



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA TERMODINÁMICO PARA LA  
REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EN UNA INDUSTRIA  
PAPELERA, ASOCIADO AL CONSUMO DE  
COMBUSTIBLE”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**

**PRESENTA**

**I.I. MAYRA HARUMI BELLO GUADARRAMA**

**Director: Dr. Rosenberg J. Romero Domínguez**

**Cuernavaca, Morelos a 15 de Febrero, 2021**

Cuernavaca, Morelos, a 09 de noviembre de 2020

**DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ**  
**COORDINADOR DEL POSGRADO EN**  
**SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: “**Diseño de un sistema termodinámico para la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en una industria papelera, asociado al consumo de combustible**” que presenta la alumna **Mayra Harumi Bello Guadarrama**, para obtener el título de la **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. ANTONIO RODRÍGUEZ MARTÍNEZ		
DR. JESÚS CEREZO ROMÁN		
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN		
DR. JONATHAN IBARRA BAHENA (IMTA)		
DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ		

**PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)**

**NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**JONATHAN IBARRA BAHENA | Fecha:2021-01-28 17:41:14 | Firmante**

ENcunFFD41JRbIKCH8jW9p7ukLBvR4iZUReTRAYzAcx7sI0E5zqiLsbx8oX3MjwA7DLWAYx6yYLBXE2P43kH69/zpmOlgY6xpyl0gSpIAZOnxULQ+Eimalo7CztYZq0Qp53vZzEs  
QeuDqOCYMx7VDQ6NEQvgc7BDg5Np2Z3LgBU/mCa+1Xz8FH/79nb/a/07dj6yI8ihk1bC4zZrruGB+Rb4L/1J7km9LkSeQsO4SV33C+mM+SX1LoRo0+q91T7/aNWWW/romWJfr  
8ILZQiZpFTG7t50PWJsnDq0sjhNZqiqLzo9V+6ZNFcm6YhhJtANU41e1tLgBnEODGJdanN3tA==

**JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON | Fecha:2021-01-28 21:49:30 | Firmante**

iT54BJKZVKOORhr56X+wRGdnNFgx8jtfpDU0pU6FFomKaQdO/bHbpgV3GzGhKgy6Tb6yuBIO4o74YZqiVF/7H0Vd8MBS6zMNtZukda7HGDRiucfYM6DBS5RjCfHFxWYU4Fp1E  
TDCv0foK3vMlwyrbGofF8XTZc6uknSdCzo3skyZPCGmfznjajMBxbPb1uEbG2g5PrjNGO8ipml/wD9+ns1Xqje3TakG4G2XOeL4vgV9paGM60La7F7y1stT71Ar9nD0NCCeXsBo0vt  
BO8pb+bKx11eqShrz+U0FIAPA04+heAG8QOaypLcesdYHARDMvps0YWc1iaHChkCMoWvg==

**ANTONIO RODRIGUEZ MARTINEZ | Fecha:2021-01-29 03:08:13 | Firmante**

x03wscn0NyOnwb12pbpRPuW5pyn7TGmpHjAwSp6Egimr5ws8uMRbtASWDwrm+glGtYr+Wic/5FVuoMdpXOwiW2PxywHZYmvV3LrqrjQromw4y3t6CGe5ZoAOGNxpzV839  
ccpGc/ndI/Pe0v2r+nX/12ehvAJnsZGzHeAe/hglPit/uUF39uLzSxDTBzAaBq/CEBlr0oc2s3CzVBByxBRgqoCF5wLqb68T2Z+rDUxi5DujWMBPazRtPH9HYMY91tQ/3dan+NITC5A  
gC9sBwzhYDQw/lrApfyKVG+Vom72GHxE+mLcT5J0DFWusXHfQww5FGcVSxtiwS1HsH+XQ==

**ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMINGUEZ | Fecha:2021-01-29 16:20:24 | Firmante**

SSD1hE/Q9RCxcDB75+c3SOxzL0OP6YwKpBtFwTEz5DKIa+1m6Oz30sh7mnMI/G7I7jgXpC9rshnBm7QrmBSINVLHY++HuVgAShg6Px6AGU3B9bgmpXksu1mWqwdglnEY65  
14kOKdA1v5WiOss2QOadnqn1MBK+/1a70UgqYqp74cyVDDtgZ5shf1ah2fqk6SI2rwlAYNdpW41wYpFO2q6m4oq91FJ5RxFlyMeGAgEgupILVZI9TzQjXEtZmOsrGEUPmt7Vbaz  
UIRWzPTAQU6m4UAvBh8//yJtdgCNaw8H892h1xWqZ6revevMTe34ynf4wNHZkI8ESJTOerQDFa==

**JESUS CEREZO ROMAN | Fecha:2021-02-02 11:38:59 | Firmante**

4vxcSC2xW9pZnTz8Ds2q3XGvnXjuv6a/I5Sgl9ORrvU37EU7DtWC0OXFKyIaenNMba0I6BLpM+n8wY9axN7LjBZQvvrpaGfU4jZu/CfvZSoCwXQW27TnqInhRc1qmb21ZtSvZCT4h  
YGjFYvTf5RSz56Xg23xj9BMhPJBz7dcXhrZmidYSqoJBjYVtb11lhbEBhlaPuaDZTNpaYdtUjSDwa0VslAVBO+1GwUgswNwrNQLdUo4ZtMv9pt6VUdMleR01F1tnDVvujb6/Q/sG+Z  
wfDce4HlyAZHmVaPw40e//4PbUNTpw2ChFvHLHVf5FTn7hxw9BR8PNmkf27PPPvV1g==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



CUx2PK

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/Lv7Zu5ZhWTPPI3p9L30hFOSmGISQG0x0>





## RESUMEN

Las emisiones de gases de efecto invernadero han tenido una tendencia de crecimiento en los últimos años, siendo este un problema mundialmente generalizado por el impacto que tiene en el medio ambiente y sociedad. En México, la industria papelera ocupa un lugar importante en el consumo de energías provenientes de fuentes fósiles, las cuales son generadoras de CO<sub>2</sub>. Esta industria lleva a cabo múltiples procesos térmicos de transferencia de calor y masa en forma cotidiana, la inclusión de un ciclo termodinámico sustentable puede ser una opción para la recuperación de calor y recursos en términos económicos en dichos procesos esto mediante la recuperación de la energía térmica del mismo.

La presente tesis describe un caso de estudio donde se propone la inclusión de un transformador térmico de una etapa en el proceso de secado de cartón corrugado de la empresa UNIPAK S.A. de S.V, en el cual se realiza la simulación en dos softwares distintos, tomando como datos de entrada temperaturas reales tomadas en la planta corrugadora de papel y utilizando una mezcla de LiBr - agua, obteniendo coeficientes de operación internos (COP por las siglas en ingles de Coefficient of Performance) máximo de 0.48 para la temperatura de recuperación a 85°C y un valor de 0.47 para temperaturas de recuperación de 108°C, la cual es posible reutilizarla en procesos cercanos a este como lo es el proceso de pegado en la corrugadora de papel.

Finalmente, se calculó el ahorro de energía en kW que resulta de la inclusión del transformador térmico por absorción en la industria papelera (1.88 kW), se calculó posteriormente el total de combustible ahorrado por la industria por cada 1.88 kW generados en el absorbedor ( $4.92 \times 10^{-5}$  litros de Diesel por segundo), utilizando el factor de emisión por combustible se concluye que el transformador térmico por absorción provocaría que la empresa UNIPAK S.A. DE C.V. dejará de generar 3.8 ton de CO<sub>2</sub> anuales.



## ABSTRACT

Greenhouse gas emissions have had a growing trend in recent years, this being a widespread problem worldwide due to the impact it has on the environment and society. In Mexico, the paper industry occupies an important place in the consumption of energy from fossil sources, which are CO<sub>2</sub> generators. This industry carries out multiple thermal heat and mass transfer processes on a daily basis, the inclusion of a sustainable thermodynamic cycle may be an option for the recovery of heat and economic resources in these processes, this through the recovery of thermal energy from the same.

This thesis describes a case study where the inclusion of a one-stage Absorption Heat Transformer is proposed in the corrugated cardboard drying process of the company UNIPAK S.A. of SV, in which the simulation is carried out in two different software, using the real operating temperatures measured in the cardboard corrugating plant and an AHT which used the LiBr-Water mixture, the calculated internal COP was a maximum of 0.48 for the recovery temperature at 85 ° C and a value of 0.47 for recovery temperatures of 108 ° C, which can be reused in processes close to this, such as the gluing process in the paper corrugator.

Finally, the saving energy in kW resulting from the inclusion of the absorption thermal transformer in the paper industry was calculated (1.88 kW), the total fuel saved by the industry was subsequently calculated for each 1.88 kW generated in the absorber ( $4.92 \times 10^{-5}$  liters of Diesel per second), using the fuel emission factor we conclude that the absorption thermal transformer would cause the company UNIPAK SA DE C.V. will stop generating 3.8 tons of CO<sub>2</sub> per year.



## AGRADECIMIENTOS

Al **Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas** por permitirme realizar mis estudios de Maestría en sus instalaciones.

Al Dr. **Rosenberg Javier Romero Domínguez** por permitirme realizar mi trabajo de investigación bajo su dirección y por la confianza brindada para realizar este proyecto.

Al honorable comité revisor: Dr. **Antonio Rodríguez Martínez**, Dr. **Jesús Cerezo Román**, Dr. **Juan Carlos García Castrejón** y Dr. **Jonathan Ibarra Bahena** por el tiempo dedicado, por su apoyo y por sus consejos que enriquecieron este trabajo de investigación.

Al **CONACYT** por el apoyo económico y por darme la oportunidad de continuar con mi formación profesional.

A la Empresa **UNIPAK S.A. de C.V.** especialmente al I.I. **Víctor Ruiz** por facilitar la medición de los datos de estudio para la simulación.

A la Mtra. **Merle García** por su apoyo y amistad brindadas durante este trabajo de investigación.

A mis compañeros y amigos durante esta estancia **Tiare Robles**, **Diocelina Toledo** y **Brenda Rivas** por su amistad, apoyo y animo que me brindaron para hacer posible este trabajo.



## **DEDICATORIA**

### **A MIS PADRES**

**Isabel Guadarrama y Jesús Bello**

Por su amor, dedicación y apoyo para que yo pudiera realizar esta meta de vida.

### **A MI HERMANA**

**Arisbeth Bello**

Por su apoyo incondicional y la confianza depositada en todo momento.

### **A MI FAMILIA**

Tíos y primos por todo su apoyo y confianza invertida en mí.

### **AMIGOS INCONDICIONALES**

Karen Q, Karen O, Vane T, Magda O, Erika C, Juan B por su amistad, compañía y apoyo durante esta etapa.



## Contenido

LISTA DE TABLAS.....	3
LISTA DE FIGURAS.....	4
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Calentamiento global y CO <sub>2</sub> .....	6
1.2 Consumos energéticos y CO <sub>2</sub> en el mundo.....	8
1.3 Consumo energético por tipo en México.....	9
1.4 Fabricación de pulpa, papel y cartón.....	15
1.5 Energías renovables y la industria Papelera en México.....	17
Justificación.....	18
Hipótesis.....	19
Objetivo General.....	19
Objetivos particulares.....	19
CAPÍTULO 2. BOMBAS DE CALOR Y LA INDUSTRIA PAPELERA.....	20
2.1 Introducción.....	20
2.2 Definición de ciclos termodinámicos.....	20
2.3 Bombas de Calor.....	20
2.4 Clasificación de bombas de calor.....	21
2.5 Mezclas de trabajo.....	25
2.6 Características de la industria papelera.....	26
2.7 Unidad funcional.....	31
CAPÍTULO 3. MODELO TERMODINÁMICO PARA UN TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA.....	34
3.1 Introducción.....	34
3.2 Consideraciones.....	34
CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN DE PROCESOS CON MODELOS MATEMÁTICOS ..	39
4.1 Introducción.....	39
4.2 Análisis de grados de libertad.....	39
4.4 Simulación en softwares.....	41
4.6 Curvas de rendimiento.....	44





CAPÍTULO 5. DISEÑO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA TERMODINÁMICO POR ABSORCIÓN. ....	46
5.1 Diseño conceptual del generador .....	46
5.2 Diseño conceptual de evaporador .....	47
5.3 Diseño termodinámico del condensador.....	47
5.4 Diseño conceptual del absorbedor .....	48
CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DEL TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN EN EL PROCESO DE SECADO DE CORRUGADO EN LA INDUSTRIA PAPELERA. ....	49
6.1 Introducción .....	49
6.2 características del doble engomador.....	50
6.3 Consumo energético del doble engomador .....	52
6.4 Cálculo de emisiones asociadas de CO <sub>2</sub> de acuerdo con el consumo de combustible. ....	53
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	58
7.1 Conclusiones .....	58
7.2 Recomendaciones.....	59
REFERENCIAS .....	60
ANEXO I. Publicaciones en Congresos .....	64



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Consumo de energía en el sector industrial por energético (PJ), 2016 .....	13
<b>Tabla 1.2</b> Consumo de energía en la fabricación de pulpa, papel y cartón en México .....	16
<b>Tabla 4.1</b> Recuento de las variables dependientes del modelo matemático de un transformador térmico por absorción .....	40
<b>Tabla 4.2</b> Recuento de variables independientes del modelo matemático de un transformador térmico por absorción .....	40
<b>Tabla 4.3</b> Valores de las variables obtenidas con software EES .....	41
<b>Tabla 4.4</b> Valores de las variables obtenidas con software MatLab .....	42
<b>Tabla 4.5</b> Resultados de las variables para la simulación del transformador térmico por absorción .....	43
<b>Tabla 5.1</b> Valores de potencia (kW) requeridos para cada uno de los componentes del sistema termodinámico por absorción .....	46
<b>Tabla 6.1</b> Conversión de masa a energía según tipo de combustible .....	55
<b>Tabla 6.2</b> Emisión asociada a cada tipo de combustible .....	56



## LISTA DE FIGURAS.

Figura 1.1 Emisiones de CO <sub>2</sub> a la atmósfera .....	07
Figura 1.2 Consumo de energía primaria 2016 de acuerdo con BP Statistical Review Of World Energy 2018 .....	09
Figura 1.3 Estructura del consumo final total por tipo de energético, 2016 .....	10
Figura 1.4 Consumo final energético por sector y energético en México, 2016. Fuente: Sistema de Información Energética .....	11
Figura 1.5 Consumo energético de las principales ramas industriales en México (PJ), 2016 .....	14
Figura 1.6 Integración de producción de pasta-papel-energía y las fuentes de CO <sub>2</sub> .....	16
Figura 2.1 Diagrama general de una bomba de calor por absorción tipo I .....	23
Figura 2.2 Diagrama general de una bomba de calor por absorción tipo II .....	25
Figura 2.3. Fotografía termográfica de la zona de elaboración de pegamento .....	27
Figura 2.4. Fotografía termográfica de la zona de precalentamiento de papeles .....	28
Figura 2.5. Diagrama esquemático del funcionamiento de los precalentadores .....	28
Figura 2.6. Diagrama esquemático del doble engomador .....	29
Figura 2.7. Fotografía termográfica de la zona de doble engomador .....	29



Figura 2.8. Diagrama esquemático de una mesa de secado .....	30
Figura 2.9. Fotografía termográfica de la zona de mesa de secado .....	30
Figura 2.10. Fotografía termográfica de la zona de descarga .....	31
Figura 2.11 Fotografía termográfica de la zona seleccionada (mesa de secado) .....	32
Figura 2.12 Zona real de mesa de secado .....	32
Figura 2.13 Diagrama esquemático del doble engomador y mesa de secado .....	33
Figura 4.1. Comportamiento del COP en función del intervalo de temperaturas del Absorbedor .....	44
Figura 4.2. Comportamiento del COP en función de la Potencia del absorbedor .....	45
Figura 5.1 Resultados de la simulación de la transferencia de calor en el condensador .....	48
Figura 6.1 Diagrama esquemático del doble engomador .....	50
Figura 6.2 Diagrama de componentes y funcionamiento del doble engomador .....	52



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Calentamiento global y CO<sub>2</sub>.

