



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA
DETECCIÓN Y SECADO DE HUMEDAD EN BOBINAS DE PAPEL**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Álava Farías Duval Jossue
Ortega Novillo Victor Hugo
TUTOR: Ing. Jonathan Salvador Paillacho Corredores M.Sc.

Guayaquil - Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Duval Jossue Álava Farías** con documento de identificación N° **0707085114** y **Victor Hugo Ortega Novillo** con documento de identificación N° **0954178885**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 6 de marzo del año 2025

Atentamente,



Duval Jossue Álava Farías
0707085114



Victor Hugo Ortega Novillo
0954178885

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Duval Jossue Álava Farías** con documento de identificación N° **0707085114** y **Victor Hugo Ortega Novillo** con documento de identificación N° **0954178885**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA DETECCIÓN Y SECADO DE HUMEDAD EN BOBINAS DE PAPEL**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 6 de marzo del año 2025

Atentamente,



Duval Jossue Álava Farías
0707085114



Victor Hugo Ortega Novillo
0954178885

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Ing. Jonathan Salvador Paillacho Corredores**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **Dispositivos tecnológicos: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA DETECCIÓN Y SECADO DE HUMEDAD EN BOBINAS DE PAPEL**, realizado por **Duval Jossue Álava Fariás** con documento de identificación N° **0707085114** y por **Victor Hugo Ortega Novillo** con documento de identificación N° **0954178885**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 6 de marzo del año 2025

Atentamente,



Ing. Jonathan Salvador Paillacho Corredores, Mg.
1718907874

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado con profundo cariño y agradecimiento a mi padre, Victor Hugo Ortega Lopez. Sus enseñanzas sobre disciplina, responsabilidad y ética han sido pilares fundamentales en mi formación, guiándome a lo largo de todos estos años. A mi madre, Mariela Lucrecia Monard Novillo, quien con su amor inmenso, cuidado y apoyo constante ha asegurado mi bienestar y me ha motivado a superar cada obstáculo.

Quiero también expresar mi gratitud a mi abuela paterna, Rosa Olga Lopez León, y a mi hermana, Doménica Matilde Ortega Novillo. Su confianza inquebrantable en mí y su apoyo incondicional han sido fuerzas motrices que me han impulsado a seguir adelante. Ellas han estado siempre a mi lado, cuidando de mí y alentándome a no rendirme nunca.

Finalmente, quiero extender mi agradecimiento a todos aquellos que, de una u otra forma, han contribuido a mi crecimiento personal y académico. Este logro no hubiera sido posible sin el respaldo y el amor de mi familia, quienes siempre han creído en mi potencial y han celebrado cada uno de mis logros. Esta dedicatoria es un pequeño tributo a su influencia en mi vida y a su constante presencia en mi corazón.

Victor Hugo Ortega Novillo

Dedico este trabajo de titulación con todo mi corazón a mis padres, Duval Oswaldo Álava Torres y Ruth Elizabeth Farías Ramírez. Ellos han sido el motor de mi vida, y gracias a su esfuerzo y sacrificio, he logrado llegar hasta aquí y terminar mis estudios universitarios; ambos me han guiado con su amor y determinación a lo largo de mi vida. También quiero dedicarlo a mi abuela, María Rosario Torres, quien me inspiró a seguir adelante día a día. Ella me enseñó la importancia de trabajar arduamente para alcanzar mis objetivos. Me mostró que la perseverancia es clave y que, aunque la vida puede ser dura, siempre hay esperanza.

No puedo olvidar a mi pareja, Stella De Vries Ayala, la cual es una de las personas que más amo en este mundo. Ha estado a mi lado en cada paso que he dado a lo largo de mi vida universitaria, apoyándome en los momentos difíciles y celebrando conmigo cada logro que he conseguido.

Quiero extender esta dedicación a toda mi familia a mis hermanos pequeños. Ellos han sido mi motor para seguir adelante para que siempre tengas un ejemplo de hermano mayor a seguir y siempre llenarlos de orgullo.

Duval Jossue Álava Farías

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a Dios, por ser la guía y fortaleza que me ha sostenido en cada paso de este camino. Mi reconocimiento profundo va también a mis padres, Victor Hugo Ortega Lopez y Mariela Lucrecia Monard Novillo, cuyo amor incondicional y enseñanzas sobre perseverancia, disciplina y ética han sido fundamentales para enfrentar y superar los retos y dificultades que la vida me ha presentado.

A la Universidad Politécnica Salesiana, le debo no solo mi formación académica, sino también el entorno enriquecedor que me ha permitido crecer y desarrollarme como profesional y como persona. Agradezco a los docentes, cuyo conocimiento y dedicación han sido un faro de orientación, y a mis compañeros, quienes han sido una parte esencial de esta experiencia, aportando con su camaradería y apoyo a lo largo de esta travesía.

En especial, quiero expresar mi agradecimiento al Ing. Jonathan Salvador. Su guía y sugerencias han sido invaluable en la realización de este proyecto. Su confianza en mis capacidades me ha motivado a trabajar con esmero y dedicación, culminando esta etapa con éxito.

Finalmente, quiero extender mi agradecimiento a mi abuela paterna, Rosa Olga Lopez León, y a mi hermana, Doménica Matilde Ortega Novillo, por su apoyo incondicional y por creer en mí sin reservas. Su confianza ha sido una fuente constante de motivación que me ha impulsado a seguir adelante sin desmayar.

Este logro es un reflejo de todos aquellos que, con su apoyo y amor, han contribuido de manera significativa a mi desarrollo personal y académico. A todos ellos, mi más sincero agradecimiento y reconocimiento.

Victor Hugo Ortega Novillo

Al culminar esta etapa tan importante en mi vida, quiero expresar mi gratitud a todas aquellas personas que han sido fundamentales en este proceso. En primer lugar, agradezco a mi familia, pero sobre todo a mis padres, Duval Oswaldo Álava Torres y Ruth Elizabeth Farías Ramírez, por ser mi mayor inspiración y por brindarme el apoyo necesario para alcanzar mis metas. Su esfuerzo y sacrificio han sido el motor que me ha impulsado a seguir adelante.

Expreso mi profundo agradecimiento a los docentes de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica, en especial a mi tutor de tesis. Ellos han sido piezas clave en mi formación profesional, proporcionándome el conocimiento y el respaldo necesario para mi desarrollo académico. Su dedicación y experiencia han sido fundamentales para dotarme de las herramientas y habilidades indispensables para mi crecimiento como ingeniero mecatrónico, y su compromiso con la excelencia académica ha dejado una huella imborrable en mi trayectoria.

Asimismo, quiero expresar mi sincera gratitud a mi abuela paterna, María Rosario Torres, cuyo apoyo incondicional y confianza en mí han sido determinantes para llegar hasta aquí. También agradezco profundamente a mi pareja, quien, a lo largo de estos cuatro años de estudio, ha estado siempre presente, brindándome su apoyo en cada momento que lo necesité.

Por último, deseo reconocer a mi compañero de tesis, quien me acompañó a lo largo de toda esta travesía estudiantil. Más que un gran compañero, ha sido una persona en la que siempre pude confiar. Además, extendiendo mi agradecimiento a todos aquellos que, de alguna manera, han contribuido a mi crecimiento personal y profesional durante estos años. Su respaldo y estímulo han sido esenciales para alcanzar mis objetivos y convertirme en el profesional que soy hoy. A todos ellos, mi más profundo agradecimiento y reconocimiento.

Duval Jossue Álava Farías

RESUMEN

El objetivo del proyecto es desarrollar un sistema de visión artificial para identificar la humedad en bobinas de papel, que garantizará la calidad del producto final. Este sistema emplea una cámara térmica y algoritmos de visión artificial en imágenes para detectar y medir zonas de humedad en las bobinas de papel de forma eficaz. Haciendo un método innovador, facilitará la detección de patrones de humedad que podrían pasar inadvertidos con técnicas convencionales.

El diseño del proyecto incluye la incorporación de cuatro rodamientos y tres guías, distribuidos en un prototipo, para simular el funcionamiento de una planta de papel en la fase de post-secado.

La temperatura es medida por el ESP32 con los datos de la cámara térmica AMG8333 , los cuales son analizados mediante un código en la aplicación Visual Studio Code. A partir de estos datos, se obtiene la temperatura, que luego se transforma en datos de humedad mediante una ejecución. Asimismo, el código indica en qué momento es necesario subir o bajar la temperatura de la niquelina para lograr un secado óptimo.

Las bobinas de papel habitualmente se rompen cuando la humedad está por encima del 60 %, lo que lo vuelve frágil, pero cuando la humedad se sitúa en niveles que no pasan del 40 %, el papel no es apto para la venta comercial, por esa razón es importante al medir la humedad y tener valores bajo el 5 %.

Palabras claves: Visión artificial, imágenes térmicas, ESP32, Visual code.

ABSTRACT

The objective of the project is to develop a machine vision system to identify moisture in paper reels, which will ensure the quality of the final product. This system uses a thermal camera and machine vision algorithms in images to detect and measure moisture zones in paper reels effectively. Using an innovative method, it will facilitate the detection of moisture patterns that could go unnoticed with conventional techniques.

The project design includes the incorporation of four bearings and three guides, distributed in a prototype, to simulate the operation of a paper plant in the post-drying phase.

The temperature is measured by the ESP32 with the data from the AMG8333 thermal camera, which is analyzed by a code in the Visual Studio Code application. From this data, the temperature is obtained, which is then transformed into humidity data by means of an execution. The code also indicates when it is necessary to raise or lower the temperature of the nickeline to achieve optimal drying.

Paper reels usually break when the humidity is above 60 %, which makes it fragile, but when the humidity is at levels that do not exceed 40 %, the paper is not suitable for commercial sale, for this reason it is important to measure the humidity and have values below 5 %.

Keywords: computer vision, thermal imaging , ESP32, Visual code.

ÍNDICE

I.	Introducción	1
II.	Problema	2
III.	Justificación	3
IV.	OBJETIVOS	4
IV-A.	Objetivo general	4
IV-B.	Objetivos específicos	4
V.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
V-A.	Inteligencia artificial para la industria	5
V-B.	Redes convolucionales	5
V-C.	Técnicas basadas en redes neuronales artificiales	6
V-D.	Convolucional	6
V-E.	Capa de agrupación	6
V-F.	Capa completamente conectada	7
V-G.	Entrenamiento	7
V-H.	Función de pérdida	7
V-I.	Métodos de medición de la calidad de imágenes	7
V-J.	Matiz	8
V-K.	Saturación	8
V-L.	Umbral de temperatura	8
V-M.	Proceso de fabricación de papel	9
V-N.	Secado de papel	12
V-Ñ.	Optimización del segmento de secado de la máquina de papel	13
V-O.	Diagrama de flujo de fabricación de papel	13
V-P.	ESP32	16
V-Q.	Raspberry Pi Pico	16
V-R.	Módulo Cámara termal infrarroja IR AMG8833	17
V-S.	Fuente de alimentación de 220/110 voltios a 12 voltios 10 amperios	17
V-T.	Motor reductor 37D 6V DC 110 RPM Encoder	18
V-U.	Arduino Uno	18
V-V.	Ejemplo de diseño de rodillos en la industria	19
VI.	Marco Metodológico	20
VI-A.	Diseño mecánico	20
VI-B.	Análisis FEA	26
VI-C.	Circuito electrónico prototipo de Post-secado	28
VI-D.	Visión Artificial con Redes Neuronales Convolucionales (CNNs)	29
VII.	Resultados	30
VII-A.	Recolección de datos de temperatura y humedad	30
VIII.	CRONOGRAMA	35
IX.	PRESUPUESTO	36
X.	Conclusiones	37

XI. Recomendaciones	38
Anexo A: Planos	41
Anexo B: Análisis de elementos finitos y térmico	44
Anexo C: Código y diagramas de flujos	45
C-A. Funcionamiento de la cámara térmica con la IA	46

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	I4.0 and its enabling technologies.[21]	5
2.	Redes convolucionales .[22]	5
3.	Clasificación de objetos.[23]	6
4.	Asignación de filtro deslizado en una imagen. [24]	6
5.	Capa de agrupación o Pooling.[24]	7
6.	Esquema de la red CNN.[24]	7
7.	Matiz de colores.[27]	8
8.	Saturación de colores.[28]	8
9.	Tanque pulper para la preparación de pasta. [30]	9
10.	Tanque preparador de mezcla de resina.[30]	9
11.	Máquina formadora de hoja de papel.[30]	10
12.	Prensado en húmedo.[30]	10
13.	Cilindro secador con junta rotativa y sifón para extraer condensado.[30]	11
14.	Equipos para la recuperación de condensado.[30]	11
15.	Sección de cilindros metálicos secadores.[30]	11
16.	Equipo de monitoreo automático scanner.[30]	12
17.	Bobinado de papel saliendo de la máquina.[30]	12
18.	Secado de papel con calor . [31]	13
19.	Optimización de la sección de secado de la máquina papelera. [32]	13
20.	Diagrama de flujo de la fabricación del papel. Fuente: Propia.	14
21.	Diagrama de flujo de la fabricación del papel. Fuente: Propia.	15
22.	ESP32. [33]	16
23.	Raspberry Pi Pico. [34]	16
24.	Módulo cámara termal infrarroja Ir AMG8833 [29]	17
25.	Fuente de alimentación 220/110 voltios a 12 voltios 10 amperios. [35]	17
26.	Motor reductor 37D 6V DC 110 RPM Encoder. [36]	18
27.	Arduino Uno [37]	18
28.	Ubicación de Rodillos MP1 con Planos. [38]	19
29.	Diagrama de flujo	20
30.	Desplazamiento de prototipo del sistema de secado	26
31.	Análisis térmico prototipo sistema de secado con la niquelina	27
32.	Circuito electrónico prototipo de Post-secado	28
33.	Datos obtenidos del mapa de calor	30
34.	Prototipo de planta de papel vista lateral	30
35.	Prototipo de planta de papel vista frontal	31
36.	Mapa de calor resultados altos	31
37.	Mapa de calor resultado nominal	32
38.	Mapa de calor en bajo cero	32
39.	Mapa de calor en tiempo real bajo	33
40.	Resultados del secado	33
41.	Artificial para detección y secado de humedad en bobinas de papel.	34
42.	Artificial para detección y secado de humedad en bobinas de papel 2	34
43.	Artificial para detección y secado de humedad en bobinas de papel 3	34
44.	Cronograma	35
45.	Lámina acotada del rodillo	41
46.	Lámina acotada del tubo	42
47.	Plano acotado de la tesis final	43
48.	Desplazamiento de prototipo de un sistema de secado	44
49.	Análisis térmico prototipo sistema de secado con la niquelina	44

50.	Código ESP32 Cámara Arduino	45
51.	Código de cámara en Visual Code Python	45
52.	Código de cámara en Visual Code Python 2	46
53.	Código de cámara en Visual Code Python 3	46
54.	Mapa de calor en Tiempo Real fría	46
55.	Mapa de Calor en Tiempo Real temperatura Tíbia	47
56.	Mapa de calor en Tiempo Real caliente	47
57.	Código motor encoder Arduino	48
58.	Código motor encoder Arduino 2	48
59.	Código motor encoder Arduino 3	49
60.	Código html	49
61.	Código html 2	50
62.	Código html Python	50
63.	Código html Python 2	51
64.	Diagrama de flujo de la producción de papel completo. Fuente: Propia	52

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Selección de Rodamientos para un Diámetro de 15 mm	25
II.	Procedimiento del elemento finito	26
III.	ANÁLISIS TÉRMICO	27
IV.	Propiedades de la Aleación 3003	28
V.	Tabla de presupuesto	36

I. INTRODUCCIÓN

El sector del papel, que ofrece desde materiales especiales usados en muchos usos hasta cosas básicas como el papel para oficina, es clave para la economía global. En esta rama, mantener chequeando el nivel de humedad en los rollos de papel es muy importante, ya que puede hacer gran diferencia en la calidad del producto al final y en lo bien que van los procesos de hacer cosas. La forma del papel puede ser afectada por dobles daños estructurales y otros fallos causados por mucha humedad, lo cual puede llevar a pérdidas económicas y problemas con la calidad. La parte del papel, que crea desde cosas especiales que se usan en un rango amplio de usos hasta cosas comunes como el papel de oficina, es clave para la economía mundial. En esta área, mantener el nivel de humedad en los rollos de papel es muy importante porque puede tener gran impacto en la calidad del producto final y en lo bien que van los procesos de hacer cosas. La forma del papel puede ser dañada por dobles daños y otros fallos causados por demasiada humedad lo cual puede llevar a pérdidas económicas y problemas con la calidad.

En esta situación, la uso de un sistema nuevo de visión por máquina para ver y secar humedad en rollos de papel aparece como una buena solución. El objetivo de este sistema es dar seguimiento continuo y claro a las condiciones de humedad ayudando a hacer lo correcto en las partes que necesitan atención. La unión de tipos de tecnologías para hojas y código ofrece una habilidad muy rara para encontrar patrones de humedad que podrían faltar con métodos antiguos.

El método para empezar el sistema involucra obtener fotos claras de los rollos de papel con una cámara termográfica. Después, hay que estudiar bien, usando formas para corte y agrupación, para hallar lugares con humedad. Una vez que se encuentran estas zonas se le aplica secado a través de una niquelina que actúa como una resistencia y seca el papel según lo que se necesita en la situación. Esta técnica garantiza no solo quitar bien la humedad sino también cuidar la calidad del papel.

La aplicación de este sistema de inteligencia artificial no solo mejora el proceso productivo al reducir el tiempo de parada y bajar el derroche, también afecta bien en la sostenibilidad del medio ambiente y el ahorro de energía. Al usar tecnologías secado más efectivas y menos dañinas para el papel, se logra una baja grande en el uso de energía y en el impacto al medio ambiente linkeado a hacer papel.

En conclusión, la creación de un sistema de visión artificial para encontrar y quitar la humedad en las bobinas de papel es un enorme paso tecnológico que puede cambiar la rama del papel. Esta idea se ve como una herramienta clave para enfrentar los problemas ahora y más adelante en esta industria, ya que facilita la cura del medio ambiente, la calidad y lo rápido que funcionan las tareas industriales. Este programa está hecho para ayudar a las compañías a hacer crecer su negocio y competir bien en un mercado más difícil con el fin de crear nuevos límites para manejar la humedad usando el papel. en un mercado cada vez más exigente mediante el establecimiento de nuevos estándares para la gestión de la humedad en la fabricación de papel.

