

# Technological Improvement of the Panela Packaging Process Using a Heat Recovery and Heat Sealing System

Mejoramiento tecnológico del proceso de empaçado de panela utilizando un sistema de recuperación de calor y de termosellado.

Fabio Camilo Gómez Meneses <sup>1,\*</sup> , Richard Moran Perafán <sup>2</sup> , Álvaro Ibarra <sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Mariana; [fgomez@umariana.edu.co](mailto:fgomez@umariana.edu.co)

<sup>2</sup> Universidad Mariana; [rmoran@umariana.edu.co](mailto:rmoran@umariana.edu.co)

<sup>3</sup> Universidad Mariana; [aibarra@umariana.edu.co](mailto:aibarra@umariana.edu.co)

\* Correspondencia: [fgomez@umariana.edu.co](mailto:fgomez@umariana.edu.co)

**Citación:** Gomez, F.; Moran, R.; Ibarra, A. Título. I+ T + C Investigación, Tecnología y Ciencia. Vol 1. Num. 17. 2023.

**Nota del editor:** Sello editorial Unicomfacauca se mantiene neutral con respecto a los reclamos derivados de los resultados de este trabajo



**Derechos de autor:** © 2023 por los autores. Presentado para posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY NC SA) ([https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es\\_ES](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES))

**Resumen:** En el contexto del procesamiento de la panela y su mejoramiento tecnológico, este artículo aborda la implementación de mejoras tecnológicas en el proceso de empaçado mediante la incorporación de un sistema de recuperación de calor y el desarrollo de un túnel de termosellado. El estudio busca no solo mejorar la eficiencia del proceso de empaçado, sino también reducir el consumo de energía y mejorar la calidad del producto final. En cuanto a los métodos, se realizó un análisis detallado de la pérdida de calor durante la producción de panela y se diseñó un sistema de recuperación de calor para aprovechar esta energía. Además, en primer lugar, se realizó un análisis energético de la planta de producción de panela para determinar el punto adecuado para implementar el sistema de recuperación, y a partir de esta información se desarrolló un innovador túnel de termosellado para garantizar la calidad de empaçado del producto trabajando desde el diseño mecatrónico. En términos de resultados, se identificó la eficiencia energética de la planta y una notable mejora en la eficiencia energética en la recuperación de calor para direccionarla al sistema de termosellado, lo que a su vez influyó positivamente en la calidad de la panela empaçada gracias al adecuado sellado proporcionado por el nuevo túnel de termosellado. En conclusión, este estudio demuestra que la combinación de tecnologías de recuperación de calor y termosellado tiene un impacto significativo en la eficiencia y calidad del proceso de empaçado de panela, en términos de sostenibilidad y mejora de procesos.

**Palabras clave:** mejoramiento tecnológico, agroindustria panelera, procesos productivos, mecatrónica

**Abstract:** In the context of panela processing and its technological improvement, this article addresses the implementation of technological enhancements in the packaging process by incorporating a heat recovery system and developing a heat sealing tunnel. The study aims not only to enhance the efficiency of the packaging process but also to reduce energy consumption and improve the quality of the end product. Regarding the methods, a detailed analysis of heat loss during panela production was conducted, and a heat recovery system was designed to harness this energy. Furthermore, an energy analysis of the panela production plant was initially carried out to determine the appropriate point for implementing the recovery system. Based on this information, an innovative heat sealing tunnel was developed to ensure the packaging quality of the product, working from the mechatronic design perspective. In terms of results, the energy efficiency of the plant was identified, along with a notable improvement in energy efficiency in heat recovery, directing it towards the heat sealing system. This, in turn, had a positive influence on the quality of the packaged panela, thanks to the proper sealing provided by the new heat sealing tunnel. In conclusion, this study demonstrates that the combination of heat recovery and heat sealing technologies has a significant impact on the efficiency and quality of the panela packaging process in terms of sustainability and process improvement.