Desde hace algunas décadas, el calentamiento global ha sido un tema de investigación y discusión tratando de buscar diversas explicaciones naturales a este fenómeno, este tema ha ido evolucionando debido a desarrollo de nuevas tecnologías, así como a una mayor comprensión del fenómeno. En 1979, la Primera Conferencia Mundial sobre el Clima, expreso la preocupación de que “[...] la continua expansión de las actividades humanas en la tierra pueda causar cambios climáticos significantes en regiones extensas e incluso globalmente” [1]. Derivado de esta conferencia, siguieron otras las cuales crearon el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) mostrando el interés y la preocupación por este tema.

Algunos acontecimientos puntuales y significativos que dieron paso a la implementación de quehaceres políticos mundiales fueron “La conferencia de Medio Ambiente y Desarrollo” en 1992, el “Protocolo de Kioto” en 1997, y la “13ª Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático “ en 2007; en los cuales se discutieron las consecuencias en del calentamiento global en cuanto al cambio climático, teniendo el conocimiento de que la temperatura media del planeta se ha ido incrementando conforme pasan los años.

La medición rutinaria de la temperatura atmosférica ha permitido llegar a la conclusión de que el calentamiento global ha ido de la mano con una tendencia hacia el incremento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, lo que crea la teoría, mundialmente generalizada, de que el calentamiento global es provocado por las emisiones de CO<sub>2</sub>, o bien, es una intensificación del efecto invernadero.

Esta teoría se basa en que el calentamiento gradual del planeta es debido a la retención en la atmósfera de energía que la tierra emite tras ser

recalentada por la radiación solar. Esta retención es causada por los gases de efecto invernadero, CO<sub>2</sub> y metano, producidos por el hombre, principalmente por la actividad industrial.

Las emisiones de los gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ha ido aumento en los últimos años. En la Figura 1.1 se observa el aumento que ha tenido las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera hasta el año 2014.

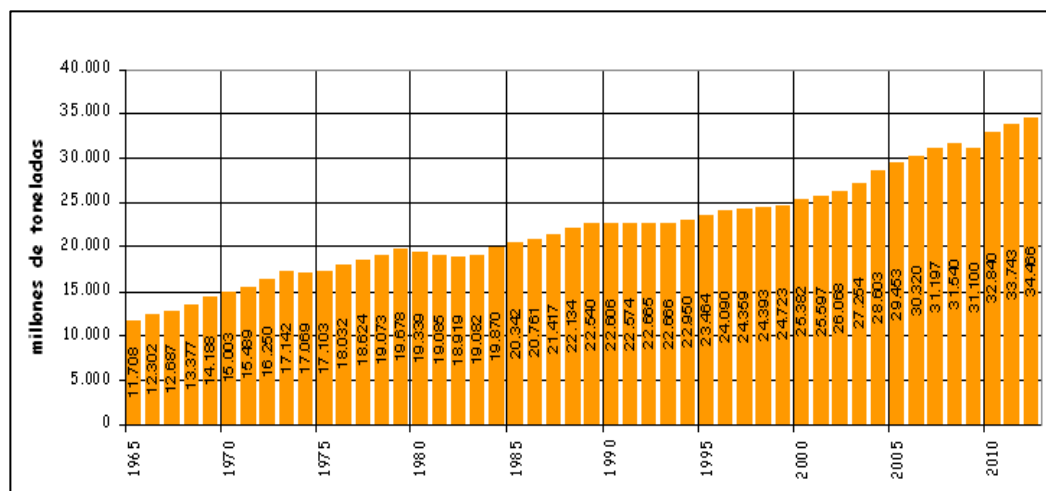


Figura 1.1 Emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Fuente: BP Statistical Review Of World Energy 2018.

En un contexto actual, las emisiones de carbono del consumo de energía aumentaron un 1.6%, para el año 2017 [2].

### 1.1.1 Relación de la industria con las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El calentamiento global es causado antropogénicamente, es decir, es causado por actividades propias del ser humano, esto lo podemos relacionar directamente a que el ser humano es productor de CO<sub>2</sub> de muchas formas. El IPCC concluye que la mayor cuota del aumento de la



temperatura global desde la segunda parte del siglo XX se debe “[...] muy probablemente al incremento antropogénico de la concentración de gases de efecto invernadero” [3].

Desde el inicio de la era industrial, el consumo de combustibles fósiles se ha incrementado constantemente, pero en las últimas décadas el incremento ha sido más pronunciado. Estas emisiones provienen principalmente de tres fuentes:

- a) La producción de energía por combustión de carbón.
- b) Industria del cemento.
- c) Combustión de los gases excedentes de la extracción y refinación del
- d) Petróleo.

La producción de energía por combustión de carbón es principalmente utilizada por la industria para sus distintos procesos de transformación.

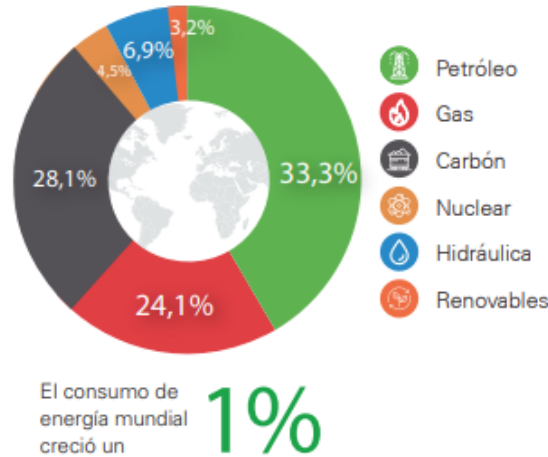
## 1.2 Consumos energéticos y CO<sub>2</sub> en el mundo.

Actualmente el mundo se enfrenta al reto de combatir el cambio climático, de ahí que es papel fundamental del sector energético en el desarrollo económico global y social, es por esto por lo que es necesario cambiar la forma en que se produce y se consume energía para garantizar un futuro más sustentable con bajas emisiones de carbono.

La situación actual exige cambiar la forma en que se produce y consume la energía y al mismo tiempo satisfacer las necesidades energéticas por medio del uso racional de los recursos y las tecnologías.

Los indicadores energéticos muestran que las energías derivadas de combustibles fósiles son las más utilizadas mundialmente. La Figura 1.2 muestra que en el 2016 la principal fuente de energía primaria consumida fue el petróleo con 33.3% con un aumento del 1.6% con respecto al 2015, seguido por el carbón 28.1% con una disminución del 1.7% respecto al 2015 y el gas natural 24.1% el cual tuvo un aumento de 1.5% en estos años [2].

Consumo de energía primaria 2016



Consumo en el mundo 2016 vs 2015



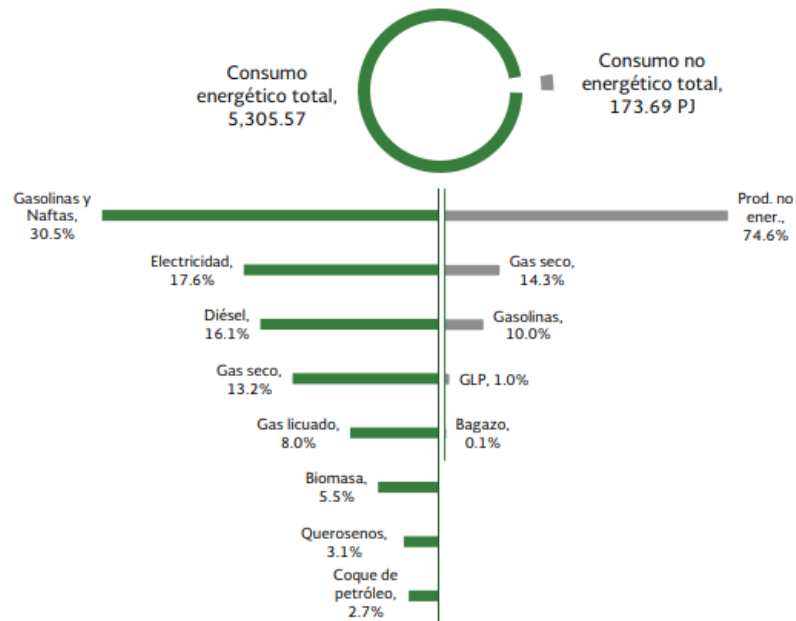
Figura 1.2 Consumo de energía primaria 2016  
Fuente: BP Statistical Review Of World Energy 2018.

El uso de combustibles fósiles es cuestionado por la producción de CO<sub>2</sub> que se emite a la atmósfera, lo que contribuye a la acumulación de GEI que es uno de los impulsores del cambio climático.

### 1.3 Consumo energético por tipo en México.

El consumo total energético se define como la energía destinada a la combustión de procesos y actividades económicas, así como la satisfacción de necesidades energéticas en la sociedad [4], en México tuvo un incremento del 3.70% en el 2016, con 5,479.26 PJ; de estos el 3.71% fue destinado a consumos no energéticos total, que son todos aquellos productos derivados del petróleo para la producción de diferentes bienes como lo es el asfalto, lubricantes, parafinas, gas seco, gasolinas y naftas. Por otra parte, el consumo energético total, que es la energía destinada a la combustión en los procesos y actividades energéticas en la sociedad, representó el 96.83% del consumo final (Figura 1.3).





\*Incluye carbón, coque de carbón, combustóleo y energía solar.

Figura 1.3 Estructura del consumo final total por tipo de energético, 2016.

Fuente: Sistema de Información Energética.

En el año 2016 las energías derivadas de combustibles fósiles fueron las de mayor consumo energético total, siendo la gasolina y las naftas las de mayor consumo con un 30.5% del total, el Diesel y gas seco ocuparon el 3er y 4º lugar respectivamente.

México se ha comprometido ante el secretariado de la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) para reducir en 25% la emisión de gases y compuestos de efecto invernadero en el período 2020-2030, en consonancia con su Ley General de Cambio Climático y para lo que la eficiencia energética podría jugar un papel primordial [5].

### 1.3.1 Consumo energético total por sectores.

El consumo energético es dividido por la Secretaría de Energía en 4 sectores principales, el de transporte, que es el sector más intensivo en uso de energía, ocupando un 46.8% del consumo total [6]; el industrial, ocupando el 31.7%; residencial, comercial y público con 18.1% y el agropecuario siendo el de menor consumo con 3.4%, como lo muestra la Figura 1.4.

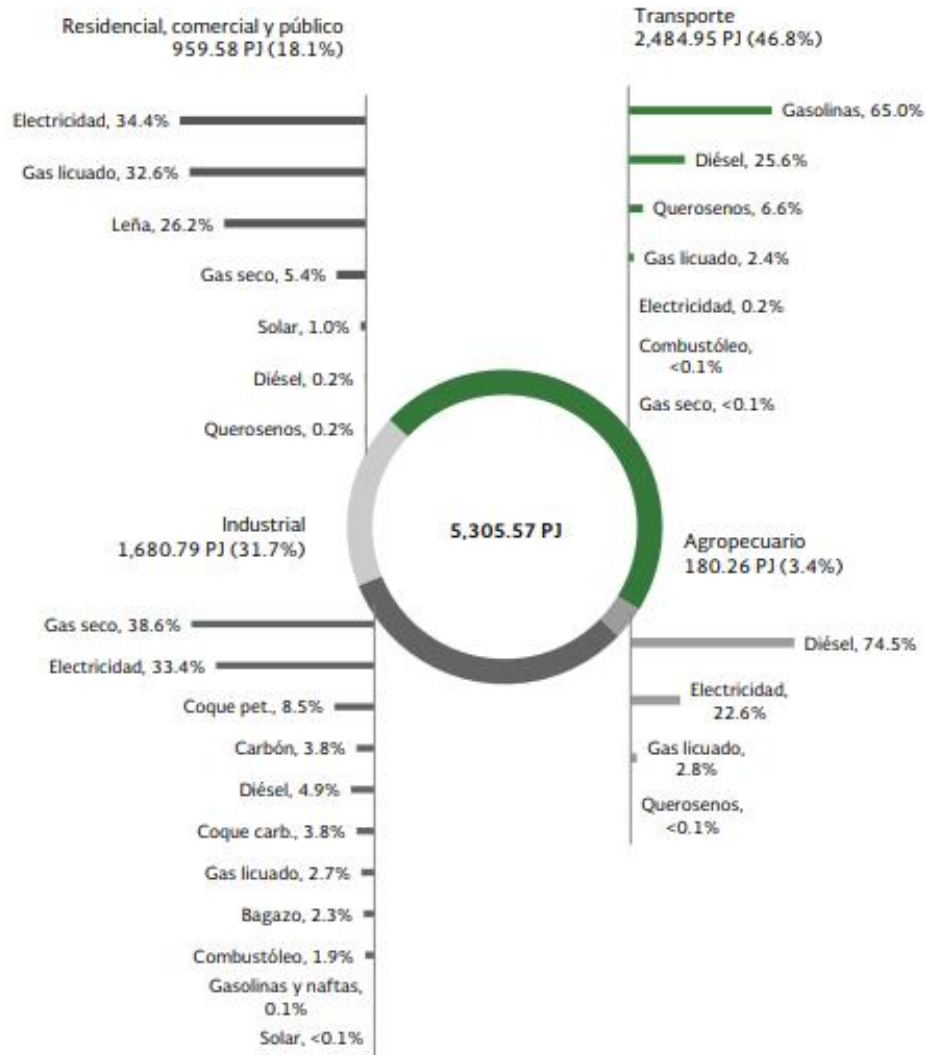


Figura 1.4 Consumo final energético por sector y energético en México, 2016

Fuente: Sistema de Información Energética.

### 1.3.2 Consumo de energía del sector industrial en México.

El sector industrial se refiere a la fabricación de bienes y productos acabados, como se indica bajo “industrias manufactureras” en las Recomendaciones Internacionales sobre Estadísticas Energéticas de las Naciones Unidas [6]. El término industria excluye la generación de energía, las refinerías y la distribución de electricidad, gas y agua, así como la extracción de materias primas y la construcción.

Los subsectores industriales que se consideran para indicadores energéticos son: Hierro y acero; química y petroquímica; metales no ferrosos; minerales no metálicos; equipos de transporte (fabricación de vehículos motorizados, remolques y semirremolques, buques, aeronaves, etc.); maquinaria; alimentos y tabaco; papel y pulpa; madera y derivados; textiles y cuero; y otras industrias no especificadas de otra forma.

En México, el sector industrial es el segundo mayor consumidor de energía, en el 2016 alcanzó 31.7% del consumo energético total [6], teniendo un crecimiento de 4.9% con respecto al año anterior con un total de 1,680.79 PJ.

El combustible más utilizado en la industria en el año 2016 fue el gas seco, el cual aportó un 38.6% del consumo del sector, el cual tuvo un incremento del 6.5% con respecto al año anterior como lo muestra la Tabla 1.1.

*Tabla 1.1 Consumo de energía en el sector industrial por energético (PJ), 2016.*

	2015	2016	Variación porcentual (%) 2016/2015	Estructura porcentual (%) 2016
<b>Total</b>	<b>1,601.84</b>	<b>1,680.79</b>	<b>4.93</b>	<b>100.00</b>
Energía solar	0.50	0.62	23.56	0.04
Bagazo de caña	37.15	38.28	3.03	2.28
Carbón	84.58	63.76	-24.61	3.79
Coque total	191.08	205.65	7.63	12.24
Coque de carbón	58.64	63.52	8.32	3.78
Coque de petróleo	132.44	142.14	7.32	8.46
Total de petrolíferos	139.94	163.09	16.54	9.70
Gas licuado	42.26	46.21	9.34	2.75
Gasolinas y naftas	0.99	1.15	15.84	0.07
Querosenos	0.00	0.00	0.00	0.00
Diésel	74.63	83.16	11.43	4.95
Combustóleo	22.05	32.57	47.68	1.94
Gas seco	608.62	647.99	6.47	38.55
Electricidad	539.97	561.40	3.97	33.40

Fuente: Sistema de Información Energética, Sener.



