UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas

FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Departamento de Ingeniería Química.

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Análisis del desempeño energético en la fábrica de papel Pulpa Cuba.

Autor: Yojara Ramírez Castro.

Tutores: Dr. C. Juan Pedro Hernández Touset.
Tec. Gustavo Echerri Ureta.

Santa Clara, julio, 2020

Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas

FQF
Facultad de
Química y Farmacia

Department of Chemical Engineering.

DIPLOMA THESIS

Title: Energy Performance Analysis at Pulpa Cuba Paper Factory.

Author: Yojara Ramírez Castro.

Thesis Director: Dr. C. Juan Pedro Hernández Touset.

Tec. Gustavo Echerri Ureta.

Santa Clara , july, 2020

Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual

Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento

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

en disfrutar lo que se obtiene.

Emerson

Dedicatoria

La realización de este trabajo va dedicada a:

- *Mis padres por su sacrificio y apoyo incondicional para la realización de este sueño.*
- *Mi abuela que, aunque no se encuentre físicamente entre nosotros este era su mayor anhelo.*

Agradecimientos

- *A mis Padres Ludmila Castro y Alfonso Ramírez por el amor, comprensión y apoyo para la superación de cada uno de los obstáculos y sacrificios.*
- *A mi tía Yolaine por sus consejos y preocupación en todo momento y a toda mi familia en general.*
- *A Yasniel por brindarme todo su amor y ser muy importante en mi vida.*
- *A mi tutor Juan Pedro Touset, por la dedicación y la ayuda incondicional que me proporcionó; al técnico Gustavo Echerri y a todo el personal de la Papelera Pulpa Cuba.*
- *Al claustro de profesores por el excelente aporte académico a lo largo de estos cinco años y a todos mis compañeros de aula.*
- *A mis amistades queridas Ilianet, José Carlos por estar en todo momento y compartir a mi lado todo tipo de emociones.*
- *A todas las personas que de una forma u otra han colaborado*

A todos,

Muchas Gracias.

Resumen

La fábrica de papel localizada en Trinidad, Sancti Spíritus, presenta deficiencias tecnológicas y operacionales que afectan la recuperación de la energía y el aguay, por tanto, los indicadores de desempeño energético del proceso. El objetivo es evaluar las oportunidades de conservación de la energía, mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía en la fábrica de papel. Basado en los requisitos que especifica la NC ISO 50001 para los sistemas de gestión de la energía, en cuanto a la revisión energética, se aplica una metodología para el balance de energía, mediante el cual se definen los principales indicadores de desempeño energético y de eficiencia energética y las pérdidas de calor. El análisis de la energía permitió definir cuatro índices de consumo que constituyen indicadores de desempeño energético (4,9 tvapor/t papel; 12 313,66 MJ/ t papel; 0,34 tFO/t papel; 4,9 m^3 de agua/t papel), los cuales se pueden tomar como referencia para implementar el sistema de gestión de la energía e identificar oportunidades de mejora, constituyendo los componentes principales para definir una línea base energética. Se evalúa un esquema termoenergético que incluye las oportunidades de mejora en la generación, distribución y uso de la energía térmica. Es factible proponer un proyecto de inversión que incluye un generador de vapor, un turbogenerador y sustitución de válvulas reductoras de presión a partir del ahorro de agua de servicio a caldera, combustible y electricidad adquirida de la red nacional, cuyo presupuesto se estima recuperar en 4 años.

Abstract

The paper mill located in Trinidad, Sancti Spíritus, has technological and operational deficiencies that affect the recovery of energy and water and, therefore, process energy performance indicators. The objective is to assess energy conservation opportunities, by applying energy management systems in the facility. Based on the requirements specified by NC ISO 50001 for energy management a system, regarding the energy review, an energy balance methodology is applied, through which the main energy performance and efficiency indicators and wasted heat are defined. The energy analysis allowed defining four consumption indices that constitute energy performance indicators (4,9 t steam / t paper, MJ / t paper, 12 313,66 MJ/ t paper, 0,34 tFO / t paper, 4,9 m^3 of water / t paper), which can be taken as a reference to implement the energy management system and identify opportunities for improvement, constituting the main components to define an energy baseline. A thermoenergetic scheme is assessed that includes opportunities for improvement in the generation, distribution and use of thermal energy. It is feasible to propose an investment project that includes a steam generator, a turbogenerator and the replacement of pressure reducing valves based on the saving of service water for the boiler, fuel and electricity purchased from the national network, whose budget is estimated to be recovered by 4 years.

Índice

Introducción 1

Capítulo I. Análisis bibliográfico. 4

1.1 Gestión de la energía y eficiencia energética. 4

1.2 Metodologías de gestión de la energía 6

1.3 Gestión y análisis de la energía en la industria de la pulpa y del papel. 9

Conclusiones parciales 13

Capítulo II. Balance termoenergético del proceso de fabricación de papel. 14

2.1 Generalidades 14

2.2 Registro y análisis de los datos de consumo de los diferentes tipos de energía y datos de producción. 15

2.3 Diagrama de flujo (esquema térmico actual), listado de equipos y estado técnico. 18

2.4 Equipos generadores de energía 19

2.5 Equipos consumidores de energía 20

2.6 Aplicación de los balances de materiales y energía. 24

2.7 Definición de los indicadores de desempeño energético del proceso. 35

Conclusiones parciales 37

Capítulo III. Evaluación de las oportunidades de conservación de la energía en el proceso de fabricación de papel. 38

3.1 Definición de oportunidades de mejora en la generación, distribución y uso de la energía térmica. 38

3.1.1 Desarrollo del balance termoenergético. 39

3.2 Análisis de factibilidad técnico – económica de las propuestas de mejoras tecnológicas 44

3.2.1 Estimación de las inversiones. 44

3.2.2 Análisis del efecto económico del sistema energético. 45

3.2.3 Estimación de la factibilidad de los proyectos de inversión. 46

Conclusiones parciales 49

Conclusiones 50

Recomendaciones 51

Bibliografía.....52
Anexos.....56

Introducción

La Empresa Papelera Pulpa Cuba, localizada en el municipio Trinidad, provincia Sancti Spíritus produce papel kraft, cartón, liner y cartulinas a partir de papel reciclado.

La misión de la empresa está encaminada a satisfacer con eficiencia y una calidad en constante aumento, las necesidades de otras industrias y de la población.

Sin embargo, es un reto para la Empresa alcanzar lo expresado anteriormente, debido a las deficiencias tecnológicas y operacionales, tales como: continuo reciclado de la materia prima, constituida por los diferentes tipos de desperdicios de papel; las continuas variaciones en las propiedades físico - mecánicas de los productos finales; la disminución de la fiabilidad del equipamiento que afectan los indicadores de eficiencia del proceso e ineficiencias en los sistemas para la recuperación del calor de corrientes de procesos y de servicios, con el consecuente aumento de los costos de producción por concepto del incremento de los índices de consumo de los recursos energéticos; además de la insuficiente rehabilitación tecnológica de una planta construida a finales de los años 50 con la tecnología de la compañía Black Clawson.

Entre los objetivos de trabajo para el 2016 se definió 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 estudios de formulaciones de materias primas y productos químicos de parte húmeda que combinado con modificaciones en el proceso tecnológico permitan obtener un papel Liner 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 los estudios realizados por el grupo de papel de la UCLV se han identificado deficiencias, que continúan agravándose en el sistema de circulación de agua, que incluye el agua residual y los condensados. En cuanto al agua residual, no opera el sistema de recuperación de fibra de la máquina de papel y no existe un ciclo cerrado terciario de aguas provenientes de la planta de preparación de pasta y máquina de papel que permita su reincorporación al proceso. En cuanto a los condensados, se estima una pérdida actual de más del 60 %. Estas deficiencias tecnológicas provocan altas pérdidas de recursos materiales y financieros y bajos indicadores de eficiencias y de despeño energético. El sistema de circulación de agua no es objeto de estudio en el presente trabajo.

En la planificación estratégica 2015 - 2019, la UEB Pulpa Cuba, Trinidad, Sancti Spíritus, 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.

Problema de investigación:

El registro por sí solo, de los consumos de energía de la fábrica no aporta información requerida para la toma de decisiones en cuanto a modificaciones en el esquema térmico, así, la ausencia del cálculo de los principales índices de consumo no permite determinar el desempeño energético actual y por tanto identificar el potencial para la mejora continua de la eficiencia térmica del proceso de fabricación de papel.

Hipótesis:

Es posible la identificación, cuantificación, control, reducción y eliminación de factores que afectan la eficiencia energética de la industria, mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía con la consiguiente reducción de los consumos de recursos energéticos y de los daños ambientales.

Objetivo General:

Evaluar los principales indicadores de desempeño energético y oportunidades de conservación de la energía, mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía.

Objetivos específicos:

1. Identificar las deficiencias tecnológicas y operacionales a través del análisis de la energía y la evaluación comparativa de los principales indicadores de desempeño energético.
2. Definir las oportunidades de conservación de la energía mediante modificaciones en el sistema termoenergético.
3. Evaluar la factibilidad técnica y económica de los proyectos de inversión propuestos, mediante los ingresos por concepto de ahorro de agua para generación, combustible y electricidad.

Capítulo I. Análisis bibliográfico.

1.1 Gestión de la energía y eficiencia energética.

La energía no constituye un sector económico, aunque su tratamiento exige estudiar su costo, de una forma u otra la producción de bienes y servicios demandan energía para su funcionamiento, pero también la población demanda energía para satisfacer sus necesidades básicas de confort, entre otras. Por eso la energía se debe visualizar como un transcendental aspecto para el desarrollo sostenible de las actividades humanas (Bravo, 2015).

El empleo de las variantes energéticas permitiría alcanzar al país objetivos como: disminuir la ineficiencia del sistema eléctrico, reducir la dependencia de combustibles fósiles, contribuir a la sustentación medioambiental, modificar la matriz energética de generación y consumo, incrementar la competitividad de la economía en su conjunto y disminuir el alto costo de la energía que se entrega a los consumidores (Matos, 2020).

La gestión energética (GE) es el uso juicioso y efectivo de la energía para maximizar ganancias, minimizar costos y mejorar la posición competitiva (Capehart, 2016). La GE es la estrategia de ajuste y optimización de la energía, utilizado sistemas y procedimientos para reducir los requerimientos de energía por unidad de producto mientras se mantiene constante o se reducen los costos totales de producción (JNU, 2013).

Un sistema de gestión de la energía (SGEn) según la NC (ISO 50001, 2011) es un conjunto de elementos interrelacionados mutuamente o que interactúan para establecer una política, objetivos energéticos, los procesos y procedimientos necesarios para alcanzar dichos objetivos.

El sector de la pulpa y el papel es intensivo energéticamente por muchas dimensiones. El sector de la pulpa y el papel contabiliza cerca del 15 % del uso industrial en los países miembros de la Agencia Internacional de Energía según IEA (International Energy Agency), (2017). En Canadá, la industria de la pulpa y el papel contabiliza el 25 % del consumo total de energía industrial. La energía contabiliza hasta el 30 % del costo de fabricación en pulpa termomecánica (Klemeš, 2013).

Según Veritas, (2018 (a)) y Veritas (2018 (b)) la energía se ha convertido en un indicador clave para empresas y organizaciones: ahorrar energía significa ahorrar costos de operación. La reducción del consumo de energía implica también reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y demuestra una mayor atención por la preservación de los recursos naturales. Estas acciones deben ser una prioridad para las empresas que buscan cumplir y contribuir a un desarrollo realmente sostenible.

La gestión energética persigue lograr un uso más eficiente de la energía sin reducir los niveles de producción, sin mermar la calidad del producto o servicio, ni afectar la seguridad o los estándares ambientales (Borroto N., 2015).

La gestión energética beneficia a la empresa, contribuyendo a garantizar la calidad de los productos, reduciendo costos de producción y elevando su competitividad; al País, aplazando los requerimientos de financiamiento para la infraestructura energética, promoviendo nuevas tecnologías y la modernización del sector empresarial, y reduciendo la importación de bienes de capital para el desarrollo energético; a la sociedad, conservando recursos para las futuras generaciones, disminuir las emisiones contaminantes al medio ambiente y contribuyendo a la formación de una cultura energética y ambiental (Borroto N., 2015).

Las empresas industriales pueden lograr ahorros de energía de hasta un 40 %, algunos sin inversión de capital, mediante la aplicación de métodos de gestión energética (Del Pilar C. R., 2013).

La importancia de instalar un Sistema de Gestión Energética (SGE) posibilita que logre identificar y recuperar el potencial de ahorros de energía eléctrica e incrementar la eficiencia del proceso, utilizando herramientas de gestión que no requieran altas inversiones de capital. Un SGE permite obtener una ruta para la administración eficiente de los recursos energéticos comprendida por todos los actores de una organización. Así, se espera que en poco tiempo y con el menor riesgo de inversión, se logren alcanzar los objetivos planteados y el mejoramiento continuo del sistema (Del Pilar C. R., 2013).

La gestión energética consiste en la optimización en el uso de la energía buscando un uso racional y eficiente, sin disminuir el nivel de prestaciones. A través de ella se detectan oportunidades de mejora en aspectos relacionados con la calidad y seguridad del sistema energético, logrando que los usuarios conozcan el sistema, identifiquen los puntos consumidores e implanten mejoras, alcanzando altos niveles de eficiencia energética (AEC, 2018).

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 (Borroto, 2013).

La eficiencia energética varía dramáticamente en las industrias y procesos de fabricación, e incluso entre plantas que fabrican los mismos productos. La eficiencia puede estar limitada por parámetros mecánicos, químicos u otros parámetros físicos y el diseño del equipamiento. En algunos casos, las prácticas de operación y mantenimiento contribuyen a bajar la eficiencia por debajo del óptimo. A pesar de la razón, la eficiencia energética menor del óptimo, implica que no toda la energía que entra se convierte en trabajo útil. En el sector manufacturero, estas pérdidas de energía ascienden a varios cuatrillones de BTU y miles de millones de dólares en ganancias cada año. El autor reporta eficiencias térmicas típicas de sistemas energéticos y equipos industriales. Algunas eficiencias térmicas seleccionadas son (Kreith, 2007): calderas de vapor con gas natural, carbón y petróleo (80 -85), secado del papel (48 %), columnas de destilación (25 - 40 %).

El consumo de vapor en las fábricas de pulpa y papel de la India varían de 6 -16 tvapor / t papel. En países desarrollados se consume de 6 – 9 t vapor / t papel (Bora, 2008). En cuanto a la distribución de la energía, el autor reporta 75 – 78 % en proceso y de 15 – 25 % en electricidad. UNIDO (1993) reporta un patrón de consumo de energía (vapor) de procesos de pulpa y papel en una fábrica de papel integrada de papel fino, con un valor de 3,3 t vapor/t papel.

1.2 Metodologías de gestión de la energía

El propósito de la Norma Internacional ISO 50001 es facilitar a las organizaciones establecer los sistemas y procesos necesarios para mejorar su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética y el uso y el consumo de la energía. La implementación de esta Norma Internacional está destinada a conducir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y de otros impactos ambientales relacionados, así como de los costos de la energía a través de una gestión sistemática de la energía. Esta Norma Internacional es aplicable a organizaciones de todo tipo y tamaño, independientemente de sus condiciones geográficas, culturales o sociales. Su implementación exitosa depende del compromiso de todos los niveles y funciones de la organización y, especialmente, de la alta dirección.

Esta Norma Internacional especifica los requisitos de un sistema de gestión de la energía (SGEn) a partir del cual la organización puede desarrollar e implementar una política energética y establecer objetivos, metas, y planes de acción que tengan en cuenta los requisitos legales y la información relacionada con el uso significativo de la energía. Un SGEn permite a la organización alcanzar los compromisos derivados de su política, tomar acciones, según sea necesario, para mejorar su desempeño energético y demostrar la conformidad del sistema con los requisitos de esta

Norma Internacional. Esta Norma Internacional se aplica a las actividades bajo el control de la organización y la utilización de esta Norma Internacional puede adecuarse a los requisitos específicos de la organización, incluyendo la complejidad del sistema, el grado de documentación y los recursos. Esta Norma Internacional se basa en el ciclo de mejora continua Planificar – Hacer – Verificar – Actuar (PHVA) e incorpora la gestión de la energía a las prácticas habituales de la organización NC (ISO 50001, 2011).

