Evaluación de oportunidades para la conservación de la energía en una máquina de papel

Assessing Opportunities for Energy Conservation in a Paper Machine

Juan Pedro Hernández-Touset[1*] https://orcid.org/0000-0002-0032-8685
Lisnedys Rodríguez-González[2]https://orcid.org/0000-0002-5464-8967
Agustín García-Rodriguez[1] https://orcid.org/0000-0002-8897-0671

[1]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba
[2]Empresa Pulpa Cuba, Trinidad, Sancti Spíritus. Cuba

[*]Autor para correspondencia. Correo electrónico: juanpedro@uclv.edu.cu

RESUMEN

Las máquinas de papel consumen grandes cantidades de energía y en la mayoría de los casos son posibles los ahorros. La sección de secado en la máquina de papel ha sido modificada estructuralmente a través de 60 años de operación, con limitado aprovechamiento del sistema para la recuperación del calor. El objetivo del trabajo es evaluar las oportunidades de conservación de la energía, mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía en la fábrica de papel. Se aplican metodologías para el balance de energía y la integración de calor, teniendo en cuenta los requisitos que especifica la norma cubana ISO 50001 para los sistemas de gestión de la energía en cuanto a la revisión energética. El análisis del pellizco se aplica con el uso de los recursos informáticos HENSAD y Aspen Energy Analyzer. Los indicadores de desempeño energético propuestos constituyen una referencia para la definición de una línea base energética. Se identifican oportunidades de conservación de la energía con un ahorro total anual

de $ 48 902 que hace factible ejecutar un proyecto de $ 35 546, cuya inversión se estima recuperar en 2 años.
Palabras clave: energía; secado de papel; integración de calor.

ABSTRACT

Paper machines consume large amounts of energy and in most cases savings are possible. The drying section in the paper machine has been structurally modified through 60 years of operation, with limited use of the heat recovery system. The objective of the work is to assess the opportunities for energy conservation, through the application of energy management systems in the paper factory.Methodologies are applied for energy balance and heat integration, taking into account the requirements specified by the Cuban standard ISO 50001 for energy management systems in terms of energy review. Pinch analysis is applied using HENSAD and Aspen Energy Analyzer computing resources. The proposed energy performance indicators constitute a reference for the definition of an energy baseline. Energy conservation opportunities are identified with a total annual saving of $ 48,902 that makes it feasible to execute a project of $ 35 546, whose capital cost is estimated to be recovered in 2 years.
Keywords: energy; paper drying; heat integration.

Introducción

El proceso de secado consume típicamente el 80 % del vapor total requerido en la fábrica de papel. La sección de secado en la máquina de papel ha sido modificada estructuralmente a través de 60 años de operación, con limitado aprovechamiento del sistema para la recuperación del calor.

Actualmente son necesarios los estudios de análisis de la energía y de integración de calor en la etapa de secado del papel que permitan la evaluación del desempeño energético y la identificación del potencial de energía factible de recuperar, a partir del cual proponer modificaciones en el sistema de recuperación del calor y por tanto mejorar los indicadores de eficiencia térmica de la etapa y de

la fábrica. En la ausencia de sistema de recuperación del calor, alrededor del 75 % de calor suministrado a los secadores va junto al recurso agua hacia la atmosfera. Obviamente, la recuperación y el reúso de estos dos preciados recursos es simplemente beneficioso para las fábricas ya que se ahorran recursos financieros en combustible y agua y permite el uso eficiente y racional de los recursos. [1]Hay una alta prioridad de encontrar eficiencias para la sección de secado. [2] La sección de secado consume el 64 % de la energía total[3] y es por lo que cualquier medición de la eficiencia energética del proceso de producción de papel tiene que comenzar con el análisis del consumo energético del proceso de secado. El periodo de pago en proyectos de inversión de ahorro de vapor puede ser pequeño si los proyectos de reducción del uso de la energía conducen a ahorros de combustible. [4]El análisis del pellizco es una herramienta poderosa, la cual, no obstante, tiene que aplicarse con cuidado, en la medida que puede haber muchas razones de proceso de porque un proyecto particular de recuperación de calor no puede ser implementado. No obstante, el conocimiento del nivel teórico mínimo de consumo de energía es un poderoso motivador para mejorar la eficiencia y reducir el desperdicio. [5]

El objetivo del presente trabajo, es evaluar las oportunidades de conservación de la energía, mediante la aplicación de sistemas de gestión de la energía en la fábrica de papel.

Materiales y métodos

La evaluación del desempeño energético de la sección de secado de papel se sustenta en la implementación de las actividades de la revisión energética según la norma cubana ISO 50001 para los sistemas de gestión de la energía. [6]

La auditoría energética comprende las actividades de: (1) inspección visual inicial, (2) registro y análisis de los reportes de operación, (3) balances energéticos, (4) análisis de los resultados y propuestas de mejoras al proceso.

Se aplican las metodologías del balance termoenergético de Espinosa[7] y deMajonin[8]para el balance de calor en la etapa de secado, que constituyen las

principales actividades de la revisión energética, con el objetivo de determinar, analizar y comparar evaluativamente los indicadores de desempeño energético (IDEns).