Las ramas de la industria que más consumieron energía en México en el año 2016 fueron principalmente la rama básica del hierro y del acero, representando un 14.4% del consumo industrial, seguida por la industria de fabricación de cemento y productos a base de cemento con una participación del 10.92% como lo muestra los flujos del Balance Nacional de Energía en el gráfico de la Figura 1.5.

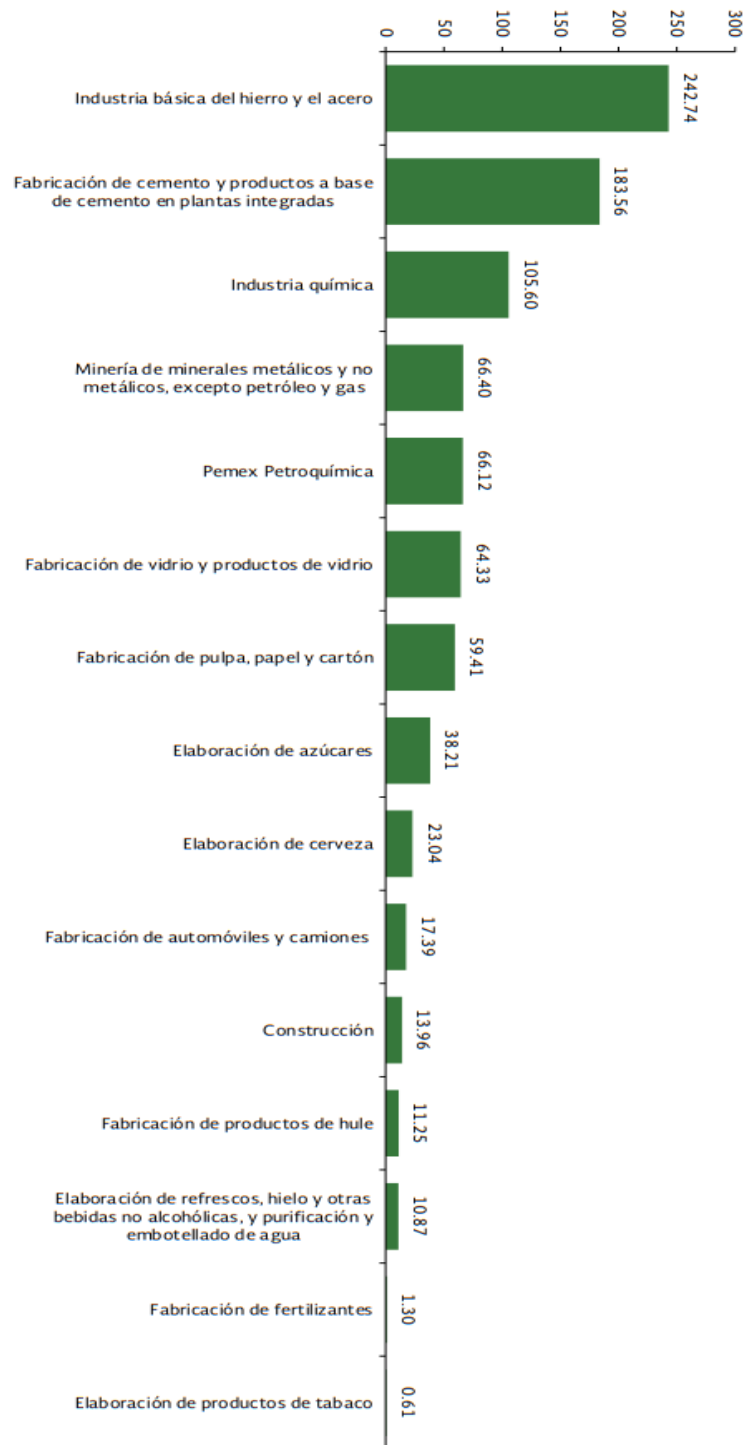


Figura 1.5 Consumo energético de las principales ramas industriales en México (PJ), 2016

Fuente: Balance Nacional de Energía, 2016.



La fabricación de pulpa, papel y cartón ocupa el 7º lugar de consumo energético en México con un total de 59.41 PJ.

Se pensaba que, con el uso del internet, el consumo de papel disminuiría, pero por lo contrario este consumo se ha incrementado. Hoy en día no se requiere la intervención de especialistas para poder imprimir, el consumo de papel sigue aumentando y la industria papelera demanda por mercados nuevos y siempre exigida por los mercados antiguos, debe tener la capacidad productiva para proveer estas necesidades [7]. Esta tendencia marca que el consumo de energía por la industria papelera seguirá en aumentó.

#### **1.4 Fabricación de pulpa, papel y cartón.**

Se considera como fabricación de pulpa, papel y cartón a la serie de procesos como la producción química o mecánica de la pulpa, y el reciclaje y la fabricación de papel y cartón.

El papel es una hoja de fibras a la que por medio de procesos mecánicos y químicos se añaden varias sustancias químicas para modificar sus propiedades y su calidad, la fabricación de papel requiere grandes cantidades de agua y energía en forma de vapor y electricidad.

La pulpa papelera es el resultado del escurrido y prensado de láminas de una suspensión de agua de fibras de celulosa, obtenida por procedimientos mecánicos, semi químicos o químicos.

Este subsector industrial, tiene como principal fuente de energía el gas seco como lo muestra la Tabla 1.2, donde se describe el consumo de energía en este sector.

Tabla 1.2. Consumo de energía en la fabricación de pulpa, papel y cartón en México. Fuente: Balance Nacional de Energía, 2016.

Fabricación de pulpa, papel y cartón											
Total	48.20	45.96	46.42	47.03	42.82	42.72	44.74	49.82	44.36	49.94	59.41
Bagazo de caña	0.23	0.24	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total de petrolíferos	12.44	13.74	12.86	12.66	9.62	7.39	5.81	6.86	2.81	7.07	12.06
Gas licuado	0.38	0.45	0.48	0.47	0.45	0.44	0.40	0.41	0.42	0.43	0.45
Diesel	1.22	1.34	1.48	1.31	1.23	1.14	0.39	1.29	1.33	1.37	1.43
Combustóleo	10.84	11.95	10.90	10.88	7.94	5.81	5.02	5.16	1.07	5.27	10.19
Gas seco	25.21	22.64	24.29	24.21	23.55	25.73	28.90	32.66	30.97	31.97	35.42
Electricidad	10.32	9.34	9.03	10.16	9.65	9.60	10.03	10.30	10.58	10.90	11.93

La industria papelera utiliza fuentes de energía provenientes de combustibles fósiles como lo muestra la Figura 1.6, los cuales generan significativamente emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta energía se utiliza en tres vertientes principales: producción de energía (electricidad y calor) para los procesos de producción dentro de la propia planta, compras de energía (electricidad) y usos de combustibles para la producción de calor en el proceso [8].

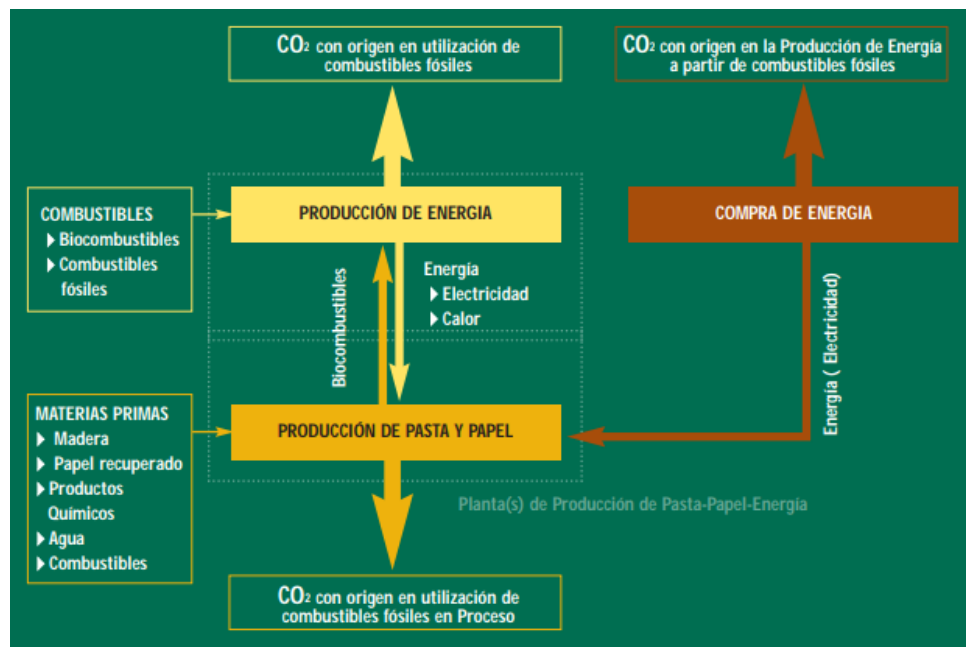


Figura 1.6 Integración de producción de pasta-papel-energía y las fuentes de CO<sub>2</sub>. Fuente: Diagnostico de la industria en México, SENER.



### 1.5 Energías renovables y la industria Papelera en México.

El sector del papel es una industria sumamente diversificada por la cantidad de productos que se fabrican actualmente, tanto para mercado interno como para la exportación. En México existen un total de 68 empresas productoras de celulosa y de papel. De estas 68 empresas mexicanas, 54 se dedican a la producción específica del papel, 10 de ellas a la producción de celulosa y papel, y 4 a la producción única de celulosa, generando más de 65,000 empleos directos y 235,000 indirectos de acuerdo con la Cámara Nacional de la Celulosa y del Papel (CNICP).

El uso de la energía en la industria de la celulosa y papel se puede distribuir de acuerdo con los procesos que estén integrados. La producción de celulosa o pasta puede provenir tanto de un proceso químico, de un proceso mecánico o de una combinación de ambos, incluyendo un proceso de reciclado de papel si es el caso; para el caso de la producción de papel está basada en procesos mecánicos o químicos ya que en estos se prepara la pulpa para posteriormente formar la lámina mediante un proceso de prensado y secado.

Los principales estados productores de papel de acuerdo con la INEGI son: México, Nuevo León, Querétaro, Coahuila, Ciudad de México, Baja California, Jalisco, Chihuahua, Veracruz, Guanajuato, San Luis Potosí, Tlaxcala, Hidalgo y Puebla [9].

La demanda energética de estas industrias requiere del uso de fuentes alternativas viables, como la adopción de tecnologías limpias, energéticamente eficientes y autosostenibles con ventajas económicas. Conforme pasan los años esta demanda energética no puede ser satisfecha tan solo con combustibles fósiles.

En 20 años la producción de papel en México se incrementó 76.6% al pasar de 3,047 a 5,381 miles de toneladas entre 1995 y 2015, esto está con una mayor eficiencia en los procesos productivos derivado de diferentes estrategias seguidas por esta industria [10].





Hasta 2014, México contaba con una capacidad efectiva instalada para la generación de energía eléctrica de 65,452 MW, de los cuáles 16,047 MW provinieron de fuentes renovables de energía (eólica, solar, hidráulica, geotérmica y de biomasa), lo que representa el 24.5% del total de la capacidad instalada. [12]

Actualmente, el país cuenta con 230 centrales en operación y construcción para la generación de energía eléctrica a través de fuentes renovables; Oaxaca y Veracruz son los estados con mayor número de proyectos eólicos y de biomasa, respectivamente.

La capacidad instalada de energías renovables no es suficiente para cubrir el total de la energía requerida en la industria papelera en los próximos años, es por eso que se deben de crear nuevas tecnologías, en especial energías limpias, que nos permitan disminuir la tendencia que se tiene en el consumo energético de esta industria.

### **Justificación**

Actualmente la Industria del Papel está clasificada a nivel internacional como una de las mayores industrias que generan emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, dada la naturaleza de sus actividades, la reforestación, uso y reciclaje. La cantidad de energía que se utiliza en la industria papelera también es un consumo asociado al combustible fósil que podría disminuirse. Esto último hará que el proceso sea sustentable energéticamente.

En el CIICAp se cuenta con software y equipos necesarios para análisis de ciclos termodinámicos, como el Engineering Equation Solver (EES) y el Laboratorio de Ingeniería Térmica Aplicada, por lo que se utilizará esta ventaja académica para proponer un ciclo para las condiciones específicas del proceso y determinar el posible ahorro en consumo de combustible y la consecuente reducción de CO<sub>2</sub>.



## Hipótesis

Es posible satisfacer una parte de la energía solicitada de la industria papelera, específicamente en los procesos térmicos de ésta, por medio de recuperación y revalorización de energía térmica a través de un ciclo de transformador térmico por absorción de una etapa con el propósito de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> e incrementar la sustentabilidad de la industria papelera.

## Objetivo General

Realizar un estudio termodinámico teórico de condiciones reales en el proceso térmico de la industria papelera para determinar el potencial de recuperación térmico en plantas procesadoras de papel, utilizando un ciclo de absorción para evaluar la disminución de contaminantes por la inclusión de esta tecnología.

## Objetivos particulares

- Conocer las condiciones termodinámicas (Potencia térmica y Temperatura) de los procesos térmicos de una industria papelera en México como caso de estudio.
- Definir el fluido termodinámico para los niveles del ciclo por absorción acoplado a uno de los procesos
- de la industria papelera.
- Evaluar el coeficiente de operación del ciclo de absorción en una operación unitaria del proceso de la fabricación del papel.
- Determinar la disminución de contaminantes y su impacto por la inclusión del ciclo de absorción en el proceso térmico de la industria papelera.



## **CAPÍTULO 2. BOMBAS DE CALOR Y LA INDUSTRIA PAPELERA**

### **2.1 Introducción**

Las Industrias del país llevan a cabo procesos de transferencia de calor y masa en forma cotidiana, por lo que la pérdida o el ahorro de la energía en estos procesos tiene impactos económicos, el uso de dispositivos como las bombas de calor puede ser una opción para la recuperación de calor y recursos económicos en dichos procesos [12].

En este capítulo se describe lo que es un ciclo termodinámico, así como el funcionamiento y los tipos de bombas de calor, componentes principales y mezclas utilizadas en los sistemas de absorción.

### **2.2 Definición de ciclos termodinámicos.**

La termodinámica tiene dos áreas importantes de aplicación, las cuales son la generación de potencia y la refrigeración. Ambos objetivos se realizan mediante ciclos termodinámicos.

Un ciclo termodinámico es aquel proceso en que un sistema partiendo de un estado inicial, sufre una serie de transformaciones termodinámicas tras las cuales llega a un estado final que es igual a la inicial.

Los ciclos de refrigeración son aquellos que se usan para producir un efecto de refrigeración a los que se les llama refrigeradores, acondicionadores de aire o bombas de calor.

### **2.3 Bombas de Calor**

Las bombas de calor pueden aplicarse en los procesos industriales ya que permiten utilizar energía térmica de desecho, logrando así una eficiencia en el



consumo energético reduciendo la emisión de contaminantes producidos por la quema de combustibles fósiles.

Se denomina bomba de calor a un grupo de tecnologías que transfieren calor de un nivel de baja temperatura a otro de mayor temperatura [13]. Estos sistemas incluyen sistemas de refrigeración, así como sistemas de calefacción con bomba de calor.