**Keywords:** Technological improvement, Panela agro-industry, Production processes, Mechatronics

## **1. Introducción**

La producción de panela es una de las actividades agrícolas más importantes en Colombia. El país es el segundo productor mundial después de la India y posee el mayor consumo per cápita de panela en el mundo [1]. Sin embargo, el uso eficiente de la energía en los procesos productivos de la panela ha sido un desafío. Muchos trapiches o plantas productoras de panela en la actualidad utilizan adicional al bagazo, leña o llantas usadas como combustible para suplir la demanda energética del proceso debido a ineficiencias energéticas del diseño de las hornillas generando pérdidas de calor que pueden ser aprovechadas [2].

En el procesamiento de la panela, el empaqueo es una etapa esencial, que requiere métodos de sellado del material de empaque que requiere altas cantidades de calor para que se produzca el termo empaque, haciendo que las plantas utilicen energía eléctrica en las resistencias de los equipos destinados a este fin, aumentando el costo comercial del producto [3].

Para este proyecto se propone realizar un análisis energético de la planta de producción de panela identificada, y a partir de este proceso realizar el diseño y la implementación de un sistema de recuperación de calor para hacer una adaptación de termosellado utilizando aire caliente, en vez de energía eléctrica logrando un proceso de empaqueo que no solo involucra la eficiencia del empaquetado en sí, sino también aspectos clave como la recuperación de calor y el termosellado. Esto se logra reconociendo la pérdida de calor en el proceso de evaporación durante la producción de la panela [2], que puede ser aprovechada con un sistema de recuperación de calor ubicado en la hornilla panelera, disminuyendo así la energía requerida en etapas subsiguientes. Por otro lado, el termosellado juega un papel crucial en la garantía de la calidad y vida útil del producto empacado [4].

Este artículo científico abordará la combinación de un análisis energética, el diseño e implementación de un sistema de recuperación de calor y el desarrollo de un túnel de termosellado para el empaqueo de panela. Se pretende analizar críticamente cómo este enfoque puede mejorar significativamente la eficiencia del proceso, la calidad del producto final y, al mismo tiempo, disminuir el consumo de energía. Además, se discutirán en detalle los aspectos técnicos de la implementación de un sistema de recuperación de calor y se presentará el desarrollo innovador de un túnel de termosellado.

## **2. Materiales y métodos**

Para el desarrollo del presente estudio se basó en la metodología propuesta por Norton [5], la cual se divide en diez pasos para lograr un enfoque integral en el desarrollo del proyecto de mejoramiento tecnológico. Estos pasos comprenden: definición de la necesidad para la planta de procesamiento de panela, investigación en el análisis energético y el desarrollo de los sistemas mecatrónicos, planteamiento de objetivos de desarrollo, definición de especificaciones de funcionamiento del equipo, ideación, análisis de alternativas, evaluación y selección del sistema, diseño detallado y construcción del equipo.

Para la primera fase del desarrollo de este estudio se concentra en el prediseño del prototipo, la cual se inicia desde la evaluación del funcionamiento energético de la planta de producción realizando los balances de masa y energía en los procesos; además se toman mediciones de flujos máxicos de caña procesada, bagazo, panela y cachaza producida, condiciones ambientales, temperaturas, composición y temperatura de los gases de combustión utilizando equipos como cámara termográfica y un sistema de

adquisición de datos, entre otros [6]. Se desarrollaron las ecuaciones de conservación de masa y energía para analizar la eficiencia de los procesos e identificar las condiciones para el diseño del sistema de recuperación de calor, tras validar la eficiencia de la parrilla, se cuantifica el calor perdido y la temperatura utilizable en el intercambiador de calor, y se presentan los planos estructurales correspondientes.

La segunda fase se concentra en el diseño del sistema de recuperación de calor y el túnel de termo empacado de panela, considerando tanto las especificaciones de calidad como los cálculos de energía, además de las dimensiones que presenta la cámara de combustión y la chimenea de la planta de producción de panela. También se elaboran los planos estructurales correspondientes al prototipo de termosellado de acuerdo a las especificaciones de empacado de la empresa.

La tercera fase se orienta hacia la construcción del prototipo, siguiendo los requisitos del diseño. Esto incluye la adquisición de los materiales necesarios para el túnel, tanto en su componente mecánica como electrónica, el sistema de aislamiento en la recuperación de calor y el sistema de generación de aire. Se procede con la construcción mecánica del túnel y posteriormente se ensamblan todas las partes, como el controlador de temperatura en PCB, el motorreductor y la banda transportadora, entre otros componentes.