Se aplica la integración de calor en el proceso de fabricación de papel para el análisis y diseño de redes de intercambio de calor (red de recuperación de calor) mediante la tecnología del pellizco[4]y el uso de los recursos informáticos Aspen Energy Analyzer[9] y HENSAD. [10]

Diagnóstico energético de la sección de secado de la máquina de papel

La sección de secado consta de 41 cilindros secadores, alimentados con vapor y cubiertos por una campana, desde la cual se extrae la corriente de aire caliente húmedo o vapor vegetal, pero no se aprovecha su calor latente y sensible mediante un sistema de recuperación del calor. La figura 1 muestra el equipamiento, accesorios y sistemas de circulación del vapor y condensado de la sección de secado.Se estima que más del 50 % del condensado de los secadores se vierte a las aguas residuales y según documentación de diseño, se debe reponer hasta 30 % del agua para la alimentación de la caldera.

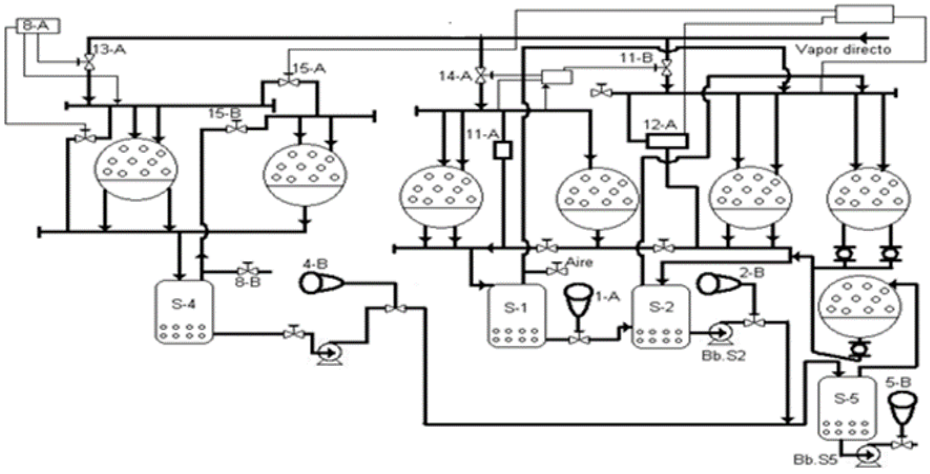

Fig.1- Esquema de la sección de secado de la máquina de papel

El registro y análisis de los reportes de operación de la máquina de papel correspondió a la producción de papel kraft en tres meses del año 2019. La tabla 1 muestra los reportes de operación de un día con producción alta y estable. La disponibilidad (tiempo efectivo/ tiempo total) se considera un indicador para determinar la eficiencia energética de la fábrica.

Tabla 1- Reporte de operación de la máquina de papel

Turno	Peso básico (g/m^2)	Velocidad (m/min)	Tiempo disponible (min)	Tiempo efectivo (min)	Producción total (t)	Disponibilidad (t efectivo/t total)
A	110	105	480	480	29,62	1
B	200	95	480	480	30,2	1
C	200	95	480	360	22,81	0,75

La figura 2 muestra el perfil de temperaturas del papel y del cilindro, el cual permite estudiar el comportamiento del calentamiento en los grupos de secadores, la aplicación del balance de calor y la integración de calor.

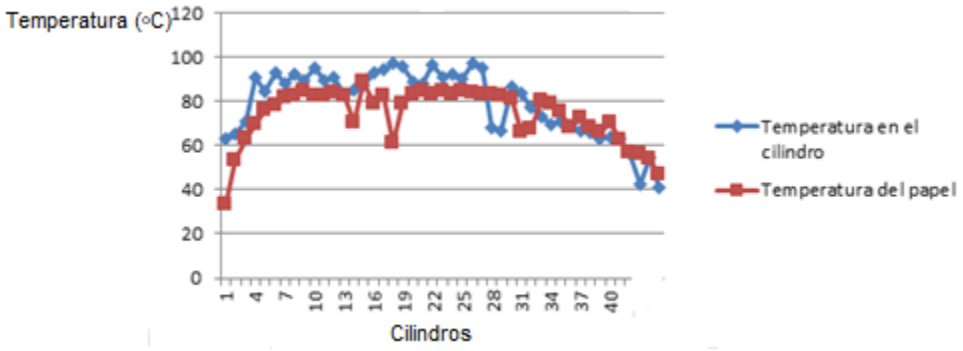

Fig. 2- Perfil de temperaturas en la sección de secado

Balance de calor en la sección de secado

El balance de calor comienza el cálculo del flujo de papel seco(G), expresado en kg/h, según la ecuación (1). Se selecciona el reporte del turno B de la tabla 1 que produjo 30 t papel kraft con peso básico (g) 200 g/m^2, una velocidad de la máquina (V) de 95 m/min. El ancho del papel en el bobinado (At) es de 3,7 m y sequedad inicial (Si) y final (Sf) 32 % y 94 %, respectivamente. Los flujos de agua antes del

secado (Wi), después del secado (Wf) y de agua evaporada (W) están dados por las ecuaciones (2), (3), (4).

$$G = 60 \cdot At \cdot V \cdot g \cdot Sf \quad (1)$$

$$Wi = G \cdot \frac{(100 - Si)}{Si} \quad (2)$$

$$Wf = G \cdot \frac{(100 - Sf)}{Sf} \quad (3)$$

$$W = Wf - Wi \quad (4)$$

El valor de G calculado, como se observa en la tabla 2, es similar al valor de la producción real mostrada en la tabla 1.