Las bombas de calor pueden operar para calentamiento, enfriamiento, ambos o como transformador térmico. Cuando una bomba de calor tiene la capacidad de extraer calor de un cuerpo o espacio y mantenerlo por debajo de la temperatura ambiente, se dice que opera para enfriamiento. Cuando tiene la capacidad de aprovechar el calor de desecho de procesos industriales o de alguna fuente de energía de un nivel de temperatura menor a otro de mayor temperatura para su utilización, se dice que opera para calentamiento.

En los transformadores térmicos no solo se aprovecha la energía de desecho, además, como resultado se obtiene energía térmica de alta calidad (alta temperatura) [14].

Desde 1911 se concibieron conceptos sobre transformadores térmicos [15], en el año de 1933 se publicaron teorías sobre estos sistemas [16] a partir de los cuales se han realizado estudios hasta estas fechas.

## 2.4 Clasificación de bombas de calor

Las bombas de calor se clasifican por sus niveles térmicos en dos tipos [17]:

- Tipo I. Donde la temperatura del evaporador ( $T_{EV}$ ) es menor a la temperatura del condensador ( $T_{CO}$ ). En esta clasificación se encuentran las bombas de calor por compresión y bombas de calor por absorción.
- Tipo II. Donde la temperatura del evaporador ( $T_{EV}$ ) es mayor a la temperatura del condensador ( $T_{CO}$ ). En esta clasificación se encuentran los transformadores térmicos por absorción.



La eficiencia térmica de una bomba de calor está determinada por el coeficiente de operación, conocido como COP por sus siglas en inglés (Coefficient of Performance). Se define como la relación de la energía útil proporcionada por la bomba dividida por la cantidad de energía de alta calidad suministrada y puede expresarse como:

$$COP_H = \frac{ENERGÍA ÚTIL}{ENERGÍA SUMINISTRADA} \quad (2.1)$$

Las bombas de calor Tipo I se puede emplear para el acondicionamiento de espacios ya sea suministrando energía térmica a una temperatura mayor (calentamiento) o extrayendo energía térmica a una temperatura menor que el medio ambiente (enfriamiento), para lo cual utiliza trabajo suministrado por un compresor (bomba de calor por compresión) o mediante la separación del fluido de trabajo de una sustancia denominada absorbente (bomba de calor por absorción), que se lleva a cabo en componentes adicionales llamados absorbedor y generador [18].

El funcionamiento del ciclo termodinámico de una bomba de calor tipo I de acuerdo a la Figura 2.1 es como sigue: Se suministra energía ( $Q_{GE}$ ) a una temperatura elevada ( $T_{GE}$ ) al generador, en el cual se vaporiza una parte del fluido de trabajo del absorbente. El fluido de trabajo cambia a fase líquida cediendo energía ( $Q_{CO}$ ) al ambiente a una temperatura intermedia ( $T_{CO}$ ); el fluido de trabajo pasa a través de una válvula de expansión que permite el cambio de presión entre los componentes para posteriormente pasar al evaporador (que se encuentra a menor presión que el condensador) donde cambia a fase vapor a una temperatura menor ( $T_{EV}$ ) proveniente de una fuente de calor de desecho ( $Q_{EV}$ ). El vapor generado en el evaporador se conduce al absorbedor en donde se pone en contacto con una corriente concentrada en absorbente proveniente del generador, produciéndose calor ( $Q_{AB}$ ) a una temperatura  $T_{AB}$  (mayor que  $T_{EV}$ ), esta solución (diluida en absorbente) regresa al generador para iniciar nuevamente el ciclo [18].

La Figura 2.1 muestra el diagrama general de una bomba de calor por absorción tipo I.

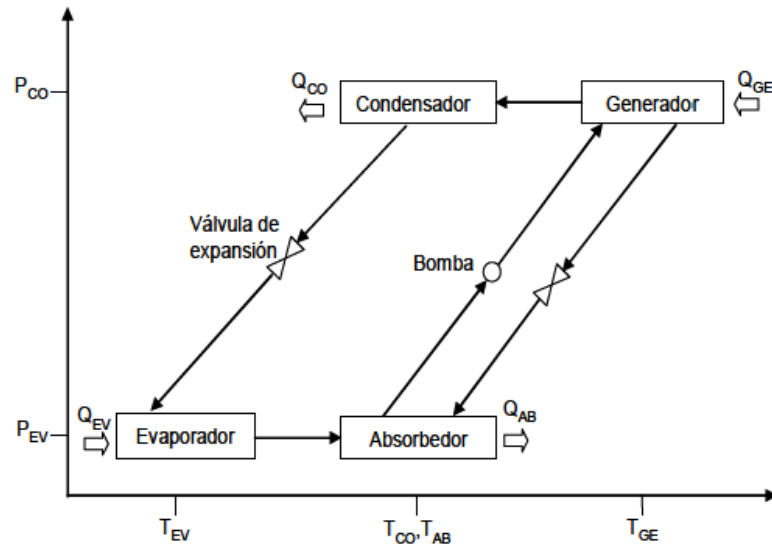


Figura 2.1 Diagrama general de una bomba de calor por absorción tipo I

Fuente: Ibarra, 2011.

El coeficiente de operación para las bombas de calor por absorción tipo I se define de la siguiente manera:

$$COP_C = \frac{Q_{EV}}{Q_{GE}} \quad \text{para enfriamiento} \quad (2.4)$$

$$COP_H = \frac{Q_{AB} + Q_{CO}}{Q_{GE}} \quad \text{para calentamiento} \quad (2.3)$$

Las bombas de calor tipo II, también llamadas transformadores de calor o térmicos es un dispositivo capaz de utilizar calor relativamente a baja temperatura (calor de desecho) para transformarlo mediante un ciclo termodinámico en calor de mayor temperatura, el cual puede reutilizarse en otro proceso productivo. Una de las ventajas de este tipo de bombas es el hecho de que pueden ser utilizadas sin la necesidad de quemar combustibles



fósiles. Los transformadores de calor por absorción pueden ser usados para recuperar hasta un 50% de calor para uso a una temperatura mayor principalmente en procesos industriales donde se lleva a cabo una quema de combustibles fósiles.

El funcionamiento del ciclo termodinámico de una bomba de calor tipo II es como sigue: En el generador se vaporiza parte del fluido de trabajo de la mezcla, debido al suministro de una fuente de calentamiento  $Q_{GE}$  (energía térmica o calor de desecho de un proceso industrial y que por lo tanto no implica un costo) a una temperatura intermedia  $T_{GE}$ , el fluido de trabajo evaporado es enviado al condensador donde cambia de fase al rechazar una cantidad de calor  $Q_{CO}$  (a una temperatura  $T_{CO}$  cercana a los alrededores que no es útil), el condensado resultante es bombeado al evaporador que se encuentra a una presión mayor, donde nuevamente regresa a fase vapor con el mismo suministro y temperatura de calentamiento que el generador (considerando que el sistema se encuentra perfectamente aislado y por lo tanto las pérdidas de calor son despreciables), por lo que  $T_{EV}=T_{GE}$ ; el vapor es enviado al absorbedor donde entra en contacto con la solución concentrada en absorbente proveniente del generador, la absorción del vapor por la mezcla de trabajo provoca una reacción exotérmica liberando calor ( $Q_{AB}$ ) a una temperatura mayor  $T_{AB}$ , la mezcla de trabajo ahora diluida en absorbente es enviada desde el absorbedor al generador, para comenzar nuevamente el ciclo. El economizador tiene como función precalentar la solución que va del generador al absorbedor utilizando la solución con mayor temperatura proveniente del absorbedor incrementando la eficiencia del ciclo.

La Figura 2.2 muestra el diagrama general de una bomba de calor por absorción tipo II.

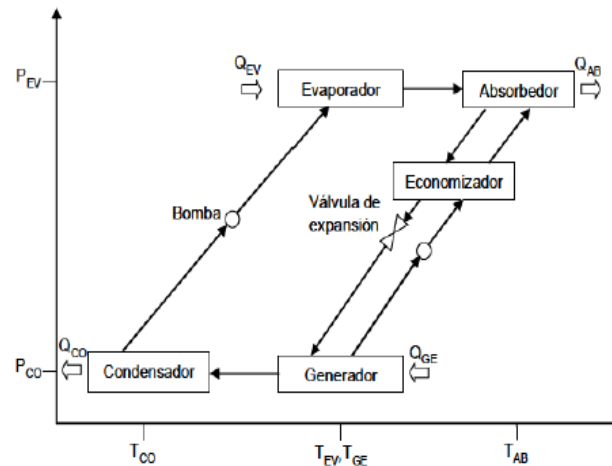


Figura 2.2 Diagrama general de una bomba de calor por absorción tipo II.

Fuente: Ibarra, 2011.

El coeficiente de operación para las bombas de calor por absorción tipo I se define de la siguiente manera:

$$COP_H = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV}} \quad (2.4)$$

Debido a que el trabajo de las bombas es muy pequeño en comparación con la energía intercambiada en el sistema, se consideran insignificantes.

### 2.5 Mezclas de trabajo

Las mezclas de trabajo para la bomba de calor por absorción tipo I y para transformadores térmicos por absorción están compuestas por un fluido de trabajo y un absorbente. La mezcla de fluido de trabajo-absorbente circula en el circuito del generador – economizador – absorbedor, y en condensador y evaporador solamente el fluido de trabajo.

Entre las mezclas de trabajo más comunes se encuentran:

- Amoníaco-agua, donde el amoníaco es el fluido de trabajo y el agua el absorbente. Esta mezcla ha sido utilizada en máquinas por absorción desde finales del siglo XIX.





- Agua- Bromuro de Litio, donde el agua es el fluido de trabajo y el bromuro de litio el absorbente [19]. Es una de las más utilizadas respecto a su costo y características de transferencia de calor y masa. Sin embargo, tiene algunos inconvenientes, como la solubilidad del LiBr en agua, ya que está limitada a un 60% en peso, ya que en concentraciones mayores puede ocurrir cristalización.
- Carrol- Agua, es otra mezcla utilizada experimentalmente en transformadores térmicos por absorción, donde el Carrol es una mezcla de bromuro de litio (LiBr) y etilenglicol [(CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub>] en una proporción de 1:4.5 en peso [12].

## 2.6 Características de la industria papelera.

Para el desarrollo de esta investigación se contó con el apoyo de la empresa UNIPAK S.A. de C.V. la cual nos permitió realizar estudios de temperatura a lo largo de su proceso de corrugado de papel esto para poder tomar decisiones sobre los acoplamientos de las variables dependientes del proceso.

Grupak (UNIPAK S.A. DE C.V.) es una empresa 100% mexicana con gran experiencia en la industria integrada de fibra, papel y cartón corrugado. Dentro de esta industria, el vapor generado por combustibles fósiles juega una parte importante en muchas etapas del proceso de fabricación de papel y corrugado, desde la producción a gran escala de pastas químicas hasta la producción del papel y láminas de cartón corrugado de alta calidad.

Durante la visita realizada se tomaron fotografías termográficas a lo largo del proceso de producción de corrugado, para esta actividad se utilizó una cámara termográfica marca FLIR la cual permitió obtener un perfil de temperaturas de estos.

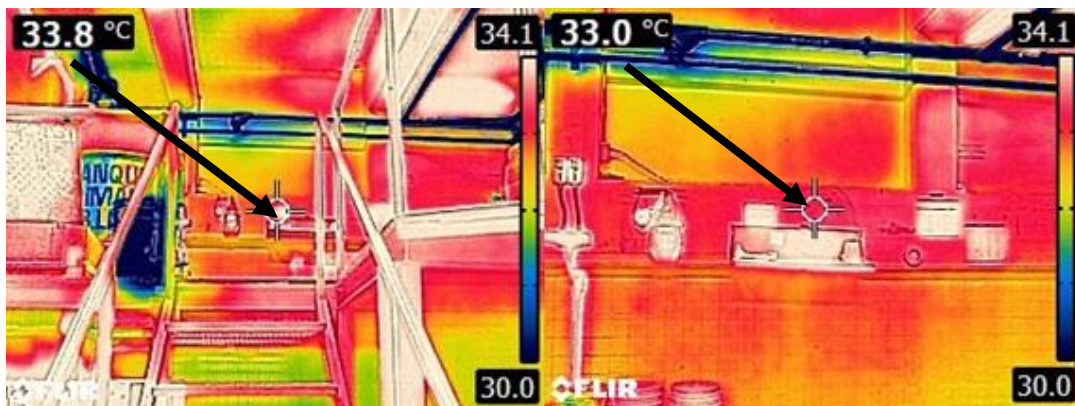
El proceso de corrugado cuenta con varios subprocesos los cuales los podemos dividir en 7 subprocesos: producción de pegamento,

precalentamiento de papel liner, corrugado de papel médium, pegado, secado, cizalla y descarga de láminas de corrugado.

La producción de pegamento en la industria papelera consiste en la elaboración de una mezcla a base de almidón, agua y otros aditivos químicos como el bórax y la sosa caustica, la cual es precalentada por medio de vapor para generar una pasta con ciertas características de viscosidad y punto de gel que permite la unión de los papeles para las láminas de corrugado.

El pegamento es parte muy importante dentro del proceso, es aplicado sobre las puntas de las flautas, con la aplicación de calor y elevación de la temperatura del adhesivo se provoca una deshidratación de los gránulos de almidón.

Dentro de esta zona existen temperaturas de ambiente muy elevadas debido a que el precalentamiento de los componentes es por medio de vapor de agua.



*Figura 2.3. Fotografía termográfica de la zona de elaboración de pegamento.*

El proceso de precalentamiento de papel es uno de los más importantes dentro de la industria de corrugado, ya que para lograr una unión perfecta de estos es necesario elevar la temperatura de papel eliminando la humedad y

permitiendo que el adhesivo penetre las fibras de este, dentro de este proceso existen temperaturas mayores a los 100°C, de igual forma los tubos precalentadores trabajan a base de vapor de agua, generando una superficie caliente por donde el papel pasa de manera constante.

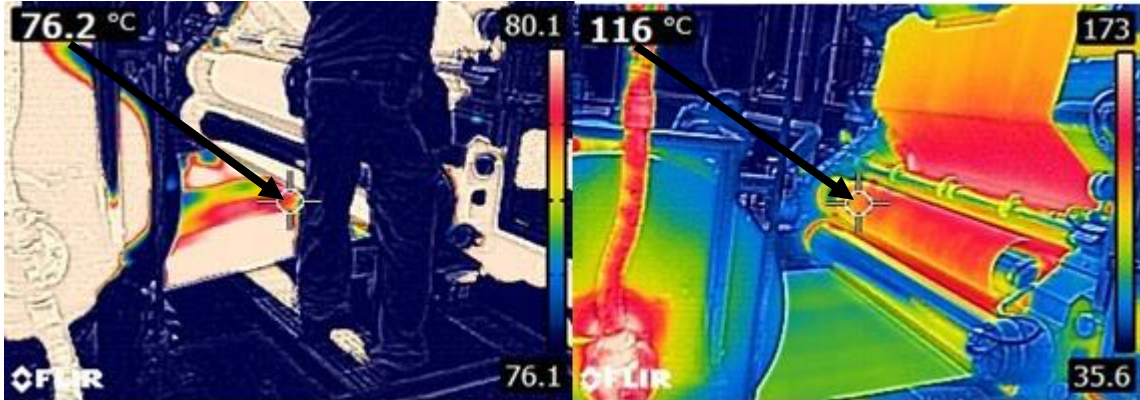


Figura 2.4. Fotografía termográfica de la zona de precalentamiento de papeles.