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:

a) 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;

b) Identificar las áreas de uso significativo de la energía basándose en el análisis del uso y el consumo 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 futuro de energía;

c) Identificar, priorizar y registrar oportunidades para mejorar el desempeño energético.

La revisión energética debe ser actualizada a intervalos definidos, así como en respuesta a cambios mayores en las instalaciones, equipamiento, sistemas o procesos.

La organización debe establecer una(s) línea(s) de base energética utilizando la información de la revisión energética inicial y considerando un período para la recolección de datos adecuado al uso y al consumo de energía de la organización. Los cambios en el desempeño energético deben medirse en relación a la línea de base energética.

Deben realizarse ajustes en la(s) línea(s) de base cuando se den una o más de las siguientes situaciones:

— los IDEns (indicadores de desempeño energético) ya no reflejan el uso y el consumo de energía de la organización;
— se han realizado cambios importantes en los procesos, patrones de operación, o sistemas de energía; o
— así lo establece un método predeterminado.
La(s) línea(s) de base energética debe mantenerse y registrarse.
Los IDEns deben revisarse y compararse con la línea de base energética de forma apropiada NC (ISO 50001, 2011).
Como la gestión de la energía es un medio importante mediante el cual mejorar la eficiencia energética, el uso del consumo específico de energía (CEE) para identificar mejoras potenciales en la eficiencia energética es visto como un instrumento importante de la gestión energética. Frecuentemente, tanto en la literatura como en las normas internacionales, el CEE se usa como un indicador de desempeño energético para evaluar o medir el comportamiento de la eficiencia energética (Lawrence, 2019).
La norma internacional sobre sistemas de gestión de la energía (ISO, 2017) estipula los principios generales y la guía sobre como una compañía puede establecer los indicadores de desempeño energético y líneas de base energéticas para medir su comportamiento energético.
La variable que caracteriza el uso de la energía por producto producido y se expresa como una razón de unidades termodinámicas por unidades físicas en la literatura se refiere como consumo específico de energía (Farla, 1997), (Patterson, 1996), (De Beer, 1998). El significado de CEE es retratar cuanta energía se consumió para producir una unidad de producto (Lawrence, 2019).
El CEE en las normas internacionales, tal como (ISO, 2017), se recomienda usar como un indicador de desempeño energético, ya que el CEE permite la medición del comportamiento de la energía y así el comportamiento de la evaluación comparativa (benchmarking). La evaluación comparativa del uso de la energía en la industria es el proceso de comparar y evaluar el desempeño energético, donde el CEE se puede usar para evaluar comparativamente a varios niveles: evaluación comparativa de proceso, sitio, nacional e internacional.
Independientemente de la conveniencia de usar el CEE, en la literatura se han señalado varios cambios, tales como: disponibilidad de información; un ejemplo es que es difícil dar seguimiento a las mejoras en eficiencia energética en la fabricación de pulpa y papel, porque son limitados los datos de producción, capacidad y uso de la energía públicamente disponibles (IEA (International

Energy Agency), 2017), otro ejemplo son las dificultades en encontrar datos relevantes están relacionadas con dificultades en la comparación de procesos de producción y productos finales (Farla, 1997). Otro reto es la complejidad de procesos integrados, es decir, la dificultad de encontrar un grupo de CEEs para la mejor tecnología disponible es el hecho de que las etapas del proceso en la industria de la pulpa y el papel están generalmente integradas. Por tanto, es difícil atribuir parte del consumo total de energía a uno de los productos.

La tecnología Pinch (del pellizco, pliegue) se refiere a un gran grupo creciente de métodos para el análisis de los requerimientos de energía con el fin de encontrar diseños económicamente óptimos y controlables. La tecnología Pinch ha probado ser efectiva y exitosamente aplicada a la integración de procesos que abarca la integración total de la planta e incluye redes de intercambiadores de calor, integración de calor y potencia o cogeneración, e integración térmica de columnas de destilación (Kreith, 2007). La tecnología, consecuentemente aplicada, complementa con efectividad los análisis energéticos de procesos con valiosos aportes para la identificación de oportunidades de conservación de la energía.

Kreith (2007) reporta un programa efectivo de gestión de la energía, el cual consta de tres fases: (1) Compromiso de la gerencia (2) Auditoria y análisis, (3) Implementación. Estas fases son similares en cuanto a contenido, a las reportadas por Espinosa - Pedraja (2014) y se corresponden con la NC (ISO 50001, 2011). Por ejemplo, los objetivos de la auditoría son determinar cómo, dónde, cuándo y cuánta energía se usa en la planta o equipo.

Se requiere un análisis de los datos de la auditoria para una investigación más crítica del gasto de combustible y la identificación del potencial para la conservación. Esto incluye un balance de energía detallado de cada proceso, actividad, o planta. Se deben formular modificaciones del proceso y alternativas de diseño de equipos, basado en la factibilidad técnica y económica y el impacto ambiental. Son esenciales los estudios económicos para determinar el período de pago, la rentabilidad y ahorros netos antes de preparar el presupuesto (Kreith, 2007).

1.3 Gestión y análisis de la energía en la industria de la pulpa y del papel.

El análisis de la energía se ha realizado en la mayoría de las fábricas de pulpa y papel. El consumo de calor se puede reducir mediante el control de puntos claves o mediante la aplicación de una metodología global (Klemeš, 2013).

La metodología general para incrementar la eficiencia energética en fábricas de papel es una combinación de varias técnicas que se usan para mejorar la eficiencia energética de fábricas de papel en modificación a: análisis del sistema de servicios; tecnologías del pellizco de calor y de agua y el análisis exergético. El objetivo es el desarrollo de medidas de mejoras energéticas que tienen en cuenta la interacción de los sistemas de servicios y de procesos y las restricciones económicas y técnicas. Este proceso consta de cinco etapas (Mateos - Espejel, 2011).

Etapa 1. Definición del caso base.

1. Registro de datos.
2. Construcción del diagrama maestro.
3. Análisis de los sistemas de servicios.
4. Simulación por computadora.

Etapa 2. Evaluación comparativa.

1. Compilación de datos.
2. Evaluación de los indicadores de desempeño afín a la energía.
3. Comparación con la práctica actual.
4. Determinación de objetivos con métodos del pellizco de calor y de agua.

Etapa 3. Análisis de interacción.

1. Recuperación interna del calor.
2. Reutilización de agua.
3. Mezclado no isotérmico.
4. Mejora energética.
5. Recuperación de condensado.
6. Conversión de energía.

Etapa 4. Estrategia de implementación.

1. Eliminación de combustible fósil.
2. Ahorros adicionales de vapor.
3. Evaluación económica.

Etapa 5. Evaluación comparativa final.

La cogeneración es una tecnología que encaja idóneamente en los procesos papeleros. Atendiendo a las diferentes tecnologías de cogeneración utilizadas en el sector papelero, 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).

El sector papelero europeo ha sido identificado por la Comisión Europea como sector industrial con riesgo de deslocalización, dado el alto peso de la factura energética y sobre el valor añadido del sector, así como por la elevada dimensión internacional de las operaciones y mercados papeleros con carácter globalizado. EL sector español ha apostado históricamente por la cogeneración como herramienta de eficiencia, reducción de emisiones, competitividad, siendo uno de los sectores industriales que mayor empleo intensivo hacen de la cogeneración, con un 18% de la potencia total instalada en España, cifras similares a la industria alimentaria y a la industria química (Acogen, 2013).

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 (Industrial, 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 % (Word, 2015).

Para proceder a una reducción de las emisiones, en primer lugar, hay que saber cuánto se emite (factores CO_2), cuáles son los focos mayoritarios de emisión y en qué puntos del proceso papelero 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:

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).

Conclusiones parciales

1. Existe uniformidad de criterios en cuanto a la trascendental importancia que tiene en la actualidad la gestión de la energía, fundamentado esto en las implicaciones que tiene para la sostenibilidad de una industria y de una nación, lo que implica el mantenimiento de altos niveles de la eficiencia energética.
2. Son generalmente coincidentes las actividades que se desarrollan tanto, en las normas internacionales que establecen los requisitos para los sistemas de gestión de la energía como en las metodologías institucionalizadas en el mundo, en las cuales, su calidad depende principalmente de la rigurosidad en su aplicación y en las herramientas que se utilizan.
3. Los consumos específicos de energía constituyen la variable principal en la medición del desempeño energético de un equipo, proceso o sitio, mediante la evaluación comparativa.

Capítulo II. Balance termoenergético del proceso de fabricación de papel.

2.1 Generalidades

En el capítulo se aplica la metodología del balance termoenergético (Espinosa-Pedraja, 1990), que constituye la principal actividad en la revisión energética según la norma cubana NC (ISO 50001, 2011) para los sistemas de gestión de la energía (SGE).

La auditoría energética comprende las actividades de: (1) inspección visual inicial, (2) recepción de datos, (3) balances energéticos, (4) análisis de los resultados y propuestas de mejoras al proceso y (5) plan de medidas adicionales.

En el presente capítulo se desarrollan las tres primeras etapas que se corresponde con un diagnóstico energético de segundo nivel. Este diagnóstico consiste en el desarrollo del balance másico y térmico en condiciones reales de operación de áreas, equipos y sistemas con el objetivo de determinar su eficiencia energética e índices de consumos. Los resultados se comparan con el análisis detallado de los registros históricos y con los valores de diseño. A partir de la comparación se establecen las desviaciones y se buscan sus causas (condiciones de operación de equipos, estado técnico, variación de regímenes de trabajo, etc.). Finalmente se deben evaluar desde el punto de vista económico, las medidas que se recomiendan llevar a cabo; se deben establecer los indicadores de consumo y de eficiencia de control en cada área y equipo, así como presentar recomendaciones de un programa de mejoramiento continuo de estos indicadores.

Las tareas definidas en la revisión energética son las siguientes:

1. Identificación de las fuentes de energía.
2. Recolección de los datos de consumo de los diferentes tipos de energía y datos de producción.
3. Obtención del diagrama de flujo y listado de equipos.
4. Agrupación de los equipos por áreas o secciones de la fábrica.
5. Obtención de los datos de diseño de los equipos generadores y consumidores de vapor.
6. Identificación, priorización y registro de las oportunidades de mejora en el desempeño energético mediante consulta con directivos y operarios de la fábrica.
7. Aplicación de los balances de materiales y energía.
8. Establecimiento de una línea base energética de la fábrica que represente el comportamiento energético actual de ella y actúe como referencia al momento de implementar el SGE y oportunidades de mejora, cuantificando los impactos que esto traerá al desempeño energético.

9. Establecimiento de indicadores para el monitoreo y medición del desempeño energético de la fábrica.

La tarea 8 es objetivo de investigaciones futuras a partir del presente análisis energético. En este estudio se definen los indicadores de desempeño energético que se pueden tomar como referencia en la planificación energética.

- **Identificación de las fuentes de energía.**

Las fuentes de energía de la fábrica son el combustible (Fuel Oil) y la electricidad, esta última, en pequeña proporción generada por la fábrica y mayormente adquirida del SEN.

2.2 Registro y análisis de los datos de consumo de los diferentes tipos de energía y datos de producción.

En las Tablas 2.1 y 2.3 se muestran los consumos de combustible (Fuel Oil) y electricidad en el año 2015 y 2016, respectivamente y las Tabla 2.2 y 2.4 muestran los datos de producción para estos años.

La Tabla 2.5 resume el cálculo de los consumos específicos de combustible y electricidad.

Tabla 2.1 Consumo de FO y electricidad en el año 2015

Mes	Fuente de energía FO (t) - Electricidad (MWh)	Valor	Total
Febrero	Fuel Oil	171,6	1.º trimestre
	Electricidad	382	1291,9
Marzo	Fuel Oil	426,4	598
	Electricidad	909,9	
			2.º trimestre
Junio	Fuel Oil	321	1341
	Electricidad	729,3	3219,5
Julio	Fuel Oil	165,6	
	Electricidad	471,2	
Octubre	Fuel Oil	85,5	
	Electricidad	229	
Noviembre	Fuel Oil	413,3	
	Electricidad	1001,5	
Diciembre	Fuel Oil	355,6	
	Electricidad	788,5	

Tabla 2.2Producción en el 1.º y 2.º semestre de 2015

Primer trimestre de 2015	
Producto	Valor, toneladas
Papel kraft p/env 85 g/m^2	154,4

Cartoncillo 160 g/ m^2	254,6
Liner natural 175 g/m^2	279,8
Cartulina color 127 g/m^2	173,6
Cartulina 230 g/m^2	57,3
Cartulina bobinada	230,9
Papel bobinado	154,4
Sub total	1305
Segundo trimestre 2015	
Liner 127 g/m^2	219,8
Cartoncillo 150 g/m^2	96,47
Cartoncillo 150 g/m^2	89,71
Liner natural g/m^2	106,12
Cartoncillo g/m^2	98,2
Cartoncillo bobinado	284,3
Sub total	894,6
Total	2199,6

Tabla 2.3 Consumo de Fuel Oil y electricidad en el año 2016

Mes	Fuente de energía FO (t) - Electricidad (MWh)	Valor	Total
Enero	Fuel Oil	270,3	1.ºtrimestre
	Electricidad	668,8	
Febrero	Fuel Oil	457,6	
	Electricidad	950,3	
Marzo	Fuel Oil	338,1	1066
	Electricidad	906,9	2526
			2.ºtrimestre
Junio	Fuel Oil	169,1	1017,71
	Electricidad	446,2	2591,31
Julio	Fuel Oil	352,2	
	Electricidad	834,5	
Octubre	Fuel Oil	325,3	
	Electricidad	780	
Noviembre	Fuel Oil	171,14	
	Electricidad	530,61	

Tabla 2.4 Producción en el 1.º y 2.º semestre de 2016

Primer trimestre de 2016	
Producto	Valor, toneladas
Liner natural 175 g/m^2	483,8
Cartulina color 127 g/m^2	198,5
Cartulina 230 g/m^2	103,7
Cartulina bobinada	302,1
Papel bobinado	621,2

Papel kraft p/env 85 g/m^2	621,2
Cartoncillo 160 g/ m^2	760,8
Sub total	3091,3
Segundo trimestre 2016	
Liner 127 g/m^2	75,8
Cartoncillo 150 g/m^2	84,15
Cartoncillo 150 g/m^2	78,26
Cartoncillo 127 g/m^2	85,6
Cartoncillo bobinado	248
Sub total	571,81
Total	3663,11

Tabla 2.5 Consumos específicos de FO y electricidad

Año	Trimestre	Fuel Oil (t)	Electricidad (MWh)	Producción (t)	tFO/tpapel	MWh/tpapel
2015	Primero	598	1291,9	1305	0,45	0,98
	Segundo	321	729,3	2199,6	**0,14**	**0,33**
2016	Primero	1066	2526	3091,3	0,34	0,81
	Segundo	169,1	446,2	571,81	0,29	0,78

Como se observa en la tabla 2.5, los mejores valores de los indicadores de desempeño energético se pueden tomar como referencia para la planificación energética. Sólo en el segundo semestre de 2015 se alcanzan bajos consumos específicos de combustible y electricidad, lo que indica que la fábrica operó con mayor estabilidad.

Las Tablas 2.6 y 2.7 muestran los datos de consumo de Fuel Oil y electricidad y producción en tres meses de operación del año 2019. La Tabla 2.8 muestra los consumos específicos en estos tres meses.

Tabla2.6 Consumo de Fuel Oil y electricidad en el año 2019

Mes	FO (t) - Electricidad (MWh)	Consumo
Marzo	Fuel Oil	205,013
	Electricidad	526,140
Abril	Fuel Oil	214,377
	Electricidad	437,753
Mayo	Fuel Oil	224,557
	Electricidad	291,037

Tabla2.7 Producción de marzo, abril y mayo de 2019

Producto	Producción, t
Papel kraft p/env. 85 g/m^2	1242,2
Liner natural 200 g/m^2	418,35
Total	1660,55

Tabla2.8 Consumos específicos de FO y electricidad

Meses	Fuel Oil (t)	Electricidad (MWh)	Producción (t)	tFO/tpapel	MWh/tpapel
Marzo	205,013	526,14	672,18	**0,304**	0,782
Abril	214,377	437,753	567,77	0,377	0,771
Mayo	224,558	291,037	420,7	0,533	**0,691**

Generalmente el aumento de los consumos de combustible, también implican aumentos de consumos de electricidad. Los mejores valores de consumos específicos son aquellos donde existe una alta producción.