### 3. Resultados

#### 3.1. modelo del diagnóstico energético de la planta de producción de panela.

Para evaluar el funcionamiento energético de la planta de producción es necesario realizar los balances de masa y energía en los procesos productivos como se indica a continuación [7]:

**Tabla 1. Datos para el desarrollo de los análisis**

Factor	Valor.
Capacidad (Kg. / h)	230
Eficiencia de la hornilla (%)	21,2
Brix panela (°Brix)	95,5
Brix Cachaza (°Brix)	7,3
Brix miel (°Brix)	72
Brix jugo (°Brix)	16,5
Humedad bagazo verde (%)	58
Humedad bagazo seco (%)	30
Extracción (%)	55
Altura de la planta (m.s.n.m)	1848
Temperatura ebullición (°C)	95
Temperatura ambiente (°C)	26
Energía interna del agua (kJ/kg) a 20°C ua:	83,91
Cp. jugo (calor específico) (KJ / Kg. * °C)	3,6533
Entalpía vapor de agua (KJ/Kg.)	2208
VCN bagazo (Poder calorífica) (KJ/ Kg.)	19228
Cantidad de caña a procesar Kg/h	2600
Presión barométrica Sandoná	101,32
Presión vapor agua a 26°C	3,5
Humedad absoluta Kg H2O/kg aire	0,022
Aire seco para quemar 1 kg de bagazo seco = kg aire/h	6

De esta manera se presenta un balance general del sistema de acuerdo a la siguiente formula general:

$$mbs + mab + mas + maa = mgs + mat + mr \quad (1)$$

$$masa\ bagazo\ seco + masa\ agua\ bagazo + masa\ aire\ seco + masa\ agua\ aire = masa\ gases\ generados + masa\ agua\ total + masa\ residuos$$

**Cantidad de bagazo utilizado**

$$Bagazo = Cantidad\ de\ caña\ procesada - Jugo\ generado \quad (2)$$

$$Bagazo = 1170\ Kg/h$$

$$Bagazo\ seco = masa\ bagazo\ húmedo * ((100 - humedad\ bh) / (100 - hbs)) \quad (3)$$

$$Bagazo\ seco = 702,00\ Kg/h$$

$$Masa\ de\ agua\ en\ el\ bagazo = Bagazo\ seco * (humedad\ bs / 100) \quad (4)$$

$$Masa\ de\ agua\ en\ el\ bagazo = 210,60\ Kg/h$$

$$Masa\ de\ aire\ seco = Aire\ seco * Bagazo\ seco \quad (5)$$

$$Masa\ de\ aire\ seco = 4212,00\ Kg/h$$

$$Masa\ de\ agua\ en\ el\ aire = humedad\ absoluta * masa\ aire\ seco \quad (6)$$

$$Masa\ de\ agua\ en\ el\ aire = 93,54\ Kg/h$$

$$flujo\ másico\ salida = 5218,14\ Kg/h$$

$$Masa\ de\ residuos\ ceniza = 58,5\ Kg/h$$

$$Masa\ de\ agua\ formada\ en\ los\ gases = Mac * bagazo\ generado \quad (7)$$

$$Masa\ de\ agua\ formada\ en\ los\ gases = 29,81\ kg/h$$

$$Masa\ de\ agua\ total\ evaporada\ en\ la\ combustión = 274,33\ kg/h$$

$$Masa\ total\ de\ los\ gases\ salida = mbs + mab + mas + maa - (mr + mat) \quad (8)$$

$$mgases\ salida = 4855,50\ Kg/h$$

$$flujo\ másico\ salida = 5218,14\ Kg/h$$

$$flujo\ másico\ salida = flujo\ másico\ salida$$

**Balance general de masa.**

$$Masa\ de\ jugo = masa\ agua\ evaporada + masa\ de\ cachaza + masa\ bagacillo + masa\ de\ panela \quad (9)$$

**Masa de jugo generado**= 1430Kg/h

porcentaje de cachaza jugo 4%

**Masa de cachaza** = 57,2 Kg/h

$C_{jc}$  = cantidad de jugo - cachaza

**Cantidad de jugo clarificado** = 1372,8Kg/h

porcentaje de Bagacillo en cachaza jugo 40%

**Cantidad de bagacillo** = 22,88 Kg/h

nivel de extracción (55%)