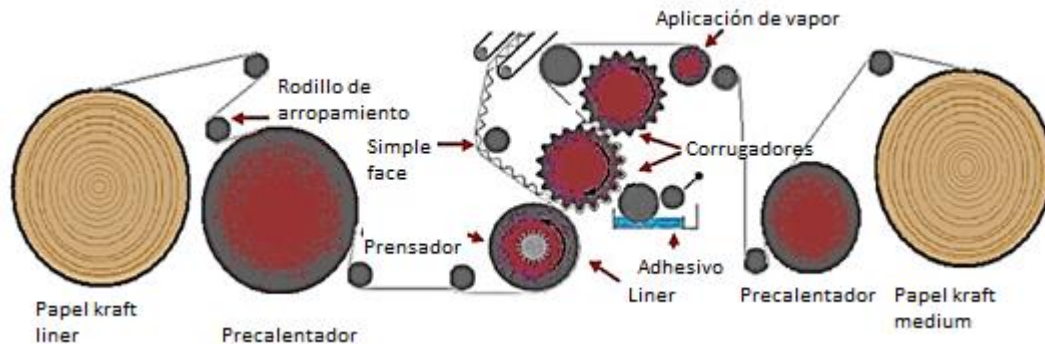


Figura 2.5. Diagrama esquemático del funcionamiento de los precalentadores. Fuente: Corrugando, 2015.

La tarea del doble engomador es colocar un adhesivo que pega al cartón de forma uniforme, un trabajo donde se realiza o aplica adhesivos mediante un rodillo previamente diseñado el cual permite al engomado a lo largo de las láminas de cartón corrugado, este adhesivo solo se lo coloca en un lado del

cartón corrugado como lo muestra la figura. El engomado o pegamento debe tener una temperatura mayor a la del ambiente para lograr la perfecta adhesión del liner con el corrugado, esto es permitido debido a que se cuenta con una línea de vapor de agua que permite mantener la temperatura del adhesivo.

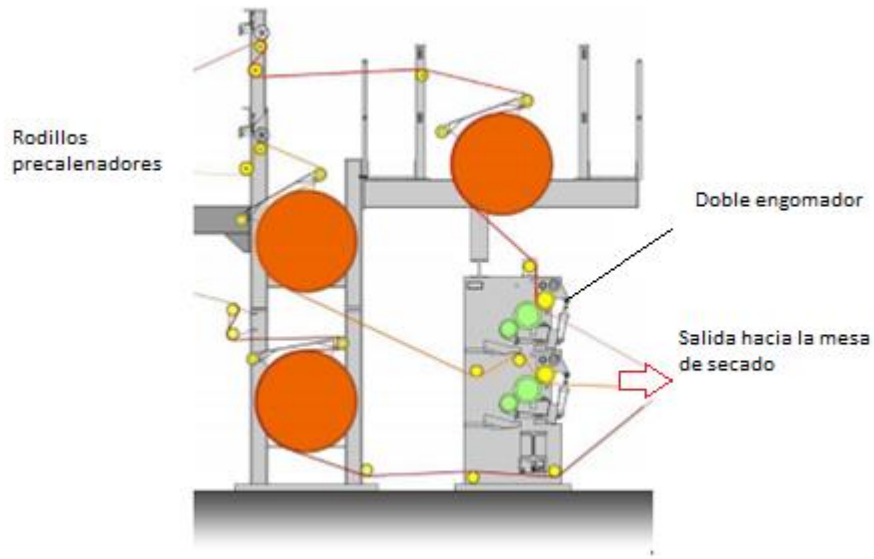


Figura 2.6. Diagrama esquemático del doble engomador. Fuente: Corrugando, 2015.



Figura 2.7. Fotografía termográfica de la zona de doble engomador.

La mesa de secado cumple la función de consolidar la alianza entre el liner y el conjunto de liner-corrugado, esto por medio de un control de temperatura uniforme a lo largo de la mesa.



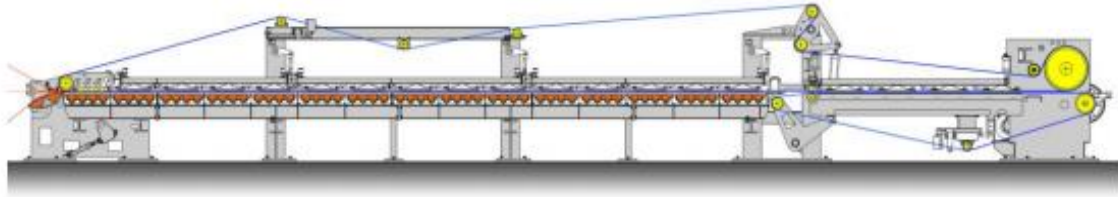


Figura 2.8. Diagrama esquemático de una mesa de secado. Fuente: Corrugando, 2015.

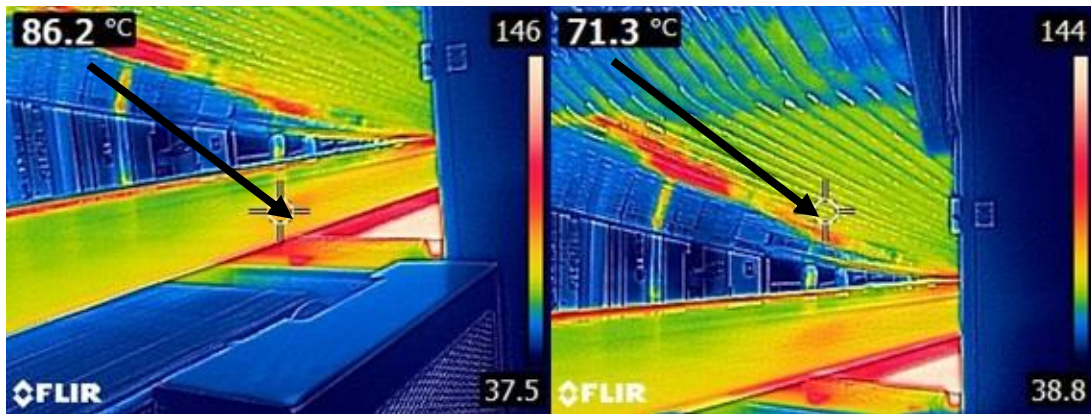


Figura 2.8. Fotografía termográfica de la zona de mesa de secado.

Después de la mesa de secado se encuentran las cizallas, las que dan las dimensiones solicitadas por el cliente y después la descarga de láminas que separa las distintas medidas seleccionadas para su almacenamiento, las láminas en esta zona vienen a altas temperaturas después de pasar por la mesa de secado, lo que genera que sus alrededores mantengan una temperatura ambiente elevada.



Figura 2.10. Fotografía termográfica de la zona de descarga.

Como se puede observar en las fotografías, a lo largo del sistema de producción de corrugado tenemos varios puntos específicos donde tenemos una pérdida de calor por desecho, es decir calor que se va al ambiente generando temperaturas elevadas y que no es reutilizado en ningún punto. De acuerdo con Donnellan P.,  $3 \times 10^{13}$  kW de energía térmica se están perdiendo en forma de desperdicio de energía disipativa cada año en la manufactura de EUA [20].

La mayoría de los procesos tienen un gran potencial para la utilización de un transformador térmico por absorción para la reutilización del calor de deshecho dentro del mismo proceso. El calor de desecho puede ser reutilizado a un mayor nivel térmico en otro proceso. [21]

### 2.7 Unidad funcional

De acuerdo con el análisis de temperaturas y a las características de cada uno de los subprocesos, se considera factible que la elección de la zona para trabajar sea la parte de secado, debido a las características de temperatura con las que se trabaja en esta zona y debido a la cercanía que tiene con otro subproceso donde podemos reutilizar la energía que se obtendrá del ciclo de absorción.

El subproceso seleccionado para el uso de la energía térmica recuperada es el proceso del doble engomador, ubicado como un proceso anterior al de la mesa de secado.



Figura 2.11 Fotografía termográfica de la zona seleccionada. Mesa de secado.



Figura 2.12

Zona real de mesa de secado.

El subproceso de pegado forma parte de los procesos con mayor importancia dentro de esta industria, ya que necesita un control de temperatura debido a que afecta directamente con la calidad del producto final, algunas de las variaciones que tiene la temperatura del pegamento en el proceso son las siguientes:

- Despegado de los papeles liners y médium.
- Lámina mojada.
- Pandeo de lámina corrugada.

La temperatura del pegamento en esta zona tiene que ser de 90°C debido a sus características que adquiere de viscosidad y la resistencia para su uso en las láminas de cartón corrugado.

La regulación del calor asegura una temperatura elevada en la primera zona de la mesa de secado, a fin de que el almidón se gelatinice.

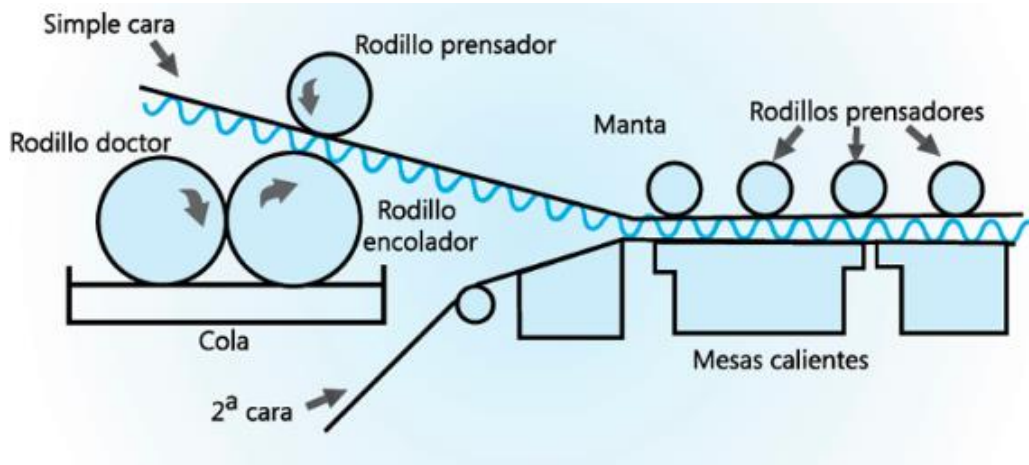


Figura 2.13 Diagrama esquemático del doble engomador y mesa de secado. Fuente: Corrugando, 2015.





## **CAPÍTULO 3. MODELO TERMODINÁMICO PARA UN TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA.**

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se describe el modelo termodinámico utilizado para calcular las posibles condiciones de operación de un transformador térmico por absorción de una etapa, utilizando la mezcla Bromuro de Litio – Agua.

### **3.2 Consideraciones**

Para la realización del modelo matemático de un transformador térmico por absorción de una etapa se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Existe equilibrio térmico en todo el sistema.
- La bomba de calor por absorción se encuentra en estado estacionario.
- Se tienen condiciones de saturación en:
  - La salida del generador hacia el absorbedor.
  - La salida del evaporador hacia el absorbedor.
  - La salida del absorbedor hacia el generador.
  - La salida del absorbedor hacia el evaporador.
- No hay pérdidas o ganancias de calor y/o masa por tuberías y componentes principales de la bomba de calor, ni al ambiente.
- Las variaciones de presión en el interior de cada componente son despreciables.
- El trabajo hecho por las bombas es isoentrópico.
- El trabajo de las bombas es pequeño con relación a la cantidad de energía que se suministra o extrae de cualquiera de los componentes.
- El paso del líquido por las válvulas es isoentálpico.
- El absorbente no se evapora en ninguna parte del sistema.



A partir de las suposiciones anteriores y conociendo las temperaturas de condensación  $T_{CO}$ , generación  $T_{GE}$ , evaporación  $T_{VE}$  y absorción  $T_{AB}$ , se puede decir que:

La temperatura del vapor como de la solución concentrada a la salida del generador es la misma:

$$T_{GE,V} = T_{GE,L} \quad (3.1)$$

Las presiones en el condensador y evaporador dependen del fluido puro, y para este estudio son agua en saturación:

$$P_{CO} = P(T_{CO}) \quad (3.2)$$

$$P_{EV} = P(T_{EV}) \quad (3.3)$$

Considerando que no existen variaciones significativas de presión en tuberías que unen los equipos, se distinguen dos zonas de presión:

$$P_{GE} = P_{CO} \quad (3.4)$$

$$P_{AB} = P_{EV} \quad (3.5)$$

Se puede calcular la concentración en el generador considerando un equilibrio termodinámico:

$$X_{GE} = X(P_{GE}, T_{GE}) \quad (3.6)$$

Para este proyecto se ha utilizado una mezcla de Bromuro de Litio – Agua, por lo que la concentración se puede determinar en un diagrama de Dühring conociendo las condiciones de operación:

$$X_{AB} = X(P_{AB}, T_{AB}) \quad (3.7)$$

Ya que no existen intercambio de materia, solo de energía entre las líneas que se encuentran entre el generador y el absorbedor, se pueden distinguir cuatro componentes, con concentraciones:



$$X_{GE}, X_{AB}, X_{CO} \text{ y } X_{EV}$$

Se considera que el absorbente no se evapora

$$X_{CO} = 0 \text{ y } X_{EV} = 0 \quad (3.8)$$

Por lo tanto, solo existen dos lugares dentro del sistema con una concentración conocida de absorbente:

$$X_{GE} > 0 \text{ y } X_{AB} > 0 \quad (3.9)$$

Considerando cada estado se puede calcular la entalpia de todas las corrientes de salida de los componentes:

$$H_{AB,S} = H_L(T_{AB}, X_{AB}) \quad (3.10)$$

$$H_{GE,S} = H_L(T_{GE}, X_{GE}) \quad (3.11)$$

Se considera que el líquido condensado a la salida del condensador se encuentra saturado:

$$H_{CO,S} = H_L(T_{CO}) \quad (3.12)$$

Se considera que el vapor a la salida del evaporador se encuentra saturado:

$$H_{EV,S} = H_V(T_{EV}) \quad (3.13)$$

Considerando que el vapor que abandona el generador se encuentra saturado:

$$H_{GE,V} = H_V(T_{EV}) \quad (3.14)$$

La efectividad del intercambiador de calor se puede considerar como la diferencia de entalpia entre la línea que abandona el generador y se dirige hacia el absorbedor con respecto a la diferencia de entalpia de la línea que ingresa al intercambiador proveniente del generador, pero a la temperatura del absorbedor ( $H_{HX,T}$ ):



$$Hf_{HX} = \frac{H_{GE,S} - H_{HX,S}}{H_{GE,S} - H_{HX,T}} \quad (3.15)$$

Donde:

$$H_{HX,S} = H_L(T_{AB}, X_{GE}) \quad (3.16)$$

Si se conoce o se supone la efectividad del intercambiador de calor  $k$ :

$$k = 0.7 \quad (3.17)$$

Se puede conocer la entalpía de la línea proveniente del generador y que después del intercambio de calor se dirige al absorbedor:

$$H_{HX,S} = H_{GE,S} - Ef_{HX}(H_{GE,S} - H_{HX,T}) \quad (3.18)$$

Conociendo o suponiendo la potencia suministrada a cada uno de los componentes (puede ser el evaporador o el condensador dado que en estos componentes solo circula fluido de trabajo) se puede calcular el caudal másico dentro del sistema:

$$M_{EV,V} = \frac{Q_{EV}}{(H_{EV,V} - H_{CO,S})} \quad (3.19)$$

Bajo la condición que no existe acumulación de masa en ningún punto del sistema se tiene que:

$$M_{GE,V} = M_{EV,V} \quad (3.20)$$

$$M_{CO,L} = M_{EV,V} \quad (3.21)$$

Y considerando la relación de flujo, definida como:

$$FR = \frac{M_{AB,S}}{M_{EV,V}} \quad (3.22)$$

Haciendo un balance de materia en el absorbedor, la relación de flujo (FR) puede expresarse en función de las concentraciones, como:

$$FR = \frac{X_{GE}}{X_{GE} - X_{AB}} \quad (3.23)$$



Por lo tanto, se puede conocer la cantidad de materia que se dirige del absorbedor hacia el generador (previo al intercambio de calor):

$$M_{AB,S} > 0 \quad (3.24)$$

Por balance de materia en el absorbedor se puede calcular el caudal masico de la mezcla de trabajo que abandona el generador y se dirige hacia el absorbedor (previo al intercambio de calor):

$$M_{AB,S} = M_{GE,S} + M_{EV,V} \quad (3.25)$$

Conociendo todos los caudales másicos se puede calcular la entalpía de la corriente proveniente del intercambiador de calor y que se dirige hacia el generador:

$$H_{HX,S,f} = \frac{M_{GE,S}}{M_{AB,S}} (H_{GE,S} + H_{HX,S}) + H_{AB,S} \quad (3.26)$$

Considerando que el paso por la válvula de expansión es isoentálpico:

$$H_{VA,A} = H_{HX,S,f} \quad (3.27)$$

A partir de los datos calculados, se pueden conocer las potencias en cada uno de los componentes:

$$Q_{GE} = M_{GE,V}H_{GE,V} + M_{GE,S}H_{GE,S} - M_{AB,S}H_{AB,S} \quad (3.28)$$

$$Q_{CO} = M_{CO}(H_{CO,S} - H_{GE,V}) \quad (3.29)$$

$$Q_{AB} = M_{CO}H_{EV,V} + M_{GE,S}H_{HX,S} - M_{AB,S}H_{AB,S} \quad (3.29)$$

Con los que se puede calcular el coeficiente de operación en función de las potencias revalorizadas y suministradas, despreciando la energía necesaria para las bombas.

$$COP = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE}+Q_{EV}} \quad (3.30)$$



## CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN DE PROCESOS CON MODELOS MATEMÁTICOS

### 4.1 Introducción.

La simulación matemática es un procedimiento aplicable a una amplia gama de problemas de diversa índole en matemática, física, Ingeniería en general, economía, ciencias sociales, etc. [22]

Este procedimiento ayudará a conocer las características que deben tener los equipos analizados para la recuperación de energía necesaria en el ciclo de absorción planteado en capítulos anteriores.