II. PROBLEMA

En el ámbito mundial del papel, la generación anual sobrepasa los 400 millones de toneladas. Pese a que el uso de papel ha experimentado una reducción con el progreso de la era digital, la producción sigue registrando un incremento anual del 2.5 % [1]. El papel continúa siendo muy empleado en áreas como la educación, la industria de alimentos, el empaquetado y la industria del cartón [2]. La industria del papel se topa con varios retos, sobresaliendo la insuficiente regulación de la humedad en las bobinas de papel. Los ambientes húmedos provocan dificultades en la impresión, tales como carga estática, fallos en la duplicación, arrugado o escasa absorción de tinta [3]. Este problema de humedad impacta de manera directa en la producción, produciendo residuos [4]. La sobrehumedad en el papel provoca una alta concentración de agua, que si excede o no llega a los niveles previstos, genera desbalances. Adicionalmente, el cambio en la humedad también podría estar vinculado con una presión insuficiente en los cilindros de secado [5]. La humedad excesiva incide en las características físicas del papel, tales como su resistencia y flexibilidad, provocando la aparición de arrugas y el cese de las máquinas [6]. En cambio, cuando la humedad disminuye al nivel apropiado, el papel disminuye su resistencia, se torna frágil y también provoca interrupciones en la producción [7]. Hay técnicas para determinar la humedad, pero suelen resultar costosas y las herramientas tradicionales no poseen la precisión necesaria para realizar mediciones en tiempo real [8]. Las máquinas de escaneo empleadas también son de alto costo y susceptibles a averías cuando se encuentran expuestas a temperaturas elevadas, polvo, humedad o impactos, lo que puede resultar en mediciones imprecisas o en la interrupción del funcionamiento del equipo [9]. El uso de tecnologías avanzadas, como los sistemas de visión artificial y el análisis de imágenes termográficas, permite detectar la humedad de manera más precisa e inmediata. Estas innovaciones facilitan una automatización más eficiente, reducen los errores humanos y garantizan datos más confiables, optimizando así los procesos de trabajo. En la industria del papel, la implementación de estas tecnologías no solo mejoraría la calidad del producto final, sino que también reduciría los costos operativos y el impacto ambiental al minimizar el desperdicio de recursos y aumentar la eficiencia [10].

III. JUSTIFICACIÓN

Las compañías del sector del papel aspiran a disminuir los niveles de humedad, dado que esta incide directamente en la calidad del papel producido. No obstante, se muestran bajo un enfoque de disminución del precio, lo que posibilita que los colectivos que emplean este método inviertan menos dinero y tiempo en el sector [11]. Varios estudios han evidenciado que se puede regular la humedad a través de técnicas como el secado, la cocción y la inteligencia artificial, entre otras, entre otras [12]. No obstante, a pesar de que estos procedimientos facilitan el cálculo de la humedad, no ofrecen resultados en tiempo real. Por ejemplo, en el procedimiento de cocción, se recolecta una muestra de papel, se cocina durante 2 horas y después se aplica una fórmula para determinar la humedad precisa del papel [13]. Un equipo revolucionario para detectar la humedad en la industria del papel es el dispositivo de medición de humedad en línea UmiPaper. Este aparato facilita la medición de la humedad en tiempo real, evitando la necesidad de recolectar muestras. No obstante, su principal obstáculo es su elevado precio. Por lo tanto, algunas compañías han decidido crear sus propios procedimientos de identificación, empleando modelos de cámaras termográficas más asequibles para disminuir los gastos en el sector. Estas cámaras también se topan con dificultades relacionadas con su estructura física, tales como la incapacidad para resistir altas temperaturas, polvo, agua y corrosión, entre otros aspectos [14]. Adicionalmente, el manual especifica las características requeridas para este tipo de labores, tales como el equipo que emplea, la rapidez de trabajo, la latencia y el espectro de funcionamiento [15]. En este artículo [16] se demuestra cómo la inteligencia artificial puede abordar cuestiones de identificación de patrones y gestión de calidad, proponiendo optimizar la evaluación de calidad mediante la integración de una cámara y un proceso de reconocimiento de imágenes. Los resultados han sido excelentes, reduciendo de manera efectiva la cantidad de bienes que no son aptos para la importación de insumos o el comercio internacional. Además, es esencial garantizar las mejores condiciones de trabajo posibles y abordar problemas como la iluminación inadecuada en el área donde se utiliza la cámara [17]. La conservación y protección del papel tienen la capacidad de reducir la absorción de humedad sin comprometer su calidad [18]. Estos productos pueden constituir una línea extra de protección frente a las variaciones de humedad. Asimismo, es imprescindible una aplicación de seguimiento de calidad constante que contemple la evaluación constante de la humedad y otros factores críticos para la producción de calidad [19]. Se deben incluir sistemas de control automatizado que modifiquen las condiciones de secado y almacenamiento recopilando datos de humedad en tiempo real para aumentar la producción y garantizar la calidad del producto final [20].

IV. OBJETIVOS

IV-A. Objetivo general

Desarrollar un sistema de detección y secado de humedad en bobinas de papel mediante el uso de visión artificial, mejorando la calidad y eficiencia del proceso de producción en la industria papelera.

IV-B. Objetivos específicos

1. Crear un algoritmo que detecte el nivel de humedad en bobinas de papel a través del análisis de imágenes térmicas capturadas por cámaras.
2. Desarrollar un sistema térmico que optimice el proceso de secado de las bobinas de papel, ajustando distintos niveles de humedad y asegurando la inspección de calidad en tiempo real para la detección de cualquier variación de humedad .
3. Validar el sistema de reconocimiento de detección y secado de humedad que opere con eficiencia para reducir los productos defectuosos.

V. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

V-A. Inteligencia artificial para la industria

La industria ha transformado la manera de hallar métodos innovadores para diversos procesos de producción en la eficiencia productiva, la disminución de costos y la calidad del producto final. Particularmente han sido notables los avances en la inteligencia artificial y tecnologías digitales asociadas, que están siendo utilizadas por una variedad de industrias manufactureras para aumentar la productividad, reducir costos y simplificar procesos. El estudio identificó desafíos como la integridad de los datos, la falta de conocimiento sobre la materia y los riesgos de seguridad que deben abordarse para utilizar plenamente la inteligencia artificial. También recomendó soluciones y estrategias. Además, se enfatizó cómo los avances como la computación en la nube y los gemelos digitales tienen el potencial de revolucionar la manufactura y otras industrias.[21]

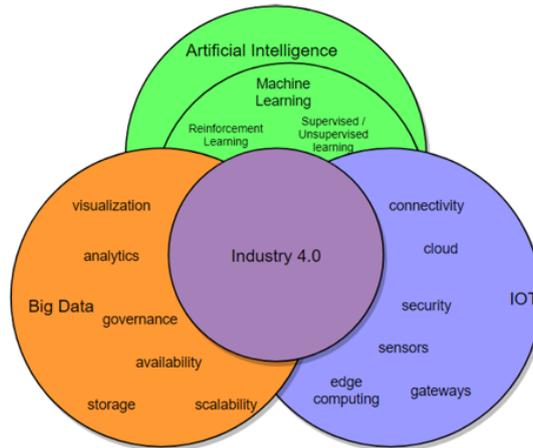


Figura 1. I4.0 and its enabling technologies.[21]

V-B. Redes convolucionales

El tema principal de este artículo es la investigación en profundidad de las redes neuronales (en particular, las redes neuronales convolucionales o CNN) y sus aplicaciones en el reconocimiento de objetos, la localización y la clasificación de imágenes. Se tratan en detalle conceptos como las funciones de activación, las capas de agrupación y las capas convolucionales, junto con un análisis exhaustivo de cómo se construyen y funcionan las redes neuronales convolucionales. El procesamiento visual se realiza con la ayuda del paquete Keras, que también incluye aplicaciones prácticas en lenguaje R. [22]

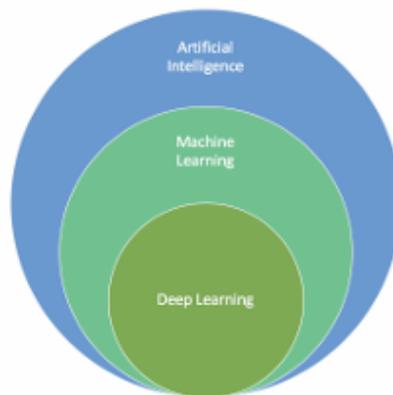


Figura 2. Redes convolucionales .[22]

V-C. *Técnicas basadas en redes neuronales artificiales*

Los procedimientos de imágenes digitales basados en redes neuronales sintéticas incluyen la aplicación del enfoque de redes neuronales artificiales al procesamiento de imágenes como un modelo basado en el comportamiento biológico y los procesos cerebrales donde las neuronas se comunican entre sí debido a su interconexión. Al enviar, recibir y analizar información, el cerebro puede procesar datos y adquirir y abordar una variedad de demandas. El uso actual del enfoque de redes neuronales artificiales siempre se ha visto obstaculizado por la falta de recursos, almacenamiento de datos, velocidad de procesamiento, medios para su diseño y presentación, etc., aunque el concepto detrás de él no es nuevo ni inútil. solo con un desarrollo cada vez más avanzado. Los avances tecnológicos recientes han facilitado la obtención de recursos informáticos con la capacitación necesaria y han permitido continuar la investigación y el estudio. el uso de redes neuronales artificiales en una variedad de dominios, incluida la informática.[23]

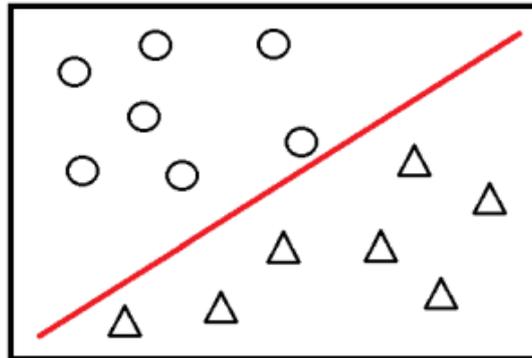


Figura 3. Clasificación de objetos.[23]

V-D. *Convolutiva*

Las capas convolucionales se componen de una colección de filtros, o núcleos, que se aplican a los datos de entrada. El ancho, la altura y los pesos de ancho \times altura de cada núcleo se utilizan para extraer las características de los datos de entrada. Cada filtro de la capa convolutiva representa un número o característica entre 0 y 255. El filtro para esa característica se activa cuando el proceso de convolución produce un número significativo después de que el filtro se haya aplicado a la imagen y haya encontrado una coincidencia. De lo contrario, no se activa el filtro.[24]

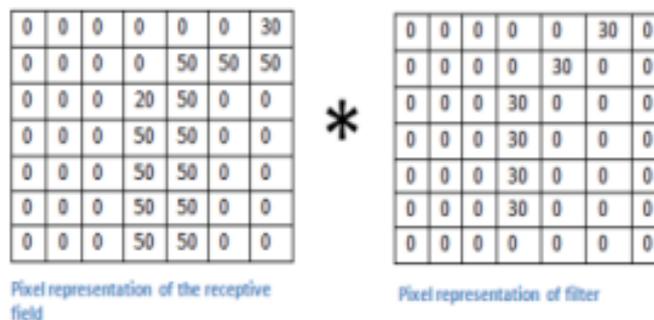


Figura 4. Asignación de filtro deslizado en una imagen. [24]

V-E. *Capa de agrupación*

La capa de agrupación, también conocida como capa de reducción de resolución, se utiliza para reducir el tamaño de los mapas de características manteniendo la información más importante.[24]

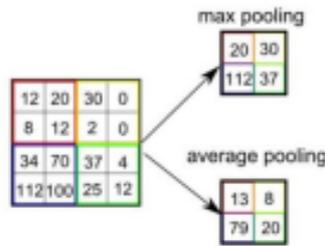


Figura 5. Capa de agrupación o Pooling.[24]

V-F. Capa completamente conectada

Una CNN consta de dos partes: tres tipos diferentes de capas componen un perceptrón multicapa (MLP) completamente vinculado: capas de entrada, ocultas y de salida.[24]

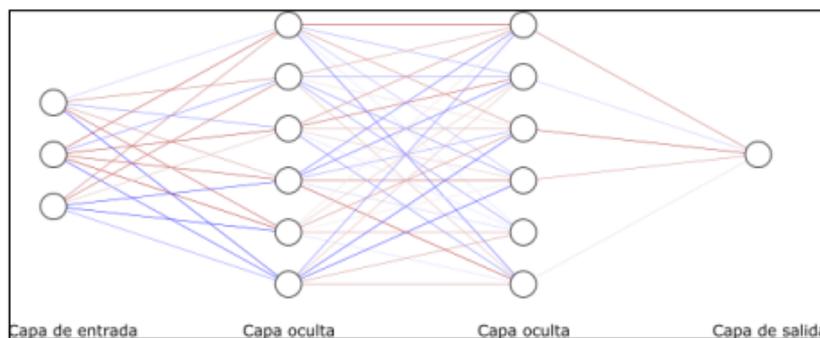


Figura 6. Esquema de la red CNN.[24]

V-G. Entrenamiento

Un modelo de CNN se entrena utilizando un conjunto de datos de entrenamiento, que es un conjunto de imágenes y etiquetas (clases, cuadros delimitadores y máscaras). La técnica de retropropagación, que se utiliza para entrenar las CNN, calcula un error en función del valor de salida de la última capa. Los pesos de cada neurona de esa capa se modifican utilizando este error. Los pesos de los pesos anteriores se actualizan y se calcula un error utilizando los pesos más actuales. Hasta que se llega a la primera capa, el proceso continúa de la misma manera.[25]

V-H. Función de pérdida

El proceso de entrenamiento modifica los pesos para mejorar la función de pérdida del conjunto de problemas designado. La función de pérdida de la red neuronal garantiza que genere resultados y conversiones positivos.[25]

V-I. Métodos de medición de la calidad de imágenes

Dado que puede haber una pérdida perceptible de información o calidad a lo largo de este proceso, la calidad es una métrica que establece la forma óptima de tratar una imagen. Las técnicas para evaluar esta pérdida pueden ser tanto objetivas como subjetivas; las técnicas subjetivas se basan en estándares humanos y los resultados difieren según la opinión personal. Los métodos objetivos, por otro lado, se basan en comparaciones con una imagen de referencia utilizando criterios numéricos. Además de las medidas objetivas comunes como MSE (error cuadrático medio) y PSNR (relación de sincronización a ruido), recientemente se ha empleado una métrica más completa llamada SSIM (método de índice de similitud estructurado) para evaluar la calidad de la imagen.[26]

V-J. Matiz

La matiz es el tono de un ángulo que separa los colores básicos de la señal RGB, dándole a cada uno un valor de 120°. Varía entre 0° y 360°. Por lo tanto, se puede escribir de la siguiente manera: 240 es azul = RGB (0, 0, 1), 120 es verde = RGB (0, 1, 0) y 0 es rojo = RGB (1, 0, 0). [27] Para una mejor percepción, se evidencia en la figura 7:

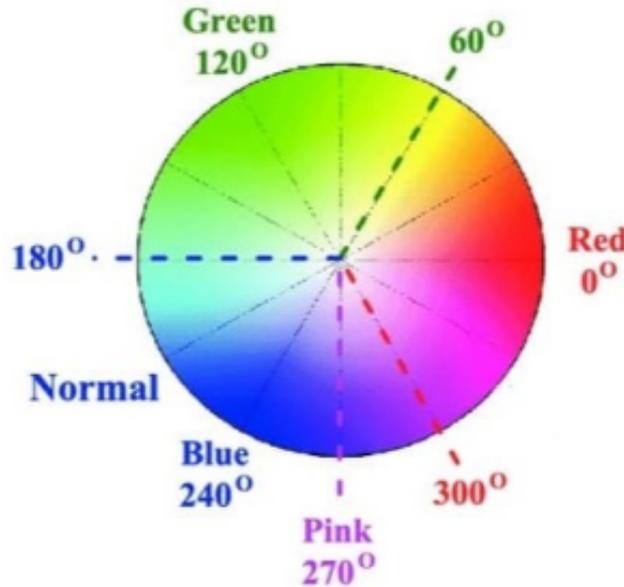


Figura 7. Matiz de colores.[27]

V-K. Saturación

La distancia entre el eje de luminosidad de 0 a 100 % se denomina saturación. Por lo tanto, el tono gris de un color aumentará junto con su saturación, lo que hará que parezca más descolorido; cuanto mayor sea el tono gris, más descolorido estará, como se evidencia en la Figura 8:



Figura 8. Saturación de colores.[28]

V-L. Umbral de temperatura

Este procedimiento consiste en definir un límite de temperatura previamente establecido. Los píxeles de la imagen térmica que exceden este límite se identifican como potenciales focos de incendio. Aunque este método es bastante simple, podría producir falsos positivos o ignorar incendios de menor magnitud, y podría no ser apropiado para ambientes complejos con condiciones de temperatura fluctuantes, como hornos y detectores de chispas para este fin. Este método posibilita un estudio más exhaustivo del ambiente y disminuye la posibilidad de falsos positivos. No obstante, este método todavía se basa en gran medida en este enfoque del algoritmo principal que se utiliza en las imágenes térmicas, aplicado a las imágenes de temperatura, producidas.[29]

V-M. Proceso de fabricación de papel

La producción de papel se segmenta en una serie de operaciones que se detalla a continuación:

- **Preparación de la pasta:** El proceso de fabricación del papel se divide en los siguientes pasos: Preparación de la pulpa: Para disolver los paquetes de celulosa en agua, se utiliza un método mecánico para examinarlos. Para realizar este procedimiento se utiliza una máquina llamada despulpadora. En la Figura 9 se puede ver una despulpadora y sus hélices dentro del tanque.