En cuanto a los consumos de agua, se estima un consumo anual de 2 520 000 m^3, considerando los dos años base, en los cuales la planta operó 7 meses en cada uno y un flujo de agua hacia la fábrica de 500 m^3/h.

2.3 Diagrama de flujo (esquema térmico actual), listado de equipos y estado técnico.

La Figura 2.1 muestra el esquema termoenergético actual de la fábrica de papel. 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 en 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 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 2,75 MPa, a

esta temperatura y presión, la mayoría del flujo de 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 desaireador a una presión de 0,12 MPa.

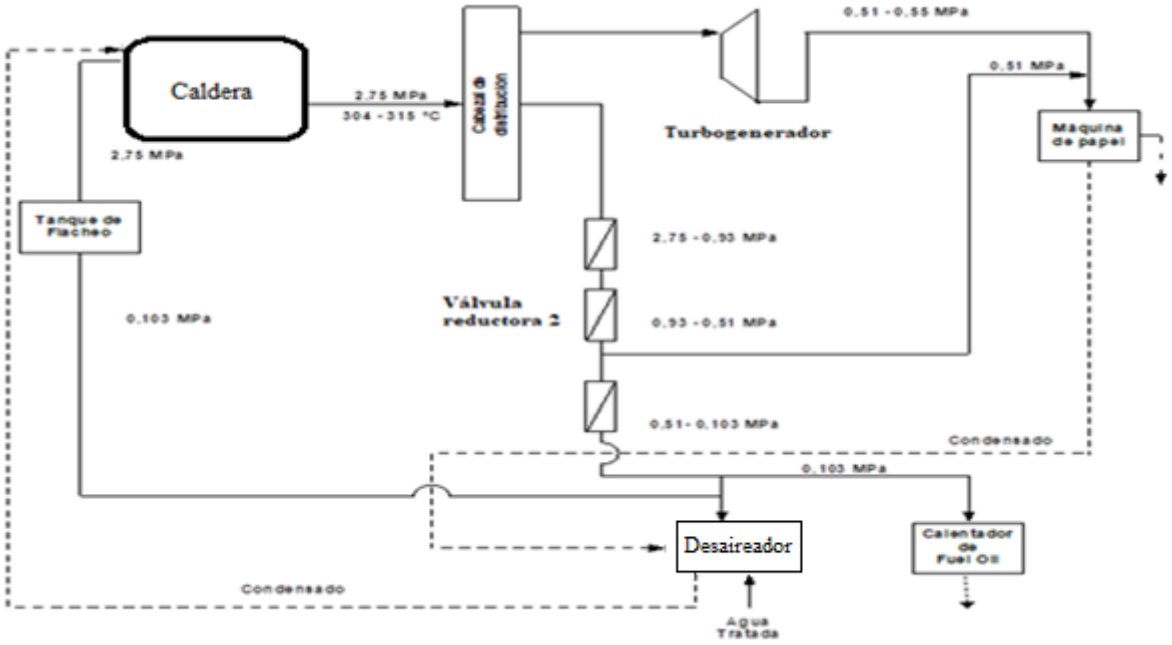


Figura 2.1 Esquema termoenergético de la Papelera Pulpa Cuba.

2.4 Equipos generadores de energía.

Actualmente la fábrica tiene un generador de vapor, de tres presentes en el diseño original denominada caldera 1.

La caldera 1 está formada por los domos superior e inferior, tubos y horno, con calentadores, economizadores, separadores, quemadores y ventiladores.

Los domos superiores e inferiores están interconectados por medio de tubos, que a su vez conforman el horno, donde tiene lugar la combustión. Por el interior de los tubos se crea una

diferencia de densidad al absorber el agua el calor producido por la combustión, el agua caliente al ser más ligera es desplazada hacia el domo superior por el agua fría contenida en los tubos que reciben menos calor. Las burbujas de vapor que se forman rompen la tensión superficial del agua, acumulándose en el domo superior donde adquieren presión, ya con la presión adecuada el vapor circula hacia el sobrecalentador, que está formado por dos cabezales interconectados por tubos, por el cabezal inferior entra el vapor saturado, circulando por los tubos.

Los gases producto de la combustión son aprovechados recalentando el vapor, al salir por el cabezal superior, obteniéndose vapor sobrecalentado. Las calderas se construyen de manera que los gases de combustión sean aprovechados al máximo, creándose en su inferior pasajes que guían a los gases a los distintos componentes (sobrecalentador, economizador, etc.).

La caldera se arranca muy rudimentariamente. Se le introduce leña y material de desecho del papel en el horno y se enciende el mismo hasta que la caldera haga vapor. Cuando exista vapor, se calienta el Fuel Oil y se atomiza al quemador con aire, cuando exista presión se pasa a atomizar con vapor. Toda la operación es manual, por lo que el control de la combustión depende totalmente de la actividad del operador.

2.5 Equipos consumidores de energía

Los equipos consumidores de vapor son: el deareador, calentador de Fuel Oil, máquina de papel y el turbogenerador HP 1200.

El turbogenerador de 1200 HP acciona un generador de corriente continua que alimenta a los motores del mecanismo de transmisión de la máquina de papel.

El Fuel Oil antes de ser alimentado al quemador de la caldera se le eliminan las impurezas sólidas que pueda tener y se le eleva la temperatura para disminuir su viscosidad, pues de esta forma mejora la combustión y arde con más facilidad.

El calentamiento del combustible se lleva a cabo en el calentador, aquí circula el petróleo por una tubería en forma de doble U que lleva en su interior otra tubería de diámetro más fino conduciendo vapor en sentido contrario al flujo de petróleo, estas tuberías están instaladas en una caja metálica aislada con amianto y forman el conjunto de cuatro calentadores individuales, que pueden trabajar uno solo, dos o los cuatro al mismo tiempo, la presión de vapor para trabajar normal es 0,021 a 0,034 MPa .

El desaireador 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. Está construido con planchas de acero, recubiertas con amianto. La función principal es eliminar el oxígeno disuelto en el agua, para facilitar esa operación es inyectada una solución de sulfito de sodio al agua de reposición antes de llegar al desaireador. El agua entra por la parte superior del tanque y es atomizada contra un paquete de chapas metálicas en forma de bandejas, que lo hace caer en forma de gotas al chocar contra ellas, retardando su caída. 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 tratada es regulada por una válvula automática a la entrada del desaireador y es operada por un flotante que abre y cierra la válvula según baje o suba el nivel del mismo.

Los secadores son cilíndricos, con un alto acabado superficial, sus cabezales descansan sobre cojinetes antifriccionales, en su parte motriz tiene dispuesto el mecanismo propulsor de alimentación de vapor y evacuación del condensado, en su parte interior tiene un sifón situado a seis u ocho milímetros de las paredes para mantener una película de condensado en la parte interior. Están construidos de hierro fundido con el objetivo de no corroerse por efectos del vapor y del condensado.

Se divide en seis secciones tecnológicas con un total de 41 tamboras.

Esta sección cumple la función de eliminar el resto del agua que le queda a la hoja formada, elevándole la sequedad hasta un 94 %.

Las temperaturas estimadas en el calentador de combustible y los secadores de papel fueron medidas con un pirómetro digital en condiciones reales de operación.

Tabla 2.9 Regímenes de trabajo de diseño de equipos generadores y consumidores de vapor.

Equipo	Parámetros de diseño	
Caldera	Combustible	Fuel Oil
	Presión máxima de vapor	2,75 MPa
	Temperatura del vapor sobrecalentado	300 °C
	Consumo de agua	23 m^3/h
	Temperatura del agua de alimentación	93 °C
	Capacidad de generación	23863,6 kg/h
	Modulación del quemador	0-1118,1 kg/h
	Índice de generación	13,5 tv/tFO
	Temperatura gases de salida	260 °C
Turbo HP 1200	Potencia	1200 HP
	Velocidad	4970/900 rpm
	Presión de vapor	2,5 MPa

Equipo	Parámetros de diseño	
	Temperatura	398,8 °C
	Presión de extracción	0,51 MPa
Calentador	Presión	0,021-0,034 MPa
	Temperatura de entrada del combustible	26,6 -32 °C
	Temperatura a la salida del combustible	71 - 79 °C
	Presión de entrada del petróleo	0,931MPa
	Tubería	U
Secadores	Cilindros secadores de papel	41
	Diámetro	1,5 m
	Longitud	4,16 m
	Área total de las tamboras	817 m^2
	Área de contacto teórico	544 m^2

Tabla 2.10 Regímenes de trabajo actual de los equipos generadores y consumidores de vapor.

Equipo	Parámetros	
Caldera	Temperatura del agua de alimentación	90 ºC
	Presión de salida del vapor de la caldera	2,75 MPa
	Temperatura del vapor a la salida de la caldera	280 ºC
	Temperatura de salida de los gases	350 ºC
	Presión de salida del vapor 2,75 MPa	
Calentador	Presión	0,021-0,034 MPa
	Temperatura de entrada del combustible	46 ºC
	Temperatura a la salida del combustible	86 ºC
	Presión de entrada del petróleo 0,931MPa	

- **Estado técnico de las instalaciones del sistema termoenergético.**

El estado técnico de las instalaciones es similar al que presentaba el sistema termoenergético en un diagnóstico realizado por una empresa especializada (BioEnergía, 2013).

El diagnóstico mostró deficiencias tecnológicas en el circuito de agua y de Fuel Oil a la caldera, economizador, quemadores, conducto de gases a la chimenea, instrumentación, automatización y aislamiento térmico.

Instrumentación y control del sistema de generación de vapor:

En la caldera solo existe regulación de Fuel Oil a los quemadores en dependencia de la presión de vapor. El aire se introduce de forma manual, así como el vapor de atomización. No existe sistema de control de nivel de agua en el domo, ni protección por niveles peligrosos.

Circuito de agua de alimentación a la caldera:

La instalación cuenta con 3 bombas de alimentar calderas, acopladas a un colector general. El aislamiento de las tuberías de agua desde las bombas a la caldera presenta secciones sin insulación, lo que ocasiona pérdidas de temperatura en el agua (material de aislamiento amianto).

Circuito de alimentación de Fuel Oil a la caldera:

Este circuito está compuesto por un calentador de vapor, dos bombas de Fuel Oil y válvulas de regulación de presión. Existen salideros de Fuel Oil por válvulas de la línea y en el tren de válvulas de regulación de presión a los quemadores. No tienen instalado calentador eléctrico de Fuel Oil, por lo que durante el calentamiento y arranque de la caldera es necesario introducir leña y residuos de cartón en el horno, hasta lograr vapor para el calentamiento del combustible, por lo que la ceniza producida es imposible de extraer y afecta la transferencia de calor durante la operación de la caldera.

Quemadores:

Los quemadores existentes son los que trae la caldera desde su fabricación, por lo que ya están obsoletos y en mal estado, principalmente las boquillas. Solo se controla el flujo de combustible en dependencia de la presión de vapor. No existe regulación de aire a la combustión, ni la atomización de vapor.

Tuberías de vapor:

El principal material de fabricación del sistema de tuberías es el hierro. Existen en la fábrica un gran número de tuberías que no están cumpliendo ninguna función, además de problemas existentes en varios tramos de tuberías por la falta de aislamiento térmico, así como varios puntos de fugas de vapor.

Conducto de gases y chimenea:

Los conductos de gases en su totalidad están en mal estado técnico, con un alto grado de corrosión. No se encuentran aislados térmicamente, provocando altas temperaturas en la sala de calderas incidiendo en las condiciones de operación de la misma. Falta de instrumentos de medición para medir las composiciones de salida de los gases de la caldera.

Secadores de papel:

El sistema de alimentación de vapor y extracción de agua condensada en las tamboras secadoras de papel, se realiza mediante sellos de espejos de carbón y superficie metálica pulida. Entre la tambora giratoria y el cabezal fijo, se pueden ocasionar salideros por fallos del sistema.

- **Identificación, priorización y registro de las oportunidades de mejora en el desempeño energético.**

Los directivos y especialistas de la fábrica han sugerido las siguientes modificaciones al esquema térmico:

a) Eliminar los turbogeneradores originales de 2,5 MW cada uno, que serían (5 MW).

b) Adquirir calderas a 12 bar de vapor saturado y no generar, ni cogenerar.

c) Cogeneración con calderas de 60 bar con cascada de dos turbinas en serie y con un sistema de un Motor de Fuel Oil acoplado a un generador y una caldera que trabaja con los gases de este motor y alimenta una turbina de vapor.

d) Generar con turbina de contrapresión hasta la satisfacción del consumo de vapor de la fábrica.

e) Mantener el turbogenerador de la máquina con un turbogenerador adicional.

f) Adquirir una válvula reductora de 2,5 - 0,51 MPa para eliminar la doble cascada que existe entre las presentes 2,5 - 0,9 MPa y de 0,9 - 0,51 MPa.

g) Adquirir una caldera con características similares que la caldera actual, así se puede bajar la carga de la misma y extender su vida útil.

h) Instalar dos atemperadores, uno seguido de la válvula reductora de 0,51 MPa y otro en el escape de la turbina para una mayor saturación del vapor y rendimiento en la sección de secado.

2.6 Aplicación de los balances de materiales y energía.

- Balance de calor en la sección de secado

El balance se realiza para una producción de liner con peso básico (g) de 200 g/m^2, ancho total del papel en el bobinado (b) de 3,7 m, velocidad del papel (V) de 90 m/min y una sequedad final (Sf) de 94 %.

La producción de papel absolutamente seco se determina mediante:

$$G = 60 \cdot b \cdot V \cdot g \cdot Sf = 60 \cdot 3{,}7 \cdot 90 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}94 = 3756{,}24 \text{ kg/h}$$

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 los 41 cilindros secadores. Al final de la sequería la hoja sale con un 6% de humedad.

La metodología, datos y expresiones para la determinación de las pérdidas de calor en los secadores de papel se pueden consultar en el Anexo 1 y 2.

La eficiencia térmica del secado de papel (η_{mp}) se determina mediante:

$$\eta \text{mp} = \frac{\text{Qump}}{\text{Qtmp}} \qquad (2.1)$$

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

$$\text{Qump} = Q1.1 + Q1.2 + Q1.3 \quad (2.2)$$

Cálculo de las pérdidas térmicas en la máquina de papel

$$Qpmp = \sum_{1}^{10} Qp \qquad (2.3)$$

$$Qtmp = Qump + Qpmp \qquad (2.4)$$

Donde:

$Q1.1$: Cantidad de calor para el calentamiento de la fibra absolutamente seca que está en el papel secado al aire (kJ/h).

$Q1.2$: Cantidad de calor para el calentamiento del agua que se queda en el papel seco al aire (kJ/h).

$Q1.3$: Cantidad de calor necesario para la evaporación (kJ/h).

$$Q1.1 = G * Cp * (Tf - Ti) \qquad (2.5)$$

G: Masa del papel absolutamente seco 3135,5 (kg/h).

Cp: Capacidad calorífica del papel absolutamente seco, este valor se estima:

Cp = 1,22 - 1,30 (kJ/kg ºC)

$Ti; Tf$: Temperatura inicial y final del papel (ºC).

Sustituyendo en 2.5

$$Q1.1 = 3756{,}24 * 1{,}30 * (62{,}4 - 53{,}1)$$

$$Q1.1 = 45412{,}9416 \text{ kJ/h}$$

$$Q1.2 = Wi * Cp_a * (Tf - Ti) \qquad (2.6)$$

Wi: Masa de agua en el fieltro mojado que se suministra para el secado del papel (kg/h).

Cp_{AGUA} :Capacidad calorífica del agua (kJ/kg °C).