**Masa de panela** = (masa del jugo \* brix jugo - (masa cachaza\* brix cachaza))/( \*brix panela) (10)

Masa de la panela = 232,8 Kg/h

$mae$ = masa jugo clarificado - (masa panela + cachaza) (11)

**Masa de agua evaporada** = 1082,8 Kg H<sub>2</sub>O/h

**Masa Ingreso Sistema** = 1372,8 Kg/h

$Masa\ Salida\ Sistema = Masa\ de\ panela + Cantidad\ de\ cachaza + Masa\ de\ agua\ evaporada$  (12)

**Masa Salida Sistema** = 1372,8 Kg/h

**Masa Salida Sistema = Masa Ingreso Sistema**

### Balance De Energía

Para este proceso se tiene como base de cálculo 10 horas de trabajo en la planta de producción, generando el siguiente esquema:

**Tabla 2.** Balance de energía

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Q Clarificación	346.052,27	KJ /h
Q Evaporación	2.336.505,60	KJ /h
Q Concentración	180.585,73	KJ /h
Q Utilizado= Qclarif + Q evap + Q conc.	2.863.143,60	KJ /h
Q suministrado=masa bagazo seco * PCI	13.498.056,00	KJ /h
Eficiencia= (Q aprov /Q sumin) * 100 %	21,2	%
Q perdido = Q sumi – Q aprov	10.634.912,40	KJ /h
Calor perdido en la chimenea	602.179,11	KJ /h
Porcentaje de perdidas en chim = (calor chimenea/calor perdido)	5,66	%

De esta manera se identifica la Eficiencia energética de la planta de producción de panela a partir de la energía aprovechada y la energía del combustible.

Encontrando,

$$\text{Eficiencia energética} = \text{energía aprovechada} / \text{energía del combustible} \quad (13)$$

$$\text{Eficiencia energética} = 21,212 \%$$



Figura 1. Determinación de calor perdido en chimenea.

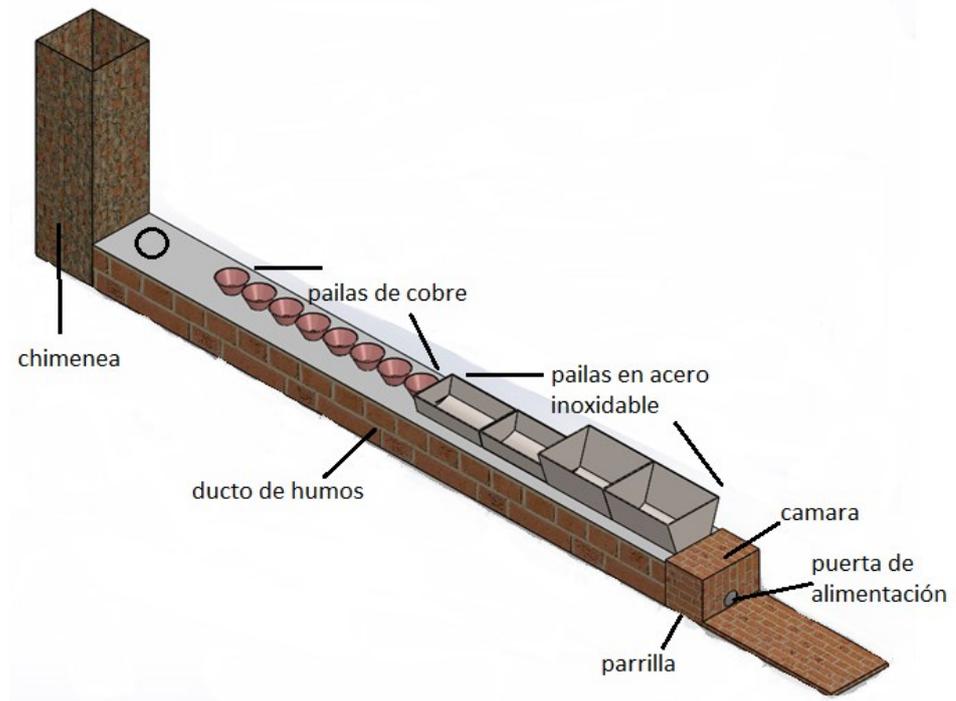
### 3.2. Diseño del sistema de recuperación de calor.