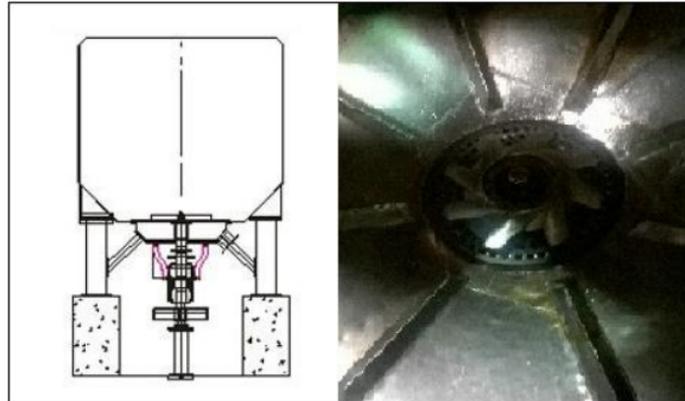


Figura 9. Tanque pulper para la preparación de pasta. [30]

El despulpador es un recipiente cilíndrico con una hélice en la parte inferior que empuja las láminas de pulpa hacia el interior del recipiente. Las fibras que componen el paquete de celulosa se separan frotando continuamente la pulpa contra la hélice, produciéndose una suspensión en agua con un porcentaje de materia seca (PMS) de entre el 6 % y el 12 %.

- **Preparación de la resina:** Para la producción de este papel filtro, es necesario disponer de una serie de elementos, propiedades y atributos apropiados para su aplicación concreta. Una característica es la resistencia a la tensión, lo que requiere la adición de resina para proporcionar resistencia en condiciones húmedas. Así, se le añade una mezcla de resina para contribuir a mantener la resistencia del equipo. Papel cuando su empleo requiera la resistencia a la acción del agua. Al formar enlaces químicos entre las fibras, esta resina le otorga a la fibra la capacidad de resistir la unión con el agua (el agua no puede adherirse a la fibra). la fibra, ya que queda retenida por la resina. Como se ve en la figura 10, se utilizan dos tanques de mezcla para producir esta resina.

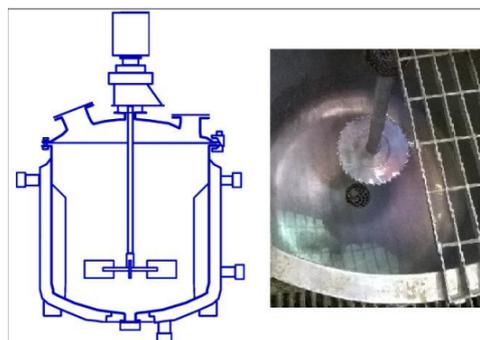


Figura 10. Tanque preparador de mezcla de resina.[30]

- **Proceso de formación de la hoja:** Proceso de formación de la hoja: La hoja de papel se crea cuando la combinación de materias primas se ha procesado adecuadamente en la tina de mezcla y la pulpa de papel ha adquirido las propiedades necesarias. En la Figura 11 se observa una máquina utilizada para fabricar la

hoja de papel. A través de este proceso, un flujo de pulpa fino se transforma en una pulpa fina y uniforme con todos los componentes distribuidos uniformemente. Así pues, la estructura de la hoja es el enlace entre las mismas de las fibras, lo que se puede apreciar al observar la hoja desde la transparencia. La pasta se traslada hasta la caja de entrada mediante conductos de acero inoxidable. La pasta se traslada hasta la caja de entrada mediante conductos de acero inoxidable, es la responsable de liberar la pasta a través de un rodillo de transformación y luego a la mesa de producción, una tela interminable, donde adopta una forma de lámina delgada, ancha y uniforme.

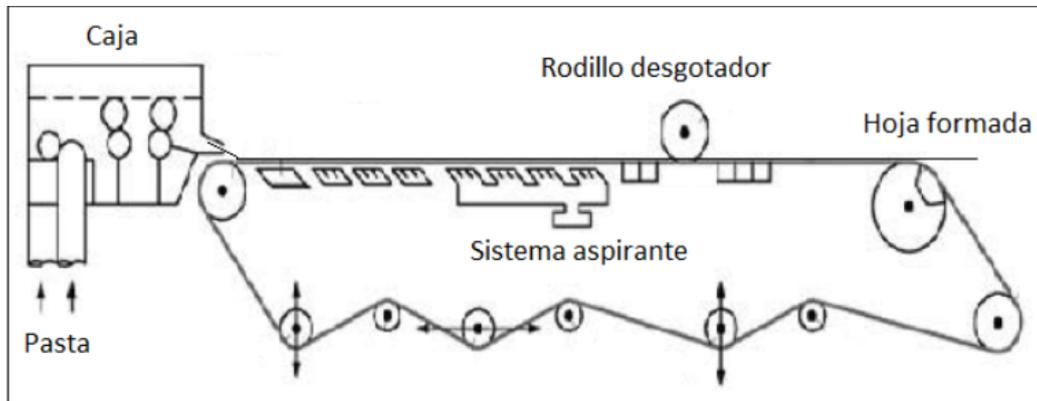


Figura 11. Máquina formadora de hoja de papel.[30]

- Prensado en húmedo:** Cuando el papel sale de la mesa de fabricación y entra en la zona de prensado, tiene una consistencia de alrededor del 20% después del proceso de prensado, todavía contendrá alrededor del 60% de agua. Para realizar el procedimiento de prensado en húmedo, la hoja pasa entre dos rodillos, que proporcionan presión al papel. El filtro absorbe el agua, que luego es expulsada. La figura 12 muestra cómo funciona el prensado en húmedo.

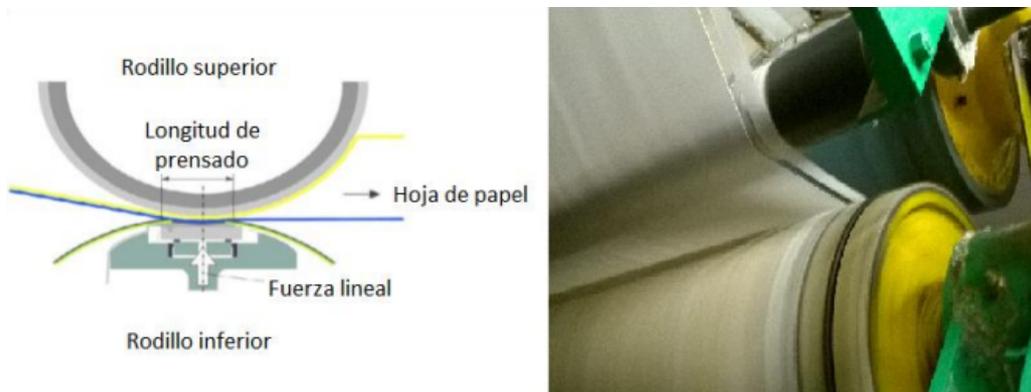


Figura 12. Prensado en húmedo.[30]

- Proceso de secado de papel:** La bobina de papel se calienta a una temperatura alta para evaporar el agua durante el proceso de secado del papel. Un proceso químico es responsable del cambio del estado líquido al gaseoso. La instalación utiliza una serie de cilindros de secado metálicos para llevar a cabo el proceso de secado, y una junta giratoria suministra vapor a los cilindros. Para ayudar al secado por ambos lados, la hoja de papel se fija a los cilindros inferiores por un lado y a los cilindros superiores por el otro. La figura 13 presenta un cilindro secador con su junta rotatoria, que simultáneamente puede extraer el condensado, resultado del vapor empleado. Además, se presenta un cilindro con sifón de rotación y otro con sifón de estacionamiento.

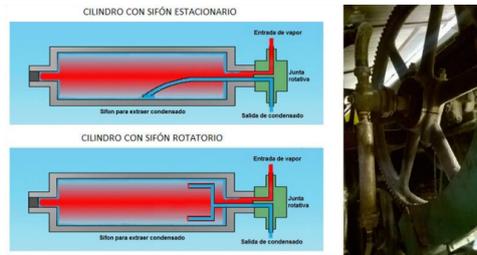


Figura 13. Cilindro secador con junta rotativa y sifón para extraer condensado.[30]

Luego, una bomba transporta el condensado residual al tanque desaierador, donde se reutiliza y se suministra a la caldera. Al ingresar a la caldera, esta agua caliente debe conservar una temperatura mínima de 100 °C. La figura 14 ilustra la disposición de los conductos para la trampa de vapor, el depósito de flasheo y la bomba de vapor vertido.



Figura 14. Equipos para la recuperación de condensado.[30]

La producción de vapor se realiza a través de dos calderas, de 700 HP y 800 HP, que operan de manera alterna y el combustible utilizado es gas natural. Al descargar los generadores, se registra una presión de vapor estable de 11 Kg/cm² (156.4568 PSI), un flujo de abastecimiento de 5.216 ton/h (11500 lb/h) y una temperatura de 184.92 °C (364.87°F). La línea de vapor principal, una tubería de 8” de diámetro de metal, se dirige al proceso de secado del papel filtro, donde se ubica una válvula reguladora de control automático que reduce la presión a 7 Kg/cm². Cuando el papel emerge de la sección de prensado en húmedo, generalmente tiene un 60 % de agua en su contenido. Desde este punto, no se puede eliminar más agua a través de métodos físicos, sino que la única forma será a través de la aplicación de calor. Así, la hoja de papel ingresa a la primera sección de secado (13 cilindros), luego a la segunda (13 cilindros) y finalmente a la tercera (15 cilindros), donde se encuentra con un porcentaje de humedad cercano al 20 %. La figura 15 ilustra la sección de cilindros metálicos secadores.



Figura 15. Sección de cilindros metálicos secadores.[30]

- Escaneo para monitorear las características del papel:** Después de la salida de la tercera sección de secado, pasa por un dispositivo de seguimiento automático, conocido como scanner, cuyo objetivo es supervisar características del papel, tales como la humedad, peso específico, porosidad, permeabilidad, entre otros aspectos.

Una computadora con interfaz de operador recibe estas mediciones y vigila cualquier variación en el proceso de fabricación de papel. La figura 16 ilustra un dispositivo de seguimiento, scanner, empleado en algunas instalaciones de papel.



Figura 16. Equipo de monitoreo automático scanner.[30]

- **Bobinado:** El papel que se extrae de la máquina se enrolla en forma de bobina para simplificar su traslado y uso en otras tareas. El tamaño de la bobina se establecerá según las necesidades del cliente o según las actividades que se llevarán a cabo más adelante (corte, empaquetado, almacenaje, transporte o reutilización). La figura 17 ilustra el proceso de bobinado de la hoja de papel al concluir el proceso de papel.

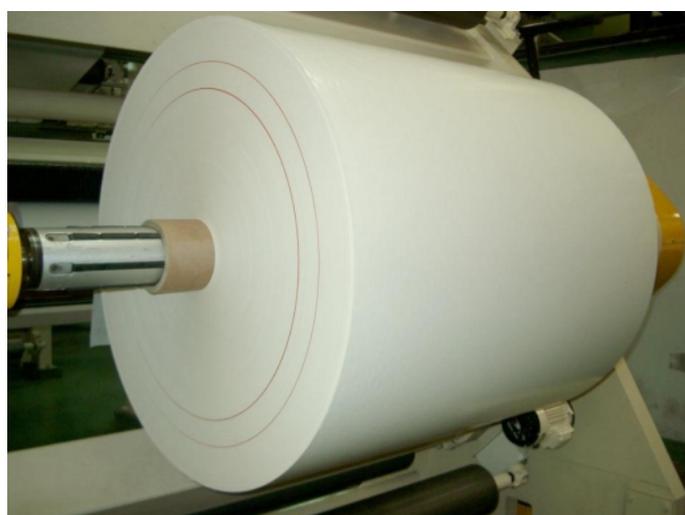


Figura 17. Bobinado de papel saliendo de la máquina.[30]

V-N. Secado de papel

Hoy en día, para la industria del papel es de gran relevancia. Mantener una ventaja competitiva en el mercado logrando un proceso de fabricación continuo con un resultado adecuado. Es imprescindible eliminar todos los fallos que representen un elevado gasto productivo en términos de su mantenimiento y gestión. El estudio de una planta y las pruebas experimentales apuntan a una solución y a una serie de mejoras que aumentan inmediatamente la producción al reducir el uso de vapor y mejorar continuamente el procedimiento de extracción de papel. Del estudio realizado, fundamentado en conceptos teóricos y datos reales, proponen una opción de solución para optimizar el sistema de extracción de condensado. Esta solución consta de partes como el cambio del sistema de secado, la creación de un sistema de by-pass adecuado y el cambio de los purgadores de vapor actuales por otros más adecuados a las características del proceso de secado del papel. Los cambios propuestos tienen como objetivo minimizar el uso de vapor y mejorar la eficiencia del secado. La figura 18 ilustra el secado del papel con calor. [31]

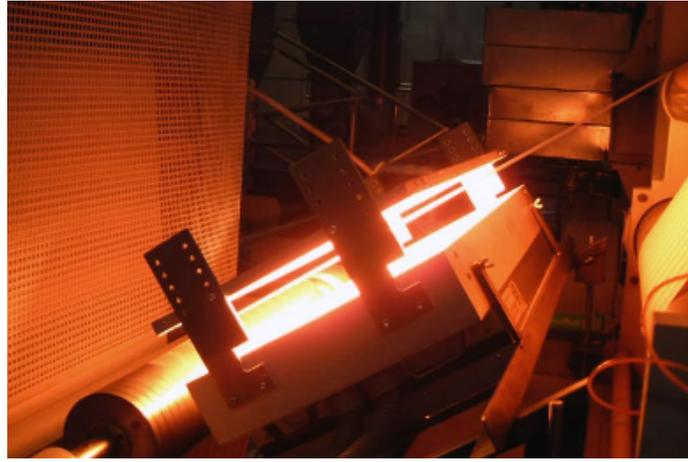


Figura 18. Secado de papel con calor . [31]

V-Ñ. Optimización del segmento de secado de la máquina de papel

Inicia con un análisis de la producción de papel, especificando los materiales fibrosos esenciales empleados en el proceso, que son: pulpa de bagazo, papel utilizado y papel que no satisface las especificaciones de comercialización (broke). Se describe detalladamente las distintas etapas por las que pasa la materia prima para crear la pulpa de un tipo específico de papel. La máquina papelera comienza creando una hoja de papel, que luego se traslada a la parte de secado, donde se muestra el producto terminado, después de pasar por la parte de prensado. Todo esto indica un proceso continuo. Es crucial llevar a cabo el análisis del consumo de vapor y el rango de evaporación de secado, ya que estos son los indicadores que evalúan el rendimiento de la optimización de la sección secada. Así se pueden identificar las áreas críticas que inciden en la reducción del rendimiento, lo que resulta en un consumo elevado de vapor y un rango reducido de evaporación durante el secado. Según investigaciones anteriores, las pruebas y ensayos efectuados en diferentes áreas de la máquina de papel han facilitado la orientación del estudio de optimización de la sección secada hacia los grupos de secado, sistemas de ventilación-extracción y la capota cerrada. La valoración financiera se centra en establecer el costo total que requeriría la mejora de la sección seca y su comparación con la reducción del costo de producción de 70,000 TM/año en promedio. La figura 19 presenta la optimización del proceso de secado en la máquina papelera. [32]



Figura 19. Optimización de la sección de secado de la máquina papelera. [32]

V-O. Diagrama de flujo de fabricación de papel

En las figuras 11 y 12 se expone el diagrama de flujo general para la fabricación del papel.

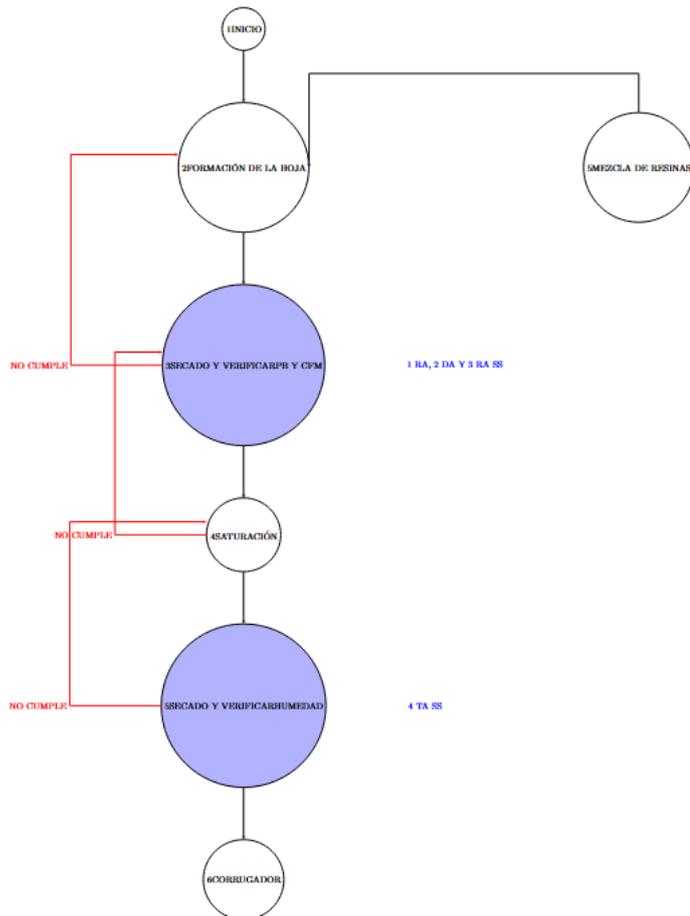


Figura 20. Diagrama de flujo de la fabricación del papel. Fuente: Propia.