Cp_{AGUA} = 4,19 kJ/kg ºC Figura XI (Pávlov, 1981)

$$Wi = \frac{G * (100 - Si)}{Si}$$

Si: Sequedad inicial (32%)

Wi = 7982,01 kg/h

Sustituyendo en 2.6

$Q1.2 = 7982{,}01 \cdot 4{,}19 \cdot (62{,}4\text{-}53{,}1)$

$Q1.2 = 311034{,}9837$ kJ/h

$Q1.3 = W * (i - Cp \cdot Tms)$ (2.7)

W : Cantidad de agua que se vaporiza en el papel (kg/h)

i : Contenido de calor que se vaporiza en el papel

i =2644 kJ/kg

Tms : Temperatura media del secado: 73,6 °C

$$W = \frac{G \cdot (100 - Si)}{Si} - \frac{G \cdot (100 - Sf)}{Sf}$$

Sf : Sequedad final (Sf =94%)

W = 7742,25 kg/h

Sustituyendo en 2.7

$Q1.3 = 7742{,}25 * (2644 - 4{,}189 \cdot 73{,}6)$

$Q1.3 = 18082922{,}98$ kJ/h

Sustituyendo en 2.2

Qump = 18439370,9 kJ/h = 5122 kW

Sustituyendo en 2.3

Qpmp = 4673647,817 kJ/h = 1298,23 kW

Sustituyendo en 2.4

Qtmp = 23113018,72 kJ/h = 6420,28 kW

Sustituyendo en 2.1

ηmp = 79,8 %

- Cálculo del consumo de vapor.

$$G_{MP} = \frac{Qtmp}{i - c \cdot t} \qquad (2.8)$$

i : Contenido de calor de vapor vivo = 2749,3 kJ/kg

c: Capacidad calorífica del agua = 4,19 kJ/kg °C

T: Temperatura del vapor vivo = 152,7 °C

$$G_{MP} = \frac{23113018,7}{2749,3\text{-}4,19 \cdot 152,7}$$

G_{MP} = 10 958,2 kg/h = 3 kg/s

- Consumo específico de calor = $\frac{Qtmp}{G} = \frac{23113018,7}{3756,24}$ = 6 153,2 kJ/kg
- Consumo específico de vapor = $\frac{Ga}{G} = \frac{10958,2}{3756,24}$ = 2,91 kgv/kg papel

El consumo específico de vapor tiene un valor superior, aunque cercano a los valores calculados con el estudio de (Hernández, 1985) y reportados por (Majonin, 1976) con magnitudes de 2,4 kgv/kg de papel y 2,26 kgv/kg de papel.

La eficiencia térmica de la sección de secado, con un valor de 79,77 % es similar a la reportada por (Majonin, 1976) en un caso de estudio, con un valor de 78,23 %.

Tabla 2.11 Resultados del balance calor en la sección de secado

Parámetros	**Resultados**	**Ecuación**
Cantidad de calor para el calentamiento de la fibra absolutamente seca que está en el papel secado al aire (Q1.1)	45412,941	$Q1.1 = G * Cp * (Tf - Ti)$
Cantidad de calor para el calentamiento del agua que se queda en el papel seco al aire (Q1.2)	311034,983	$Q1.2 = W1 * Cp_a * (Tf - Ti)$
Cantidad de calor necesario para la evaporación (Q1.3)	18082922,98	$Q1.3 = W * (i - Cp * Tms)$
Gasto útil de calor para el secado del papel (Qump)	18439370,9	$Qump = Q1.1 + Q1.2 + Q1.3$
Q1: Pérdidas de calor por las partes libres de la hoja de papel (kJ/h).	1562232,62	$Q1 = Fp * \alpha 1 * [(Tms - Tbi) + ... + (Tms - Tb6)]$
Q2: Pérdidas de calor por las partes libres de los fieltros secadores (kJ/h).	1963567,118	$Q2 = Fc * \alpha 2 * \sum (Tm - Tb1)$
Q3: Pérdidas de calor por los fondos de los cilindros secadores de papel (kJ/h).	85553,096	$Q3 = 2 * F * K1 * [(Tv1 - Tb1) * n1 + ... + (Tv6 - Tb6) * n6]$

		$K1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha f} + \frac{\alpha t}{\lambda 1} + \frac{1}{\alpha 3}}$
Q4: Pérdidas de calor por los fondos de los cilindros secadores de fieltro (kJ/h).	0	$Q4 = 2 * K1 * F * (Tvf - Tb1) * nf$
Q5: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de papel (kJ/h).	549250,877	$Q5 = K2 * \pi * dp * [(1 - Bp) * b + (1 - Bf) * (B - b)]$ * $[(Tv1 - Tb1) * n1 + ... + (Tv6 - Tb6) * n6]$ $K2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha f} + \frac{\alpha c}{\lambda 1} + \frac{1}{\alpha 3}}$
Q6: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de fieltro (kJ/h).	0	$Q6 = K2 * \pi * df *$ $[(1 - Bf) * B + (B - Bfieltro) + nf\,(tuf - tb1)]$
Q7: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros cubiertos de papel y fieltro (kJ/h).	183990,013	$Q7 = K3 * \pi * b * dp * Bf *$ $[(Tv1 - Tb1) * n1 + ... + (Tv6 - Tb6) * n6]$ $K3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha 1} + \frac{\partial c}{\lambda 1} + \frac{\partial 1}{\lambda 2} + \frac{\partial 2}{\lambda 3} + \frac{1}{\alpha 2}}$
Q8: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores cubiertos de papel; pero no cubiertos de fieltro (kJ/h).	14705316	$Q8 = K4 * D * \pi * B1 * (Bp - Bf) *$ $[(Tv1 - Tb1) * n1 + ... + (Tv6 - Tb6) * n6]$ $K4 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha 1} + \frac{\partial c}{\lambda 1} + \frac{\partial 1}{\lambda 2} + \frac{1}{\alpha 2}}$
Q9: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros cubiertos de fieltro; pero no cubiertos de papel (kJ/h).	182000,93	$Q9 = K3 * \pi * dp * (B - b) * Bf *$ $[(Tv1 - Tb1) * n1 + ... + (Tv6 - Tb6) * n6]$
Q10: Pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de fieltro cubiertos de fieltro (kJ/h).	0	$Q10 = K3 * \pi * dp * Bf * Bfieltro *$ $[(Tv1 - Tb1) * n1 + ... + (Tv6 - Tb6) * n6]$

Pérdidas térmicas (kJ/h)	4673647,817	$Qpmp = \Sigma pmpi$
Calor total para el secado ($Qtmp$)	23113018,72	$Qtmp = \sum Qump + Qpmp$
Consumo de vapor en el secado (kg/h)	10 958,2	$\mathrm{Ga}_{\mathrm{MP}} = \frac{\mathrm{Qt}}{\mathrm{i - c \cdot t}}$
Eficiencia térmica de la sección de secado (%)	79,77	$\eta\mathrm{mp} = \frac{\mathrm{Qump}}{\mathrm{Qtmp}}$

Para un control del proceso es necesario conocer los consumos de cada equipo en particular, así como del sistema completo, esto garantiza un trabajo con su máxima eficiencia.

- **Balance de calor en el calentador de Fuel Oil.**

Datos:

Flujo de combustible (mc) = 770 kg/h

Capacidad calorífica del Fuel Oil (Cpc)= 2,09 kJ/kg °C

Temperatura de entrada del combustible (Te)= 25 °C

Temperatura de salida del combustible (Ts)= 86 °C

Presión de vapor = 0,103 MPa

Calor latente de vaporización (λv) = 2256,8 kJ/kg.

$$m_c Cp_c \Delta T = Gcal \lambda_v$$

$$770\frac{kg}{h} * 2{,}09\frac{kJ}{kg°C} * (86-25)°C = Gcal * 2256{,}8\frac{kJ}{kg}$$

Gcalentador = 43,5 kg/h = 0,012 kg/s

- **Balance de calor en el Turbogenerador HP 1200.**

El consumo de vapor del turbogenerador ($G_{TG)}$ se obtuvo mediante el software Turbine Steam - Consumption Calculator (Jayes, 2002). En el Anexo 3 se muestra el reporte del software.

Las propiedades termodinámicas del agua y el vapor se calcularon mediante un recurso informático ChemicaLogic Steam Tab, (1999-2003).

Las condiciones del vapor son: Pv = 2,75 MPa, Tv sobrecalentado = 304 ^{o}C, Hvsobrecalentado= 3011,8, Tsat = 228,8 ^{o}C, Psal = 0,51 MPa, eficiencia termodinámica = 90 %, potencia de la turbina = 0,8826 MW

G_{TG}=10 076 kg/h = 2,8 kg/s

Consumo específico = 11,42 kgv/kWh

- **Balance de calor en el Desaireador.**

Donde:

Gcond: Flujo de condensado

Gacald: Flujo del agua de alimentación

Gat: Flujo de agua tratada.

Gvdear: Flujo de vapor.

Datos de la corriente de condensado.

Tcond = 42 °C Pcond= 0,103 MPa Hcondmp= 175, 89 kJ/kg

Se adopta que el 50 % del condensado se recupera, por lo que se repone magnitud similar al desaireador, basado en información de especialistas de la fábrica.

$Gcondmp = 0{,}5 \cdot (Gmp) = 0{,}5 \cdot (10\ 952)$ = 5 476 kg/h = 1,52 kg/s

Datos del agua de alimentación a la caldera (Tacald) en el desaireador

Tacald= 90 °C P= 0,103 MPa Hacald=377 kJ/kg $\rho = 965{,}3$ kg/m^3

Flujo volumétrico de la bomba de alimentación de agua a la caldera: 30 $\frac{m^3}{h}$

Flujo de agua a la caldera (Qv): 23 m^3/h (diseño)

$Gacald = \rho \cdot Qv$

$Gacald = 965{,}3 \cdot 23$

Gacald= 22 202 $\frac{kg}{h}$

Corriente de vapor.

P= 0,103 MPa λv=2256,8 kJ/kg

Corriente de agua de reposición.

Tat= 29 ^{o}C P=0,103 MPa Hat= 121,55 kJ/kg

$Gcondmp + Gat + Gvdesaireador = Gacald$

Se definen 5476 kg/h de agua tratada de reposición, según comentario anterior.

$$GacaldHacald = Gcondmp \cdot Hcondmp + Gat \cdot Hat + Gvdesaireador \cdot \lambda v$$

$$Gdesaireador = \frac{Gacald \cdot Hacald - Gat \cdot Hat - Gcondmp \cdot Hcondmp}{\lambda v}$$

$$Gdesaireador = 2987{,}14 \frac{kg}{h} = 0{,}82 \text{ kg/s}$$

- **Balance de vapor**

El consumo de vapor (Gcald) demandado por el proceso se determina mediante:

$$Gcald = (Gvr_2 + G_{TG}) \cdot 1{,}1$$

$$Gcald = (3912{,}84 + 10076) \cdot 1{,}1$$

$$Gcald = 15387{,}72 \frac{kg}{h} = 4{,}27 \text{ kg/s}$$

- Flujo de vapor por válvula reductora (Gvr2).

$$Gvr2 = Gmp + Gdesaireador + Gcalen - G_{TG} = 10\,958{,}2 + 2987{,}14 + 43{,}5 - 10\,076$$

$$Gvr2 = 3912{,}84 \text{ kg/h}$$

El turbogenerador entrega 10 076 kg/h, pero la máquina de papel consume 10 958 kg/h, por tanto, hacia la máquina de papel se desvía un flujo ($Gmpvr_2$) de 882, 2 kg/h que se determina mediante:

$$Gmpvr2 = Gvr2 - Gdesaireador - Gcal = 882{,}2 \text{ kg/h}$$

$$G_{TG} + Gvr2 = Gnecesidades\ tecnológicas$$

$$Gnec.tec. = Gvr_2 + G_{TG} = 13\,988{,}84 \text{ kg/h}$$

$$\%Gvr = \frac{Gvr}{Gcald} \cdot 100 = \frac{3912{,}84}{15387{,}72} \cdot 100 = 25{,}42$$

Según (Espinosa-Pedraja, 1990) el porcentaje de flujo de vapor que debe pasar por la válvula reductora en centrales azucareros es de 12-15 %.

Tabla 2.12 Distribución del vapor en el proceso

Equipos	Consumo (t/h)
1.Turbogenerador	10, 076
2. Máquina de papel	10, 958
3. Desaireador	2, 987
4. Calentador de combustible	0,043
5. Válvula reductora 2 (2+3+4 -1)	3, 912
Necesidades tecnológicas (2+5)	13,989
Demanda total (1+5)·1,1	15, 387

- **Balance de agua.**

Teóricamente el flujo de vapor total es igual al flujo de condensado (Gcald=Gacald), sin embargo, hay vertimientos de condensado, los cuales no regresan a la caldera, siendo recuperado solo el 50 % del flujo de condensado de la sección de secado y el condensado del desaireador. Por tanto:

$$\text{Gacald} = \text{Gcondensados recuperados} + \text{Gareposición}$$

$$\text{Gareposición} = \text{Gacald} - \text{Gcondensadosrecuperados}$$

$$\text{Gareposc} = 15387{,}72 - (5476 + 2987{,}14)$$

$$\text{Gareposc} = 6\ 924{,}58 \text{ kg/h}$$

$$\%\text{Aguareposición} = \frac{\text{Gareposc}}{\text{Gcald}} * 100$$

$$\%\text{Aguareposición} = \frac{6924{,}58}{15387{,}72} * 100 = 45$$

Según la literatura el porcentaje de agua de reposición para la industria azucarera debe estar entre 10 - 15 %. Según diseño original de la fábrica de papel se debe reponer el 30 % y actualmente se repone el 45 %.

- **Balance de calor.**

El calor requerido por el proceso (Qcald) o potencia térmica requerida se determina mediante:

$$\text{Qcald} = Q_{TG} + \text{Qmp} + \text{Qdesaireador} + \text{Qcondrecup} + \text{Qpérdidas}$$

$$\text{Qcald} = \text{Gcald} * \text{ho}$$

ho=3011,93 kJ/kg Con T= 304 ^{o}C y Pv= 2,75 MPa

$$\text{Qcald} = 4{,}27 \cdot 3011{,}93$$

$Qcald = 12860{,}94\,kW = 12{,}8MW$

En la suma de los calores demandados en los equipos(Qn) que consumen vapor, no se considera el calor en calentador de combustible ni el flujo de calor del 50 % del condensado, los cuales constituyen calores no recuperados en las corrientes de condensado, por tanto, son pérdidas de calor.

$$Qpérdidas = Qcald - \sum Qn$$

$$Qpérdidas = Qcal - \sum Q_{TG} + Q_{MP} + Qdear + Qcondrecup$$

$$Qcondrecup = Qcondmap + Qconddear = Gcondmap \cdot ha + Gconddear \cdot ha =$$

$$1{,}52 \cdot 175{,}89 + 0{,}82 \cdot 377{,}039 = 576{,}52$$

$$Qpérdidas = 3208{,}1\ kW$$

$$\%\ Qperdido = \frac{3208{,}1}{12860{,}94} \cdot 100 = 24{,}94 \approx 25$$

Tabla 2.13 Distribución del calor en el proceso

Flujos de calor	Datos	Fórmula	Calor (kW)	Distribución del calor (%)
Condesados - Qcondrecup	Gacondmap=1,52 kg/s Gaconddear=0,82kg/s hamap=175,89 kJ/kg ha dear=377kJ/kg	Qcondrecup = Gacondmap·ha + Gaconddear·ha	576,52	4,48
Potencia - Qturbogenerador	Gturb=2,8 kg/s h1 =3011, 8 kJ/kg h2 = 2696,5 kJ/kg	Qturb=Gturb* (h1-h2)	882,84	6,8
Proceso - Qmp - Qdesaireador	Gmp= 3 kg/s λ=2114,3 kJ/kg Gdear= 0,82 kg/s λ= 2256,8 kJ/kg	Qproceso= Qmp + Qdear Qmp=Gmp·λ Qdesaireador=G desaireador·λ	8270,86 6420,28 1850,58	63,7
Pérdidas(Qperd)			3208,1	25
Qcald			12938,3	100

Como se observa en la Tabla 2.13 el calor demandado en la sección de secado tiene una magnitud similar al calculado con mayor precisión mediante la metodología de (Majonin, 1976) con un valor de 6420,28 kW, lo que muestra la confiabilidad de los datos y procedimientos analíticos.

El porcentaje de pérdidas generales según (Espinosa-Pedraja, 1990) debe ser igual o menor de 5 %. En este caso es 24,94 %, aunque no significa que debe ser similar, ya que son industrias diferentes; incluso entre fábricas de papel puede alcanzar valores distantes.

Las pérdidas de calor están distribuidas en el 50 % de flujo de condesado de la sección de secado que no se recupera, el flujo de condensado del calentador de combustible, tuberías sin aislamiento, fugas y purgas de vapor, con un porcentaje de 91,5 en las tres últimas.

$$Qpérdidas = Qcond + Qtuberías + Qfugas + Qpurgas$$

$$Qcond = Qcondmp + Qcalentador = Gcondmp \cdot ha + Gcondcal \cdot ha = 1{,}52 \cdot 175{,}89 + 0{,}012 \cdot 420{,}998 = 272{,}4 \text{ kW}$$

Por tanto, las pérdidas de calor en tuberías, fugas y purgas de vapor se determinan mediante:

$$Qtub.\,fugas.\,purgas = Qperd - Qcond = 3208{,}1 - 272{,}4 = 2935{,}7 \text{ kW}$$

Tabla 2.14 Distribución de las pérdidas de calor en el proceso.