El calor total requerido para el secado del papel (Qtmp) es la suma del calor útil (Qu) y el calor perdido (Qp), expresados en kJ/h, dado por la ecuación (5); a su vez el calor útil está constituido por el calor para el calentamiento de la fibra absolutamente seca (Qu_1), el calor para el calentamiento del agua que está en el papel al inicio del secado (Qu_2) y el calor necesario para la vaporización del agua (Qu_3), valores que se muestran en la tabla 2.

$$Qtmp = G \cdot Cpp \cdot (Tf - Ti) + Wi \cdot Cpa \cdot (Tf - Ti) + W \cdot (i - Cpa \cdot Tms) + Qp \quad (5)$$

El calor especifico del papel (Cpp) es 1,30 kJ/kg^oC[8], la temperatura media de secado (Tms) es 73,62 (^oC), la entalpia del vapor de agua (i) a la Tms es 2 633,26 kJ/kg[(11)], el calor especifico del agua (Cpa)es 4,19 (kJ/kg ^oC), y las temperaturas antes (Ti) y después del secado (Tf)son 33 ^oC y 84,6 ^oC, respectivamente.

El cálculo de las pérdidas de calor en la etapa de secado requiere un alto número de variables y propiedades que, en ocasiones, por razones de disponibilidad de los datos se recurre a valores aproximados o a la aplicación de métodos numéricos[(1)]La literatura [(12)]reporta43,1% en una fábrica con alto nivel de control automático del proceso. En estudios recientes en la fábrica objeto de evaluaciónse reporta [(13)] un 20 % de pérdidas de calor, pero se estima que pueden ser mayores por el alto consumo de vapor que presenta la fábrica, muy cercano a su capacidad nominal.

Otros autores [(14)] reportan que una eficiencia térmica típica en el secado del papel es 48 %, por tanto, las pérdidas de calor serian el 52 %. También hay trabajos que

plantean que[15]la eficiencia energética de la máquina de papel es aproximadamente de 66 % (34 % de pérdidas de calor), valor que se asume para los cálculos que suceden en el presente estudio. La tabla 2 muestra los resultados del análisis de la energía.

El consumo de vapor en la máquina de papel (G_{MP}) está dado por:

$$G_{MP} = \frac{Qtmp}{i - Cpa \cdot tv} \qquad (6)$$

A 0,51 MPa, la temperatura de saturación del vapor (tv) es 152,6 ^{o}C y su entalpia(i) 2749 kJ/kg. [11]

- Estimación del calor residual y condensado recuperables en el vapor vegetal.

En cuanto a la recuperación del vapor vegetal condesado, el flujo de agua se debe determinar con el flujo de aire y la humedad de aire. En ausencia de estos datos, la máxima recuperación de condensado es el flujo total de agua evaporada (W) mostrado en la tabla 2. Por tanto, el flujo máximo de calor sensible (Qs) recuperable se expresa como:

$$Qs = W \cdot Cpa \cdot \Delta T \qquad (7)$$

donde

ΔT es la diferencia de temperatura del aire en la entrada y salida de la campana de secado, con valores de 80 ^{o}C y 32 ^{o}C, respectivamente.

El máximo flujo de calor latente disponible para recuperación está dado por:

$$Q_L = W \cdot \lambda \qquad (8)$$

donde

λ es el calor latente del vapor vegetal a 80 ^{o}C.

Por tanto, utilizando las ecuaciones (7) y (8), los valores del máximo calor latente y calor sensible son 428 kW y 5239,16 kW, respectivamente. Esto significa un total de 5667,16 kW disponibles para su recuperación. Esta potencia térmica es el 60 % de la potencia térmica suministrada por el vapor a los cilindros (Qtmp).

Con relación a este análisis, Yisahak[1] reporta 72,6 %.

El balance de vapor, calor y agua en la fábrica y el balance de calor en la sección de secado permitieron definir los indicadores de desempeño energético mostrados en la tabla 3.

Tabla 2- Resultados del análisis de la energía

Parámetro	Magnitud
Calor total requerido para el secado del papel (Qtmp), kJ/h	31 937 098,772
Calor útil (Qu), kJ/h	21 078 485,19
Calor para el calentamiento de la fibra absolutamente seca (Qu_1), kJ/h	265 966,83
Calor para el calentamiento del agua que está en el papel al inicio del secado (Qu_2), kJ/h	1 821 617
calor necesario para la vaporización del agua (Qu_3), kJ/h	18 990 901,28
Calor perdido en el secado (Qp), kJ/h	10 858 613,58
Producción bruta de papel (G), kg/h	3 964,92
Flujo de agua en el fieltro mojado antes del secado (Wi), kg/h	8 425,45
Flujo de agua después del secado (Wf), kg/h	253,08
Flujo de agua evaporada (W), kg/h	8 172,37
Consumo de vapor en la máquina de papel (G_{MP}), kg/h	15 134
Pérdidas de calor, %	34
Consumo de combustible, kg/h	740
Gasto de combustible por pérdidas de calor, kg/h	251
Condensado, kg/h	15 134
Eficiencia térmica, %	66

Tabla 3- Indicadores de desempeño energético (IDEns).

Parámetros	Indicadores de eficiencia	Reportado
Consumo de vapor	3,82 tv / t de papel seco	2,26[8] y 3,3[18]
Consumo de energía	8 064,92 MJ / t de papel seco	4 936[8]
Combustible (FO)	0,19 t FO / t de papel seco	0,377 (Datos de fábrica, 2019))
Agua evaporada/papel seco	2,0 t agua evap. / t de papel seco	1-1,5 [19]
Consumo vapor/Agua evaporada	1,85 tv / t de agua evaporada	1,15 – 1,2lbv/lb agua evaporada[20]
Condensado a la caldera, %	50	70 (Diseño original)
Pérdidas de calor, %	34	34[15]
Eficiencia térmica, %	66	66[15]

El consumo de vapor y la demanda de servicio de calentamiento son superiores en aproximadamente 40 % al reportado por Majonin. [8] El consumo especifico de combustible, reportado por la fábrica es el doble de consumo específico calculado en el presente estudio. La cantidad de agua evaporada con relación al papel producido es cercana al límite superior reportado y el consumo de vapor por tonelada de agua evaporada es ligeramente superior al rango reportado; en una fábrica con operación relativamente estable durante 60 años. De forma general, todos los indicadores muestran una baja eficiencia energética en el secado del papel.