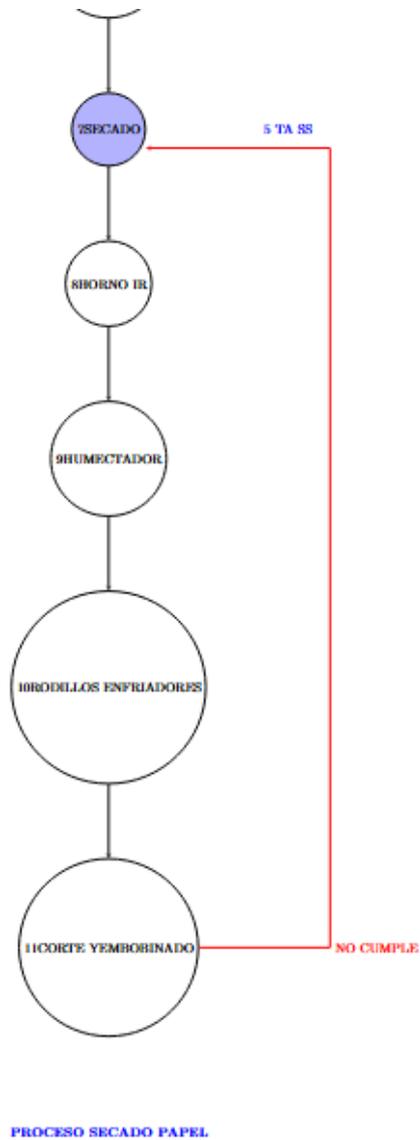


Figura 21. Diagrama de flujo de la fabricación del papel. Fuente: Propia.

V-P. ESP32

El ESP32 es una plataforma eficiente y asequible, perfecta para el desarrollo de aplicaciones IoT. Creado por Espressif Systems en Shanghai, China, el ESP32 se distingue por su potente combinación de características y capacidades. Entre sus características se incluyen un procesador de doble núcleo, Bluetooth y Wi-Fi integrados, una gran cantidad de puertos de entrada/salida de propósito general (GPIO) y bajo consumo de batería. Las interfaces Wi-Fi y Bluetooth del ESP32 permiten una conexión y comunicación sencillas con otros dispositivos o redes, soportando varios protocolos Wi-Fi como 802.11 b/g/n y ofreciendo opciones de conectividad Bluetooth Classic y Bluetooth Low Energy (BLE). Los numerosos pines GPIO del ESP32 permiten conectar y controlar dispositivos y sensores externos, admitiendo interfaces como SPI, I2C, UART y PWM. [33]

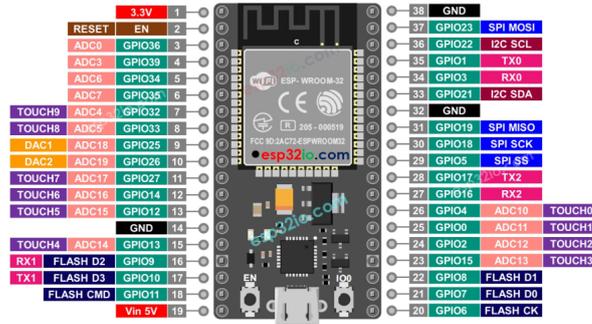


Figura 22. ESP32. [33]

V-Q. Raspberry Pi Pico

Es una herramienta didáctica única que permite a los usuarios aprender los fundamentos de la programación en Linux y Python es Raspberry Pi Pico. Este microcontrolador facilita la integración con Arduino, aumentando las opciones de desarrollo para aplicaciones de electrónica y robótica. Además, Pico facilita el desarrollo de proyectos conectados a Internet, lo que lo convierte en una herramienta invaluable para investigar el Internet de las cosas (IoT). Además, su compatibilidad con el módulo de cámara de Raspberry Pi crea posibilidades adicionales para aplicaciones multimedia. Por último, el Raspberry Pi Pico es ideal para proyectos de retrocomputación, permitiendo a los entusiastas revivir y experimentar con tecnologías del pasado, mientras aprenden y desarrollan habilidades prácticas en programación y electrónica.[34]

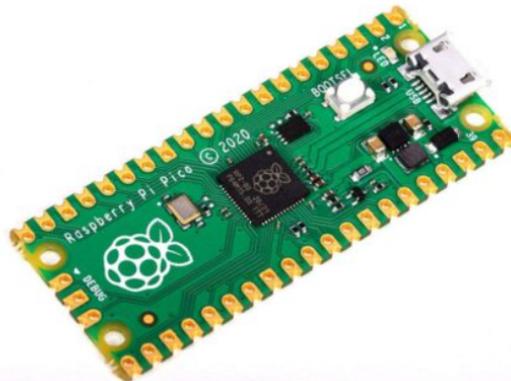


Figura 23. Raspberry Pi Pico. [34]

V-R. Módulo Cámara termal infrarroja IR AMG8833

Con una precisión de $\pm 2,5$ °C (4,5 °F), el sensor de la cámara térmica AMG8833 mide temperaturas entre 0 °C y 80 °C (32 °F y 176 °F). Este sensor incluye una interrupción configurable, la cual puede activarse cuando un solo píxel supera o queda por debajo del valor umbral preestablecido. Además, cuenta con un pin de interrupción configurable que puede activarse bajo las mismas condiciones de umbral. La cámara funciona a una distancia de hasta 7 metros o (23 pies), puede identificar la presencia de personas. El AMG8833 es perfecto para construir detectores de presencia humana o producir pequeñas imágenes térmicas debido a su velocidad máxima de cuadros de 10 Hz.[29]

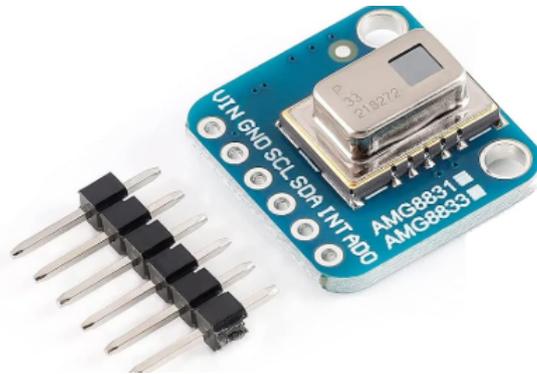


Figura 24. Módulo cámara termal infrarroja Ir AMG8833 [29]

V-S. Fuente de alimentación de 220/110 voltios a 12 voltios 10 amperios

Una fuente de alimentación conmutada de 12 V y 5 A, conocida también como fuente eléctrica, fuente de corriente alterna o fuente de alimentación, es un dispositivo eléctrico. Se refiere a un dispositivo en electrónica que utiliza corriente alterna (CA) para convertirla en corriente continua (CC) con el fin de proporcionar una o más salidas. Además de facilitar la conversión de energía eléctrica de CA a CC, esta fuente de alimentación de CA de 12 V 5 A puede alimentar una variedad de dispositivos electrónicos, incluidos motores de CC, LED de alta potencia, tiras de LED, cámaras de seguridad, módulos PWM, placas o módulos Arduino, sensores, actuadores, amplificadores y circuitos integrados.[35]



Figura 25. Fuente de alimentación 220/110 voltios a 12 voltios 10 amperios. [35]

V-T. Motor reductor 37D 6V DC 110 RPM Encoder

El motorreductor de corriente continua es perfecta para aplicaciones que requieren de una gran precisión, ya que cuenta con un servomotor y un codificador AB de dos canales que permiten un control preciso de la posición y la rotación. Debido a su construcción de metal, que ofrece estabilidad y durabilidad, se ve con frecuencia en barcos, automóviles y robots. La caja reductora permite ajustar la relación entre torque y velocidad, ofreciendo mayor torque a bajas velocidades y viceversa. Además, está fabricado con materiales de alta calidad, incluyendo un núcleo de alambre de cobre puro, lámina de acero 407 y un potente imán magnético, lo que garantiza una gran resistencia. Su consumo de corriente sin carga es de 200 mA.

- Máximo voltaje permitido bajo carga: 3A
- Velocidad sin carga: 37 revoluciones por minuto (37 rpm)
- Velocidad de resistencia máxima en situaciones de carga: 30 RPM (30 rpm)
- Momento nominal de torsión: 32 kg.cm
- Momento de par máximo: 90 kg.cm
- Las dimensiones de la caja de cambios L: 26,5 mm
- Cantidad de pulsos del codificador por canal, divididos por la revolución del husillo: $11 \times 168 = 1848$ pulsaciones.[36]



Figura 26. Motor reductor 37D 6V DC 110 RPM Encoder. [36]

V-U. Arduino Uno

El microcontrolador Arduino UNO utiliza el ATmega328P. Entre sus características se encuentran seis entradas analógicas, 14 pines de entrada/salida (seis de ellos PWM), un botón de reinicio, un conector de alimentación, un conector ICSP, un puerto USB y un cristal de cuarzo de 16 MHz. Todo lo necesario para alimentar el microcontrolador está incluido; simplemente use el cable USB para conectarlo a una computadora, o enciéndalo usando una batería o un convertidor CA-CC para comenzar. Con su placa UNO, puede experimentar con todo lo que quiera sin preocuparse por cometer un error.[37]



Figura 27. Arduino Uno [37]

V-V. Ejemplo de diseño de rodillos en la industria

En el sector industrial, el diseño de rodillos es vital para varios procesos de fabricación y producción. Las máquinas de laminado, transporte y prensado emplean rodillos, y su diseño fluctúa dependiendo de la aplicación concreta. Se toman en cuenta elementos como el material del rodillo, su diámetro, longitud y superficie para mejorar su desempeño y durabilidad. Por ejemplo, en el proceso de laminado de metales, los rodillos deben ser fabricados con un material que resista el desgaste y el calor, mientras que en la industria del papel, se da preferencia a una superficie suave para prevenir el deterioro del producto. El diseño también debe considerar la sencillez en el mantenimiento y la habilidad para resistir cargas tanto dinámicas como estáticas [38].

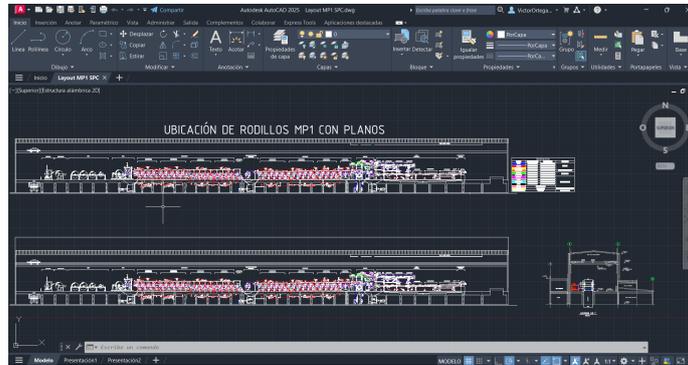


Figura 28. Ubicación de Rodillos MP1 con Planos. [38]

VI. MARCO METODOLÓGICO

Se utiliza un sistema de visión artificial para identificar la humedad en las bobinas de papel con el fin de probar y ejecutar el diseño del sistema. Este enfoque permite recopilar datos sobre la presencia de humedad y validar la tecnología utilizada. Para garantizar la aplicabilidad de los resultados, se seleccionará una muestra representativa de las bobinas de papel que se conservan en una fábrica de papel para la instalación del sistema de visión artificial. Los datos se recogerán utilizando una cámara termográfica y un sensor de humedad, y las imágenes se procesarán utilizando un software de visión artificial. Con el uso de estos instrumentos, se pueden obtener datos precisos y completos sobre los niveles de humedad de las bobinas de papel. Los datos recogidos se analizarán utilizando las técnicas estadísticas adecuadas. En la Figura 29 se muestra un gráfico del funcionamiento del sistema.

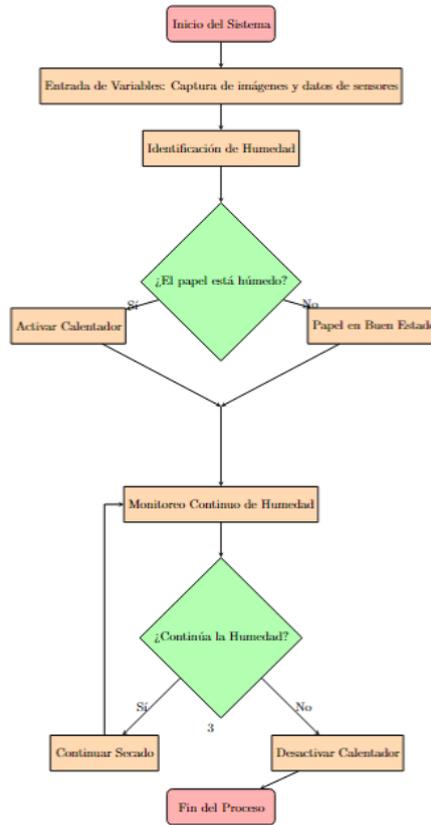


Figura 29. Diagrama de flujo

VI-A. Diseño mecánico

Para la creación del prototipo, se lleva a cabo la representación de la planta a una escala de 1:10. Esto conlleva disminuir todas las dimensiones auténticas de la planta a un décimo de su tamaño inicial, lo que permite una representación exacta y controlable. Esta escala se emplea frecuentemente en la creación de prototipos para simplificar la visualización, el análisis y las modificaciones antes de edificar la planta en su totalidad. Además, facilita la detección de posibles inconvenientes y optimizaciones de diseño en una fase inicial, lo cual puede economizar tiempo y recursos en el proceso de producción final. Este método también promueve la interacción y cooperación entre los distintos equipos participantes en el proyecto, garantizando que todos entiendan de manera clara el diseño y las metas del prototipo.

VI-A.1 Diseño de rodillos

Materiales y Criterios de Selección

- Rodillos: Se opta por materiales como el acero de gran resistencia o el acero inoxidable por su habilidad para resistir cargas y temperaturas elevadas. Además, factores como la resistencia del material a la corrosión y al desgaste determinan su calidad.
- Cálculos de esfuerzos: Mediante el enfoque de elementos finitos (FEA), se examinan los esfuerzos y deformaciones en los rodillos en situaciones de carga tanto dinámica como estática.
- Fatiga: Se llevan a cabo evaluaciones de fatiga para garantizar que los rodillos sean capaces de resistir ciclos reiterados de carga sin romper.
- Análisis térmico: Se realiza un estudio térmico para los rodillos que se calientan, con el objetivo de determinar la distribución de la temperatura y su impacto en la resistencia del material. Esto abarca la conductividad térmica de los materiales, como la niquelina, que tiene una conductividad cercana a 90 W/m·K.

El diseño de los rodillos se basa en la fórmula básica de flexión:

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I}$$

Donde:

σ : Tensión en el rodillo.

M : Momento flector aplicado.

c : Distancia desde el centroide hasta el punto más alejado de la sección transversal.

I : Momento de inercia de la sección transversal.

Cálculo de Flexión en una Viga Circular

Datos del Problema

- Longitud de la viga: $L = 300$
- Carga aplicada: $F = 21\text{ksi} = 21 \times 6,895 = 144,795$
- Diámetro de la sección circular: $D = 60$
- Ancho de la viga: $b = 300$
- Módulo de elasticidad: $E = 69 = 69 \times 10^3$
- Tipo de soporte: Viga simplemente apoyada

Cálculo del Momento de Inercia

Cómo encontrar el momento de inercia de una sección circular se puede calcular de la siguiente manera:

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (1)$$

Sustituyendo $D = 60$:

$$I = \frac{\pi(60)^4}{64} = \frac{\pi(12960000)}{64} = 63617,25^4 \quad (2)$$

Cálculo del Momento Flector Máximo

Encontrar la flector máximo respecto a una viga que está simplemente apoyada y tiene una carga puntual central:

$$M_{\text{máx}} = \frac{FL}{4} \quad (3)$$

Sustituyendo los valores:

$$M_{\text{máx}} = \frac{(144,795 \times 300)}{4} = 10859,63\text{N} \cdot \text{mm} \quad (4)$$

Cálculo del Esfuerzo Máximo

El esfuerzo máximo por flexión se determina como:

$$\sigma = \frac{M_{\text{máx}}c}{I} \quad (5)$$

Donde $c = \frac{D}{2} = 30$:

$$\sigma = \frac{(10859,63)(30)}{63617,25} = 5,12 \quad (6)$$

Cálculo de la Deflexión Máxima

Encontrar la deflexión máxima respecto a una viga que está simplemente apoyada y tiene una carga puntual central:

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{FL^3}{48EI} \quad (7)$$

Sustituyendo los valores:

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{(144,795 \times 300^3)}{48 \times (69 \times 10^3) \times 63617,25} = 0,301 \quad (8)$$

Resultados Finales

- **Esfuerzo máximo:** 5,12
- **Deflexión máxima:** 0,301

Pérdida de Energía

La fórmula a continuación se utiliza para establecer la energía perdida por calentamiento y fricción:

$$Q = mc\Delta T$$

Donde:

Q es la cantidad de calor transferido.

m es la masa del rodillo.

c es la capacidad calorífica específica del material.

ΔT es el cambio de temperatura.

Análisis de elementos finitos para tubos huecos de 14 mm de Diámetro

Propiedades del material

■ Aluminio 3003:

- Módulo de elasticidad (E): 69 GPa = 69×10^9 N/m²
- Densidad (ρ): 2730 kg/m³

■ Acero inoxidable:

- Módulo de elasticidad (E): 200 GPa = 200×10^9 N/m²
- Densidad (ρ): 8000 kg/m³

Cálculos para Aluminio 3003

- Diámetro interior (d): 15 mm = 0.015 m
- Momento de inercia (I):

$$I = \frac{\pi}{64} (0,017^4 - 0,015^4) \approx 3,78 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

- Tensión máxima (σ):

$$\sigma = \frac{100 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 0,0085 \text{ m}}{3,78 \times 10^{-10} \text{ m}^4} \approx 2,25 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Cálculo de Fatiga para Aleación de Aluminio 3003

Propiedades del Material

- **Aluminio 3003:**

- Límite de fatiga (σ_f): 20 MPa
- Tensión última (σ_u): 90 MPa

Datos del ciclo de carga

- Tensión máxima ($\sigma_{\text{máx}}$): 50 MPa
- Tensión mínima ($\sigma_{\text{mín}}$): 10 MPa

Cálculos

- Esfuerzo medio (σ_m):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{50 + 10}{2} = 30 \text{ MPa}$$

- Esfuerzo alternante (σ_a):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{50 - 10}{2} = 20 \text{ MPa}$$

- Verificación con el diagrama de Goodman modificado:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = \frac{20}{20} + \frac{30}{90} = 1 + 0,33 \approx 1,33 \quad (\text{No cumple})$$

Datos del Ciclo de Carga

- Tensión máxima ($\sigma_{\text{máx}}$): 300 MPa
- Tensión mínima ($\sigma_{\text{mín}}$): 100 MPa

Cálculos

- Esfuerzo medio (σ_m):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{300 + 100}{2} = 200 \text{ MPa}$$

- Esfuerzo alternante (σ_a):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} = \frac{300 - 100}{2} = 100 \text{ MPa}$$

- Verificación con el diagrama de Goodman modificado:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = \frac{100}{240} + \frac{200}{505} \approx 0,417 + 0,396 \approx 0,813 \quad (\text{Cumple})$$

Diseño de rodillos

VI-A.2 Diseño de cada pieza

Cada componente de un sistema de rodillos debe ser diseñado teniendo en cuenta su funcionalidad, materiales y condiciones de operación.