Fuente de pérdidas de calor	**Calor (kW)**	**Distribución de las pérdidas, %**
Condensado	272,4	8,4
Tuberías sin aislar, fugas, purgas	2935,7	91,5
Total	3208,1	100

- **Eficiencia de la generación y eficiencia térmica general.**

$$\eta_{generación} = \frac{Gcald}{G_{nominal}} \cdot 100$$

$$\eta_{generacion} = \frac{15304{,}15}{23000} \cdot 100$$

$$\eta_{generacion} = 66{,}53\ \%$$

$$\eta \text{ térmica general} = \frac{Qcald - Qpérdidas}{Qcald} = \frac{(12938{,}3 - 3208{,}1)}{12938{,}3} = 75\ \%$$

- **Definición del consumo de combustible del proceso y gastos de combustible asociado a las pérdidas de calor.**

$$\text{ConsumoFO} = \frac{\text{Qcald}}{\text{VCN}} \cdot 100 = \frac{12938{,}3}{43157} = 0{,}30 \text{ kg/s} = 1072 \text{ kg/h}$$

$$\text{Gasto de Fuel Oil} = \frac{\text{Qpérdidas}}{\text{VCN}} = \frac{3208{,}1}{43157} = 0{,}074 \text{ kg/s} = 266{,}4 \text{ kg/h}$$

Según el análisis energético, el combustible necesario para una potencia térmica requerida de 12,861 MW es de 1072 kg/h. Sin embargo, se reporta un consumo de combustible de 700 kg/h, es decir, una diferencia de 372 kg/h, que coincide aproximadamente con el consumo de combustible asociado a las pérdidas de calor (266,4 kg/h).

En la Tabla 2.15 se muestran los principales resultados del balance termoenergético.

Tabla 2.15 Resultados del balance termoenergético.

Variable	Valor
Consumo de vapor, t/h	15,387
Potencia térmica, MW	12,8
Porcentaje de vapor por válvula reductora, %	25,42
Pérdidas de calor, %	25
Consumo de combustible, t/h	1,072
Gasto de combustible por pérdidas de calor, t/h	0,266
Agua de reposición, m^3/h	6,92
Eficiencia térmica general, %	75

2.7 Definición de los indicadores de desempeño energético del proceso.

En el Capítulo 1 se hace referencia a los indicadores de desempeño energético (IDEns) y su uso para medir el comportamiento de la eficiencia energética. Tomando los resultados del balance de energía del proceso, se pueden definir los principales IDEns, los cuales se pueden utilizar en una evaluación comparativa con la línea de base energética adoptada en un estudio realizado en el año 2017. Sin embargo, se presenta cierta complejidad en la definición de los indicadores, por la diversidad de surtidos en un mismo período, los cuales se producen con una misma fuente de generación de energía. Independientemente de estas particularidades en la fábrica de papel, los IDEns son una medida del comportamiento de la eficiencia energética.

Los principales IDEns definidos son: consumo específico de vapor (t vapor/t de papel), calor (MJ/t papel), agua (m^3/t de papel) y combustible (t de combustible/t de papel).

El análisis energético se realizó para liner natural con un peso básico de 200 g/m^2 y una producción de 3756,24 kg/h (3,76 t/h). Si se consideran 24 horas de operación en un día, serían 90 t/día, pero la fábrica generalmente no opera las 24 horas por diversas interrupciones, por tanto, se adoptan 20 horas con una producción de 75 t/día (3,125 t/h).

Tabla 2.16 Indicadores de desempeño energético.

Demandas	Consumos	Consumos específicos (IDEns)
Vapor, t/h	15,387	4,92 tvapor/t papel
Calor, MJ/h	46 299, 384	12 313,66 MJ/ t papel
Combustible (FO), t/h	1,072	0,34 tFO/t papel
Agua para generación, m^3/h	15,387	4,9 m^3/t papel

El consumo especifico de vapor está por debajo del valor reportado en fábricas de países desarrollados (6-9 tvapor / t papel), sin embargo, en general es alto, ya que en la máquina de papel y otros consumidores se reporta 3,3 t vapor/t papel (UNIDO, 1993) y en esta fábrica el único y mayor consumidor es la máquina de papel con un valor de 3,5 t vapor/t papel, por tanto, es elevado también el consumo especifico de calor.

En cuanto a la distribución de la energía en calor y electricidad, según la Tabla 2.13, el 93 % de la energía se usa en proceso y el 7 % en electricidad; valores muy alejados de los reportados por Bora (2008), referido en el Capítulo I.

En la evaluación comparativa se analiza solamente el combustible (Fuel Oi), teniendo en cuenta que de las dos principales energías primarias (combustible y agua), el consumo de combustible es la medida del consumo de vapor y por tanto de la demanda de calor.

El consumo específico de combustible calculado mediante el análisis energético se realiza considerando que solo se produce Liner natural 200 g/m^2. El consumo específico calculado con los reportes del primer semestre de 2015 y el calculado con los reportes del primer semestre de 2016 se define para la producción total de 7 surtidos de papel. El consumo específico calculado con los reportes del primer semestre de 2019 se define para la producción total de 2 surtidos.

Tabla 2.17 Evaluación comparativa

Consumo específico (IDEns) calculado (tFO/t papel)	Consumo específico (reporte 1er semestre 2015)	Consumo específico (reporte 1er semestre 2016)	Consumo específico (reporte 1er semestre 2019)
0,34	0,48	0,34	0,77

Como se observa en la Tabla 2.17 el consumo específico actual es bajo con relación a los reportes de la fábrica, ya que se asume una operación estable de un único surtido. La causa principal del incremento del indicador es la disminución de producción de papel sin reducir o con poca reducción del nivel de generación de vapor y, por tanto, del consumo de combustible. Con estos resultados se confirma la complejidad de la determinación de los IDEns en fábricas de papel, comentada en el Capítulo I, no obstante, el valor calculado mediante el análisis energético se considera con cierta correspondencia con los consumos específicos reportados por la fábrica.

Conclusiones parciales

1. La recepción y procesamiento de los datos de consumos de recursos energéticos y de producción de la fábrica permitió determinar los indicadores de desempeño energéticos, con valores mínimos de 0,14 t FO / t papel y 0,33 MWh / t papel, los cuales se pueden tomar como referencia para de implementar el SGE e identificar oportunidades de mejora, constituyendo los principales componentes para definir una línea con base energética.
2. El análisis energético permitió la identificación del porcentaje de reposición de agua a la caldera, con una magnitud de 45, superior a 30, definido por diseño; así como el porcentaje de pérdidas de calor con una magnitud de 25 que determina un gasto adicional de combustible de 266,4 kg/h y una eficiencia térmica de 75 %.
3. La evaluación energética permitió definir cuatro índices de consumo que constituyen importantes indicadores de desempeño energético (4,92 tvapor/t papel, 12 313,66 MJ/t papel, 0,34 tFO/t papel y 4,9 m^3 de agua/t papel), presentando el Fuel Oil una magnitud cercana a los consumos específicos calculados a partir de los reportes de operación de la fábrica.

Capítulo III. Evaluación de las oportunidades de conservación de la energía en el proceso de fabricación de papel.

En el presente capítulo se aplica la metodología del balance termoenergético (Espinosa-Pedraja, 1990) y los sistemas de gestión de la energía (NC ISO 50001, 2011) en un esquema térmico modificado. La definición de proyectos de inversión y su factibilidad técnica y económica se realiza basadas en el esquema térmico modificado con el objetivo de mejorar el desempeño energético, con algunos ajustes y mayor precisión en los procedimientos analíticos, pero cuyos resultados no difieren esencialmente de los mostrados previamente.

3.1 Definición de oportunidades de mejora en la generación, distribución y uso de la energía térmica.

En este estudio se adoptan las modificaciones e, f, g y h que satisfacen en parte, las oportunidades de mejora identificadas y expresadas en el Capítulo II.

Para alcanzar el uso más eficiente de energía térmica principalmente en vapor, el mismo debe reducirse hasta la temperatura de saturación o cerca de ella, de esta manera es posible recuperar gran cantidad de la energía que se consumió en el mismo al calentarlo para su paso de agua a vapor. Por este análisis la factibilidad de las propuestas de mejoras tecnológicas está encaminada a la instalación de dos atemperadores, dicha inversión debe estar respaldada por la adquisición de la válvula reductora de 2,75 -0,51 MPa que eliminaría la doble cascada, pues la atemperación funciona para mejorar la transferencia de calor al usar vapor cerca del punto de saturación en intercambiadores lo que favorecería el trabajo de las tamboras de secado, controlar el sobrecalentamiento no intencional por la reducción de la presión del vapor, y proteger tuberías y equipos posteriores contra temperaturas y presiones elevadas.

Para este caso particular se tiene como sugerencia el modelo de atemperador Fisher TBX-T tomado del catálogo Emerson (TBX-T, 2020), donde el agua de rocío se suministra al distribuidor y se distribuye a las boquillas. Estas se colocan estratégicamente para lograr una combinación óptima y una vaporización rápida en todas las condiciones de flujo. El atemperador Fisher TBX-T se puede configurar con una válvula de reducción de presión inmediatamente, con un difusor integrado o como un dispositivo independiente como se muestra en el Anexo 4.

La capacidad actual de la caldera permite la adición de un turbogenerador de similares especificaciones al turbogenerador actual y de esta forma se puede reducir el flujo de vapor por la válvula reductora.

En el nuevo esquema se adiciona un turbogenerador de similar potencia, con operación en paralelo con el turbogenerador de la máquina y una válvula reductora que reduce la presión de 2,75 MPa a 0,51 MPa.

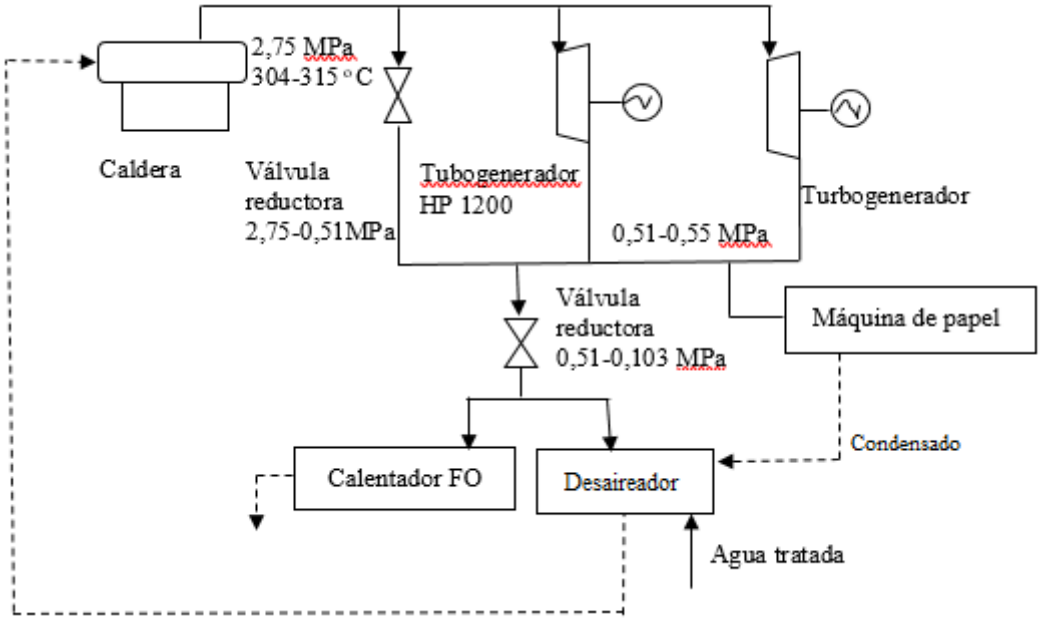


Figura 3.1 Esquema termoenergético modificado.

3.1.1 Desarrollo del balance termoenergético.

- Balance de calor en el Turbogenerador adicional

Se toma como referencia una oferta de turbogenerador (Brilliance, 2015) con especificaciones técnicas en la Tabla 3.1, similares al turbogenerador HP 1200, para determinar el consumo de vapor.

Tabla 3.1 Especificaciones técnicas del turbogenerador de contrapresión.

Turbina de vapor de contrapresión 1MW	
Model NO.:DBPST070544	Rated Power:1000kW -50MW
Power:1000 kW	Steam Consumption Rate:10,5 – 37,8 kg/kWh
Generator Type: Alternator	Inlet Steam Pressure: 0,5 – 8,89 MPa
Output Type: AC Three Phase	Inlet Steam Temperature: 250 - 535 ºC
Certification: CCC	Steam Consumption: 3~260 t/h

Standard: Nonstandard	Exhaust Pressure: 0,1 - 2 MPa
Product: Back Pressure Steam Turbine	Speed: 3000, 5600/1500 rpm
Material: Carbon Steel & Stainless Steel & Aluminum	Generator: Options of Siemens, Stamford or Csic

El consumo de vapor del turbogenerador (G_{TG2}) se obtuvo mediante el software Turbine Steam - Consumption Calculator (Jayes, 2002). En el Anexo 5 se muestran el reporte del software.

Las condiciones del vapor son: Pv = 2,75 MPa, Tv sobrecalentado = 304 ^{o}C, Hvsobrecalentado = 3011,8, Tsat = 228,8 ^{o}C, Psal = 0,51 MPa, Hsal = 2696,5 kJ/kg, eficiencia termodinámica calculada = 84,73 %, potencia de la turbina = 1 MW

$$\eta \text{ termodinámica} = \frac{io - i'2}{io - i2} = \frac{3011,8 - 2696,5}{3011,8 - 2639,7} = 84,73\ \%$$

G_{TG2}= 3,369 kg/s = 12 128 kg/h

Consumo específico = 12,13 kgv/kWh

Q_{TG2} = 3,369 • (3011, 8 -2696,5) = 1062,24 kW

- **Balance de calor en el Desaireador.**

Se asume que al desaireador se alimenta el 70 % del condensado de la máquina de papel y se repone el resto de agua tratada, por tanto:

Gcondmp = 7670,74 kg/h = 2,13 kg/s

$$Gdesaireador = \frac{Gacald \cdot Hacald - Gat \cdot Hat - Gcondmp \cdot Hcondmp}{\lambda v}$$

$$= \frac{22202 \cdot 377 - 3287,46 \cdot 121,55 - 7670,74 \cdot 175,64}{2256,8} = 2\,934\ kg/h = 0,815 \text{ kg/s}$$

- **Balance de vapor**

El consumo de vapor (Gcald) demandado por el proceso se determina mediante:

$$Gcald = (Gvr + G_{TG1} + G_{TG2}) \cdot 1,1$$

$$Gcald = (10076 + 12128) \cdot 1,1$$

$$Gcald = 24424 kg/h = 6,78 \text{ kg/s}$$

- **Flujo de vapor por válvula reductora (Gvr).**

$$Gvr = Gmp + Gdear + Gcalen - G_{TG} = 0$$

$$Gnec.tec. = 10958{,}2 + 2934 + 43{,}5 = 13935{,}7 \text{ kg/h}$$

$$Gnec.tec. = Gvr + G_{TG1} + G_{TG2}$$

$$= 22\,204 \text{ kg/h}$$

Como se observa, el consumo de los turbogeneradores es superior (22 204 kg/h) a las demandas de vapor calculadas de los equipos de proceso (máquina de papel, desaireador y calentador de combustible) que tienen una magnitud de 13 989 kg/h, por tanto, no debe pasar un flujo de vapor por la válvula reductora, por lo que se asume un valor de cero. Aunque se ha definido un flujo de vapor de 10 958,2 kg/h a la máquina de papel, esta consume una cantidad superior, teniendo en cuenta que recibe, en la práctica, cierta cantidad de vapor por la válvula reductora 2 (esquema actual), calculado mediante el balance realizado en el Capítulo II. Por otra parte, aún existe incertidumbre en el balance de calor en el desaireador, el cual debe consumir un flujo de vapor superior al calculado.

- **Balance de agua**

$$Gacald = Gcondensados\ recuperados + Gareposición$$

$$Gareposición = Gacald - Gcondensadosrecuperados$$

$$Gareposc = 24424 - (7670{,}74 + 2934)$$

$$Garepos. = 13820 kg/h$$

$$\%Aguareposición = \frac{Gareposc}{Gcald} * 100$$

$$\%Aguareposición = \frac{13820}{24424} * 100 = 56{,}58\ \%$$

Aquí se demuestra que, al incorporar un turbogenerador, se incrementa el requerimiento total de vapor, el cual no tiene demanda en equipos consumidores en el proceso, por lo que determina un mayor flujo de agua de reposición.