Determinación de los objetivos energéticos de la red de intercambio de calor

La integración de calor (IC)se aplica para la determinación de los objetivos energéticos de la red de intercambio térmico, tales como los requerimientos mínimos de servicios de calentamiento y de enfriamiento, la máxima recuperación de calor (MRC), el número mínimo de unidades de transferencia de calor y el área mínima mediante la aplicación de métodos gráficos y numéricos combinadosde la tecnología del pellizco [4,16]y para el diseño de la red de intercambio de calor (RIC) o red de recuperación de calor.

En la figura 3 se muestra el diagrama simplificado del proceso de fabricación de papel y en la tabla 4 los flujos (m) y datos térmicos de las corrientes.

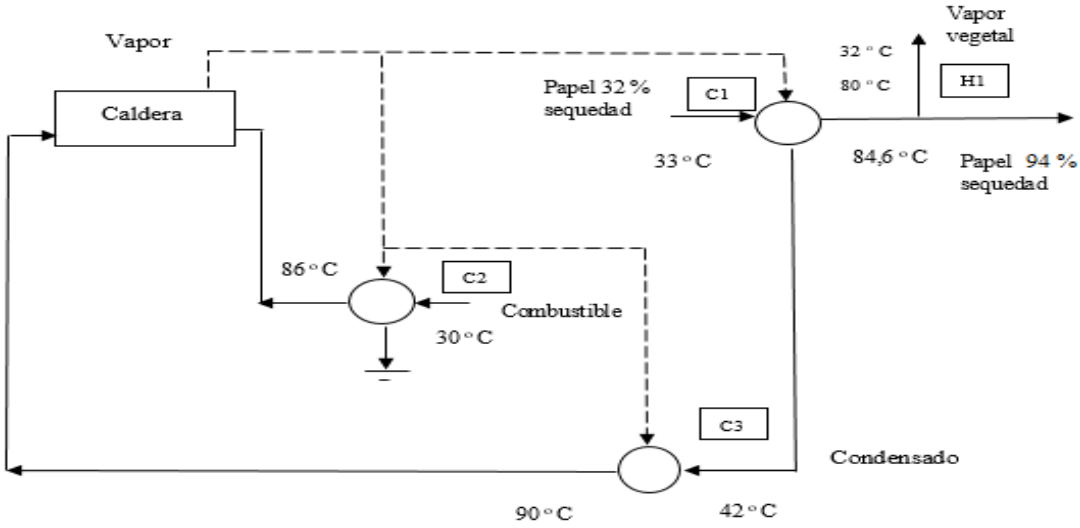

Fig. 3- Diagrama de flujo del proceso

Los flujos considerados en el análisis son: flujo de papel húmedo (C1), flujo de combustible (C2), flujo de condensado de los cilindros (C3) y flujo de vapor vegetal (H1).

Tabla 4- Datos térmicos de las corrientes

Corriente		m (kg/s)	cp (kJ/kg ºC)	CP= m·cp (kW/º C)	Ti (º C)	Tf (º C)	ΔH (kW)	Coeficiente pelicular[16], h (W/m²ºC)
Nombre	Tipo							
H1	Caliente	2,27	4,19	9,5	80	32	456	5000
C1	Fría	1,17	1,3	1,52	33	84,6	78,43	500
C2	Fría	0,21	2,09	0,44	30	86	24,64	1000
C3	Fría	4,20	4,19	17,59	42	90	844,7	6000

La ∆Ten este caso en particular se establece en 20 °C, la cual, según la experiencia se encuentra entre 10 - 20 ^{o} C[4] para procesos de fabricación de pulpa y papel. La tabla 5 muestra el resultado del cálculo manual por el método numérico algoritmo de la tabla problema y la figura 4 muestra la aplicación del método grafico (curvas compuestas) con uso del software HENSAD[10]. Los resultados coinciden en ambos métodos.

Tabla 5- Algoritmo de la tabla problema

Intervalo	Corrientes				Tint	ΣCPc –ΣCph	ΔHint	Deficit/ Exceso	Cascada impráctica, ΔH cas	Cascada práctica
	H1	C1	C2	C3	°C	kW/°C	kW		kW	kW
0					100	0	0		0	757,6
1				↑	96	17,59	70,39	Déficit	-70,39	687,21
2			↑		94,6	18,04	25,25	Déficit	-95,64	661,96
3		↑			70	19,56	481,12	Déficit	-576,7	180,9
4	↓				52	10,05	180,8	Déficit	-757,6	0
5					43	-7,55	- 67,96	Exceso	-689,6	68
6					40	-9,07	-27,21	Exceso	-662,4	95,2
7					22	-9,51	-171,18	Exceso	-491,2	266,4
CP, kW/°C	9,51	1,52	0,44	17,59						

Al valor 0 de la cascada práctica o factible le corresponde la temperatura del punto de pellizco (Tp) 52 °C. Al sumar ∆Tmín/2 a Tp, el punto de pellizco de las corrientes calientes ocurre a 62 °C. Similarmente, al restar ∆Tmín/2 a Tp, el punto de pellizco de las corrientes frías resulta a 42°C.