### 4.2 Análisis de grados de libertad

El análisis de grados de libertad proporciona el número de variables de decisión que podemos cambiar para obtener el diseño óptimo [23]. Los grados de libertad también se definen como el número de variables que pueden ser especificadas independientemente [24] y son obtenidas con la siguiente ecuación:

$$N_F = N_V - N_E \quad (\text{Ec.4.1})$$

Donde:

$N_F$ = grados de libertad.

$N_V$ = número total de variables involucradas en el programa.

$N_E$ = número de ecuaciones independientes (incluyendo especificaciones).

De acuerdo con el modelo matemático obtenido en el capítulo 3, se realiza el recuento de variables dependientes que se muestran en la Tabla 4.1 y el recuento de variables independientes que se muestra en la Tabla 4.2. El número total de variables dependientes es: 14, mientras que el número total de variables independientes es 3.



Tabla 4.1 Recuento de variables dependientes del modelo matemático de un transformador térmico por absorción.

VARIABLES DEPENDIENTES	UNIDADES
$Q_{CO}, Q_{GE}, Q_{AB}$	kW
$X_{AB}$	%
$T_{AB}$	°C
$M_{EV,V}, M_{AB,S}, M_{GE,S}$	kg/s
$H_{EV,V}, H_{CO,L}, H_{GE,V}, H_{AB,S}, H_{HX,T}$	kJ/kg
$COP$	Adimensional
<b>Número total de variables dependientes= 14</b>	

Tabla 4.2. Recuento de variables independientes del modelo matemático de un transformador térmico por absorción

VARIABLES INDEPENDIENTES	UNIDADES
$T_{CO}, T_{GE=EV}$	°C
$X_{GE}$	%
<b>Numero total de variables independientes= 3</b>	

El número total de variables del modelo es:

$$N_V = 17$$

El número de grados de libertad del sistema ( $N_f$ ) se calcula de acuerdo con la ecuación 4.1:

$$N_F = N_V - N_E \tag{Ec.4.1}$$

Sustituyendo los valores de  $N_V$  y  $N_E$  en la ecuación, obtenemos lo siguiente:

$$N_F = 17 - 14; \quad N_F = 3$$

Este resultado nos dice que podemos variar tres variables dependientes para llegar al objetivo deseado, en este caso de estudio se decide que la variable dependiente es la temperatura del absorbedor, para observar el





comportamiento del coeficiente de operación (COP) a las distintas temperaturas de salida de este componente.

#### 4.4 Simulación en softwares

Para la simulación en ambos softwares es importante tomar en cuenta las variables que nos permitirán empezar con el análisis de las ecuaciones descritas en el capítulo 3 de esta tesis, el desarrollo de las ecuaciones en los softwares es distinto debido a que el área de trabajo de cada uno de ellos tiene una forma de trabajo diferente.

$$Q_{EV} = 2kW \quad (\text{Potencia del evaporador})$$

$$T_{CO} = 15^{\circ}C \quad (\text{Temperatura del condensador})$$

$$T_{GE}, T_{EV} = 71^{\circ}C \quad (\text{Temperatura del generador y evaporador})$$

De acuerdo con la literatura, en 1992 Saito, recomienda a las bombas de calor por absorción para operar con temperaturas entre 60 y 80°C como óptimas para utilizar fuentes de calor geotérmico o de desecho industrial, en donde las fuentes de calor usadas para estas bombas son agua y aire [25].

A continuación, se anexan las Tablas 4.3 y 4.4 con los resultados obtenidos con los softwares utilizados (MATLAB & EES).

Tabla 4.3 Valores de las variables obtenidas con software EES				
<b>COP=0.4808</b>	d <sub>8</sub> =1845	h <sub>1</sub> =2634	h <sub>10</sub> =208.2	h <sub>2</sub> =62.98
h <sub>5</sub> =202.2	h <sub>6</sub> =211.4	h <sub>7</sub> =211.4	h <sub>8</sub> =222.3	h <sub>9</sub> =222.3
m <sub>2</sub> =0.0007798	m <sub>3</sub> =0.000798	m <sub>4</sub> =0.0007798	m <sub>5</sub> =0.002245	m <sub>6</sub> =0.002245
m <sub>9</sub> =0.001466	n=0.7	P <sub>1</sub> =1.706	P <sub>10</sub> =32.58	P <sub>2</sub> =1.706
P <sub>5</sub> =32.58	P <sub>6</sub> =32.58	P <sub>7</sub> =1.706	P <sub>8</sub> =1.706	P <sub>9</sub> =32.58
Q <sub>A</sub> =1.9	Q <sub>C</sub> =2.005	Q <sub>E</sub> =2	Q <sub>G</sub> =1.905	T <sub>1</sub> =71
T <sub>5</sub> =90	T <sub>8</sub> =71	T <sub>A</sub> =90	T <sub>C</sub> =15	T <sub>E</sub> =71
v <sub>8</sub> =0.0005421	W <sub>B1</sub> =0.01673	W <sub>B2</sub> =0.0309	x <sub>1</sub> =0	x <sub>10</sub> =0.6708
x <sub>4</sub> =0	x <sub>5</sub> =0.4378	x <sub>6</sub> =0.4378	x <sub>7</sub> =0.4378	x <sub>8</sub> =0.6708



**Tabla 4.4 Valores de las variables obtenidas con software MatLab**

<b>COP=0.4808</b>	$d_8=1845$	$h_1=2634$	$h_{10}=208.2$	$h_2=62.98$
$h_5=202.2$	$h_6=211.4$	$h_7=211.4$	$h_8=222.3$	$h_9=222.3$
$m_2=0.0007798$	$m_3=0.000798$	$m_4=0.0007798$	$m_5=0.002245$	$m_6=0.002245$
$m_9=0.001466$	$n=0.7$	$P_1=1.706$	$P_{10}=32.58$	$P_2=1.706$
$P_5=32.58$	$P_6=32.58$	$P_7=1.706$	$P_8=1.706$	$P_9=32.58$
$Q_A=1.9$	$Q_C=2.005$	$Q_E=2$	$Q_G=1.905$	$T_1=71$
$T_5=90$	$T_8=71$	$T_A=90$	$T_C=15$	$T_E=71$
$v_8=0.0005421$	$W_{B1}=0.01673$	$W_{B2}=0.0309$	$x_1=0$	$x_{10}=0.6708$
$x_4=0$	$x_5=0.4378$	$x_6=0.4378$	$x_7=0.4378$	$x_8=0.6708$

Se puede observar que en ambos programas obtenemos un COP= 0.48 que de acuerdo con la literatura sabemos que el COP del sistema se define como la relación del calor útil producto que deja el sistema con respecto a las entradas de energía, este dato nos ayuda a conocer que un 48% de la energía de deshecho que obtenemos del proceso de secado en la industria papelera es recuperado mediante este ciclo termodinámico por absorción.

De igual forma se realizó el cálculo para un intervalo de temperaturas de recuperación de 85°C a 110°C para conocer el comportamiento que tienen las variables del sistema principalmente el coeficiente de operación (Tabla 4.5). Esta tabla nos da una idea sobre las modificaciones que se deben de hacer en el sistema para obtener diferentes temperaturas, de igual forma nos permite realizar los gráficos de rendimiento energético para este sistema.

El renglón marcado con línea amarilla nos muestra los valores que debe de tener los componentes (temperatura, presión, potencia y entalpia) y el valor específico del COP para lograr una temperatura de 90°C necesaria para el correcto funcionamiento de nuestro sistema que recibe la temperatura recuperada.



**Tabla 4.5 RESULTADOS DE LAS VARIABLES PARA LA SIMULACION DEL TRANSFORMADOR TERMICO POR ABSORCION EN UN INTERVALO DE 85°C A 110°C**

TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN																				
No. De calculo	TEMPERATURA ABSORBEDOR	FRACCION LIBR- AGUA		FRACCION LIBR- AGUA ABSORBEDOR		ENTALPIAS						PRESIÓN		POTENCIA		COP				
		GENERADOR	XGE	GENERADOR	XAB	ENTALPIA GENERADOR (MEZCLA)	HGE	ENTALPIA ABSORBEDOR (MEZCLA)	HAB	ENTALPIA GENERADOR (AGUA)	H1	ENTALPIA CONDENSADOR (AGUA)	H2	ENTALPIA DEL EVAPORADOR (AGUA)	H4	EVAPORADOR- ABSORBEDOR	QGE	QAB	COEFICIENTE DE OPERACIÓN	COP
1	85	66.4	66.4	42	42	232.6421	232.6421	220.4321	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8935	1.8935	1.8935	1.8935	0.4863	0.4863
2	86	66.4	66.4	42.65	42.65	232.6421	232.6421	221.3693	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8922	1.8922	1.8922	1.8922	0.4862	0.4862
3	87	66.4	66.4	43.25	43.25	232.6421	232.6421	222.4641	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8904	1.8904	1.8904	1.8904	0.4861	0.4861
4	88	66.4	66.4	43.8	43.8	232.6421	232.6421	223.7086	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8881	1.8881	1.8881	1.8881	0.4860	0.4860
5	89	66.4	66.4	44.4	44.4	232.6421	232.6421	224.9100	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8858	1.8858	1.8858	1.8858	0.4859	0.4859
6	90	66.4	66.4	45	45	232.6421	232.6421	226.1777	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8833	1.8833	1.8833	1.8833	0.4857	0.4857
7	91	66.4	66.4	45.6	45.6	232.6421	232.6421	227.5177	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8804	1.8804	1.8804	1.8804	0.4856	0.4856
8	92	66.4	66.4	46.15	46.15	232.6421	232.6421	229.0042	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8769	1.8769	1.8769	1.8769	0.4854	0.4854
9	93	66.4	66.4	46.75	46.75	232.6421	232.6421	230.4960	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8733	1.8733	1.8733	1.8733	0.4852	0.4852
10	94	66.4	66.4	47.3	47.3	232.6421	232.6421	232.1270	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8690	1.8690	1.8690	1.8690	0.4850	0.4850
11	95	66.4	66.4	47.85	47.85	232.6421	232.6421	233.8312	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8643	1.8643	1.8643	1.8643	0.4847	0.4847
12	96	66.4	66.4	48.4	48.4	232.6421	232.6421	235.6109	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8591	1.8591	1.8591	1.8591	0.4845	0.4845
13	97	66.4	66.4	48.95	48.95	232.6421	232.6421	237.4682	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8533	1.8533	1.8533	1.8533	0.4842	0.4842
14	98	66.4	66.4	49.5	49.5	232.6421	232.6421	239.4048	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8469	1.8469	1.8469	1.8469	0.4839	0.4839
15	99	66.4	66.4	50.05	50.05	232.6421	232.6421	241.4221	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8398	1.8398	1.8398	1.8398	0.4836	0.4836
16	100	66.4	66.4	50.55	50.55	232.6421	232.6421	243.5251	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8320	1.8320	1.8320	1.8320	0.4833	0.4833
17	101	66.4	66.4	51.1	51.1	232.6421	232.6421	245.6978	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8234	1.8234	1.8234	1.8234	0.4829	0.4829
18	102	66.4	66.4	51.6	51.6	232.6421	232.6421	247.9408	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8141	1.8141	1.8141	1.8141	0.4825	0.4825
19	103	66.4	66.4	52.1	52.1	232.6421	232.6421	250.2502	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.8038	1.8038	1.8038	1.8038	0.4821	0.4821
20	104	66.4	66.4	52.6	52.6	232.6421	232.6421	252.6259	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.7926	1.7926	1.7926	1.7926	0.4816	0.4816
21	105	66.4	66.4	53.1	53.1	232.6421	232.6421	255.0677	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.7803	1.7803	1.7803	1.7803	0.4812	0.4812
22	106	66.4	66.4	53.6	53.6	232.6421	232.6421	257.5752	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.7667	1.7667	1.7667	1.7667	0.4806	0.4806
23	107	66.4	66.4	54.1	54.1	232.6421	232.6421	260.1479	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.7518	1.7518	1.7518	1.7518	0.4801	0.4801
24	108	66.4	66.4	54.55	54.55	232.6421	232.6421	262.7265	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.7361	1.7361	1.7361	1.7361	0.4795	0.4795
25	109	66.4	66.4	55.05	55.05	232.6421	232.6421	265.4196	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.7180	1.7180	1.7180	1.7180	0.4788	0.4788
26	110	66.4	66.4	55.5	55.5	232.6421	232.6421	268.1027	2626.0988	62.9837	2626.0988	62.9837	2626.0988	0.3120	1.6991	1.6991	1.6991	1.6991	0.4781	0.4781

#### 4.6 Curvas de rendimiento

Las curvas de rendimiento energético muestran el comportamiento del COP en función de un par de variables. En estas curvas se puede observar que el COP tiene valor máximo de 0.486 para la temperatura de recuperación a 85°C y un valor de 0.478 para temperaturas de 108°C. Esta energía del absorbedor puede ser reutilizada en procesos cercanos donde se utilice energía a mayor temperatura. Lo cual nos permitiría reducir el consumo de combustible fósil utilizado en estos procesos.

Los datos de rendimiento mencionados son consecuencia de un modelado ideal en el cual no se consideran pérdidas térmicas y suponiendo un equilibrio termodinámico en durante todo el ciclo. Un equipo real deberá considerar las irreversibilidades termodinámicas de cada operación unitaria y las pérdidas convectivas y radiativas al ambiente.