VI-A.3 Ejes

Los ejes de los rodillos son críticos para la transmisión del movimiento. Deben ser diseñados considerando:

- Materiales: Acero al carbono, aleaciones.
- Diámetro: Según la carga y velocidad.
- Resistencia a la fatiga y torsión.

Fórmula de diseño de ejes

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (9)$$

Donde:

τ es la tensión cortante.

T es el torque.

r es el radio.

J es el momento de inercia polar.

VI-A.4 Análisis térmico en rodillos

Los rodillos pueden calentarse debido a la fricción y deben ser analizados térmicamente para asegurar que funcionen dentro de los límites seguros.

Fórmula de transferencia de calor

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{(T_{hot} - T_{cold})}{d} \quad (10)$$

Donde:

Q es el flujo de calor.

k es la conductividad térmica.

A es el área.

T_{hot} y T_{cold} son las temperaturas.

d es el grosor del material.

VI-A.5 Conductividad de la níquelina

La aleación de níquel es famosa por su excepcional resistencia y estabilidad a altas temperaturas. Un componente esencial del análisis térmico es su conductividad térmica.

$$k_{\text{níquelina}} \approx 15 \text{ W/m}\cdot\text{K} \quad (11)$$

VI-A.6 Pérdida de energía

La disipación de energía en los rodillos puede ser analizada considerando la fricción y el calor generado.

Fórmula de pérdida de energía

$$P = f \cdot N \cdot v \quad (12)$$

Donde:

P es la potencia perdida.

f es el coeficiente de fricción.

N es la carga normal.

v es la velocidad.

VI-A.7 Diseño de las paredes donde van los rodillos

Las paredes deben ser diseñadas para soportar la carga y asegurar la alineación adecuada de los rodillos.

Análisis estructural

Considerar las cargas aplicadas y los materiales para asegurar que las paredes no se deformen bajo carga.

VI-A.8 Selección de rodamientos

Fórmula de selección de rodamientos:

La vida útil de un rodamiento se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot 10^6 \quad (13)$$

Donde:

- L_{10} es la vida útil en revoluciones.
- C es la capacidad de carga básica (kN).
- P es la carga aplicada (kN).

VI-A.9 Cálculos de selección de rodamientos Se supone que:

- La carga aplicada $P = 5$ kN
- Se busca un rodamiento con un diámetro del cilindro de 15 mm.

Para calcular selección de rodamientos para un diámetro de 15 mm L_{10} , primero se necesita encontrar un rodamiento con una capacidad de carga básica (C) adecuada.

Tabla I
SELECCIÓN DE RODAMIENTOS PARA UN DIÁMETRO DE 15 MM

Diámetro del rodillo (mm)	Capacidad de Carga Básica (C) (kN)	Modelo de Rodamiento
15	10	6202
15	12	6302
15	15	6402

Se selecciona un rodamiento modelo 6202 con una capacidad de carga básica $C = 10$ kN.

Cálculo de vida útil Utilizando la fórmula de vida útil:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot 10^6 \quad (14)$$

Sustituyendo los valores:

$$L_{10} = \left(\frac{10}{5}\right)^3 \cdot 10^6 \quad (15)$$

$$L_{10} = 8 \cdot 10^6 \text{ revoluciones} \quad (16)$$

Por lo tanto, la vida útil del rodamiento seleccionado es de $8 \cdot 10^6$ revoluciones.

Ecuación humedad de papel Fórmula empírica para la humedad del papel

$$H_p = H_{ref} X \left(\frac{HR}{H_{ref}}\right)^n \quad (17)$$

- H_p representa la humedad del papel en equilibrio del porcentaje (%).
- H_{ref} representa la humedad de referencia del papel a una condición conocida
- HR es la humedad relativa del aire (%).
- H_{ref} es la humedad relativa de referencia (%).
- n es un coeficiente empírico (típicamente entre 0.6 y 0.8 para el papel Kraft).

Valor de referencia

Se toma un valor de referencia típico del papel kraft

- Humedad de papel a 60% HR y 20°C: $H_{ref} = 8.5\%$
- HR de referencia: $H_{ref} = 60\%$
- HR objetivos: $HR = 50\%$
- Coeficiente empírico : $n = 0.7$ (valor común para el papel kraft) Fórmula empírica para la humedad del papel
Valor de referencia

$$H_p = 8,5 \left(\frac{50}{60} \right)^{0,7} \quad (18)$$

VI-B. Análisis FEA

El análisis por elementos finitos (FEA) es un método de simulación por ordenador avanzado, ampliamente aplicado en la ingeniería y la ciencia para modelar y resolver problemas complejos de estructuras, fluidos, multifísicos, etc. Este enfoque se basa en diseccionar un elemento o sistema en una malla formada por elementos finitos unidos por nodos, cada uno de los cuales contiene características materiales y estructurales que afectan el comportamiento del elemento en situaciones específicas. Para determinar la resistencia del material utilizado en el prototipo del sistema de humedad, se realizó un estudio de elementos finitos. En la Figura 30 se presenta el desplazamiento del prototipo del sistema de secado.

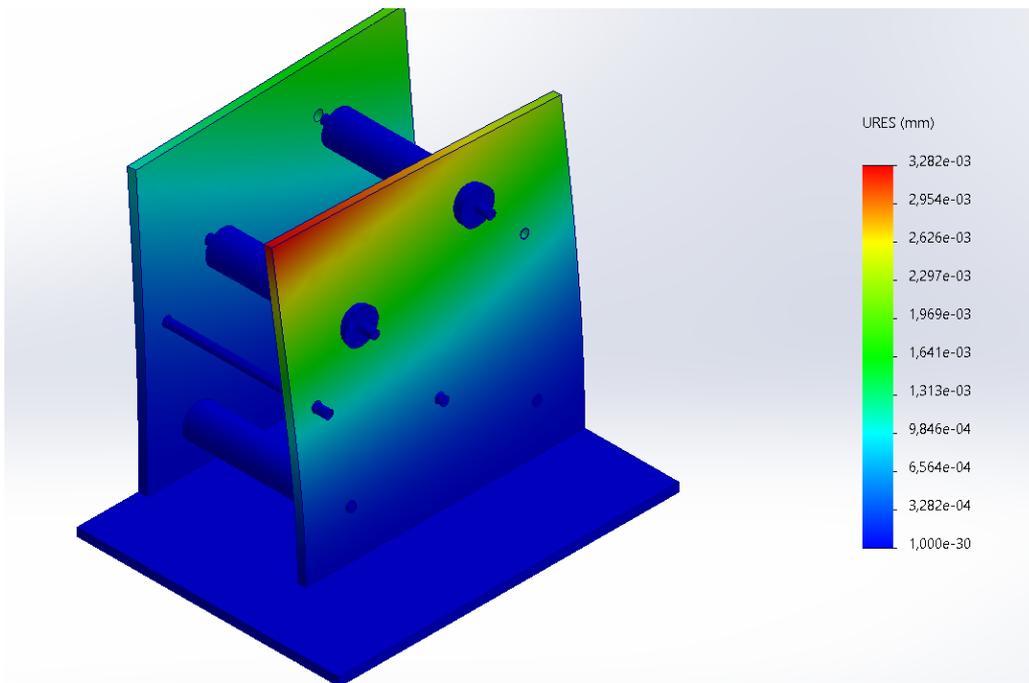


Figura 30. Desplazamiento de prototipo del sistema de secado

Al emplear este método se obtienen los siguientes resultados:

Tabla II
PROCEDIMIENTO DEL ELEMENTO FINITO

FUERZA APLICADA (F)	PUNTO B DEFORMACIÓN (mm)	PUNTO C DEFORMACIÓN (mm)	PUNTO C ESFUERZO (Mpa)
1 N	4.4043 mm	0.06737 mm	29.86 Mpa
14.20 N	7.451 mm	0.114 mm	50.42 Mpa
16.85 N	8.7697 mm	0.146 mm	59.32 Mpa
29 N	8.9813 mm	0.15665 mm	68.57 Mpa

Se realizó un análisis térmico que se visualiza en la figura 31.

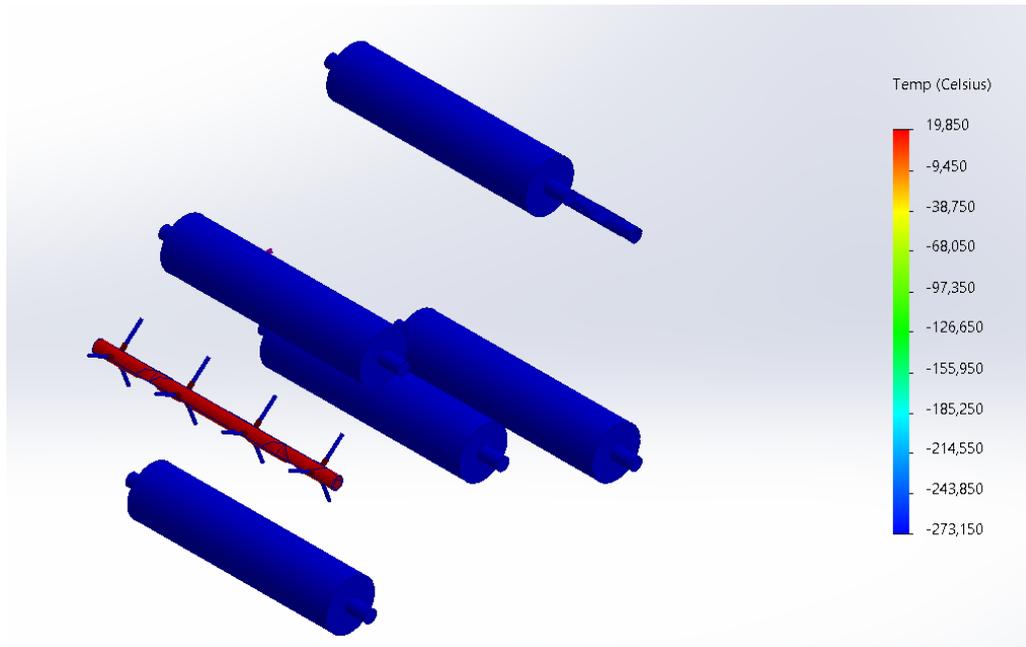


Figura 31. Análisis térmico prototipo sistema de secado con la niquelina

Se puede observar la respectiva tabla III del análisis térmico.

Tabla III
ANÁLISIS TÉRMICO

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (SEG)	TEMPERATURA CENTRAL (°C)
20°C	466 seg	15.2 °C
50°C	598 seg	25.6 °C
80°C	688 seg	27.34 °C
100°C	1725 seg	35.78 °C

Se puede observar la respectiva tabla IV de las propiedades de la aleación 3003. El análisis de elementos finitos (FEA) es crucial y las características térmicas y mecánicas de la aleación 3003, un material utilizado frecuentemente en aplicaciones de ingeniería debido a su equilibrio ideal de resistencia, flexibilidad y resistencia a la corrosión, se muestran en los datos adjuntos. En los FEA, el material se modela como un material isótropo elástico lineal, por lo que las propiedades con respecto al material son vitales para predecir y diseñar su comportamiento sobre un rango de cargas y diferencias de temperatura. Posteriormente se presentan las propiedades relevantes de la Aleación 3003:

Tabla IV
PROPIEDADES DE LA ALEACIÓN 3003

Propiedad	Valor
Designación	Aleación 3003
Tipo de modelo	Isotrópico elástico lineal
Criterio de error predeterminado	Tensión de von Mises máx.
Límite elástico	$4,13613 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
Límite de tracción	$1,10297 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
Módulo elástico	$6,9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de Poisson	0.33
Densidad	$2,700 \text{ kg/m}^3$
Módulo cortante	$2,7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
Coefficiente de dilatación térmica	$2,3 \times 10^{-5} /\text{Kelvin}$

VI-C. Circuito electrónico prototipo de Post-secado

Se componen de las siguientes partes:

- **Arduino Uno:** Este microcontrolador funciona a 5V. Se encarga de controlar y coordinar el funcionamiento de los demás componentes del circuito.
- **Receptor de humedad y nivel termico DHT11:** Este sensor funciona a 3.3V o 5V. Mide la humedad y el nivel termico del ambiente y envía los datos al Arduino.
- **Módulo de relé:** Este módulo funciona a 5V. Permite controlar equipos de mayor corriente y voltaje mediante una señal de bajo voltaje proveniente del Arduino.
- **Motor DC:** Este motor funciona a 5V. Es controlado por el módulo de relé y se utiliza para mover el ventilador en el proceso de secado.
- **Módulo de sensor de humedad del suelo:** Este sensor funciona a 3.3V o 5V. Mide la humedad del suelo y envía los datos al Arduino.
- **Protoboard:** Es una placa de pruebas donde se conectan los componentes del circuito sin necesidad de soldar. No requiere alimentación propia.
- **Fuente de alimentación:** Proporciona al circuito la energía que necesita para funcionar. En esta situación, utilice una fuente de alimentación de 5 V.

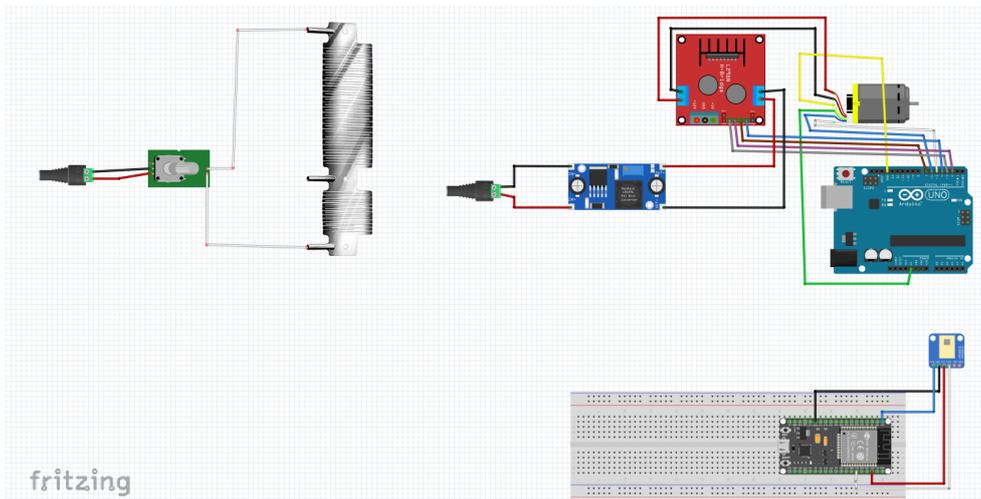


Figura 32. Circuito electrónico prototipo de Post-secado

VI-D. Visión Artificial con Redes Neuronales Convolucionales (CNNs)

Introducción a las Redes Neuronales Convolucionales (CNNs)

Las CNNs son unos tipos de redes neuronales que son particularmente eficaces para aplicaciones de visión artificial, como la identificación de ilustraciones y su organización. Se inspiran en la clasificación del córtex visual de los animales y tienen la capacidad de comprender patrones espaciales jerárquicos en los datos de entrada.

Arquitectura de una CNN

Una CNN típica se compone de varias capas:

- **Capas Convolucionales:** Realizan convoluciones sobre la entrada para obtener propiedades.
- **Capas de Pooling (submuestreo):** Disminuyen la magnitud espacial de las propiedades.
- **Capas Completamente Conectadas:** Realizan la clasificación según las propiedades obtenidas.

Proceso Metodológico

Paso 1: Preparación de Datos: Previo al entrenamiento de una CNN, es necesario organizar y normalizar las variables de entrada. Se deben tener datos de imágenes con etiquetas asociadas.

Paso 2: Definición de la Arquitectura: Se define una arquitectura simple de CNN:

Entrada \rightarrow Conv(3×3 , 32) \rightarrow ReLU \rightarrow MaxPool(2×2) \rightarrow Conv(3×3 , 64) \rightarrow ReLU \rightarrow MaxPool(2×2) \rightarrow Fully Connected(19)

Paso 3: Convolución: La convolución coloca un filtro (kernel) en la ilustración de entrada, lo que genera un mapa de características.

Paso 4: Activación ReLU: La activación ReLU (Rectified Linear Unit) se aplica a cada valor del mapa de características para introducir no linealidades.

Paso 5: Pooling: El pooling reduce la dimensionalidad del mapa de características. Por ejemplo, el max pooling de 2×2 toma el valor máximo en cada ventana de 2×2 .

Paso 6: Capas Totalmente Conectadas: Las características extraídas se aplanan y se procesan a través de capas densamente conectadas para llevar a cabo la clasificación final. La salida final puede ser la probabilidad de cada clase utilizando una función softmax.

Entrenamiento

Durante el entrenamiento, se emplea un cálculo de pérdida (como la entropía cruzada) y un algoritmo de optimización (por ejemplo, la reducción de gradiente estocástico) para ajustar los pesos del modelo.

VII. RESULTADOS

VII-A. Recolección de datos de temperatura y humedad

Los datos presentados se obtuvieron mediante la cámara térmica AMG8833. En la Figura 33 se ilustra la distribución de temperatura registrada, junto con la humedad correspondiente del papel. También se señala la necesidad de aumentar la temperatura en un rango del 6% al 7% para alcanzar los valores nominales óptimos.