La literatura [(4)] refiere que, dependiendo de la red de agua y la técnica de extracción de datos utilizada, la temperatura del pellizco en fábricas de pulpa y papel se encuentra en el rango de 60°C a 120°C.

La demanda mínima de servicio de calentamiento (vapor) es de 757,6 kW y la demanda mínima de servicio de enfriamiento (agua) es 266,4 kW. La MRC es 190,5 kW como se observa en la figura 5 según reporte del software HENSAD, [(10)]

la cual se obtiene mediante la diferencia entre la energía acumulada disponible de la corriente caliente (456,5 kW) y la mínima demanda de servicio de enfriamiento.

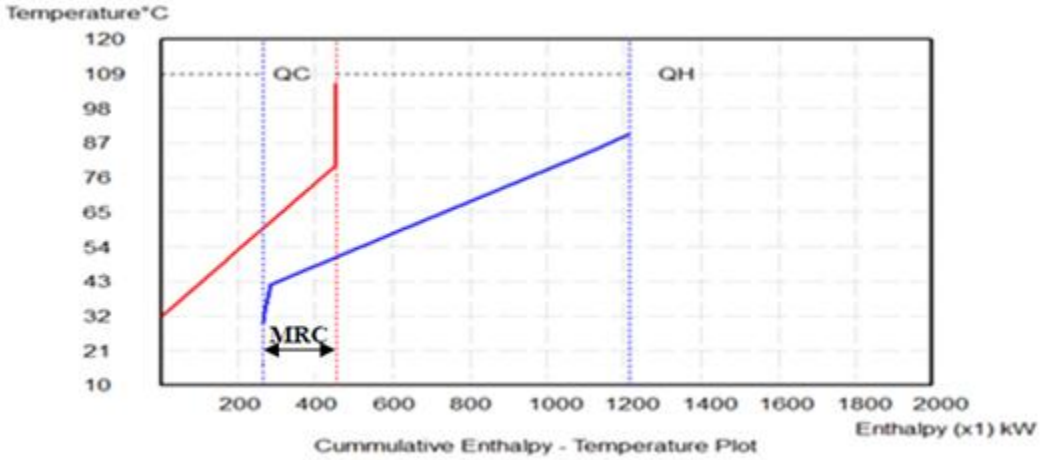

Fig.4-Diagrama de las curvas compuestas de RIC actual

En la figura 5 también se muestra el grafico de sensibilidad que muestra el comportamiento de la energía en el proceso y el área de transferencia de calor de la red de intercambio térmico en función de ΔTmin. [10] El servicio de calentamiento y el de enfriamiento aumentan con el aumento de la ΔTmin, lo que indica que es un proceso con pellizco y es factible de optimizar. El área de la RIC para la ΔTmin = 20 ^{o}C es de 100 m^{2}, calculada mediante el software HENSAD.

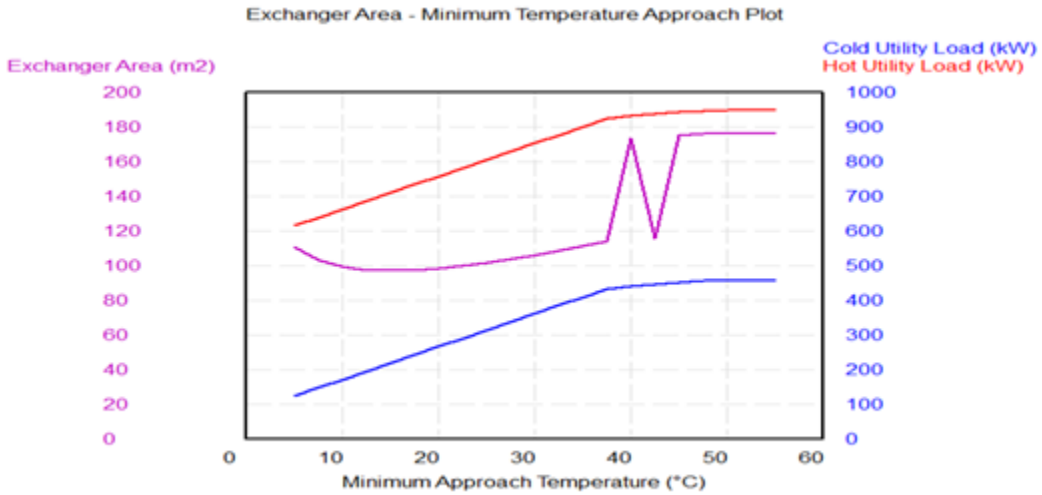

Fig. 5- Diagrama de servicios(energía) y área vs. ΔTmin de la RIC

El mínimo número de unidades en sistemas de recuperación de calor que satisface el requerimiento de MRE (sin descomponer la red en el pellizco) es otro valor objetivo útil, el cual está dado por la ecuación (9) y se definen 5 unidades.

$$Umin.global = Nc + Nf + Nservicios - 1 \qquad (9)$$

Diseño de la red de intercambio de calor

El compromiso entre la energía y la inversión sugiere que los intercambiadores individuales tengan una diferencia de temperatura no menor que el ΔTmin entre las curvas compuestas. Si se alcanza el objetivo energético determinado por las curvas compuestas o el algoritmo de la tabla problema, el diseño no puede transferir calor a través del pellizco. Para satisfacer esta regla, el proceso se divide en el pellizco y se representan los datos de corrientes en el diagrama de rejillas mostrado en la figura 6.