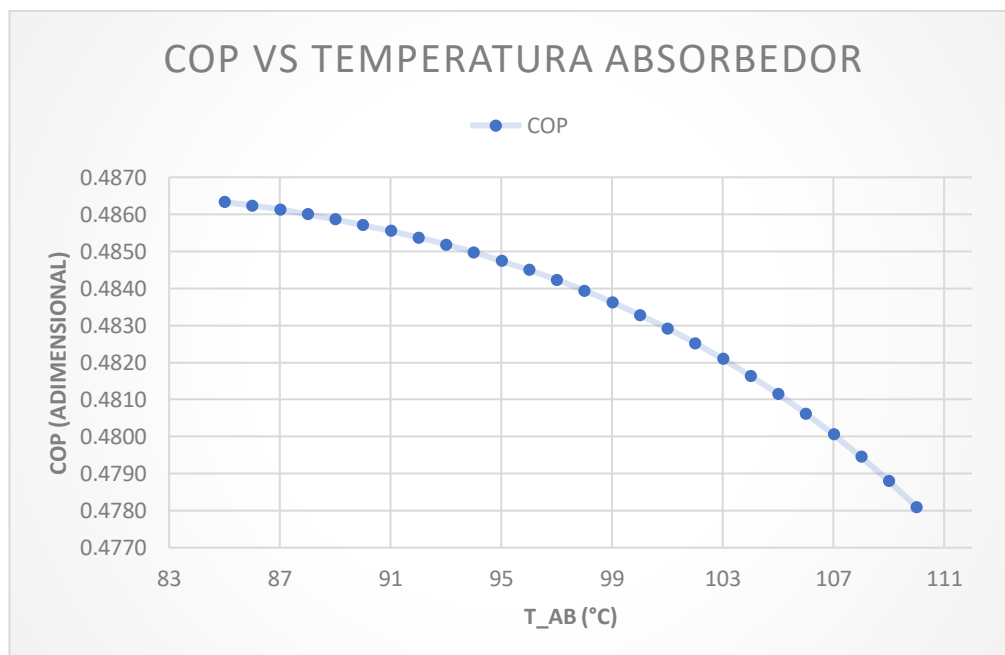


Figura 4.1. Comportamiento del COP en función del intervalo de temperaturas del Absorbedor.

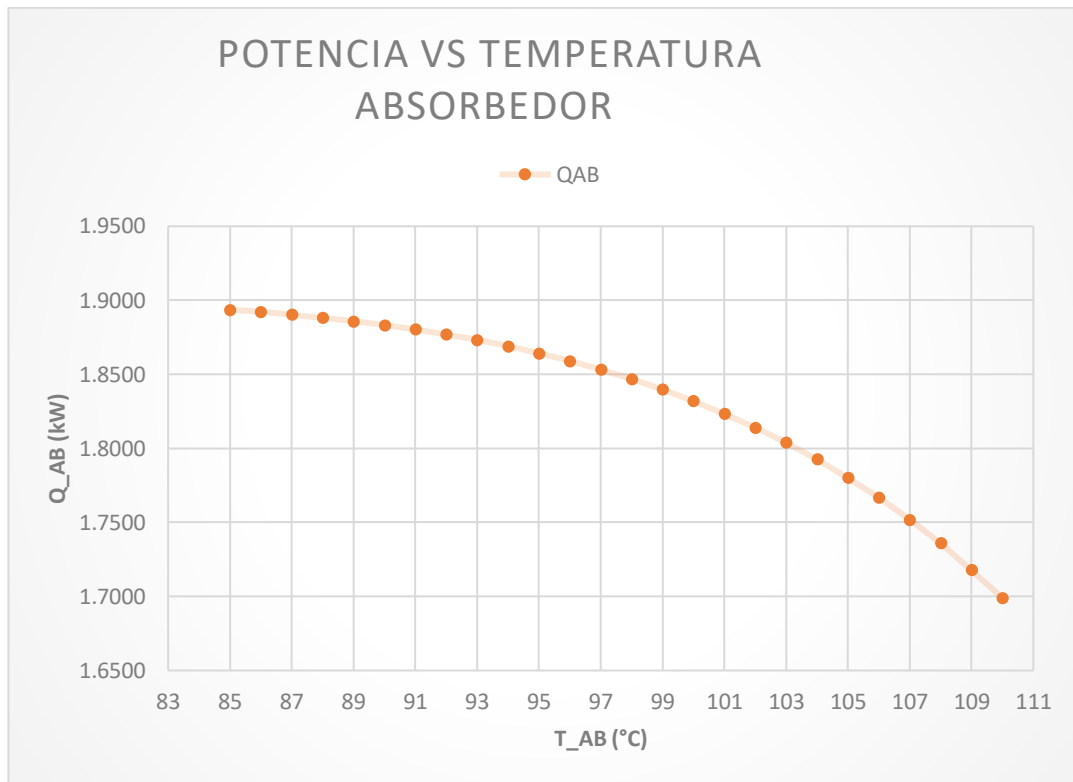


Figura 4.2. Comportamiento del COP en función de la Potencia del absorbedor.



## CAPÍTULO 5. DISEÑO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA TERMODINÁMICO POR ABSORCIÓN.

En los capítulos anteriores se determinó que es posible realizar el ciclo termodinámico por absorción en la industria papelera para recuperar una temperatura de 90°C para introducirlo nuevamente al proceso ahora en la sección de pegamento, dentro de la máquina Langston, con un coeficiente de operación equivalente a 0.48.

El diseño conceptual propuesto consta de cuatro componentes principales y tres accesorios: un generador, un evaporador, un condensador, un absorbedor, dos bombas y una válvula de expansión.

Para obtener este coeficiente de operación y esta temperatura los valores para los componentes del sistema termodinámico por absorción son los siguientes:

*Tabla 5.1 Valores de potencia (kW) requeridos para cada uno de los componentes del sistema termodinámico por absorción*

	COMPONENTE	POTENCIA EN Kw
P O T E N C I A	GENERADOR	<b>1.88</b>
	CONDENSADOR	<b>2</b>
	EVAPORADOR	<b>2</b>
	ABSORBEDOR	<b>1.88</b>

### 5.1 Diseño conceptual del generador

Se propone que para el generador se utilicen tubos aletados con las siguientes dimensiones: 2.36 m de largo, 0.0254 m de diámetro exterior,



calibre 16, así como una superficie aletada de 10.21mm de altura con 8 aletas por pulgada. El dispositivo tiene una potencia (por tubo) de 200 Watts [26].

Es decir que para el generador necesitamos 10 tubos aletados para este componente con las características antes mencionadas. Estos tubos aletados tienen que estar colocados sobre la mesa de secado de la industria papelera para recuperar el calor de deshecho por convención.

Estos tubos aletados han sido utilizados en procesos de enfriamiento, como condensadores, siendo fácil de construir y probado, debido a que todas las dimensiones de su diseño son comerciales.

### **5.2 Diseño conceptual de evaporador**

Se propone que el evaporador sea un componente similar al generador con una potencia de 2 kW es necesario colocar 10 tubos aletados con las mismas características físicas que los tubos del generador [26].

De igual forma este grupo de diez tubos aletados serán conectados e instalados sobre la superficie de la mesa sin afectar el proceso de producción de corrugado.

### **5.3 Diseño termodinámico del condensador**

Para el condensador se consideró que sea un tanque vertical con serpentín, en el cual circule agua a contracorriente con el vapor proveniente del evaporador.

El agua de enfriamiento obtendrá tu temperatura proveniente del chiller instalado dentro del propio proceso de corrugado, esta temperatura de enfriamiento será de 10°C.

Para el cálculo de las dimensiones del condensador, se volvió a realizar una simulación en el programa EES obteniendo lo siguiente:



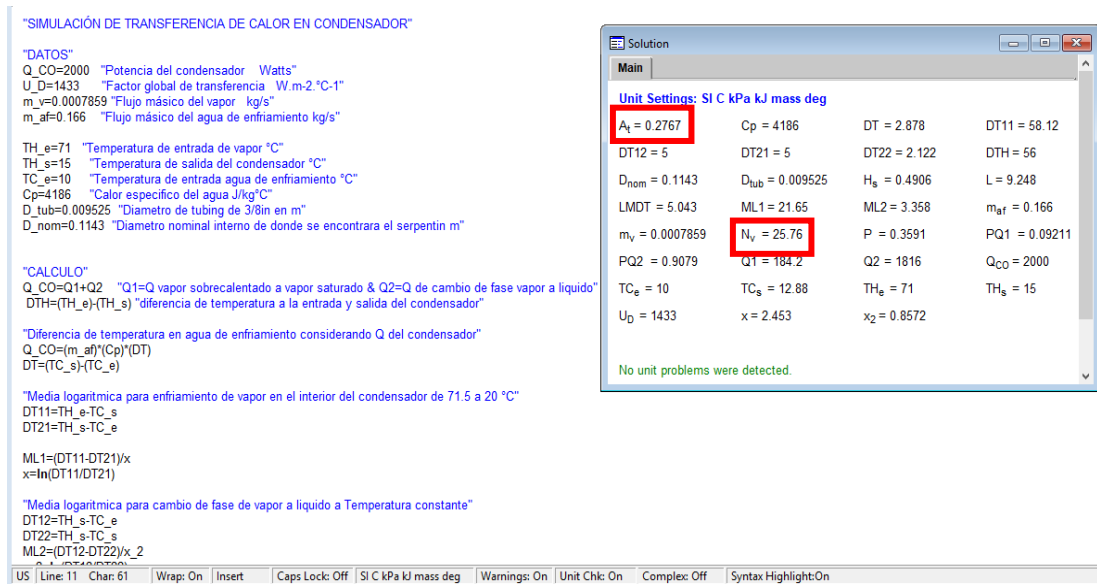


Figura 5.1 Resultados de la simulación de la transferencia de calor en el condensador.

El serpentín del condensador tendrá un área de transferencia de calor de 0.2767 m<sup>2</sup>. El vapor se alimenta al condensador en su parte lateral y el condensado se retira por la parte interior del mismo.

#### 5.4 Diseño conceptual del absorbedor

El absorbedor es el equipo donde se efectúa la mayor transferencia de calor hacia el medio en forma útil. Se considera un tanque vertical con un serpentín interno, por el cual circule aceite térmico, y que cuente con un distribuidor de solución en la parte superior para generar una película descendente sobre el serpentín con el fin de que entre en contacto con el vapor que se alimenta al tanque en su parte media [12].

La capacidad calorífica que se requiere de este componente es de 1.88kW, lo cual es posible suministrar con un diseño de absorbedor en forma cilíndrica de 0.167 m de diámetro y 0.7 m de longitud. El serpentín debe de contar con un área de transferencia de calor de 0.28 m<sup>2</sup> y una capacidad máxima de almacenamiento de 3.5 kg.



## **CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DEL TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN EN EL PROCESO DE SECADO DE CARTÓN CORRUGADO EN LA INDUSTRIA PAPELERA.**

### **6.1 Introducción**

Dentro de la industria papelera se han considerado nuevas tecnologías haciendo énfasis en el consumo energético y en el rol de la eficiencia energética para reducir el impacto ambiental.

El objetivo específico de la aplicación del transformador térmico por absorción dentro de un subproceso de la industria papelera es el lograr el uso eficiente de energía y su debida implementación contribuyendo específicamente en la reducción del consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

La producción de cartón ondulado requiere un alto consumo de energía, básicamente por el proceso de encolado y la remoción de agua de proceso [27]. Este consumo de energía representa costos altos para la industria, es por ello por lo que se buscan alternativas de ahorro de energía para las corrugadoras como innovaciones tecnológicas que permitan la reutilización, no solo de materia prima, sino también de agua y calor.

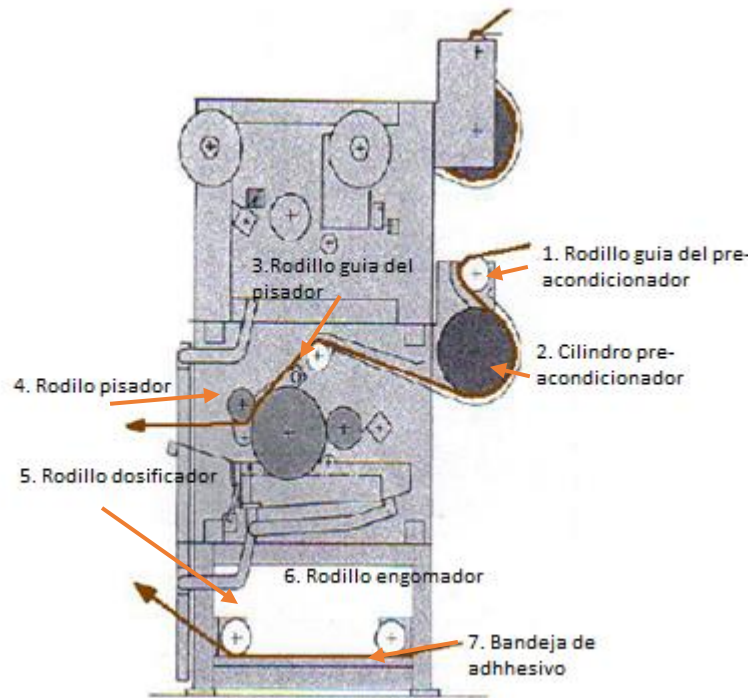
De acuerdo con las características mencionadas en el diseño de los componentes del transformador térmico se consideran las medidas necesarias para el diseño y aplicación en la zona considerada prudente para su colocación.

Como se mencionó en capítulos anteriores, para este proyecto de tesis se seleccionó el subproceso de secado dentro de la producción de papel corrugado con una temperatura de 75°C que por medio de convección permitirá el funcionamiento del transformador térmico por absorción proporcionando un calor de salida que nos permitirá generar un calor suficientes para poder elevar la temperatura del vapor de agua a 90°C

necesarios para poder mantener la temperatura del pegamento utilizados el doble engomador del subproceso previo al de secado.

## 6.2 características del doble engomador

La tarea del doble engomador es colocar adhesivo y pegar al cartón de una forma uniforme, el adhesivo se aplica mediante un rodillo previamente diseñado el cual permite el engomado a lo largo de la lámina de cartón corrugado.



*Figura 6.1 Diagrama esquemático del doble engomador. Fuente: Corrugando, 2015.*

El doble engomador cuenta con los siguientes componentes:

- Rodillo guía del pre-acondicionador (1)
- Cilindro pre-acondicionador (2)



- Rodillo guía del pisador (3)
- Rodillo pisador (4)
- Rodillo dosificador (5)
- Rodillo engomador (6)
- Bandeja de adhesivo (7)

La lámina de cartón corrugado ingresa por el rodillo guía (1), atraviesa por el cilindro pre-acondicionador (2); el cual se encarga de precalentar a un solo lado la lámina de cartón mediante el calor residual que emite. Después, el rodillo guía (3) es el encargado de dirigir la lámina de cartón corrugado al rodillo pisador (4), este rodillo se calibra y es el encargado de incrustar el adhesivo en la cresta de la onda mediante fricción. El rodillo dosificador (5) permite el paso de la cantidad requerida de adhesivo hacia el rodillo engomador (6) donde tiene contacto con la parte superior de la onda del cartón corrugado. La recolección del adhesivo se realiza mediante raspadores ubicados en los rodillos engomadores y dosificadores, este adhesivo se desprende por gravedad a una bandeja (7) la cual se mantiene caliente permitiendo que las características del pegamento no cambien, el rodillo engomador se encuentra sumergido parcialmente sobre la bandeja el cual se alimenta continuamente de adhesivo, en la entrada de la bandeja existe una válvula de cierre y apertura que regula el nivel de este. Dicho funcionamiento se puede observar en la Figura 6.2

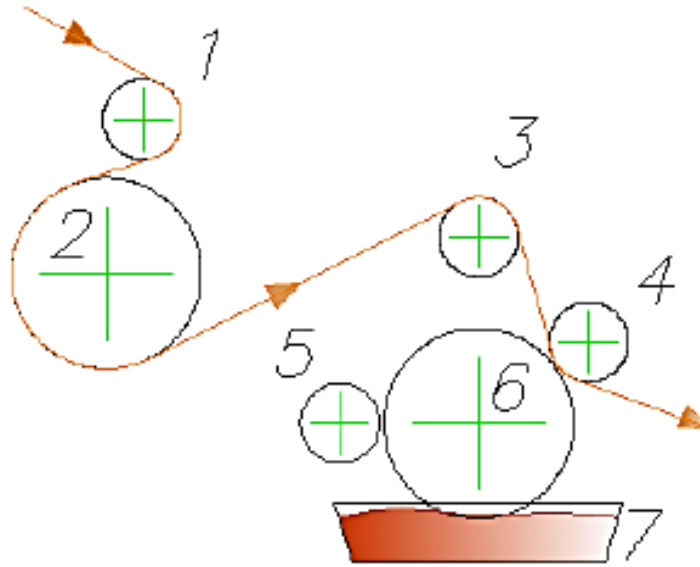


Figura 6.2 Diagrama de componentes y funcionamiento del doble engomador. Fuente: Corrugando, 2011.