Para desarrollar este proceso se realizó una descripción de la hornilla de la planta de producción, identificando medidas y materiales de cómo está conformada la parrilla y las pails que la conforman como se describen a continuación:

Tabla 3. Características de la hornilla panelera

Equipo	Material	Capacidad:	Dimensiones:
Paila descachazadora:	Acero Inoxidable 304 Calibre 16.	1 metro cúbico, más volumen de falcas.	2.4 m * 1.1m * 0.4, falcas de 0.30 metros alrededor de la paila.
Paila de Evaporación:	Acero Inoxidable 304 espesor de 1/8" en el fondo de la paila, calibre 14 en las paredes laterales y falcas.	1 metro cúbico, más volumen de falcas.	2.0 m * 1.1 m * 0.5, falcas de 0.60 metros alrededor
Paila de concentración:	Acero Inoxidable 304 Calibre 14.	0.6 metros cúbicos, más volumen de falcas	1.65 m * 1.1 m * 0.3, falcas de 0.40 metros alrededor.
Paila Puntera:	cobre	0.22 metros cúbicos, más volumen de falcas.	096 m * 0.45 * 0.50, falcas de 0.30 metros alrededor de la paila falcas.
Cámara de combustión:	La cámara de combustión está construida en su interior con ladrillo refractario, y en su parte externa con ladrillo convencional.		
Ducto de Humos:	El ducto de humos está construido con ladrillo convencional fabricado en la región		
Chimenea:	La chimenea está construida en ladrillo, en su base mide 1.5 metros cuadrados y en la punta 90 centímetros y una altura de 7.5 metros		

En la figura 2 se puede observar el diseño de la parrilla, con sus medidas y partes, esta parrilla está diseñada en flujo paralelo.



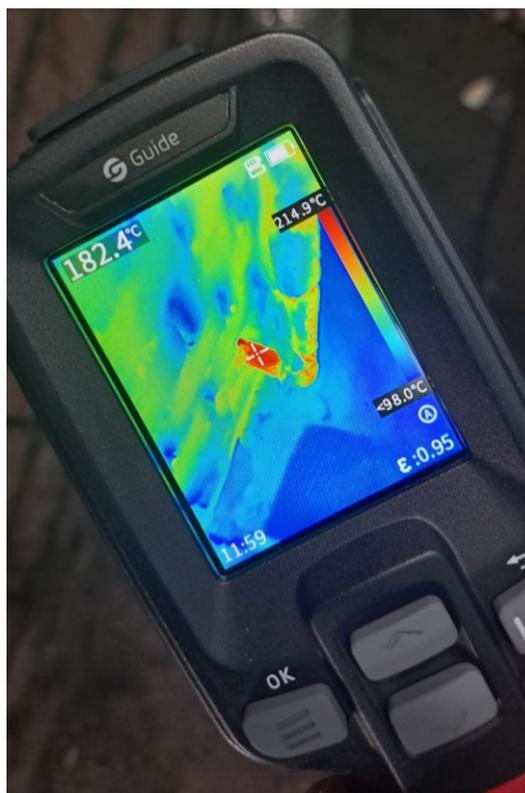
**Figura 2.** Diseño de la hornilla de la planta de producción de panela.

**Recuperador de calor.** En este caso se utiliza un tubo de acero galvanizado de una pulgada, soldado en forma de W generando el máximo aprovechamiento la transferencia de calor, con este diseño se planea que el tubo este en contacto con el aire caliente producido por la combustión del bagazo todo el tiempo y que no genere ningún inconveniente en el funcionamiento de la hornilla panelera.



**Figura 3.** sistema de recuperación de calor.

Este proceso se desarrolló registrando diferentes mediciones a lo largo de la parrilla en diferentes puntos apoyados en una cámara termografía y un Sistema de adquisición de datos utilizando un sensor MAX6675 al que va conectado una termocupla de tipo K.