La RIC diseñada está constituida por tres unidades de servicio de calentamiento (H) y un intercambiador de calorarriba del pellizcoy una unidad de servicio de enfriamiento (C) debajo del pellizco. Sobre el pellizco se puede usar vapor (hasta Qh min) con una demanda de 758 kW y por debajo del pellizco agua fría (hasta Qcmin) con una demanda de 266 kW.

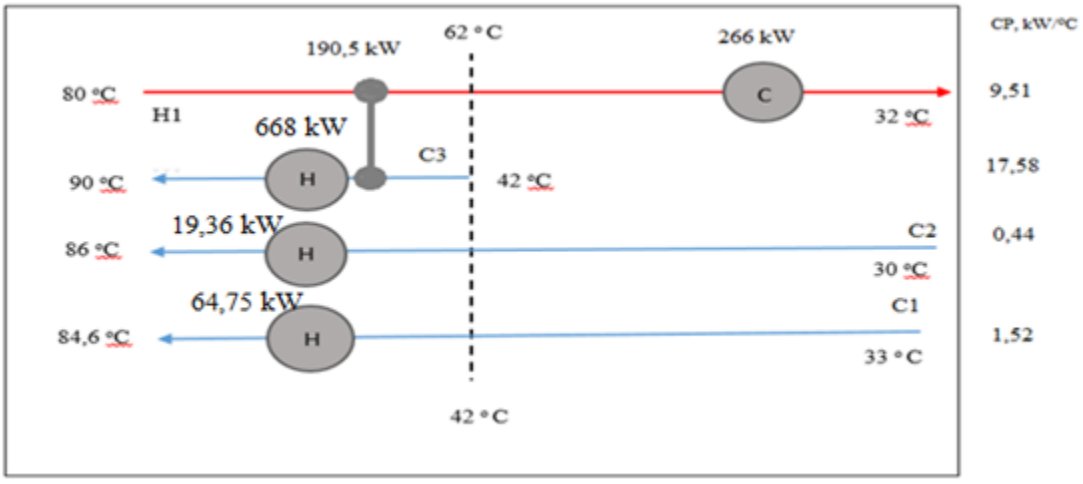

Fig. 6- Diagrama de rejilla del diseño de la RIC

Arriba del pellizco el número de corrientes calientes (N_H) es menor que el número de corrientes frías (N_C) y se comprueba que CPh ≤ CPc, es decir, 9,51< 17,58, por

tanto, es factible la combinación de las corrientes H1 y C3. Debajo del pellizco no hay combinaciones factibles de las corrientes. La figura 7 muestra los datos del intercambiador que satisface la MRC según reporte del software Aspen Energy Analizer. [9]

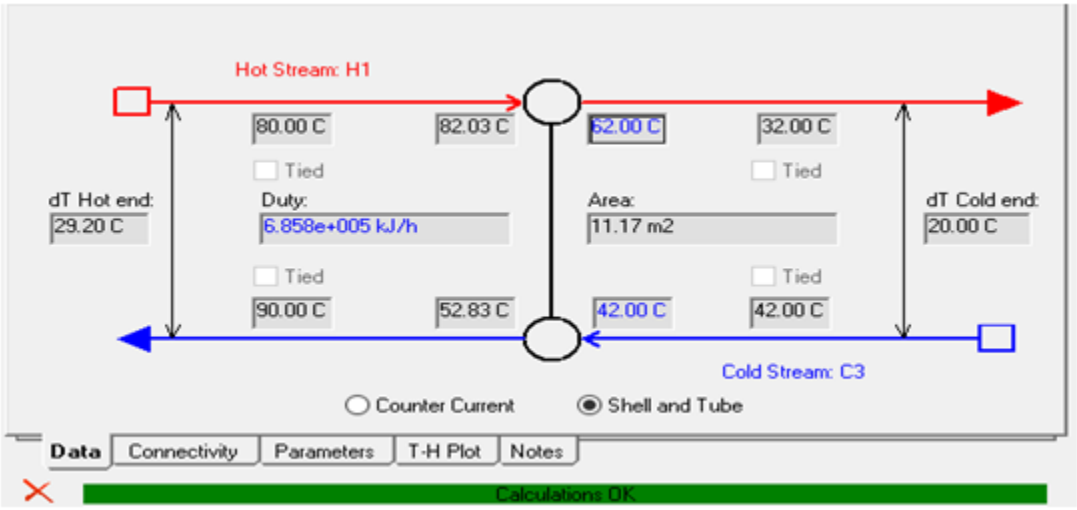

Fig. 7- Datos del intercambiador de calor vapor vegetal - condensado

Evaluación económica

En la tabla 6 se muestran los requerimientos mínimos de servicios de calentamiento y enfriamiento, laMRC y los ahorros potenciales en unidades de potencia térmica de recursos energéticos y los recursos monetarios para el sistema de recuperación del calor en el secado del papel. Se asumen un valor calórico neto del combustible de 40 600 kJ/kg[17], 300 días de operación al año, 20 horas/día y precios del combustible (FO) y agua de 260$/t - 360 $/t y 0,1 $/m^3, respectivamente y se adopta el CUC como única moneda en todos los análisis.

Para propósitos de estimación de la factibilidad de la inversión solo se considera el ahorro de combustible.

Los ahorros potenciales para estimar la factibilidad de proyectos de inversión se basan en la MRC de la RIC diseñada.