- **Balance de calor.**

El calor requerido por el proceso (Qcald) o potencia térmica requerida se determina mediante:

$$Qcald = Q_{TG} + Q_{TG2} + Qmp + Qdesaireador + Qcondrecup + Qpérdidas$$

$$Qcald = Gcald * ho$$

ho=3011,93 kJ/kg Con T= 304 ^{o}C y Pv = 2,75 MPa

$$Qcald = 6{,}78 \cdot 3011{,}93$$

$$Qcald = 20420{,}88\,\text{kW} = 20,\ 4\text{MW}$$

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{20420{,}88 - 9598{,}2}{20420{,}88} \cdot 100 = 53\%$$

En la suma de las potencias térmicas de los equipos(Qn) que consumen vapor, no se consideran el calor en el calentador de combustible y el flujo de calor del 30 % del condensado, los cuales constituyen calores no recuperados en las corrientes de condensado, por tanto, son pérdidas de calor.

$$Qpérdidas = Qcald - \sum Qn$$

$$Qpérdidas = Qcal - \sum Q_{TG} + Q_{MP} + Qdesaireador + Qcondrecup$$

Pérdidas = Qcald - 882,84 + 1062,24 + 6342,9 + 1850,57 + 683,81= 9598,2

$$Qcondrecup = Qcondmap + Qconddesaireador = Gcondmap \cdot ha + Gconddesaireador \cdot ha = 2{,}13 \cdot 175{,}89 + 0{,}82 \cdot 377{,}039 = 683{,}81\text{kW}$$

$$Qpérdidas = 9598{,}2\ \text{kW}$$

$$\%\ Qperdido = \frac{9598{,}2}{20420{,}88} \cdot 100 = 47$$

$$ConsumoFO = \frac{Qcald}{VCN} = \frac{20420{,}88}{43157} = 0{,}473\text{kg/s} = 1703{,}4\text{kg/h}$$

$$\text{Gasto de Fuel Oil} = \frac{9598{,}2}{43157} = 0{,}222\,\frac{kg}{s} = 800{,}64\,\frac{kg}{h}$$

Tabla 3.2 Distribución del calor en el proceso

Flujos de calor	Datos	Fórmula	Calor (kW)	Distribución del calor (%)
Condesados Qcondrecup	Gacondmap=2,13kg/s Gaconddesaireador =0,815kg/s ha map=175,89 kJ/kg ha dear=377 kJ/kg	Qcondrecup = Gacondmap·ha + Gaconddear·ha	683,81	3,34

Potencia - Q_{TG} -Q_{TG2}	Gturb= 2,8+3,37kg/s h1 =3011, 8 kJ/kg h2 = 2696,5 kJ/kg	$Q_{TG}=G_{TG*}$ (h1-h2) $Q_{TG2}=G_{TG2}\cdot$(h1-h2)	1945,4	9,52
Proceso - Qmp - Q desaireador	Gmp= 3 kg/s λ=2114,3 kJ/kg Gdesaireadodor=0,82 kg/s λ= 2256,8 kJ/kg	Qproceso= Qmp + Qdear Qmp=Gmp·λ Qdesaireador =Gdesaireador·λ	8193,47 6342,9 1850,57	40,12
Pérdidas(Qperd)			10822,36	47
Qcald			20420,88	100

Basado en los resultados que muestra la Tabla 3.2, la distribución de la energía en calor y potencia(electricidad) no se corresponde con los índices reportados (Capítulo I) ya que el 93 % de la energía se usa en el proceso y el 10 % en potencia, lo cual es factible modificar.

Tabla 3.3 Resultados del balance termoenergético.

Variable	**Valor**
Consumo de vapor, t/h	24,42
Potencia térmica, MW	20,4
Flujo por válvula reductora, %	0,00
Pérdidas de calor, %	47,00
Consumo de combustible, t/h	1,703
Gasto de combustible por pérdidas de calor, t/h	0,8
Agua de reposición, m^3/h	56,58
Eficiencia térmica general, %	53

Tabla 3.4 Indicadores de desempeño energético para el esquema modificado.

Demandas	Consumos específicos Esquema actual (IDEns)	Consumos específicos Esquema modificado (IDEns)
Vapor, tvapor/t papel	4,92	7,8
Calor, MJ/ t papel	12 313,66	23 524,85
Combustible (FO), tFO/t papel	0,34	0,544
Agua para generación, m3/t papel	4,9	7,81

El análisis del consumo específico de vapor es similar al realizado para el esquema térmico actual, es decir, en este caso el consumo especifico de vapor está en el rango del valor reportado en fábricas de países desarrollados (6-9 tvapor / t papel), sin embargo, en general es alto, ya que en la

máquina de papel y otros consumidores se reporta 3,3 t vapor/t papel (UNIDO, 1993) y en esta fábrica el único y mayor consumidor es la máquina de papel con un valor de 3,5 t vapor/t papel, por tanto, es elevado también el consumo especifico de calor.

En esta alternativa de esquema termoenergético se incrementan las pérdidas de calor, ya que la potencia térmica requerida (Qcald) es mayor, al incluir un turbogenerador, siendo similar el calor demandado por los equipos consumidores de vapor, por tanto, parte del calor no se recupera y la eficiencia térmica es menor (53%) que en el esquema térmico actual (75%). En ambos esquemas, el consumo de combustible es superior a 0,7 t/h, promedio que reporta la industria.

Aún con estos resultados es beneficioso cogenerar, donde, tanto el generador actual como la sustitución por una nueva unidad satisfacen la demanda de vapor del proceso.

Para adoptar este esquema es necesario realizar un estudio de mayor precisión en el proceso para determinar los consumos de vapor de la máquina de papel y desaireador la demanda mínima de servicio de calentamiento mediante un estudio de integración de calor, lo que permitirá conocer en qué medida se aleja la demanda actual de servicio de calentamiento de la demanda mínima.

3.2 Análisis de factibilidad técnico – económica de las propuestas de mejoras tecnológicas

3.2.1 Estimación de las inversiones.

- Costo de inversión total del generador de vapor.

Se asume que el generador de vapor acuotubular se adquiere en el país, tomando como referencia un contrato para la inversión de dos calderas acuotubulares en la refinería Ñico López firmados con Bioenergía Caribe S.A, que incluyó servicio de construcción, montaje y puesta en marcha en la modalidad "Llave en mano" cuya inversión total ascendió a 3 945 294.09 Euros con un interés anual del 3,7%.

Las principales especificaciones técnicas de la caldera C.A.C.-250 se muestran a continuación. La caldera está dimensionada para asegurar una producción de 25 t/h de vapor sobrecalentado a 12 bar correspondiendo a una potencia bruta agua/vapor de $15x10^6$ kcal/h, y agua de alimentación a 105 ºC.

- Combustible Fuel-Oil (Pesado)/ Gas ref.
- Presión de diseño 18 bar
- Presión máx sal. Caldera 14 bar
- Temperatura del vapor sobrecalentado 225 ºC

- Vaporización en MCM 25 t/h (con agua a 105 ºC)
- Potencia térmica neta $15 \cdot 10^6$ kcal/h (17 445 kW)
- Temperatura del agua de alimentación 105 ºC
- P.C.I. del combustible Fuel-Oil 9 200 kcal/kg.
- P.C.I. del combustible Gas 6 725 kcal/kg.
- Sobrepresión de caldera 45.60 mm CA
- Superficie de calefacción nominal 588 m^2
- Peso en servicio de Caldera 65 ton

Agua de Alimentación:

- Caudal de agua kg/h 25 500
- Pérdida de carga (mm.CA) 0,3
- Diseño del economizador (bar) 15
- Presión de prueba (bar): 21

Para propósitos de estimación de una inversión, se considera una inversión total de 2 045 634,98 Eur, incluyendo el interés anual.

- **Costo de inversión del turbogenerador.**

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).

3.2.2 Análisis del efecto económico del sistema energético.

El efecto económico se obtiene mediante la determinación de los ahorros potenciales de recursos (combustible, agua y electricidad). La Tabla 3.4 muestra el resultado del cálculo de los ahorros.

En la determinación de las cantidades respectivas, se asumen un valor calórico neto del combustible de 43157 kJ/kg, 300 días de operación al año, 24 horas/día y precios del combustible (FO), agua y electricidad de 512,9 $/t, 0,1 $/$m^3$, 270,3 $/MWh, respectivamente.

Los gastos de combustible y agua se definen para el esquema tecnológico actual, donde las pérdidas de calor son menores, por tanto:

Consumo FO según balance energético = Qperd/VCN = (3208,1·3600) / (43157)

= 267 kg/h

Costo anual de combustible consumido por pérdidas de calor =267 · 24 · 300 · 512,9 / 1000 = $ 985999,00

Ahorro anual de electricidad adquirida al SEN

1 · 24·300·270,3 = $1 946 160,00

El flujo de agua de reposición calculado es de 7m^3/h, que coincide con la magnitud definida por diseño (30 %). El flujo de agua destinado a la caldera es de 23 m^3/h (diseño) y actualmente, según información de especialistas de la fábrica no se recupera aproximadamente el 50 % del condensado (11,5 m^3/h), por tanto, hay un potencial de 4,5 m^3/h de agua de reposición que puede recuperarse.

Ahorro anual de agua para servicio de generación de vapor = 4,5·24·300·0,1=$ 8 280,00

Tabla 3.4 Ahorros de agua, combustible y electricidad.

Recurso	Ahorro anual de recursos	Ahorro de recursos financieros ($/año)
Agua, m^3	82 800,00	3 240,00
Fuel Oil, t	1 922,4	985 999,00
Electricidad, MWh	7 200,00	1 946 160,00
Total		2 935 399,00

3.2.3 Estimación de la factibilidad de los proyectos de inversión.

Para estimar la factibilidad de los proyectos de inversión se consideran como ingresos las pérdidas actuales referidas en la Tabla 3.2 y constituirían el ahorro de recursos financieros, una vez que se ejecute la inversión.

Se asume un período de operación de 300 días/año y CUP como única moneda en todos los análisis.

Los costos de operación del generador de vapor, no se toman en consideración asumiendo que pueden ser similares a los actuales que tiene la fábrica, así como por la incertidumbre generada por circulación de dos monedas.

Los valores asumidos de vida útil y tasa de interés son de 15 años y 12 %, respectivamente (Cartera de oportunidades, 2014), (Decreto, 2014) y un método de depreciación lineal. En el análisis de rentabilidad se utiliza un recurso informático en un libro Excel denominado Cost & Evaluation

Workbook que acompaña a la 5.ta edición del libro Plant Design and Economics for Chemical Engineeers y la metodología utilizada por Peters (1991).

Para la estimación del tiempo de recuperación de la inversión en la Tabla 3.5 se muestra el costo del equipamiento seleccionado anteriormente.

Tabla 3.5 Costos de adquisición e inversión

Equipo	Costo de adquisición ($)	Costo de inversión ($)
Generador de vapor	-	2 045 635
Turbogenerador	900 000	1 575 000
Total	1400 000	3 620 635

Tomando los resultados de la estimación de la inversión total (turbogenerador y generador de vapor), y los ahorros por eliminación de las pérdidas de recursos financieros se determinan los indicadores de rentabilidad (VAN, TIR y PRD) mostrados en la Tabla 3.6 y el flujo de caja mostrado en la Figura 3.2.

Tabla 3.6 Indicadores de rentabilidad.

Indicadores de rentabilidad	
Valor actual neto (VAN), CUP	12,719,650.64
Tasa Interna de Rendimiento (TIR), %	54
Período de recuperación al descontado (PRD), años	4

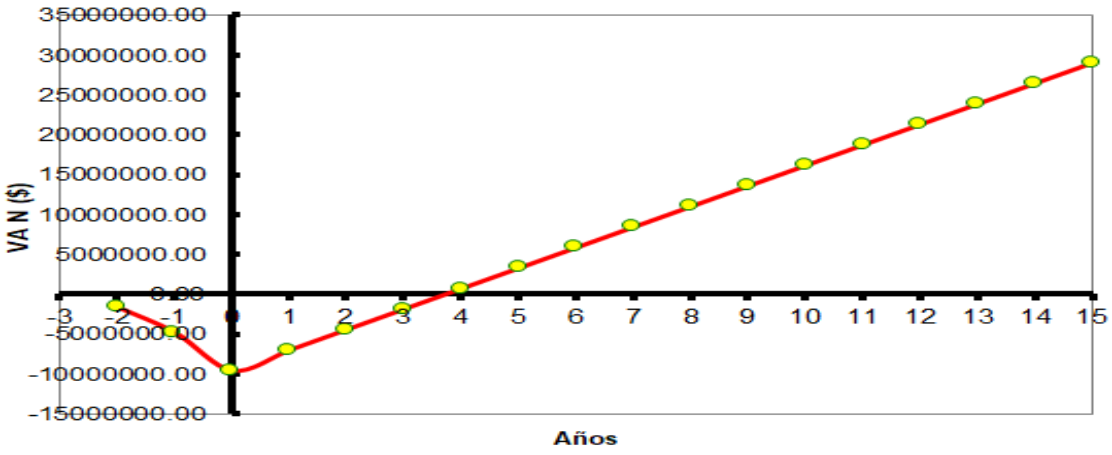


Figura 3.2 Flujo de caja

- Análisis del balance generación-consumo de combustible.

El siguiente análisis está centrado en los gastos de combustible asociados a las pérdidas de calor.

La adición de un turbogenerador implica que se consuman 800,64 kg/h de combustible con un costo anual de $2 954 304 ,00 y el ingreso por la entrega de electricidad es de $1 946 160,00, cuya diferencia ($ 1 008 144, 00) es muy cercana a los gastos anuales actuales ($ 985 999,00) por consumo de combustible asociado a las pérdidas de calor. Por tanto, se logran ahorros financieros en la electricidad adquirida al SEN, sin embargo, se incrementa el consumo de combustible por pérdidas de calor y la disminución de la eficiencia térmica.

En resumen, con el esquema térmico modificado se satisface la demanda de calor, con un nuevo sistema de generación y distribución del vapor, factible técnica y económicamente.

A partir de la aplicación de sistemas de gestión de la energía, la Empresa puede definir los objetivos, metas y planes de acción en función de implementar los proyectos de inversión que se proponen a continuación:

1. Instalación del generador de vapor acuotubular de 22 a 25 t/h que sustituye al generador actual.
2. Instalación de un turbogenerador de 1 MW acoplado con el turbogenerador original de 0,9 MW para una potencia total instalada de 1,9 MW.
3. Rehabilitación de las redes de distribución de vapor, incluyendo reposición de aislamiento y la supresión de una válvula de reducción de presión.
4. Rehabilitar los sistemas de recuperación de condensados, tratamiento de agua y alimentación de agua a la caldera.

Conclusiones parciales

1. La evaluación energética del esquema modificado define que es necesario reponer el 56,6 % del agua de servicio a calderas y no se recupera el 47 % del calor, sin embargo, se logra reducir a cero el flujo de vapor por la válvula reductora.
2. El esquema térmico modificado presupone la sustitución total de los turbogeneradores de extracción-condensación por un turbogenerador de contrapresión de 1 MW, operando en paralelo con el turbogenerador actual de 0,9 MW para una potencia total instalada de 1,9 MW la cual satisface el consumo actual de electricidad de la fábrica.
3. Atendiendo a que el consumo de vapor del proceso en el esquema térmico modificado tiene una magnitud de 24,4 t/h se puede satisfacer con un generador acuotubular de 22 a 25 t/h con similares características dando solución al sobrecalentamiento, mediante atemperadores.
4. Es factible proponer un proyecto de inversión que incluye un generador de vapor, un turbogenerador y la sustitución de válvulas reductoras a partir del ahorro de agua de servicio a la caldera, combustible y electricidad adquirida al SEN, cuya inversión total se estima recuperar en 4 años.
5. La evaluación energética presupone la necesidad de invertir en un generador de vapor acuotubular de 22 a 25 t/h que sustituye al generador actual; un turbogenerador de 1 MW en paralelo con el turbogenerador original; la rehabilitación de las redes de distribución de vapor y condensados; el tratamiento de agua y la alimentación de agua a caldera.