**Figura 4.** Proceso de adquisición de temperatura.

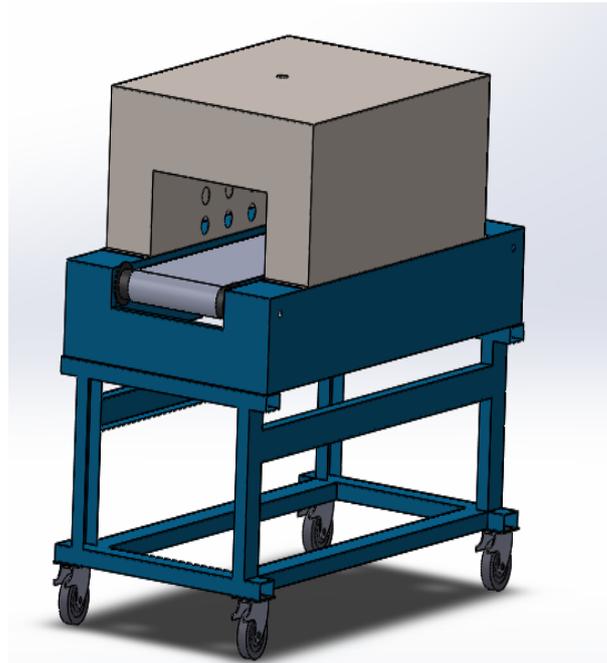
**Sistema de generación de aire:** después de identificar la transferencia de calor, a partir de pruebas se identificó la cantidad de aire necesario y la velocidad para que permita llevar el calor hacia el túnel de termosellado, de esta manera se determinó finalmente utilizar un blower de ½ hp para el sistema de recuperación de calor.



**Figura 5.** sistema de recuperación de calor.

### 3.2. Diseño del sistema de termosellado.

En el proceso de termosellado es necesario mantener en la cámara de empaque aire caliente con una velocidad de 7 m/s a 250 grados centígrados, Para desarrollar esta actividad se utilizó solidworks, donde se diseñó cada parte del túnel, en la figura 6 se observa el ensamble final del túnel.



**Figura 6.** Ensamble final del túnel de termosellado.

**Desarrollo de la Banda transportadora:** Para el proceso de termosellado, es necesario conocer la velocidad de la banda transportadora, donde serán ubicadas las panelas que tienen un diámetro entre 12 y 14 centímetros, dependiendo del tipo de panela que sea, como puede ser cuadrada o redonda en diferentes pesos, entre panela tendrán un espacio de 1 centímetro, porque si quedan juntas obstruirían el paso del aire caliente afectando el proceso de termosellado, la banda debe ser construida o adquirida en un material resistente a altas temperaturas. Para calcular la velocidad de la banda transportadora se tiene como referencia el sellado de 20 a 25 panelas por minuto.

*Velocidad de la banda transportadora*

V	Velocidad de la banda transportadora (m/min)
N° panelas*min	Número de panelas por minuto (producción requerida por la planta)
L	Longitud o largo del paquete (cm/paquetes)
100	Factor de conversión de cm a mts.

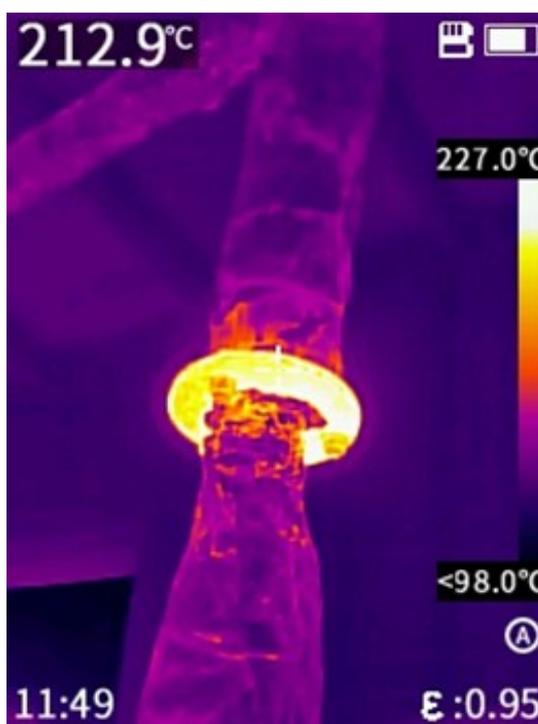
$$V = (n^{\circ} Pnales *min * L) / 100 \quad (14)$$

$$V = 3.9 \text{ m/min}$$

La velocidad de la banda, según los requerimientos de la planta en transportar el número de panelas por minuto es de 3.9 m/min

**Control de temperatura:** Para esto se utilizará el controlador REX-C100, que cuenta con un sistema programable dependiendo de cuales sean las necesidades de donde se empleara este controlador o según las necesidades del cliente, es decir control inteligente derivativo, lo que significa que el control estará haciendo cálculos matemáticos para controlar la temperatura lo mejor posible, de tal forma que conforme pase el tiempo el control será más preciso haciendo que el error disminuya.