Los valores asumidos de vida útil y tasa de interés son de 15 años y 12 %, respectivamente[21, 22]y un método de depreciación lineal. En el análisis de rentabilidad se utiliza el libro Excel Cost&EvaluationWorkbook que acompaña a la

5.ta edición del libro PlantDesign and Economicsfor Chemical Engineeers y la metodología utilizada por Peters. (23) En correspondencia con el diseño de la RIC se propone un intercambiador de calor y un condensador, que constituyen parte del sistema de recuperación del calor.

Se selecciona un intercambiador de calor con tubos de acero inoxidable AISI 304 con un área definida por la aplicación del método del pellizco.

Tabla 6- Estimación de los ahorros de combustible y agua

Demandas	Análisis energético		Integración de calor ΔTmin = 20ºC				Ahorro		
	kW	m³/h	Servicio mínimo			MRC kW	t/año FO	m³/año	$/año
			kW	m³/h	t/h				
Calentamiento (vapor)	5239,16	-	758	-	1,3	190,5	95,34	-	48 902
Enfriamiento (agua)	428	8,172	266	11,4	-	190,5	-	90 680	-
Total									48 902

La actualización del costo del intercambiador se realiza mediante un índice de costo de 356 (1991) y 619,2 para el año 2019. (24)

Se selecciona un condensador de placas y marco(22) para la condensación del vapor vegetal. La tabla 7 muestra los resultados de la estimación de los costos de adquisición del equipamiento para el sistema de recuperación del calor. Los indicadores de rentabilidad (VAN y PRD) se obtuvieron a partir del costo de inversión y los ahorros estimados, los cuales se muestran en la tabla 8 y figura 8. El costo de adquisición de los equipos que constituyen el sistema de recuperación de calor presupone un costo de inversión de $ 35 546,500 para el proyecto de inversión.

Tabla 7- Costos de adquisición de los intercambiadores de calor

Equipo	Parámetro de selección	Costo de adquisición ($)	Costo actualizado ($)
Intercambiador de calor	Area de transf. de calor = 11,17m²	4000,00[23]	6 500,00
Condensador	Flujo máx. = 20 m³/h	5000,00[25]	5000,00
Sistema de recuperación de calor en el secado de papel			11 500,00

Tabla 8-Resultados del análisis de factibilidad.

Indicadores de rentabilidad	
Valor actual neto (VAN), $	265 986
Período de recuperación al descontado (PRD), años	2

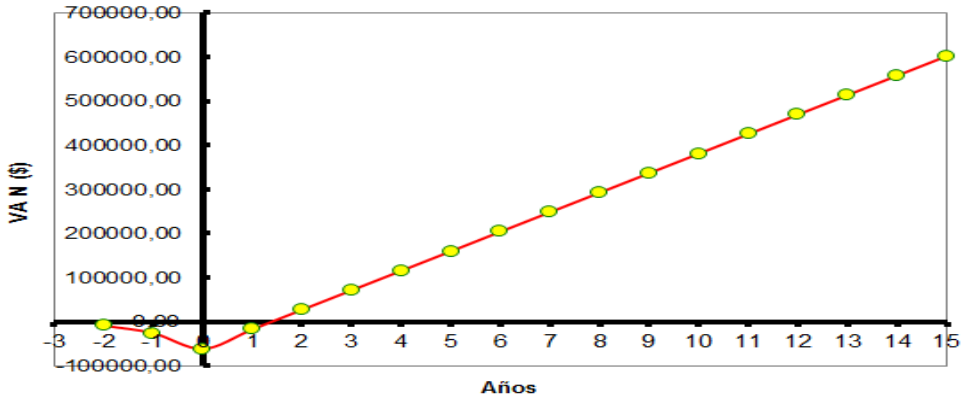

Fig.8-Flujo de caja

Conclusiones

1. Los indicadores de desempeño energético propuestos, constituyen una referencia para la definición de una línea base energética, a partir de la cual se puede medir la eficiencia energética.
2. El flujo de vapor vegetal contenido en flujo de aire extraído de la sección de secado, con una energía de 5 152 MJ/ t papel, constituye la fuente de calor que puede ser utilizada para incrementar la recuperación del calor con alto potencial de calor latente y sensible recuperable, y representa el 63,88 % de la potencia térmica requerida para el secado del papel, cercana a valores reportados.
3. La definición de los indicadores de desempeño energético, los objetivos energéticos de la red de intercambio de calor y el diseño de la red de intercambio de calor, han permitido identificar oportunidades para la conservación de la energía en la máquina de papel.
4. Mediante el análisis de la energía y la aplicación de la metodología de integración de calor en el proceso de fabricación de papel se identifica un

ahorro total anual de $ 48 902 que hace factible ejecutar un proyecto de inversión con un costo de $ 35 546,5, recuperable en 2 años.

5. La máquina de papel tiene fuentes potenciales para la recuperación del calor en el sistema de condensados y en el flujo de aire caliente húmedo, que constituyen estudios para la continuidad de las investigaciones en la fábrica.