Conclusiones

1. El análisis energético en el esquema térmico actual permitió definir el porcentaje de reposición de agua a la caldera, con una magnitud de 47, superior a 30, definido por diseño; el porcentaje de pérdidas de calor con una magnitud de 25 que determina un gasto adicional de combustible de 266,4 kg/h, una eficiencia térmica de 75 % y deficiente aprovechamiento de la energía del vapor.
2. Los indicadores de eficiencia, en el esquema modificado difieren de los índices actuales en fábricas de papel, con valores de 56,5 %, 47 % y 53 % de agua de reposición, pérdidas de calor y eficiencia térmica, respectivamente.
3. La evaluación energética de esquema térmico actual permitió definir cuatro índices de consumo que constituyen indicadores de desempeño energético (4,92 tvapor/t papel, 12 313,66 MJ/ t papel, 0,34 tFO/t papel, 4,19 m^3 de agua/t papel), los cuales se pueden tomar como referencia para de implementar el SGE e identificar oportunidades de mejora, constituyendo los componentes principales para definir una línea con base energética.
4. El esquema térmico modificado presupone la sustitución total de los turbogeneradores de extracción-condensación por un turbogenerador de contrapresión de 1 MW, operando en paralelo con el turbogenerador actual de 0,9 MW para una potencia total instalada de 1,9 MW, la cual satisface el consumo actual de electricidad de la fábrica y se elimina el flujo de vapor por la válvula reductora.
5. Es factible proponer un proyecto de inversión que incluye un generador de vapor de 24,4 t/h; un generador acuotubular de 22 a 25 t/h; un turbogenerador de un 1 MW; la rehabilitación de las redes de distribución de vapor y condensados; el tratamiento de agua y la alimentación de agua a caldera y sustitución de válvulas reductoras, a partir del ahorro de agua de servicio a la caldera, combustible y electricidad adquirida al SEN, cuya inversión total se estima recuperar en 4 años.

Recomendaciones

1. Realizar un análisis riguroso en el desarrollo de los balances de materiales y energía en los equipos consumidores de vapor y estudio de la estructura tecnológica, con el objetivo de identificar las posibles causas de la variabilidad de los resultados en el estudio actual y precedentes.

2. Aplicar los métodos de integración de calor al proceso de fabricación de papel para complementar el análisis energético e identificar con mayor precisión potencialidades de conservación de la energía.

Bibliografía

1. ACOGEN 2013. Disponible en: http://www.acogen.org/post/informe-acogen-congeneración
2. AEC, A. E. P. L. C. 2018. Gestión de la Energía. Disponible en: https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/gestion-de-la-energia
3. BIOENERGÍA, C. 2013. Diagnóstico en operación a la Caldera 1, Empresa Pulpa Cuba.
4. BORA, K.2008. Energy Management in the Pulp and Paper Industry: A Case Study of Cachar Paper Mill, Master´s Degree Thesis, University of Ljubljana, 99 p. Disponible en: http://www.gcpcenvis.nic.in/Thesis/bora134-B.pdf
5. BORROTO, A. 2013. Metodológicas para la Recomendaciones implementación de sistemas de gestión energética según la norma ISO 50001:2011, Cienfuegos.
6. BORROTO N., A. 2015. La Gestión energética: una alternativa eficaz para mejorar la competitividad empresarial. Revista del Instituto de Energía. Facultad de Minas(núm. 33). Medellín, Colombia, pp. 65-69. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147019387005
7. BRAVO, H. D. 2015. Energía y desarrollo sostenible en Cuba. Centro Azúcar, 42.Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2223-48612015000400002
8. BRILLIANCE 2015. Brilliance General Equipment Co., Ltd. Disponible en: http://shwolun.en.made-in-china.com/
9. CAPEHART, B. L., TURNER, C., KENNEDY**,** W. J., 2016. Guide to energy management, Eighth Edition, The Fairmont Press Inc., Lilburn
10. CARTERA DE OPORTUNIDADES, D. I. E. 2014. pp. 177- 220. Disponible en: http://www.granma.cu/file/sp/cartera-de-inversion-14/datos/documentos/marco_regulatorio/Marco%20Legal%20inversi%C3%B3n%20extranjera_ESP.pdf
11. DE BEER, J. W., E.; BLOK, K., 1998. Long-term energy-efficiency improvements in the paper and board industry, Energy. pp. 21–42.

12. DECRETO 2014. Reglamento del proceso inversionista. In: CUBA, C. D. M. D. (ed.). Gaceta Oficial. Disponible en: http://www.camaracuba.cu/index.php/es/descargas/category/1-negocios%3Fdownload%3D337:decreto-no-327-reglamento-del-procesoinversionista-go-x-5-2015-reglas-spanish&rct
13. DEL PILAR C. R., G., A. J., CIRO QUISPE, E., 2013. Mejoramiento de la eficiencia energética en la industria del cemento por proceso húmedo a través de la implementación del sistema de gestión. . Revista del Instituto de Energía. Facultad de Minas., 80, pp. 115-123. Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49625661015
14. ESPINOSA-PEDRAJA, R., REYMOND - ALAMO, A., MACHADO - BENAVIDES, S., CARRILLO - ALFONSO, M. J. 1990. Sistemas de utilización del calor en la industria azucarera, La Habana, Cuba. pp. 62-65.
15. ESPINOSA - PEDRAJA, R., HERNÁNDEZ - TOUSET, J.P., 2014. Gestión energética eficiente y análisis de los sistemas auxiliares en las plantas químicas. Editorial Feijóo ed. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. pp. 60-66.
16. FARLA, J. B., K.; SCHIPPER, L. 1997. Energy efficiency developments in the pulp and paper industry. pp.745–758
17. HERNÁNDEZ, J. P. 1985. Modelación matemática de la máquina de papel en el combinado de papeles "Panchito Gómez Toro", . Trabajo de Diploma., Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
18. IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) 2017. Tracking Clean Energy Progress; IEA: Paris, France.
19. INDUSTRIAL, (Steam). 2015. Disponible en: http://www.midwestchptap.org/Archive/pdfs/060216_Industrial_Steam.pdf
20. ISO 50001, NC. 2011. Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso (ISO 50001:2011, IDT). Cuban National Bureau of Standards. pp. 1-35. Disponible en: http://www.nc.cubaindustria.cu
21. ISO 2017. Energy Management Systems—Measuring Energy Performance Using Energy Baseline (EnB) and Energy Performance Indicators (EnPI)—General Principles

and Guidance ISO 50006:2017. Geneva, Switzerland: International Standard Organization.

22. JAYES, W., WILSON, H., 2002. Turbine Steam - Consumption Calculator. 2.1 ed.
23. JNU 2013. General Aspects of Energy Management and Energy Audit. Jaipur National University, 207 p. Disponible en: https://www.google.com.cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi6_dTRn77qAhWxl-AKHYQDA1oQFjABegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fs3.ap-south-1.amazonaws.com%2Faipnpc.org%2Fdownloads%2FT_5053_GENERAL_ASPECTS_OF_ENERGY_MANAGEMENT_AND_ENERGY_AUDIT.pdf&usg=AOvVaw1YSf2wlDVoLG670t-G1kHl
24. KLEMEŠ, J. J. 2013. Handbook of Process Integration,Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions, UK, Woodhead Publishing Limited. pp. 765 - 797
25. KREITH, F., GOSWAMI, D. Y., 2007. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, USA.
26. LAWRENCE, A., THOLLANDER P., ANDREI M., KARLSSON, M., 2019. Specific Energy Consumption/Use (SEC) in Energy Management for Improving Energy Efficiency in Industry: Meaning, Usage and Differences. Energies. 12, 247, 22 p; doi: 10.3390/ en12020247.
27. MAJONIN, A. G. 1976. Principios de la tecnología papelera, Departamento de mimiógrafo. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba. 424p.
28. MATEOS - ESPEJEL, E., SAVULESCU, L., MARECHAL, F., PARIS, J., 2011. Unifed methodology for thermal energy efficiency improvement: application to Kraft process. , Chemical Engineering Science. pp. 135 – 151.
29. MATOS, A. M. 2020. Energías renovables y ahorro energético en Cuba. CUBAHORA. Disponible en: https://www.cubahora.cu/ciencia-y-tecnologia/energias-renovables-y-ahorro-energetico-en-cuba
30. PATTERSON, M. G. 1996. What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues, Energy Policy. pp. 377–390.
31. PÁVLOV, K. F. 1981. Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aspectos en tecnología química, Editorial Mir, Moscú.

32. PETERS, M. S., TIMMERHAURS, K. D., 1991. Plant Desing and Economics for Chemical Engineers, Fourth Edition, McGraw-Hill Inc. 1991, 925 p.
33. ChemicaLogic STEAM TAB, Companion. 1999-2003. Thermodinamic and Transport Properties of Water and Steam. Disponibleen: http://www.chemicalogic.com
34. TBX-T 2020. Atemperador Fisher TBX-T, Boletín del Producto, Catálogo Emerson. Disponible en: http://www.Fisher.com
35. TURBINE, B. P. 2003. Disponible en: http://www.backpressureturbine.com
36. UNIDO.1993. Handy Manual. Pulp and Paper Industry. Output of a Seminar on Energy Conservation in Paper and Pulp Industry, 45 p.
37. US.DOE. 2012. Consider Installing High-Pressure Boilers with Backpressure Turbine-Generators, Advanced Manufacturing Office Energy Efficiency and Renewable Energy. Disponible en: http://manufacturing.energy.gov
38. VERITAS, B. 2018 (a). Eficiencia Energética y Sostenibilidad. Disponible en: http://www.bureauveritas.es/home/about-us/our-bussines-certification/area-of-activity/energy-efficiency-and-sustainability
39. VERITAS, B. 2018 (b). Gestión Energética: mejore la eficiencia con la certificación ISO 50001. Disponible en: http://www.bureauveritas.com.ar/home/about-us/our-bussines/certification/management-systems/certification-gestion-energetica/sistemas-gestión-energética
40. WORD, M. 2015. The Cost of Producing Electricity. Disponible en: http://www.maintenanceworld.com/the-cost-of-producing-electricity/
41. XAVIER, F. 2008. Los sistemas de gestión de emisiones y energía como primer punto de prevención para la reducción de emisiones de CO2. Disponible en: http://www.riadicyp.org.ar

Anexos

Anexo 1. Expresiones para el cálculo de las pérdidas de calor en la sección de secado

- Cálculo de las pérdidas de calor por las partes libres de la hoja de papel (Q1).

Q1= Fp * α1 * ($\left[(Tms - Tbi) + ... + (Tms - Tb6)\right]$ kJ/h

Fp : Superficie de las partes libres de la hoja de papel de los lados (m)

α1: Coeficiente de emisión térmica del papel al aire (W/m^2 ºC)

Tm : Temperatura media del papel en las partes libres (igual a la temperatura media de secado) (°C)

$Fp = 2 * L * b * n$

L : Longitud de la parte libre del papel entre los cilindros (m)

b : Ancho del lienzo del papel (condicionalmente aceptado igual al ancho total del papel en el bobinado (m)

n : Cantidad de partes libres, se acepta igual al número de secadores

Fp = 2 * 1,2* 3,7 * 41

Fp =364,08 m^2

El coeficiente de emisión térmica se puede determinar por la fórmula empírica siguiente α1= 5,58 + 3,95 * V

V: Velocidad de la máquina (m/s)

α1= 5, 58 + 3, 95 * 1, 5

α1= 11, 505 W/m^2°C

Q1= Fp * α1 * ($\left[(Tms - Tbi) + ... + (Tms - Tb6)\right]$

Q1= $364{,}08 * 11{,}505 *$
$\left[(73{,}6 - 53) + (73{,}6 - 66) + (73{,}6 - 69) + (73.6 - 56) + (73{,}6 - 49) + (73{,}6 - 45)\right]$

Q1= 1562232,62 kJ/h

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

Q2 = $Fc * \alpha 2 * \sum (Tm - Tb1)$

Fc : Superficie de las partes libres de los fieltros (m^2)

α2: Coeficiente de emisión térmica para la superficie rugosa del fieltro

$$Fc = 2 * AB * [Lt - (\pi * Dp * np * Bp + \pi * Df * nf * Bf)]$$

Donde:

AB : Ancho del fieltro (m)

Lt : Longitud total de los fieltros (m)

Dp : Diámetro de los cilindros (m)

Np : Cantidad total de cilindros

Bf : Coeficiente medio de los arcos de los cilindros secadores de fieltro (W/m^{2}°C).

Bp : Coeficiente medio del arco en los cilindros secadores, cubiertos de papel.

$$Bp = PCP / PT$$

PCP : Perímetro del papel en contacto con el cilindro.

PCF : Perímetro de contacto del fieltro con el cilindro.

PT : Perímetro de la tambora.

Bp : 0,63 W/m^{2}°C

Bf : 0,5 W/m^{2}°C

$$Fc = 2 * AB * [Lt - (\pi * Dp * np * Bp + \pi * Df * \cancel{nf} * Bf)]$$

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

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

α2: se determina por la fórmula empírica de la superficie rugosa.

α2 =6, 16 + 4,187* V

α2 = 12,4405 W/m^{2} °C

$$Q2=423{,}2*10.[(73{,}6-53)+(73{,}6-66)+(73{,}6-69)+(73{,}6-56)+(73{,}6-49)+(73{,}6-45)]$$

Q2 = 1963567,118 kJ/h

- Cálculo de pérdidas de calor por los fondos de los cilindros secadores de papel (Q3).

$$Q3= (2 * F * K1 * [(Tv1 - Tb1) * n1 + (Tv2 - Tb2) * n2 + ... + (Tv6 - Tb6) * n6]$$

F : Superficie de tope de un cilindro (m^2)

$K1$: Coeficiente de transferencia de calor del vapor al aire a través de la pared del cilindro.

$Tv1, Tv2, Tv3, Tv4. Tv5, Tv6$: Temperatura promedio del vapor en los cilindros secadores por grupo.

n : Número de cilindros secadores por grupo.

$$F = 3{,}14 * \frac{dp^2}{4}$$

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

$$F = 1{,}76625 \text{ m}^2$$

$$K1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha f} + \frac{\alpha t}{\lambda 1} + \frac{1}{\alpha 3}}$$

αf : Coeficiente de emisión térmica del vapor para la pared del cilindro ($W/m^{2\circ}C$)

αt : Espesor de la tapa del tope del cilindro (m)

$\lambda 1$: Coeficiente de termo conductividad del material (para el hierro fundido λ = 62,8 $W/m^{2\circ}C$ (Majonin, 1976)

$\alpha 3$: Coeficiente de emisión térmica de la pared del tope del cilindro al aire ($W/m^{2\circ}C$)

$\alpha 3$: Se determina mediante una fórmula empírica.

$$\alpha 3 = 5{,}58 + 3{,}95 \cdot V / 2$$

$$\alpha 3 = 8{,}5425 \text{ W/m}^{2\circ}\text{C}$$

$$K1 = 7{,}57 \text{ W/m}^{2\circ}\text{C}$$

$$Q3 = 2 * 1{,}76625 * 7{,}57 * [(63{,}4 - 53) * 2 + (84{,}6 - 66) * 4 + (89{,}1 - 69) * 8 + (83{,}8 - 56) * 18 + (50{,}3 - 49) * 3 + (66{,}4 - 45) * 6]$$

Q3 = 85553,0961 kJ/h

- Cálculo de pérdidas de calor por los fondos de los cilindros secadores de fieltro (Q4).

$$Q4 = 2 * K1 * F * (Tvf - Tb1) * nf$$

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).

$$Q5 = K2 * \pi * dp * \left[(1 - Bp) * b + (1 - Bf) * (B - b)\right] *$$
$$\left[(Tv1 - Tb1) * n1 + (Tv2 - Tb2) * n2 + (Tn3 - Tb3) * n3 + ... + (Tv6 - Tb6) * n6\right]$$

Donde:

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

∂c : Espesor del cilindro (m).

$$K2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha f} + \frac{\alpha c}{\lambda 1} + \frac{1}{\alpha 3}}$$

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

$$Q5 = 7.57 * 3.14 * 1.5 * \left[(1 - 0.75) * 3.7 + (1 - 0.50)(4.16 - 3.7) + (4.16 - 0.5)\right] *$$

$$\left[(63.4 - 53) * 2 + (84.6 - 66) * 4 + (89.1 - 69) * 8 + (83.8 - 56) * 18 + (50.3 - 49) * 3 + (66.4 - 45) * 6\right]$$

Q5 = 549250,877kJ/h

- Calculo de pérdidas de calor por la superficie lateral de los cilindros secadores de fieltro (Q6).