Para el funcionamiento del túnel de termosellado se utilizará un control on-off, este tipo de control activa la resistencia o calefactor que se esté utilizando, en este caso será un soplador industrial y se desactiva hasta que el control haya llegado a la temperatura a la cual se programó, de la misma manera la resistencia será activada cuando el sistema esté por debajo de la temperatura programada, porque la temperatura que ingresa al sistema por la eficiencia térmica es superior a los 180°C.



**Figura 7.** Verificación de temperatura que ingresa al túnel de termosellado.

**Proceso de manufactura del túnel:** Para el proceso de manufactura se con la fabricación del diseño propuesto, con cada uno de sus componentes como el intercambiador, el tubo que conduce el calor hasta el túnel con sus respectivas partes, como se observa en la figura 8.



**Figura 8.** Túnel de termosellado completo.

#### 4. Discusión

La eficiencia energética, definida como la relación entre la energía aprovechada y la energía del combustible, es mayor en los trapiches con modificaciones tecnológicas en las hornillas. Se observa que la eficiencia energética está directamente relacionada con el diseño térmico de las hornillas.

El análisis también revela altas pérdidas de energía en los gases de combustión debido a las altas temperaturas y a los excesos de aire elevados en la chimenea. Los trapiches con diseños térmicos deficientes muestran pérdidas energéticas significativas.

Los autores deben discutir los resultados y cómo se pueden interpretar desde la perspectiva de estudios previos y de las hipótesis de trabajo. Los hallazgos y sus implicaciones deben discutirse en el contexto más amplio posible. También se pueden destacar las direcciones de investigación futuras.

#### 5. Conclusiones

Se determina que el calor aprovechado por la hornilla es muy bajo, encontrando una eficiencia del proceso de combustión de 40%, generando bastante calor por la chimenea para ser utilizado.

Es importante hacer pruebas in situ para la determinación del sistema de recuperación de calor, debido al diseño inicial de la hornilla panelera no permite que se ingresen objetos al interior de esta ya que genera una recirculación de flujos ya ahoga el sistema, de tal manera es importante ubicar un sistema de recuperación de calor muy cerca a la pared de la parrilla.

Según las pruebas de análisis finitos la estructura tiene buena resistencia del prototipo general, soportando el peso del equipo mecatrónico con sus componentes.

En la prueba de funcionamiento se identifica que existe un mejoramiento en el proceso de empaque de 15% con respecto al proceso manual de termosellado.

#### Referencias

- [1] Andersson, J., & Gonzalez, A. (2015). *Efectos de la tecnología utilizada en la producción panelera en las transformaciones ambientales de la hoya del río Suárez*.
- [2] Velásquez, H. I., Janna, F. C., & Agudelo, A. F. (2006). *Diagnóstico exergético de los procesos productivos de la panela en Colombia*. *Energética*, 35(35), 15–22.
- [3] Corpoica. (1998). *Mejoramiento de la producción en panela*
- [4] Vallejo C, Peña H, (2005). *Evaluación de la producción y consumo de energía en hornillas paneleras*. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 12–26.
- [5] Norton, R. L. (2013). *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (5a. ed. --.). México D. F.: McGraw-Hill.
- [6] Gonzales, K. (2010). *Determinación de pérdidas energéticas y sus puntos críticos, en hornillas paneleras ward-cimpa en la hoya del río Suárez*. 49.
- [7] Gomez, Fabio Camilo. (2007). *Estudio de factibilidad para la elaboración de panela pulverizada saborizada con limón y canela en la empresa delizia en la ciudad de Pasto*. (Vol. 1, Issue 235). universidad de Nariño.