Referencias bibliográficas

1. YISAHAK, M, Dribssa, E, Didwania, M A. Methodology for Determination of Waste Heat and Water Recovery Potential from the Dryer Section of a Pulp and Paper Factory.*International Journal of Scientific & Engineering Research*.2017,**8** (5), pp. 1552-1557. ISSN 2229-5518. Disponible en : http://www.ijser.org

2. LAM, E. *Energy Analysis of the Drying Hood in Paper Machine 1 at Stora Enso, Nymölla Mill*. Tesis de maestría inédita. Lund University, 2016. Disponible en: http://lup.lub.lu.se

3. DIACONESCU, I, Patrascu, R, Minciuc, E. Energy Efficiency Study of the Paper Making Drying Process. *International Conference on Energy and Environment (CIEM)*, 2017, pp. 187 – 191. doi:10.1109/ciem.2017.8120806

4. KLEMEŠ, J J. *Handbook of Process Integration. Minimisation of Energy and Water Use, Waste and Emissions.* UK: Woodhead Publishing Limited, 2013. ISBN 978-0-8570-9593-0

5. FRANCIS, D W. Towers, M T, Browne, T C. *Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry – An Energy Benchmarking Perspective*. Her Majesty de Queen of Right of Canada, 2002. ISBN 0-662-66163-X. Disponible en :
https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21552944

6. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso. NCISO 50001:2011. La Habana: Oficina Nacional de Normalización. Disponible en:
http://www.nc.cubaindustria.cu

7. ESPINOSA, R, Hernández, J P, Espinosa J, Castellanos J.*Gestión energética eficiente y análisis de los sistemas auxiliares en las plantas químicas*.Editorial Feijóo. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba, 2014.ISBN 978-959-250-992-4

8. MAJONIN, A. G. *Principios de la tecnología papelera*. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Cuba,1976.

9. ASPENTECH. *Aspen Energy Analyzer V 10*. Aspen Technology Inc. USA, 2017

10. TURTON, R. *Richard Turton Professor, Chemical and Biochemical Engineering*[en línea], 2001 Disponible en: https://richardturton.faculty.wvu.edu/files/d/23f41a8a-c4b4-4fdd-8bfe-bcab0f9ca0c3/hensad.zip

11. CHEMICALOGIC STEAM TAB COMPANION. *Thermodinamic and Transport Properties of Water and SteamV 2.0.* [enlínea]. ChemicaLogic Corporation. Copyright 1999-2003. Disponible en: http://www.chemicalogic.com

12. HERNÁNDEZ, J. P. *Modelación matemática de la máquina de papel en el combinado de papeles blancos. Panchito Gómez Toro*. Trabajo de diploma inédito. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 1985

13. HERNÁNDEZ, J P, Guevara, M, Echerri G, Rusindo, I, Espinosa R.Evaluación energética en la papelera Pulpa Cuba. *Revista Centro Azúcar*[en línea]. 2015,**42**(4), pp. 66 – 74. ISSN 2223- 4861. Disponible en: http://centroazucar.qf.uclv.edu.cu

14. KREITH, F, Goswami, D Y.*Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*. USA:CRC Press, 2007. ISBN 978-0-8493-1730-9

15. CHEN, X., Li, J., Liu, H., Yin, Y., Hong, M., Zeng, Z., Energy System Diagnosis of Paper-Drying Process: Part 1. Energy Performance Assessment. *Drying Technology*.USA: Taylor & Francis Group,2016. ISSN: 0737-3937 [impreso] 1532-2300 [enlínea]Disponible en: http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2015.1087022

16. SMITH, R. *Chemical Process Design and Integration*, England: John Wiley & Sons, Ltd., 2005. ISBN 0-471-48680-9.

17. ENGINEERING TOOLBOX. *Fuels - Higher and Lower Calorific Values* [enlínea], 2003 [Consultado 13.10.2020]. Disponible en: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

18. UNIDO. OPEN DATA PLATAFORM. *Handy Manual. Pulp and Paper Industry. Output of a Seminar on Energy Conservation in Paper and Pulp Industry* [enlinea]. 1993. Disponible en: https://open.unido.org/publications

19. AEE INTEC. *Drying in paper industry* [online], 2016, Disponible en: http://wiki.zero-emissions.at/index.php?title=Drying_in_paper_industry&oldid=231699 19

20. HILL K. *Improving Dryer Efficiency, Kadant Johnson Inc*. [en línea], 2013, 42 p., Disponible en: https://www.rpta.org/resources/Improving_Dryer_Efficiency.pdf

21. CONSEJO DE MINISTROS DE CUBA. *Reglamento del proceso inversionista*. *Decreto 327/2014*[en línea]. Documento publicado en Gaceta Oficial, 11/10/2014. Disponible en: http://www.camaracuba.cu/index.php/es/descargas/category/1-negocios%3Fdownload%3D337:decreto-no-327-reglamento-del-proceso-inversionista-go-x-5-2015-reglas-spanish&rct

22. CARTERA DE OPORTUNIDADES DE INVERSIÓN EXTRANJERA [en línea], 2015. Disponible en: http://www.granma.cu/file/sp/cartera-de-oportunidades-de-inversion-extranjera-23/datos/documentos/Cartera%20de%20Oportunidades%20de%20Inversi%C3%B3n%20Extranjera%202015.pdf

23. PETERS, M S.Timmerhaurs, K D. 1991. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Fourth Edition, McGraw-Hill Inc, 1991

24. CEPCI. *Economic Indicators* [en línea]. 2019. Disponible en: https://es.scribd.com/document/410567937/cepci-2019

25. Shanghai Empire Mechanical Engineering Co., Ltd.*Heat Recovery System Use Gasket Plate and Frame Heat Exchanger* [enlínea], 2020.Disponible en: https://empireheatexchanger.en.made-in-china.com/

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Juan Pedro Hernández Touset: aplicación de la integración de calor y escritura del artículo.

Lisnedys Rodríguez González: extracción de datos de la industria y aplicación de los balances de calor en la sección de secado

Agustín García Rodríguez: asesoría en la terminología y tecnología de fabricación de papel.