### 6.3 Consumo energético del doble engomador

La incertidumbre futura con respecto a las fuentes de suministro de energía, el costo de la energía y la necesidad de reducir las emisiones de carbono significa que la reducción de los requisitos de combustible y el aumento de la eficiencia energética son acciones obligatorias para muchas empresas [28]

Dentro de la industria del corrugado se utiliza calor generado mediante calderas, este principalmente se utiliza en el calentamiento de papel, pegado y secado de las láminas de cartón.

El vapor es utilizado en la industria papelera principalmente por su capacidad calorífica, es decir que pequeños caudales de vapor transportan gran cantidad de calor, con lo que tuberías, válvulas, juntas y en general todos los equipos y componentes son de dimensiones razonablemente reducidos [29].



El consumo energético de una maquina doble engomadora es debido a que requiere un flujo de vapor dentro de la bandeja de pegamento que permite que este se mantenga a la temperatura adecuada para permitir el pegado del papel liner antes de entrar a la mesa de secado.

**La temperatura del vapor de alta calidad necesario para realizar esta actividad primordial dentro del proceso es de 90°C.**

Este flujo de vapor dentro del doble engomador es constante durante los 7 días de la semana, durante todo el año a excepción a los días de mantenimiento y días de paro de labores que son en su totalidad 38 días por año, lo que nos da un resultado de 327 días que se mantiene el flujo de vapor constante.

#### **6.4 Cálculo de emisiones asociadas de CO<sub>2</sub> de acuerdo con el consumo de combustible.**

De acuerdo con la literatura, las bombas de calor muestran un gran potencial económico para la reducción de CO<sub>2</sub>, en 1992 Stuiji reportó que el uso masivo de estos dispositivos pueden ser una solución en grandes ciudades con altos índices de contaminación [30].

La inclusión de estos dispositivos utilizados en varias plantas industriales, por ejemplo, en una planta incineradora de desechos sólidos para la recuperación de energía de los gases de combustión [31], lo que nos permite saber que estos dispositivos pueden ser utilizados en cualquier tipo de industria.

La inclusión del transformador térmico a la industria papelera, en específico al proceso de corrugado ahorrara 1.88 kW, resultado de la energía de salida del absorbedor, esta energía es obtenida en una unidad de tiempo de un segundo de acuerdo con la definición de un Watt.



Es necesario saber las diferencias entre dos términos para poder realizar los cálculos sobre el ahorro de energía y por ende el ahorro en producción de CO<sub>2</sub> en dicha industria.

Un Watt (W) es una unidad de potencia y la potencia es la tasa a la que la energía se produce o se consume, un Watt-hora (Wh) es una unidad de energía, es la cantidad de trabajo generado o realizado; en concreto, los Watts-hora miden cantidades de energía durante un periodo específico de tiempo y los Watts miden tasas de potencia en un momento en el tiempo.

Por ende, el absorbedor genera una potencia de 1.88 kW.

$$Q_{abs} = 1.88 \text{ kW}$$

Para el siguiente paso de los cálculos es necesario conocer la definición de valor calorífico o calorífico de las sustancias, que es la cantidad de calor por unidad de masa (o volumen) que desprende un combustible al quemarse [32] y está dado en las siguientes unidades:

$$kJ/kg$$

De acuerdo con la tabla de conversión de masa a energía según el tipo de combustible que representa el valor calorífico de los combustibles (Tabla 6.1) se obtiene que para el caso específico del Diesel (combustible utilizado en la industria Grupak para la generación del flujo de vapor) el valor es el siguiente:

$$\text{Valor calorífico del DIESEL} = 11.78 \text{ kWh/kg} \rightarrow 42,408 \text{ kJ/kg}$$





COMBUSTIBLE	FACTOR DE CONVERSIÓN
Gas natural (m <sup>3</sup> )	10.65 kWh/Nm <sup>3</sup> de gas natural
Gas butano (kg)	12.44 kWh/kg de gas butano
Gas propano (kg)	12.83 kWh/kg de gas propano
Gasoil (litros)	11.78 kWh/kg de gasoil
Fuel (kg)	11.16 kWh/kg de fuel
GLP genérico (kg)	12.64 kWh/kg de GLP genérico
Carbón nacional (kg)	5.7 kWh/kg de carbón nacional
Carbón de importación (kg)	7.09 kWh/kg de carbón de importación
Coque de petróleo (kg)	9.03 kWh/kg de coque de petróleo

Tabla 6.1 Conversión de masa a energía según tipo de combustible.

*Gasoil es equivalente a Diesel*

*Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del anexo 8 del Informe Inventarios GEI 1990-2008 (2010) y datos del anexo I del Plan de Energías Renovables en España 2005-2010. El dato de kWh es según PCI (poder calorífico inferior).*

De acuerdo con estas tablas se obtiene la cantidad de masa de diésel que se necesita para generar los 1.88 kW que produce el absorbedor del transformador térmico por absorción.

$$masa (diesel) = \frac{1.88 \text{ kJ/s}}{42,408 \text{ kJ/kg}} = 4.433 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$$

La densidad del diesel es de  $900 \text{ kg/m}^3$ .

$$volumen (diesel) = \frac{4.433 \times 10^{-5} \text{ kg}}{900 \text{ kg/m}^3} = 4.925 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\approx 4.925 \times 10^{-5} \text{ litros de diesel/s}$$

Estos cálculos nos permiten saber que el sistema termodinámico por absorción nos permite ahorrar un consumo de  $4.925 \times 10^{-5}$  litros de Diesel sobre segundo, por cada 1.88 kW generado en el absorbedor.

Para calcular las emisiones asociadas, se debe de aplicar el factor de emisión que corresponda de acuerdo con la Tabla 6.2



COMBUSTIBLE	FACTOR DE EMISIÓN
Gas natural (m <sup>3</sup> )	2.15 kg CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> de gas natural
Gas butano (kg)	2.96 kg CO <sub>2</sub> /kg de gas butano
Gas propano (kg)	2.94 kg CO <sub>2</sub> /kg de gas propano
Gasoil (litros)	2.79 kg CO <sub>2</sub> /kg de gasoil
Fuel (kg)	3.05 kg CO <sub>2</sub> /kg de fuel
GLP genérico (kg)	2.96 kg CO <sub>2</sub> /kg de GLP genérico
Carbón nacional (kg)	2.30 kg CO <sub>2</sub> /kg de carbón nacional
Carbón de importación (kg)	2.53 kg CO <sub>2</sub> /kg de carbón de importación
Coque de petróleo (kg)	3.19 kg CO <sub>2</sub> /kg de coque de petróleo

Tabla 6.2 Emisión asociada a cada tipo de combustible.

*Gasoil es equivalente a Diesel*

$$\begin{aligned} \text{Emisión de CO}_2 &= 4.925 \times 10^{-5} \text{ litros de diesel/s} \left( \frac{2.79 \text{ kg de CO}_2}{\text{litro de diesel}} \right) \\ &= 1.37 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

De acuerdo con el cálculo anterior concluimos que el transformador térmico por absorción nos permite ahorrar un aproximado de  $1.37 \times 10^{-4} \text{ kg de CO}_2/\text{s}$  por cada 1.88 kW de potencia que nos genera el absorbedor.

De acuerdo con este cálculo y considerando los días trabajados en la industria papelera por año, tenemos que:

$$\text{Generación de CO}_2 = 1.37 \times 10^{-4} \text{ kg de CO}_2/\text{s}$$

$$\text{Tiempo de trabajo anual} = 327 \text{ días} \left( \frac{24 \text{ hr}}{1 \text{ día}} \right) \left( \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hr}} \right) = 28.252 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\text{DISMINUCION DE CO}_2 = \text{Generación de CO}_2 \times \text{Tiempo de trabajo anual}$$



$$\begin{aligned} \text{DISMINUCION DE } CO_2 &= (1.37 \times 10^{-4} \text{ kg de } CO_2/s) (28.252 \times 10^6 \text{ s}) \\ &= \mathbf{3,870.52 \text{ kg de } CO_2 \text{ anuales}} \end{aligned}$$



## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones

Es factible satisfacer una parte de la energía que actualmente se desecha por la industria papelera en los procesos térmicos de ésta; del proceso de secado de material corrugado hacia el proceso de pegado de este, por medio de recuperación y revalorización de energía térmica con un transformador térmico de una etapa.

En un proceso ideal, calculado teóricamente para un transformador térmico por absorción de una etapa, se podría recuperar hasta el 48 % de la energía del proceso de secado de material corrugado para transferirla a 108 °C al área de pegado.

La industria papelera es la séptima industria consumidora de energía en México y sus niveles de temperatura la hacen candidato para recuperar parte de ella con ciclos termodinámicos.

Después de un estudio de mezclas que se usan en ciclos termodinámicos de bombas de calor, tipo II (transformador térmico) se determinó que la mezcla que puede operar para las temperaturas de los procesos de secado y pegado es el bromuro de litio.

El rendimiento del transformador térmico expresado como Coeficiente de Operación, fue calculado para la integración de energía desechada actualmente en una industria local (UNIPAK S.A. de C.V.) a 85 °C y fue posible determinar que puede integrar el 48 % de esa energía al proceso de pegado entre 108 y 110 °C.

Una vez establecidas las condiciones de diseño conceptual del transformador térmico, se calculó que con la instalación de un transformador térmico se tendrá un ahorro de 1.88 kW de potencia, una cantidad de 3.8 Toneladas de



CO<sub>2</sub> anuales en la empresa que proporcionó sus condiciones de operación para secado y pegado de material corrugado.

## 7.2 Recomendaciones

Después del estudio realizado en la presente tesis, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Realizar la adaptación del transformador térmico a los procesos seleccionados dentro de la empresa UNIPAK S.A. de C.V.
- Realizar un estudio económico acerca de la adaptación de este transformador para visualizar las ganancias monetarias con respecto a la disminución de consumo de diésel en esta industria.
- Aplicar este estudio a otras empresas y otros procesos dentro de las Industrias papeleras mexicanas para realizar una evaluación a nivel nacional de los beneficios que aportaría la inclusión de transformadores térmicos a nivel planta.



## REFERENCIAS

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. “16 Years of scientific assessment in support of the climate convention”, 2004.
- [2] Dudley, B. (2018). *BF Statistical Review of World Energy*, (67), 56.
- [3] IPCC. “Summary for policymakers” (2013), in Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.
- [4] Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M. y H. L. Miller (eds.). *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group into the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007.
- [5] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2018). *Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México-2018*. México: CEPAL.
- [6] Fernant Romero, J., Cué Aguilar, G., & Renata Gámez, L. (2018). *Diagnóstico de la industria de petrolíferos en México [Ebook]* (p. 34,36,101). México: SENER.
- [7] Domínguez Rios, M., Hernández Contreras, R., & Medina Hernandez, R. (2018). *INNOVACIÓN Y SUSTENTABILIDAD DE LA INDUSTRIA DE PAPEL EN MÉXICO*. In *Revista global de negocios* (5th ed., pp. 87-97). Puebla: IBFR.
- [8] Fernant Romero, J., Cué Aguilar, G., & Renata Gámez, L. (2018). *Diagnóstico de la industria de petrolíferos en México [Ebook]* (p. 19). México: SENER.
- [9] INEGI, I. (2018). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/>



- [10] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). (2018). Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México-2018. México: CEPAL.
- [11] Energías renovables. (2018). Retrieved from <https://www.gob.mx/promexico/acciones-y-programas/energias-renovables-26802>
- [12] Rosenberg J. Romero D., (1996) Estudio de las mezclas bromuro de litio-agua y carrol<sup>TM</sup>-agua en transformadores térmicos por absorción de una etapa, México, 04,100.
- [13] Keith E. Herold., Reinhard Radermacher., & Sanford (2016) Absorption chillers and heat pumps. (p. 6). CRC Press.
- [14] Alfonso García-Gutiérrez., Barragán Rosa M., & V.M. Arellano (2008). Investigación y desarrollo tecnológico sobre bombas de calor en México operando con energía geotérmica. (p.3) Instituto de investigaciones eléctricas. México
- [15] Alternkich (1913), Reversible Absorptions machine, Zeitschrift fur die gesamte alte-Industrie, 20(1), pp.1-9.
- [16] K. Nesselmann (1933), Kälteindustne, Wiss Veroffen-Siemens Konzern, Vol. 12, pp.89.
- [17] Herold K. E., Radermacher R., Klein S. A., (1996). Absorption chillers and Heatpumps, CRC press, USA.
- [18] Ibarra B. Jonathan (2011) Determinación del potencial de recuperación de calor de desecho industrial con un DSHT. (p.9,18). México.
- [19] Kurem E, Horuz I. (2001). "A comparison between ammonia – water and water – lithium bromide solutions in absoroption heat transformers". Int Commun Heat Mass Transfer, 28 (3), 427-38.



- [20] Philip Donnellan, Kevin Cronin, Edmon Byrne. (November 2014). Recycling waste heat energy using vapour absorption heat transformer: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1290-1304.
- [21] Diwekar U. (2008). *Introduction to applied optimization*, Vol. 22, Springer, New York, USA.
- [22] Edgar T. F., Himmelblau D. M., Lasdon L. S. (2001). *Optimization of Chemical Processes*, Second edition, McGraw-Hill, New York, USA.
- [23] Xuehu Ma, Jiabin Chen, Songping Li., (2003) Application of absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant. *Applied Thermal Engineering*, 23, 797-806.
- [24] Puppo Hugo Alberto, (2008). *Simulación matemática. Aplicaciones en la ingeniería*. Pp.421,422. Argentina.
- [25] T. Saito, Annex XIV- working fluids and transport phenomena in advanced absorption (H.P.), *Newsletter of the IEA Heat Pump Centre*, Vol. 10, No 1, March 1992, pp 26-27
- [26] Galindo Luna, Yuridiana R, Rosenberg J. Romero D (2016). Diseño térmico de un condensador aletado para un sistema de aire acondicionado por absorción. (p.257). *Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química*. México.
- [27] Jason Alvarado Rodríguez. (diciembre 2015). Consumo y costos, la energía que mueve la industria. *Corrugando*, 50, 32.
- [28] Michel Wakim, Rodrigo Rivera-Tinoco. (Julio 2018). Absorption heat transformers: Sensitivity study to answer existing discrepancies. *Renewable Energy*, 130, 881.
- [29] Roberto Baviera. (diciembre 2014). Vapor: energía eficiente y limpia en máquinas corrugadoras. *Corrugando*, 44, 21.





[30] A. B. Stuij, The impact of H.P.s on the greenhouse effect, Newsletter of the IEA Heat Pump Centre, Vol. 10, No 3, September 1992, p 17

[31] R. M. Lazarrin, Heat pumps in industry II: application, Heat Recovery Systems & CHP, Vol 15, No 3, April 1995, pp 305-317

[32] Martina, P., Aeberhard, R; García Solá, E. (2011). Diseño y construcción de un calorímetro de Junkers para determinación del poder calorífico del biogás. Avances en Energías renovables y medio ambiente, 15, 09.



## ANEXO I. Publicaciones en Congresos

M. Harumi Bello Guadarrama, Rosenberg J. Romero, *“Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria papelera mediante la inclusión de un ciclo termodinámico sustentable”*, XL Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en ingeniería Química (AMIDIQ), **Mayo 2019**.