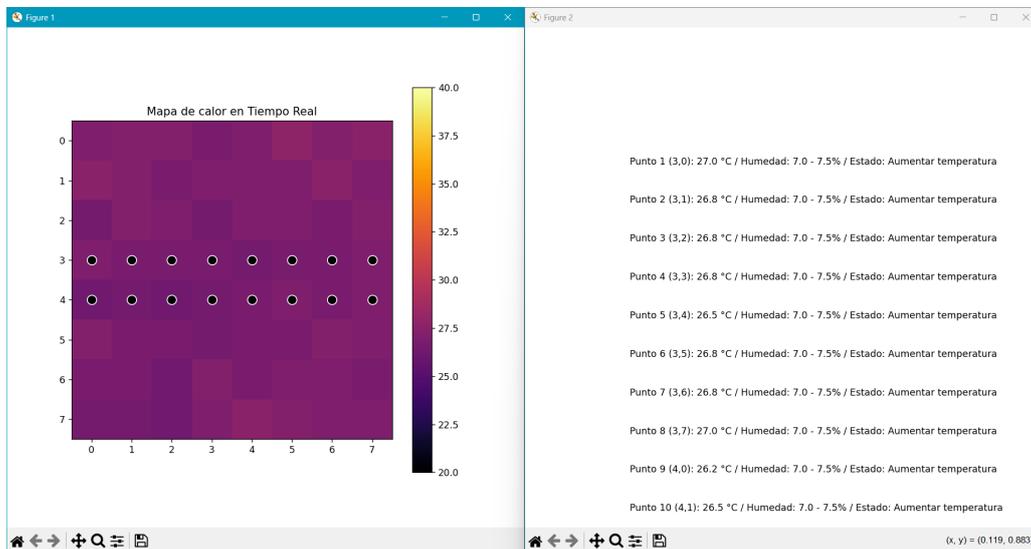


Figura 33. Datos obtenidos del mapa de calor

El sistema desarrollado para el secado de humedad de bobinas de papel mediante la utilización de visión artificial fue mejorando como consecuencia de todo el conjunto de pruebas que se fueron realizando hasta conseguir, un análisis de datos cada vez más preciso y eficiente. Para ello se establecieron medidas de protección de seguridad, tales como prevención de cortocircuitos o el aumento progresivo de la corriente suministrada a la resistencia de la niquelina, el cual parametrizaba explícitamente el secado, evitando así picos rápidos de temperatura que producen sobrecalentamientos o control térmico ineficiente. Se puede visualizar en el prototipo en las figuras 34 y 35.



Figura 34. Prototipo de planta de papel vista lateral



Figura 35. Prototipo de planta de papel vista frontal

Se pueden evidenciar las pruebas realizadas, con diferentes porcentajes de humedad. Como se evidencia en la figura 36 , donde sobresale el color amarillo que corresponde a valores altos de temperatura.

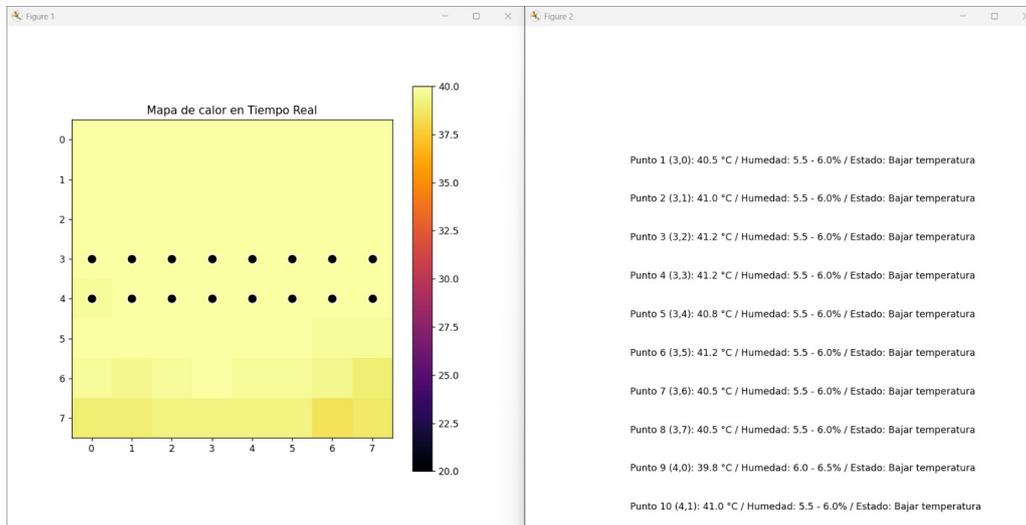


Figura 36. Mapa de calor resultados altos

En la figura 37, donde sobresale el color naranja que corresponde a valores intermedios del valor nominal de la temperatura.

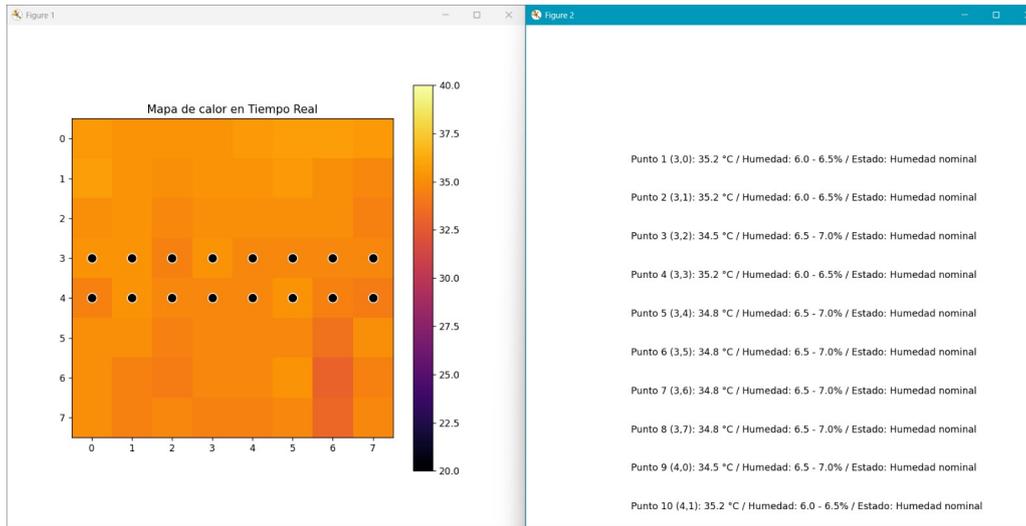


Figura 37. Mapa de calor resultado nominal

En la figura 38, donde sobresale el color negro que corresponde a valores bajos de la temperatura.

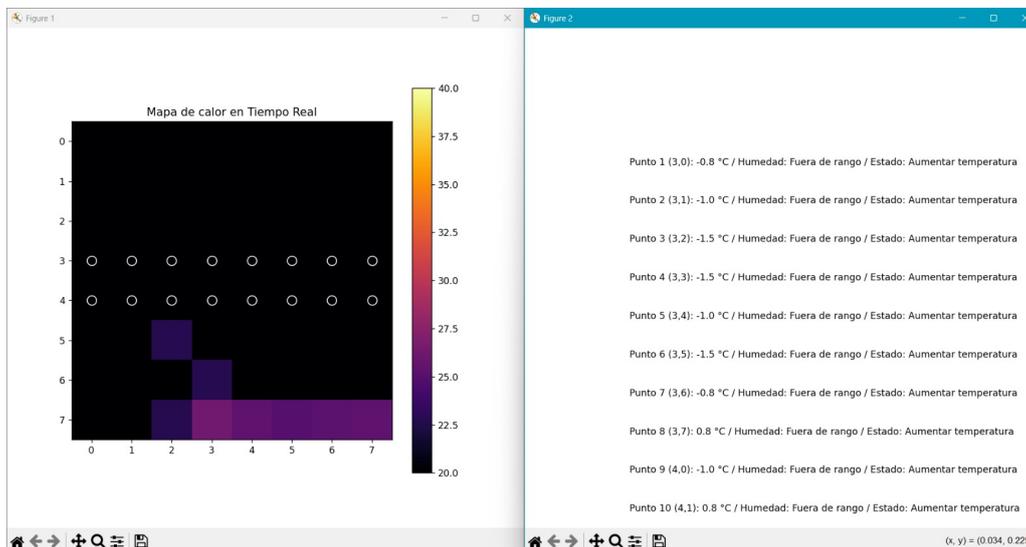


Figura 38. Mapa de calor en bajo cero

En la figura 39, donde sobresale el color morado que corresponde a valores bajos de la temperatura, donde indica que se debe aumentar la temperatura de la niquelina.

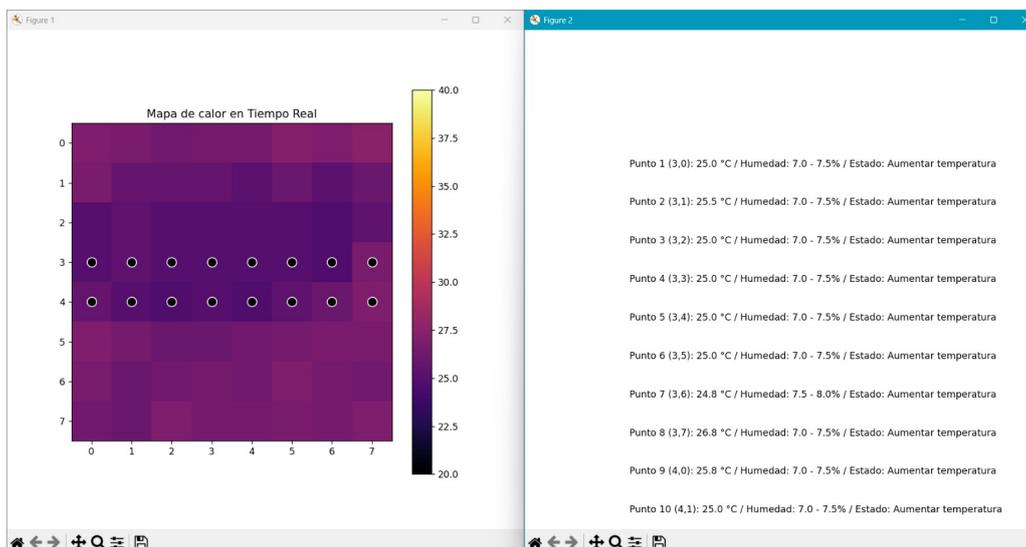


Figura 39. Mapa de calor en tiempo real bajo

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos a partir de diversas pruebas realizadas con diferentes niveles de humedad inicial. En las primeras seis pruebas, con niveles de humedad superiores al 25 %, se observó la rotura del papel debido a la tensión generada por la humedad excesiva. A partir de la séptima prueba, con un nivel de humedad inicial del 12 %, se logró un secado efectivo. En la décima prueba, con una humedad inicial del 5 %, no fue posible realizar el procedimiento, ya que la humedad final superó el valor nominal estándar. En la figura 40 se indica los resultados de la tabla.

Resultados						
# de Prueba	Humedad Inicial	Humedad Final	Temperatura Inicial	Temperatura Final	Tiempo	Descripción
Primera Prueba	100%	N/D	20 °C	N/D	N/D	Rotura de la hoja por tensión debido al papel mojado
Segunda Prueba	75%	N/D	20 °C	N/D	N/D	Rotura de la hoja por tensión debido al papel mojado
Tercer Prueba	50%	N/D	20 °C	N/D	N/D	Rotura de la hoja por tensión debido al papel mojado
Cuarta Prueba	40%	N/D	20 °C	N/D	N/D	Rotura de la hoja por tensión debido al papel mojado
Quinta Prueba	30%	N/D	20 °C	N/D	N/D	Rotura de la hoja por tensión debido al papel mojado
Sexta Prueba	25%	N/D	20 °C	N/D	N/D	Rotura de la hoja por tensión debido al papel mojado
Séptima Prueba	12%	7%	31 °C	N/D	50 minutos	El papel se seco hasta llegar a la humedad deseada, aunque se tuvo que tomar más tiempo del esperado.
Octava Prueba	10%	7%	32 °C	N/D	30 minutos	El secado se realizó de manera eficiente.
Novena Prueba	8%	7%	30 °C	35 °C	10 minutos	El secado se realizó de manera eficiente.
Decima Prueba	5%	5%	40 °C	40 °C	0 minutos	No se pudo realizar debido a que la humedad supero la nominal.

Figura 40. Resultados del secado

La interfaz fue desarrollada para que la red neuronal pueda identificar y analizar imágenes térmicas y realice su cálculo y nos indique la humedad promedio. La figura 41 se muestra el resultado del HTML.



Figura 41. Artificial para detección y secado de humedad en bobinas de papel.

La figura 42 muestra el resultado del HTML con otra imagen.



Figura 42. Artificial para detección y secado de humedad en bobinas de papel 2

La figura 43 ilustra el resultado del HTML con otra imagen.



Figura 43. Artificial para detección y secado de humedad en bobinas de papel 3

VIII. CRONOGRAMA

A continuación se muestra el cronograma de trabajo en la Figura 44.

Cronograma						
Actividad	Actividad específica	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero
Redacción inicial del documento	Título	X				
	Objetivo general y específicos	X				
	Problemática y justificación	X				
	Marco teórico y metodológico	X				
	Cronograma y presupuesto	X				
	Referencia	X				
Diseño	Diseño de maqueta en software 3D		X	X		
	Elección de componentes para el prototipo		X	X		
	Diseño del prototipo en físico		X	X		
	Integración de los componentes en la prototipo		X	X		
	Pruebas de funcionamiento		X	X		
Desarrollo de software	Desarrollo de programación en Google Colab				X	X
	Implementación de Red neuronal				X	X
	Implementación de automatización de autoajustado				X	X
Pruebas e implementación	Pruebas de funcionamiento del software				X	X
	Validación de correcto uso del software				X	X
	Aplicación de funcionamiento del prototipo				X	X

Figura 44. Cronograma

IX. PRESUPUESTO

A continuación se muestra el presupuesto del trabajo en la tabla V.

Tabla V
TABLA DE PRESUPUESTO

Nombre del elemento	Descripción	Cantidad	Valor inicial	Valor total
Varilla de aluminio hueca	De 14 mm de diámetro y 300 mm de ancho	1	\$ 75	\$ 75
Varilla de aluminio	De 60 mm de diámetro, 300 mm de ancho	1	\$ 210	\$ 210
Módulo cámara termal infrarroja ir AMG8833	Cámara infrarroja	1	\$ 45	\$ 45
Motor DC Encoder	Motor DC encoder de 12V	1	\$ 35	\$ 35
Acople de motor	5 mm	1	\$ 3	\$ 3
Driver L298N	12 DC	1	\$ 4	\$ 4
Papel Kraft	Papel de la industria papelera para rollos	1	\$ 10	\$ 10
Plancha de madera	400 mm	1	\$ 130	\$ 130
Soportes de madera	100 mm	30	\$ 4	\$ 120
Perno	20 mm	50	\$ 1	\$ 50
Anillo de presión	20 mm	50	\$ 0.5	\$ 25
Tuerca	10 mm	45	\$ 1	\$ 45
Perno	10 mm	45	\$ 1	\$ 45
Fuente de alimentación	12V 10A	1	\$ 13	\$ 13
Arduino uno	Tarjeta electrónica	1	\$ 30	\$ 30
ESP32	Tarjeta electrónica	1	\$ 10	\$ 10
Dinner Eaton giratorio 600W 120 V-60 HZ	Atenuador	2	\$ 7	\$ 14
Breaker	dispositivo de motor	1	\$ 4	\$ 4
SUBTOTAL MAQUETA				\$ 868
Mano de obra	Corte láser de varillas de aluminio	1		\$ 130
Mano de obra	Corte láser de madera de 400mm	1		\$ 125
Horas de trabajo		400 horas	\$ 6	\$ 2400
SUBTOTAL COSTOS LOGÍSTICOS				\$ 2655
TOTAL(+ COSTOS LOGÍSTICOS)				\$ 3268

X. CONCLUSIONES

Se realizó la integración de un sistema térmico inteligente que permitió ajustar de manera dinámica los parámetros de secado según los niveles de humedad detectados en tiempo real. Esto contribuyó a una reducción del consumo energético y a una mayor eficiencia en el proceso.

Se utilizó visión artificial para recolectar información a través del reconocimiento de colores en tiempo real, con una cámara termográfica. Esto asegura que el sistema sea eficaz, exacto y preciso al determinar si la temperatura y la humedad son apropiadas para que el producto final pueda ser comercializado, o si el producto no satisface las condiciones requeridas para su venta.

Para obtener información precisa sobre la estructura, la cantidad de deformación, la carga que puede soportar, la sección elegida para los cojinetes, la carga axial y radial y el cálculo del diseño de los cojinetes, se realizó un análisis estático y térmico del prototipo. Esto se hizo para asegurarse de que el sistema estuviera funcionando como estaba previsto.

Se creó una tabla que permite visualizar la escala en la que se ubica el papel a través de la temperatura y otros elementos, con el objetivo de que el procedimiento sea más exacto y se reduzcan los posibles errores.

XI. RECOMENDACIONES

Para conseguir resultados exactos al manipular visión artificial, es crucial ajustar la cámara con antelación. Considerando que la iluminación puede fluctuar considerablemente en función del ambiente, es recomendable disponer de una adecuada iluminación para garantizar un rendimiento óptimo y prevenir dificultades en la identificación de las imágenes térmicas.

Es fundamental que la cámara se mantenga inmóvil, ya que cualquier desplazamiento podría obstaculizar el análisis de la información, provocando inestabilidad.

La temperatura y la humedad en las bobinas de papel se pueden detectar mediante un modelo basado en la inteligencia artificial para mejorar el sistema de visión artificial. Un sistema de aprendizaje automático puede interpretar los datos del sensor de temperatura y humedad en tiempo real, lo que permite realizar ajustes automáticos de la cámara y de los parámetros ambientales para garantizar las condiciones ideales para el procesamiento de datos y la captura de imágenes.