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

$$Q6 = 0$$

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

$$Q7 = K3 * \pi * b * dp * Bf *$$
$$\left[(Tv1 - Tb1) * n1 + (Tv2 - Tb2) * n2 + (Tv3 - Tb3) * n3 + .. + (Tv6 - Tb6)n6\right]$$

$K3$: Coeficiente de emisión térmica de los cilindros secadores de papel y fieltro.

$$K3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha 1} + \frac{\partial c}{\lambda 1} + \frac{\partial 1}{\lambda 2} + \frac{\partial 2}{\lambda 3} + \frac{1}{\alpha 2}}$$

$\partial 1$: Espesor del papel (m)

∂c: Espesor del cilindro (m)

$\partial 2$: Espesor del fieltro (m)

$\lambda 1$: Coeficiente de termo conductividad del material en W/m^2 °C

λ 2: Coeficiente de termo conductividad del papel en W/m^2 °C

$\lambda 3$: Coeficiente de termo conductividad del fieltro en W/m^2 °C

$\alpha 2$: Coeficiente de emisión térmico del fieltro al aire

K3=6, 6 W/m^2 °C

$$Q7 = 6{,}6 * 3{,}14 * 3{,}7 * 1{,}5 * 05 *$$

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

Q7 = 183990,0138 kJ/h

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

$$Q8 = K4 * D * \pi * B1 * (Bp - Bf) *$$
$$[(Tv1 - Tb1) * n1 + (Tv2 - Tb2) * n2 + (Tv3 - Tb3) * n3 + .. + (Tv6 - Tb6)n6]$$

$$K4 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha 1} + \frac{\partial c}{\lambda 1} + \frac{\partial 1}{\lambda 2} + \frac{1}{\alpha 2}}$$

$K4 =$ 10,1 W/m$^{2\circ}$C

$Q8 =$ 14705316 kJ/h

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

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

$Q9 =$ 3620,16 kJ/h

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

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

$Q10 = 0$

Anexo 2.

Tabla 1 Principales datos para el balance de calor en la sección de secado.

Elementos a evaluar	Unidad	Símbolo	Magnitud
Ancho del papel	m	b	3,70
Velocidad de la máquina	m/min	V	90
Peso básico llevado a 100% de sequedad	kg/m^2	g	
Sequedad final en fracción	----	Sf	0,94
Capacidad calorífica del papel	kJ/kg °C	cp	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	cp	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
Coef. termoconductividad del material	$W/m^{2\circ}C$	LAN1	62,8
Temp.del vapor en cil/grupos			

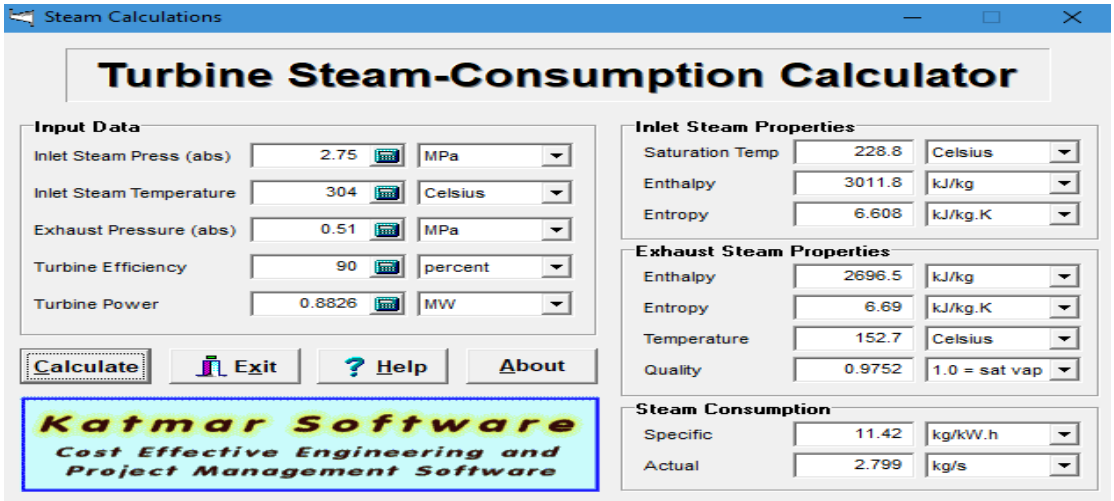
Número de cilindros secadores por grupos	----	N1 N2 N3 N4 N5 N6	2 4 8 18 3 6
Espesor del fieltro	m	GA2	0,005
Coefic. termoconductividad del papel	$W/m^{2\circ}C$	LAN2	0.0465
Temperatura del vapor vivo	$^{\circ}C$	TH	152,7
Contenido de calor, vapor vivo.	kJ/kg	i	2749,3

Tabla 2 Temperaturas de cilindros y del papel en la sección de secado.

No. de cilindro	Temperatura	T papel
1	63,4	33
2	65	53,4
3	70,8	63,3
4	90,7	69,4
5	84,4	75,8
6	92,8	77,8
7	87,9	81,3
8	92,3	82,2
9	89,4	84,2
10	95,4	82,3
11	89,1	82,6
12	90,9	83,6
13	82,8	82,4
14	85,2	70,1
15	87	89
16	93	78,8
17	94,7	82,6
18	97,2	60,9
19	95,7	78,5
20	89	83
21	88,3	84,6
22	96,4	83,1
23	90,6	84,6
24	92,3	83,1
25	90,2	84,2
26	97,1	83,4
27	95,2	82,7

No. de cilindro	Temperatura	T papel
28	68,1	83,1
29	66,3	82,3
30	86,9	80,5
31	83,8	65,9
32	77,4	67,5
33	73,3	80,4
34	69,4	78,8
35	71,2	75,2
36	68,6	67,9
37	66,5	72,3
38	65,6	67,7
39	63,4	66,2
40	63,5	70,3
41	63,2	62,4
Rolos 1	56,6	57
Rolos 2	42,6	55,6
Rolos 3	54,3	53,7
Rell	41,2	46,6
Tms		73,62

Anexo 3. Reporte del software Steam – Consumption Calculator para turbogenerador HP 1200



Anexo 4. Atemperador Fisher TBX-T

Atemperador Fisher™ TBX-T

El atemperador Fisher TBX-T puede utilizarse en muchas aplicaciones para reducir de modo eficiente la temperatura de vapor sobrecalentado al punto de referencia deseado. El atemperador TBX-T está disponible para su instalación en líneas de vapor de DN200 a DN1500 (NPS 8 a 60) de diámetro y son capaces de mantener las temperaturas del vapor hasta 6 °C (10 °F) de temperaturas de saturación.

La atomización y la vaporización de agua son elementos clave en cualquier aplicación de acondicionamiento de vapor. El diseño TBX-T incorpora un manifold de agua de rocío con boquillas AF de geometría variable que producen un patrón de rocío optimizado sobre un amplio rango operativo. Estas boquillas se colocan estratégicamente para lograr una combinación óptima y una vaporización rápida en todas las condiciones de flujo (consulte la figura 4). Años de investigación en atomización y vaporización fueron decisivos para optimizar el sistema de inyección de agua. El uso generalizado de análisis de CFD, además de la información proveniente del rendimiento en el campo, se utilizó para validar mejoras en el sistema de rociado.

Características

- **Inyección precisa de agua de rocío**-- Un manifold de rociado con diseño CFD determina el punto de inyección y la profundidad de inserción del agua para maximizar la mezcla y la evaporación rápida.
- **Revestimiento térmico en el cuerpo**-- El TBX-T tiene la opción de incluir un revestimiento térmico integral dentro de la tubería de vapor. Esta construcción se utiliza generalmente en aplicaciones de atemperación intermedia de calderas, donde se expone el atemperador a una amplia oscilación térmica, a tensión alta, a altas velocidades de vapor y a vibraciones inducidas por el flujo. El revestimiento minimiza el riesgo de choque térmico cuando se introduce agua fría en una unidad que ya se ha calentado a la temperatura operativa del vapor.
- **TBX-T**—El atemperador TBX-T incorpora un manifold de agua de rocío de boquillas tipo AF de geometría variable que produce un patrón de rocío optimizado en un amplio rango operativo. Estas boquillas se colocan estratégicamente para lograr una combinación óptima y una vaporización rápida en todas las condiciones de flujo (consulte la figura 3).

El atemperador TBX-T se puede configurar con una válvula de reducción de presión (PRV) inmediatamente aguas arriba, con un difusor integrado o como un dispositivo independiente.

El TBX-T (figura 1) normalmente se utiliza cuando una aplicación requiere una separación de la reducción de presión y las funciones de atemperación. El TBX-T está equipado con un manifold de suministro de agua que incluye una conexión de agua de rocío (NPS 1 a 4). El manifold proporciona flujo de agua de enfriamiento a varias boquillas de rocío individuales instaladas en la pared de la tubería de la sección de salida. El resultado es un rocío fino inyectado en forma radial a la turbulencia alta del flujo de vapor axial. La combinación de contacto de gran superficie del agua y la alta turbulencia en el vapor permite una mezcla muy eficiente y una rápida vaporización.

Tabla 1. Especificaciones

Conexiones

Línea de vapor: NPS 8 a 60[3]; CL150 a CL2500[4]; BWE, RF y RTJ
Agua de rocío NPS 1 a NPS 4[3], CL150 a CL2500[4], RF, RTJ, BWE y SWE

Valores de presión máxima[1][4]

Coherente con los valores de presión y temperatura aplicables según ASME B16.34

Rangeabilidad inherente

Hasta 50:1. La relación de la capacidad controlable C_v máxima con respecto a la mínima depende de la presión diferencial de agua disponible

Presión del agua de rocío requerida[2]

3,5 a 35 bar (50 a 500 psi) mayor que la presión de la tubería de vapor

Capacidad máxima C_V de la unidad (para flujo de agua de rocío)

Comunicarse con la oficina de ventas de Emerson.

Materiales de construcción

Tubería de vapor: ■ acero al carbono SA105, ■ SA182 grado F22 (2-1/4 Cr-1 Mo) ■ SA182 grado F91 (9 Cr-1 Mo-V) ■ SA182 Grado F92 (9 Cr-2 W-V)
Boquillas: ■ acero inoxidable S41000 ■ N07718
Empaquetaduras: ■ N06600/grafito
Pernos: ■ SA193 grado B7, ■ SA193 grado B16, ■ N07718

1. No deben excederse los límites de presión/temperatura indicados en este boletín ni las limitaciones de normas o códigos aplicables.
2. Una función del margen de regulación requerido y la selección de equipos.
3. Consultar a la oficina de ventas de Emerson para conocer otras opciones.
4. Clasificación intermedia superior a CL2500 disponible a pedido. Clasificaciones PN también disponibles según los requisitos de presión de EN1092-1. Consultar a la oficina de ventas de Emerson para obtener más información.

Figura 1. Enfriador Fisher TBX-T

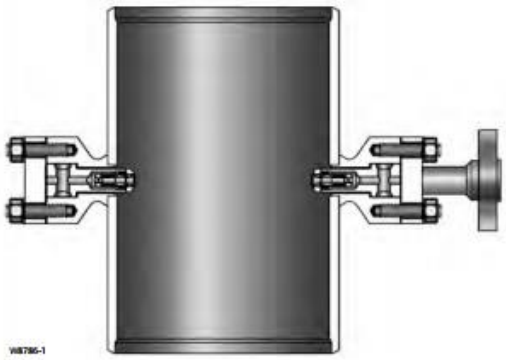


Figura 2. Atemperador Fisher TBX-T con revestimiento opcional

Principio de funcionamiento

Para alcanzar el uso más eficiente de energía térmica basada en vapor, debe reducirse la temperatura del vapor casi hasta la temperatura de saturación. Con el vapor a la temperatura de saturación o cerca de ella, es posible recuperar la gran cantidad de energía que se consumió en el vapor cuando pasó de agua a vapor al calentarse. La atemperación se usa mayormente para lo siguiente • mejorar la eficiencia térmica de los procesos de transferencia de calor al usar vapor cerca del punto de saturación, • controlar el sobrecalentamiento no intencional por la reducción de la presión del vapor, y • proteger tuberías y equipos aguas abajo contra temperaturas y presiones elevadas.

En el atemperador TBX-T, el agua de rocío se suministra al distribuidor y se distribuye a las boquillas. Estas boquillas se colocan estratégicamente para lograr una combinación óptima y una vaporización rápida en todas las condiciones de flujo. El atemperador TBX-T se puede configurar con una válvula de reducción de presión (PRV) inmediatamente aguas arriba, con un difusor integrado o como un dispositivo independiente. Las dimensiones dependen de los requisitos de diseño. Consultar a la oficina de ventas de Emerson acerca de las condiciones de servicio para obtener las dimensiones.

Figura 3. Atemperador Fisher TBX-T

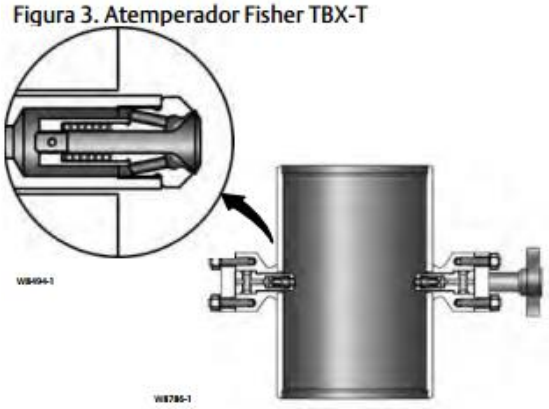


Figura 4. Detalle de la boquilla de rocío

Información para pedidos

Use el diagrama de flujo incluido en la figura 5 para seleccionar el atemperador adecuado para sus requisitos.

Al hacer pedidos, especificar la siguiente información. Los artículos 1 a 5 se requieren para el dimensionamiento de atemperadores.

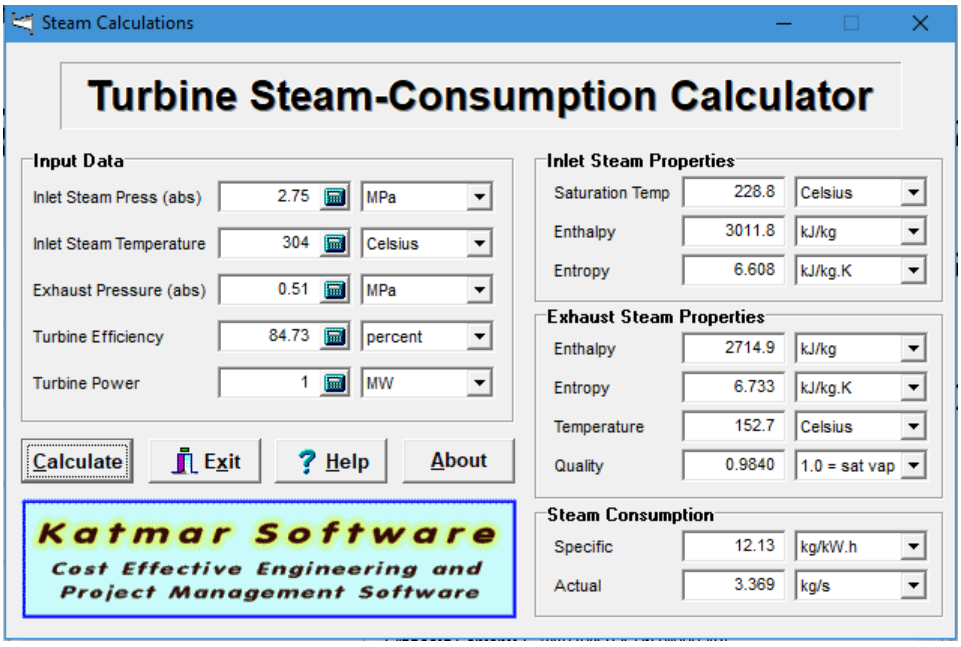
1. Caudal de vapor máximo, normal y mínimo.

2. Presión y temperatura del vapor en la entrada y la salida.

3. Presión y temperatura del agua de rocío.

4. Condiciones de diseño, si son diferentes de las operativas.

5. Tamaño de la línea de vapor.

6. Tamaño, tipo y valor nominal de la conexión de vapor del atemperador.

Anexo 5. Reporte del software Steam – Consumption Calculator para turbogenerador adicional.