REFERENCIAS

- [1] L. Donald, *Industria del papel y de la pasta de papel*. 2022.
- [2] H. C. Minh, «Evaluation of Microplastic Removal Efficiency at the Wastewater Treatment Plant of a Kraft Paper Factory in Vietnam,» *Ingenieria mecatrónica*, 2023.
- [3] D. F. G. Gómez, «Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador,» *Departamento de ingeniería eléctrica*, 2012.
- [4] L. A. V. Ureta, «Estandarización del proceso de fabricación de papel kraft en la aquina papelera N° 2 de la Empresa trupal,» *Ingeniería industrial*, 2017.
- [5] A. G. C. Vera, «Evaluación de las propiedades física y mecánicas del papel kraft obtenido a partir de la biomasa lignocelulósica de la cascarilla de cacao (Theobroma cacao L.) tras someterse a un proceso de blanqueo con peróxido de hidrógeno,» *Proyecto e investigación ingeniería ambiental*, 2024.
- [6] P. Popogolzelski, «In a very difficult context, pulp and paper industry has shown resilience in 2023,» *confederation of European paper industries*, 2024.
- [7] A. Tejada, «La humedad en la atmósfera bases física , instrumentos y aplicaciones,» *Universidad de Colima*, 2018.
- [8] L. Viscaíno, «Influencia de la humedad y la temperatura en las características dieléctricas del papel Kraft,» *Maquinaria electrónica*, 2009.
- [9] Hikvision, *Manual Thermal optical bi-spectrum networkcamera DS-2TD2537T-4*.
- [10] J. A. R. C. Luis Maximiliano Moreno Palacios, «Evaluación de la metodología Kurschner y Hoffner en la producción de papel Kraft a partir de las cascarilla de Cacao (Theobroma Cacao) utilizando aditivos derivados del pseudotallo de platano(Musa paradisina) y jacarandá (Jacaranda Copaia),» *Ingenieria ambiental*, 2024.
- [11] E. L. y Manuel Muñoz, «Característica físicas de las hojas de papel,» *Ingeniería industrial*, 2019.
- [12] *Determinación del contenido de humedad de un lote método de secado en estufa*, 2018.
- [13] W. Kraszewski, «Contenido de humedad en fardos de papel y cartón a través de la potencia de recepción en el rango de las microondas,» *Departamento de ingeniería eléctrica*, 2020.
- [14] accedido: 10-12-2021.
- [15] *Manual DS-2TD2537T*, China HangZhou, 2021.
- [16] L. Geng y wenke Li, «Pointer temperature and humidity meter detection based on machine vision,» *Tianjin polytechnic university*, 2020.
- [17] S. Kumar, «Paper Machine industrial analysis on moisture control using BF-PSO algorithm and real time implementation setup through embedded controller,» *Paper industry , PSO, PID, BFO, BF-PSO*, 2016.
- [18] T. Z. Zhiyan Ma Teng Fei, «Sensors and actuators:B. Chemical,» *Laboratory of integrated optoelectronics, college of electronic science and engineering*, 2023.
- [19] A. Verichev y K. M. Carpio, «Analysis of the Behaviour of timber construction solutions to interstitial condensation in areas of high relative humidity: Valdivia, Chile,» 2024.
- [20] L. X. Haibing Yuan Ziping Wang, «Design of temperature and humidity detection system for a material warehouse based on GM,» *School of mechanical engineering,Hubei university of automotive technology*, 2020.
- [21] G. Crossmann, «Inteligencia artificial para la industria 4.0: revisión sistemática de aplicaciones, desafíos y oportunidades,» *Sistema experto con aplicaciones*, 2023.
- [22] C. Bonilla Carrión, «Redes convolucionales,» 2020.
- [23] *Repositorio Digital - Escuela Politécnica Nacional*, <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23379>, Accedido: 18 de febrero de 2025.
- [24] B. Krinski, *Convolutional Neural Network*, <https://towardsdatascience.com/covolutional-neural-network-cb0883dd6529>, Accedido: 18 de febrero de 2025, 2019.
- [25] A. Tanchenko, «Visual-PSNR measure of image quality,» *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 25, n.º 5, págs. 874-878, 2014. DOI: 10.1016/j.jvcir.2014.01.008.
- [26] A. Horé y D. Ziou, «Image quality metrics: PSNR vs. SSIM,» en *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition*, 2010, págs. 2366-2369. DOI: 10.1109/ICPR.2010.579.

- [27] N. A. Ibraheem, M. M. Hasan, R. Z. Khan y P. K. Mishra, «Understanding Color: A Review,» *ARPJ Journal of Science and Technology*, vol. 2, n.º 3, págs. 265-275, 2012.
- [28] C. N. E. Del Angel et al., «Detección de Fallas en Servidores Utilizando Descriptores Estadísticos en Imágenes Termográficas,» 2023.
- [29] V. Hotkar, O. P. Meena y T. Jaiman, «Real Time Fire Detection with Simple Thermal Imaging: A Novel Integration of Threshold and Change Detection Techniques,» en *2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, IEEE, 2024, págs. 1-6.
- [30] M. MAGDALENO FLORES et al., «Propuesta de implementación de la Metodología DMAIC para la reducción de consumo de vapor en el proceso de secado de papel filtro, en una empresa papelera,» 2016.
- [31] S. A. Abarca Abarca y F. Tirado Diaz, «Mejoramiento de secado de papel onda para fabricar cajas de carton.,» Tesis doct., Universidad de Talca (Chile). Escuela de Ingeniería Mecánica, 2000.
- [32] D. E. Paredes Zavaleta, «Optimización de la sección secado de la máquina papelera PPX-7 de SPL-Trupal,» 1990.
- [33] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič y O. Težak, «Design and implementation of ESP32-based IoT devices,» *Sensors*, vol. 23, n.º 15, pág. 6739, 2023.
- [34] M. Richardson y S. Wallace, *Getting Started with Raspberry Pi: Electronic Projects with Python, Scratch, and Linux*. Maker Media, Inc., 2014.
- [35] *Steren Ecuador*, <https://www.steren.com.ec/>, Accedido: 16 de Enero de 2025.
- [36] *Grupo Electrostore*, <https://grupoelectrostore.com/>, Accedido: 16 de Enero de 2025.
- [37] *Arduino Uno Case y Cable USB*, <https://www.sigmagye.net/product-page/arduino-uno-case-y-cable-usb>, Accedido: 18 de febrero de 2025.
- [38] X. Li y A. Sharma, «Development of NC Program Simulation Software Based on AutoCAD Swarm Optimization Algorithm,» 2024.

ANEXO A
PLANOS

Planos de las piezas acotadas en SolidWorks 2024:

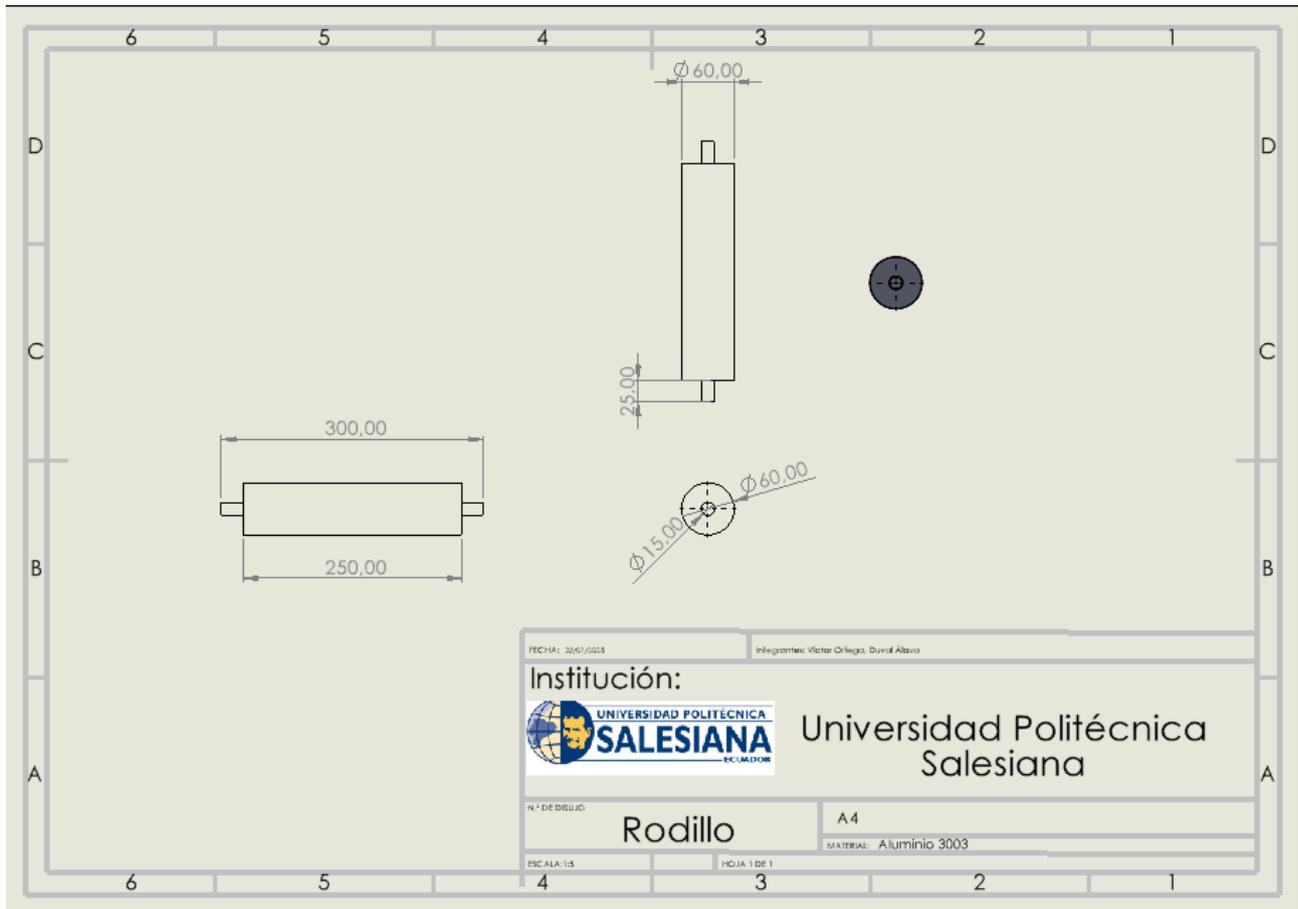


Figura 45. Lámina acotada del rodillo

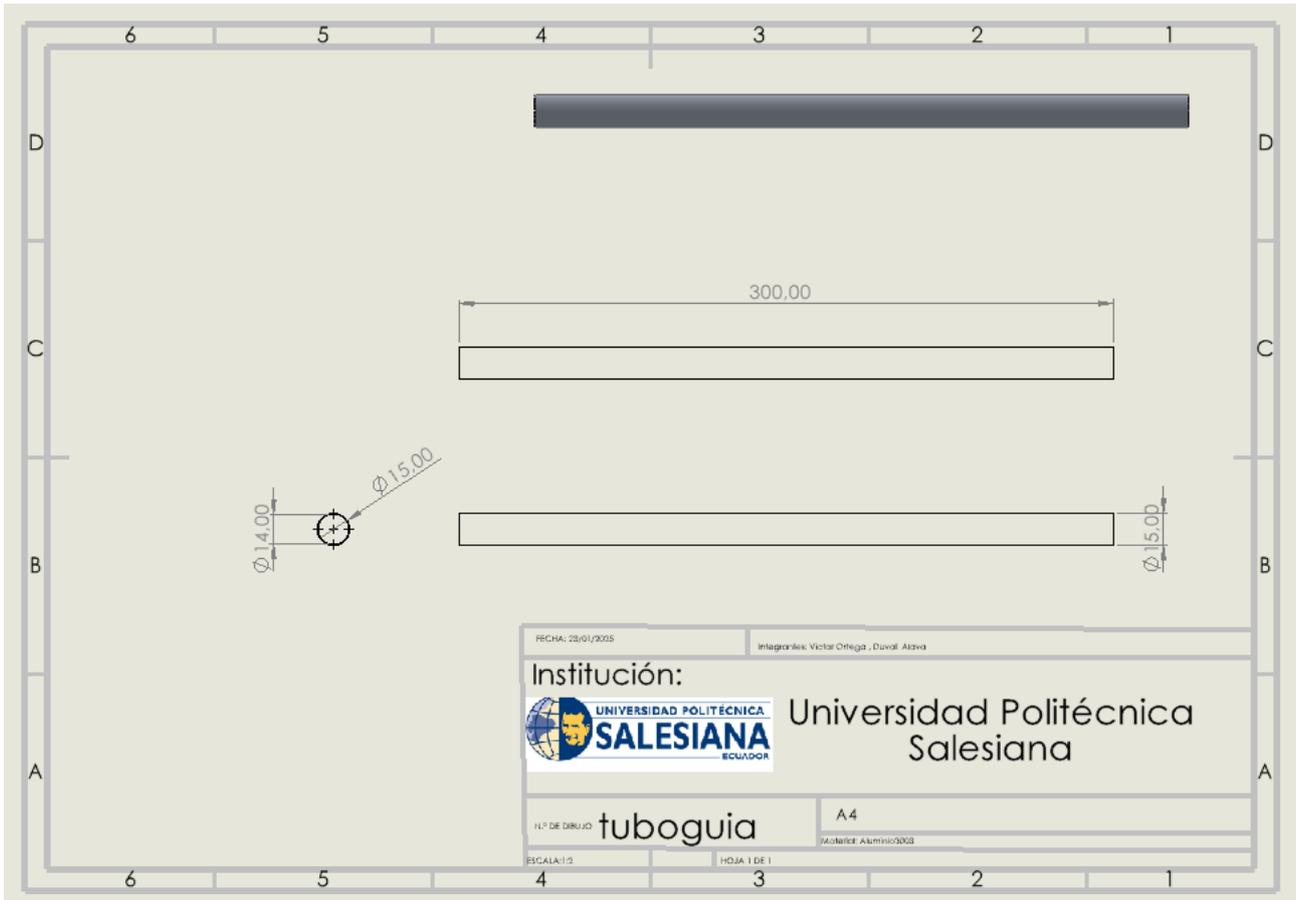


Figura 46. Lámina acotada del tubo

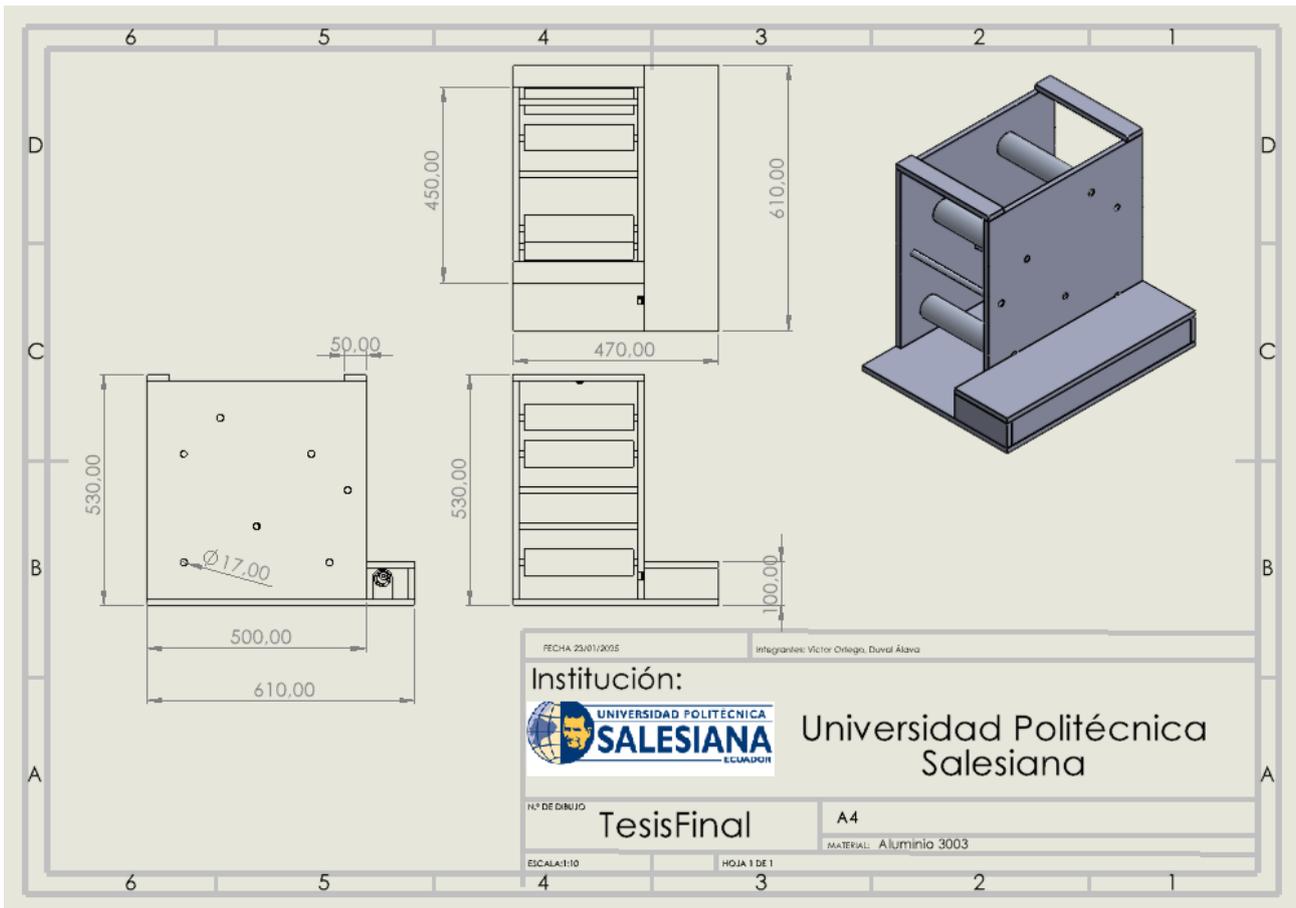


Figura 47. Plano acotado de la tesis final

ANEXO B
ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS Y TÉRMICO

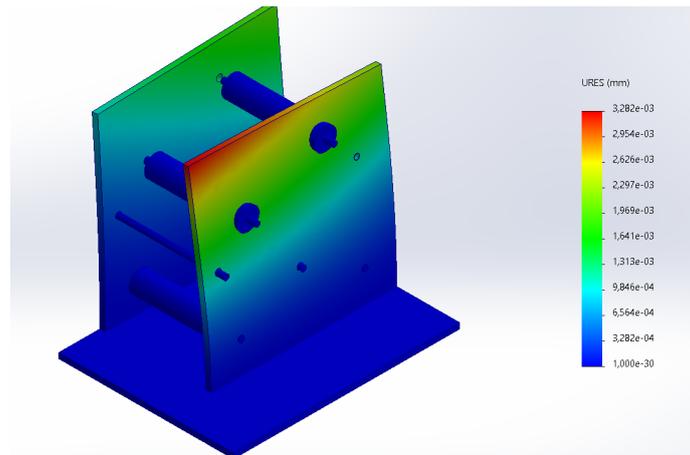


Figura 48. Desplazamiento de prototipo de un sistema de secado

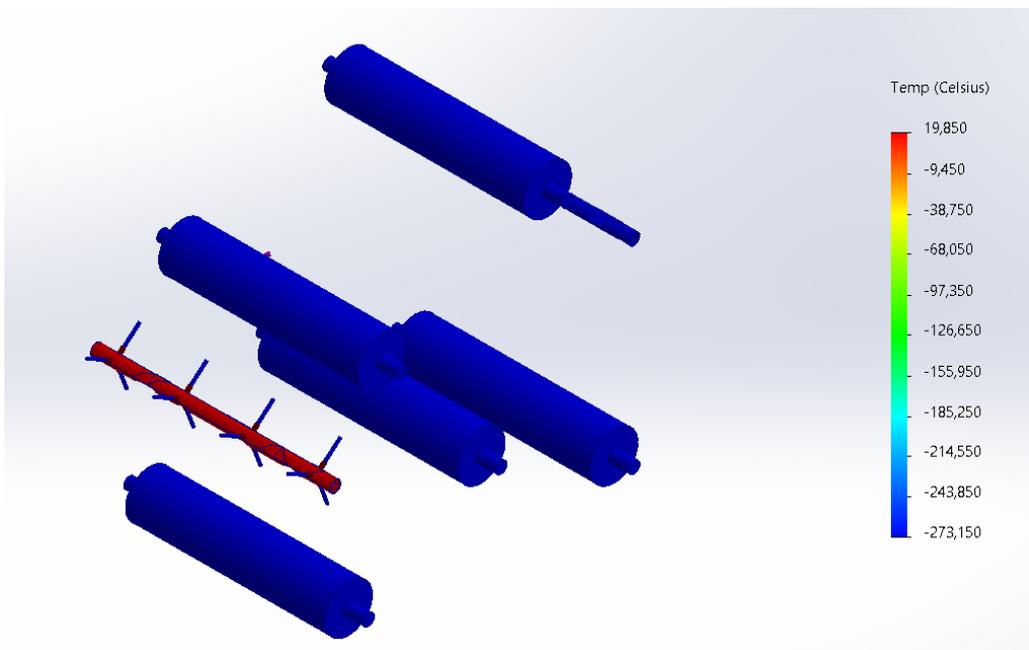


Figura 49. Análisis térmico prototipo sistema de secado con la niquelina

ANEXO C CÓDIGO Y DIAGRAMAS DE FLUJOS

```
1 #include <Wire.h>
2 #include<Adafruit_AMG88xx.>
3
4 Adafruit_AMG88xx amg;
5 float pixels [64];
6
7 void setup () {
8   Serial.begin (115200); // Comunicación por USB
9   Wire. begin ();
10
11   if(!amg.begin()) {
12     Serial.println ("Error al inicializar el sensor AMG8833");
13     while (1);
14   }
15
16   Serial.println ("Sensor AMG8833 inicializado");
17 }
18
19 void loop () {
20   // Leer los datos del sensor
21   amg. readPixels(pixels);
22   // Enviar los datos con delimitador claro
23   Serial. print ("[" ;
24   for
25   (int i = 0; i < 64; i++) {
26     Serial.print (pixels[i], 2); // Precisión de 2 decimales
27     if
28     (i < 63) Serial.print(","); // Separar valores con coma
29     Serial.println("]"); // Nueva línea para indicar fin del paquete
30     delay (100); // Ajustar retraso para evitar saturación
31   }
```

Figura 50. Código ESP32 Cámara Arduino

```
1 import serial
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 puerto_serial = 'COM3' # Ajusta tu puerto serial
6 baud_rate = 115200
7
8 def leer_datos_serial():
9     with serial.Serial(puerto_serial, baud_rate, timeout=0.1) as ser:
10         buffer = ""
11
12         while True:
13             try:
14                 if ser.in_waiting > 0:
15                     buffer += ser.read(ser.in_waiting).decode('utf-8')
16
17                     if "[" in buffer and "]" in buffer:
18                         inicio = buffer.find("[")
19                         fin = buffer.find("]") + 1
20                         paquete = buffer[inicio:fin]
21                         buffer = buffer[fin:] # Limpiar el buffer procesado
22
23                         datos = [float(x) for x in paquete.strip("[]").split(",")]
24                         if len(datos) == 64:
25                             yield np.array(datos).reshape((8, 8))
26             except Exception as e:
27                 print(f"Error leyendo datos: {e}")
28
29 def convertir_temperatura_a_humedad(temperatura):
30     """
31     Convierte una temperatura en el rango de humedad del papel Kraft basado en la escala proporcionada.
32     """
33     rangos temp = [15, 20, 25, 30, 35]
```

Figura 51. Código de cámara en Visual Code Python

```

34 | valores_humedad = ["6.5-7.0%", "6.0-6.5%", "5.5-6.0%", "5.0-5.5%", "4.5-5.0%", "Fuera de rango"]
35 |
36 | indice = np.digitize(temperatura, rangos_temp)
37 | return valores_humedad[indice]
38 |
39 | def visualizar():
40 |     plt.ion()
41 |     fig, ax = plt.subplots()
42 |     img = ax.imshow(np.zeros((8, 8)), cmap='inferno', vmin=20, vmax=40)
43 |     plt.colorbar(img, ax=ax)
44 |     ax.set_title("Mapa de calor en Tiempo Real")
45 |
46 |     # Puntos específicos de medición en las filas 3 y 4
47 |     puntos = [(3, col) for col in range(8)] + [(4, col) for col in range(8)]
48 |
49 |     # Mostrar puntos de medición en el gráfico con color negro
50 |     x_puntos, y_puntos = zip(*[(col, fila) for fila, col in puntos])
51 |     ax.scatter(x_puntos, y_puntos, c="black", s=100, edgecolor="white")
52 |
53 |     # Subplot para mostrar las temperaturas y humedades de los puntos
54 |     fig_text, ax_text = plt.subplots(figsize=(8, 4))
55 |     ax_text.axis("off")
56 |     textos_puntos = [ax_text.text(0.1, 0.8 - i * 0.1,
57 |                                 f"Punto {i+1} ({p[0]},{p[1]}): -- °C / Humedad: --",
58 |                                 fontsize=10) for i, p in enumerate(puntos)]
59 |
60 |     try:
61 |         for datos in leer_datos_serial():
62 |             img.set_data(datos)
63 |
64 |             # Actualizar los valores de temperatura y humedad de los puntos seleccionados
65 |             for i, punto in enumerate(puntos):

```

Figura 52. Código de cámara en Visual Code Python 2

```

66 |             temp = datos[punto[0], punto[1]]
67 |             humedad = convertir_temperatura_a_humedad(temp)
68 |             textos_puntos[i].set_text(f"Punto {i+1} ({punto[0]},{punto[1]}): {temp:.1f} °C / Humedad: {humedad}")
69 |
70 |     plt.draw()
71 |     plt.pause(0.01)
72 | except KeyboardInterrupt:
73 |     print("Finalizando visualización")
74 |     plt.ioff()
75 |     plt.show()
76 |     plt.close(fig) # Cierra la ventana de la gráfica
77 |
78 | if __name__ == "__main__":
79 |     visualizar()

```

Figura 53. Código de cámara en Visual Code Python 3

C-A. Funcionamiento de la cámara térmica con la IA

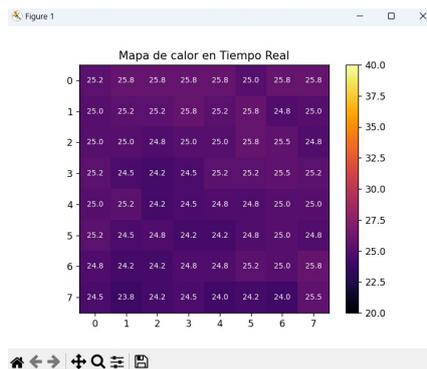


Figura 54. Mapa de calor en Tiempo Real fría

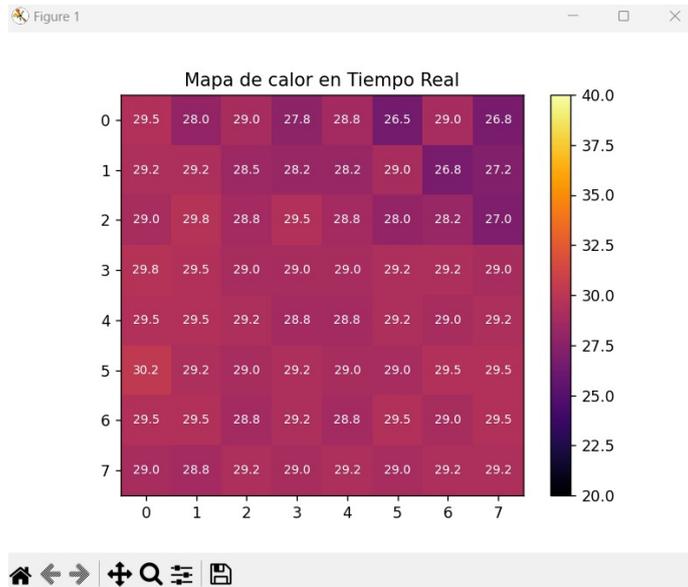


Figura 55. Mapa de Calor en Tiempo Real temperatura Tibia

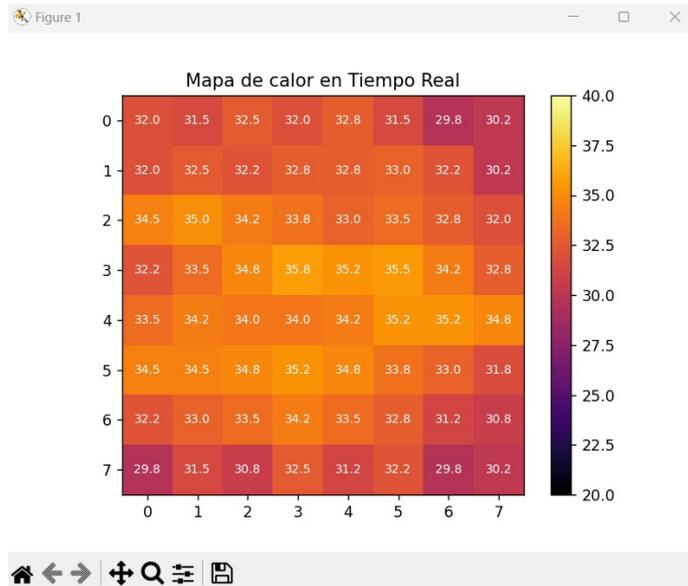


Figura 56. Mapa de calor en Tiempo Real caliente

```

1  const int ENC_A = 6;
2  const int ENC_B = 5;
3  char op = '0';
4  const int IN1 = 3;
5  const int IN2 = 2;
6  const int ENA = 9; // Cambiar a un pin PWM
7  int v = 400;
8
9  void setup() {
10   Serial.begin(9600);
11   pinMode(ENC_A, INPUT);
12   pinMode(ENC_B, INPUT);
13   pinMode(IN1, OUTPUT);
14   pinMode(IN2, OUTPUT);
15   pinMode(ENA, OUTPUT);
16   MENU();
17 }
18
19 void loop() {
20   serialEvent();
21   encoder();
22   delay(3000);
23 }
24
25 void serialEvent() {
26   if (Serial.available()) {
27     op = Serial.read();
28     while (Serial.available() > 0) {
29       Serial.read(); // Limpia buffer
30     }
31
32     switch (op) {
33       case '1':
34         digitalWrite(IN1, HIGH);
35         digitalWrite(IN2, LOW);
36         analogWrite(ENA, v);

```

Figura 57. Código motor encoder Arduino

```

36   analogWrite(ENA, v);
37   Serial.println("Estado: Giro Horario");
38   break;
39
40   case '2':
41     analogWrite(ENA, 0);
42     Serial.println("Estado: Apagado");
43     break;
44
45   case '3':
46     digitalWrite(IN1, LOW);
47     digitalWrite(IN2, HIGH);
48     analogWrite(ENA, v);
49     Serial.println("Estado: Giro Antihorario");
50     break;
51
52   case '4':
53     Serial.println("Ingrese la velocidad (0-255): ");
54     while (Serial.available() == 0) {} // Espera entrada
55     v = Serial.parseInt(); // Lee número entero
56     v = constrain(v, 0, 500); // Asegura que está en rango
57
58     Serial.print("Nueva velocidad establecida: ");
59     Serial.println(v);
60     analogWrite(ENA, v); // Aplica el cambio de velocidad inmediatamente
61     break;
62   }
63 }
64 MENU();
65 }
66

```

Figura 58. Código motor encoder Arduino 2

```

67 void encoder() {
68     int a = digitalRead(ENC_A);
69     int b = digitalRead(ENC_B);
70     Serial.print(a * 5);
71     Serial.print(" ");
72     Serial.println(b * 5);
73 }
74
75 void MENU() {
76     Serial.println();
77     Serial.println(F("MENU"));
78     Serial.println(F("Presione una opcion 1-4: "));
79     Serial.println(F("1. Giro izquierda"));
80     Serial.println(F("2. Apagar"));
81     Serial.println(F("3. Giro derecha"));
82     Serial.println(F("4. Cambiar velocidad"));
83 }

```

Figura 59. Código motor encoder Arduino 3

```

index.html x  app.py
templates > index.html > ...
1 <!DOCTYPE html>
2 <html lang="es">
3 <head>
4     <meta charset="UTF-8">
5     <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
6     <title>Análisis de Imágenes Termográficas</title>
7 </head>
8 <body>
9     font-family: Arial, sans-serif;
10    text-align: center;
11    margin: 20px;
12 }
13 .header {
14     text-align: center;
15     margin-bottom: 20px;
16 }
17 .header img {
18     width: 450px; /* Ajusta el tamaño de la imagen */
19 }
20 .header-text {
21     margin-top: 10px;
22 }
23 .container {
24     max-width: 600px;
25     margin: auto;
26 }
27 </body>
28 </html>
29 <body>
30
31 <div class="header">
32     
33     <div class="header-text">
34         <h2>SEDE GUAYAQUIL</h2>
35         <h3>CARRERA DE MECATRÓNICA</h3>
36         <h3>DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA DETECCIÓN Y SECADO DE HUMEDAD EN BOBINAS DE PAPEL</h3>
37     </div>
38 </div>

```

Figura 60. Código html

```

index.html x app.py
templates > index.html > ...
2 <html lang="es">
29 <body>
31 <div class="header">
38 </div>
39
40 <div class="container">
41 <h1>Subir Imagen Termográfica</h1>
42 <form action="/upload" method="post" enctype="multipart/form-data">
43 <input type="file" name="file" accept="image/*" required>
44 <button type="submit">Subir y Analizar</button>
45 </form>
46
47 {% if filename %}
48 <h2>Imagen Subida:</h2>
49 
50
51 {% if average_temperature is not none %}
52 <h2>Temperatura Promedio: {{ average_temperature }} °C</h2>
53 {% else %}
54 <h2>Temperatura Promedio: No disponible</h2>
55 {% endif %}
56 {% endif %}
57 </div>
58
59 </body>
60 </html>
61

```

Figura 61. Código html 2

```

index.html x app.py x
app.py > upload_image
1 from flask import Flask, render_template, request, redirect, url_for
2 import cv2
3 import numpy as np
4 import os
5
6 app = Flask(__name__)
7 app.config['UPLOAD_FOLDER'] = 'static/uploads'
8
9 # Crear la carpeta de subidas si no existe
10 if not os.path.exists(app.config['UPLOAD_FOLDER']):
11 | os.makedirs(app.config['UPLOAD_FOLDER'])
12
13 @app.route('/')
14 def index():
15 | return render_template('index.html', average_temperature=None)
16
17 @app.route('/upload', methods=['POST'])
18 def upload_image():
19 | if 'file' not in request.files:
20 | | return redirect(request.url)
21
22 | file = request.files['file']
23
24 | if file.filename == '':
25 | | return redirect(request.url)
26
27 | if file:
28 | | filepath = os.path.join(app.config['UPLOAD_FOLDER'], file.filename)
29 | | file.save(filepath)
30
31 | | # Procesar la imagen para obtener la temperatura promedio
32 | | average_temperature = analyze_temperature(filepath)
33
34 | | # Verificar en la consola si el valor se está calculando correctamente
35 | | print(f"Temperatura promedio calculada: {average_temperature} °C")
36
37 | | return render_template('index.html', filename=file.filename, average_temperature=average_temperature)
38

```

Figura 62. Código html Python

```
index.html  app.py  X  ▶  ◻  ...
app.py > upload_image
37 |         return render_template("index.html", filename=file.filename, average_temperature=average_temperature)
38 |
39 | def analyze_temperature(image_path):
40 |     # Cargar la imagen en escala de grises
41 |     image = cv2.imread(image_path, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
42 |     h, w = image.shape # Obtener dimensiones de la imagen
43 |
44 |     # Definir tres puntos en el centro de la imagen (horizontalmente)
45 |     center_y = h // 2
46 |     points_x = [w // 4, w // 2, (3 * w) // 4] # Puntos a 1/4, 1/2 y 3/4 del ancho
47 |
48 |     # Obtener los valores de intensidad en los puntos
49 |     temperatures = [image[center_y, x] for x in points_x]
50 |
51 |     # Convertir a una escala de temperatura (0 a 100 grados como ejemplo)
52 |     temperatures = [(temp / 255.0) * 100 for temp in temperatures]
53 |
54 |     # Calcular el promedio de temperatura
55 |     average_temperature = sum(temperatures) / len(temperatures)
56 |
57 |     return round(average_temperature, 2)
58 |
59 | if __name__ == '__main__':
60 |     app.run(debug=True)
61 |
```

Figura 63. Código html Python 2

