

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 1 de 11

21.1

FECHA	martes, 29 de agosto de 2023
--------------	------------------------------

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Ciudad

UNIDAD REGIONAL	Sede Fusagasugá
TIPO DE DOCUMENTO	Pasantía
FACULTAD	Ingeniería
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Electrónica

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
Erazo Gómez	Marco Aurelio	1006055493

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
Barrero Sánchez	Faider Humberto

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
 Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 2 de 11

TÍTULO DEL DOCUMENTO

Análisis y diseño de secadora de radiografías y mantenimiento de consola de energía para alivios térmicos, para International Nuclear Industry.

SUBTÍTULO

(Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

EXCLUSIVO PARA PUBLICACIÓN DESDE LA DIRECCIÓN INVESTIGACIÓN

INDICADORES	NÚMERO
ISBN	
ISSN	
ISMN	

AÑO DE EDICION DEL DOCUMENTO

25/08/2023

NÚMERO DE PÀGINAS

103

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)

ESPAÑOL	INGLÉS
1. Radiografía	Radiography
2. Secadora	Dryer
3. Térmicos	Thermal
4. Tecnología	Technology
5. Control	Control
6. Automatización	Automation

FUENTES (Todas las fuentes de su trabajo, en orden alfabético)

Adewumi Isaac Popoola, I. A. O. (2022). Design and construction of a radiographic film dryer. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 10.

Alejandro Pérez Pastor, E. al. (2013). Medida de la temperatura del aire utilizando termopares. Recuperado el 26 de enero de 2023, de Murciaeduca.es website: http://ftp.murciaeduca.es/programas_educativos/Nuevo1/LIBROETSIA/descripcin_de_la_p_rctica15.html

Anand, S. (2017, octubre 18). Radiography test (RT). Recuperado el 28 de abril de 2023, de Welding and NDT website: <https://www.weldingandndt.com/radiography-testing/>

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 3 de 11

Arévalo, M. F. (s/f). SECADO. Recuperado el 29 de abril de 2023, de Personal.us.es website: https://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec_far/secado.pdf

baños., M. A. (s/f). EL revelado radiografico. Recuperado el 2 de enero de 2023, de Webs.um.es website: https://webs.um.es/mab/miwiki/lib/exe/fetch.php?media=lectura_12.pdf

Behling, R. (s/f). serie de pasos en el procesamiento químico de la película radiográfica. Recuperado el 3 de enero de 2023, de Researchgate.net website: https://www.researchgate.net/figure/The-series-of-steps-in-the-chemical-processing-of-radiographic-film_fig42_325342963

Bismarks, J. L. (2022, abril 8). ¿Qué es un Termistor y Cómo Funciona? Recuperado el 27 de enero de 2023, de Electrónica Online website: <https://electronicaonline.net/componentes-electronicos/resistor/termistor/>

Capell, J. R. B. (2020, junio 23). ▷ Chumacera: qué es y para qué sirve [Guía completa]. Recuperado el 29 de enero de 2023, de Sadi Transmisiones S.L website: <https://saditransmisiones.com/chumacera/>

Carlos, P. (2013, marzo 27). Energía térmica Vs energía eléctrica. Recuperado el 29 de enero de 2023, de Nergiza website: <https://nergiza.com/energia-termica-vs-energia-electrica/>

Chaverri-Quirós, O., & Conejo-Solís, M. (2017). Radiografía Industrial: comparación entre el método tradicional y digital empleando rayos X. *Revista Tecnología en Marcha*, 30(3)

Cheaytani, R. (2019, enero 29). Qué correa elegir. Recuperado el 12 de enero de 2023, de Guías de compra DirectIndustry website: <https://guide.directindustry.com/es/que-correa-elegir/>

Chile, W.-M. (s/f). Construcción de una cámara de secado. Recuperado el 9 de febrero de 2023, de Woodmizer.cl website: http://www.woodmizer.cl/2017/hornossecadores/construccion_de_una_camara_de_secado.html

CLR. (2019, mayo 17). Tipos de engranajes y sus aplicaciones. Recuperado el 29 de enero de 2023, de Clr.es website: <https://clr.es/blog/es/tipos-de-engranajes-y-sus-aplicaciones/>

Dayton Electric Mfg. (s/f). Dayton® AC Axial Fans. Recuperado el 29 de abril de 2023, de Mazcr.com website: <http://mazcr.com/img/imagenes/Dayton-AC-Axial-Fans-OIPM.pdf>

De La Torre, V. L. Q. (2016). *Secador de bandejas para hierbas aromáticas dedicado a la microindustria*. Universidad técnica del norte, Ibarra-Ecuador.

Díaz, C., Gabriel, H., & Salinas, A. (s/f). OBTENCIÓN DE UNA ECUACIÓN EMPÍRICA PARA CANALES ANULARES. Recuperado el 7 de junio de 2023, de laea.org website: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/29/009/29009954.pdf>

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 4 de 11

Drying time - X-ray film processing. (s/f). Recuperado el 2 de enero de 2023, de Tpub.com website: <http://armymedical.tpub.com/MD0954/Drying-Time-X-Ray-Film-Processing-71.htm>

Efita Pratiwi Adi Anita Nur Mayani Hendri Ermawan. (2021). *Design of Radiography Film Dryer Machine Using Timer*. Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Indonesia.
Ensayos No Destructivos por radiografía digital. (2021, octubre 4). Recuperado el 21 de diciembre de 2022, de SCI website: <https://scisa.es/radiografia-industrial-digital/>

Estudio de la rueda dentada. (s/f). Recuperado el 8 de enero de 2023, de Mec.es website: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/operadores/ope_ruedentada.htm

García, A. A. (s/f). Película Radiográfica. Recuperado el 2 de enero de 2023, de Blogspot.com website: <https://rayos2013.blogspot.com/2013/05/obtencion-de-la-pelicula-radiografica.html>

García Pereira, A., Muñiz Becerá, S., Hernández Gómez, A., González, L. M., & Fernández Valdés, D. (2013). Análisis comparativo de la cinética de deshidratación Osmótica y por Flujo de Aire Caliente de la Piña (Ananas Comosus, variedad Cayena lisa). *Revista ciencias técnicas agropecuarias*, 22(1), 62–69. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542013000100011

General Electric Company. (s/f). Structurix Dryer. Recuperado el 4 de enero de 2023, de Ndtsupply.com website: <https://content.ndtsupply.com/assets/Uploads/structurix-dryer.pdf?clientId=1047446527.1672864284>

Global, A. L. (2020, mayo 18). Tipos de Ventiladores - clasificacion. Recuperado el 27 de enero de 2023, de Aire Limpio Global website: <https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>

Gómez, E. (2018, julio 19). Cómo conectar una PT100 ¿Qué es una RTD? Recuperado el 7 de junio de 2023, de Rincón Ingenieril website: <https://www.rinconingenieril.es/como-conectar-una-pt100/>

González, L. Á. (2012, invierno 8). La película radiográfica, pantalla de refuerzo y chasis radiográfico. Recuperado el 2 de enero de 2023, de librossanitarios.com website: <https://librossanitarios.files.wordpress.com/2012/12/la-pelc3adcula-radiogrc3a1fica-pantalla-de-refuerzo-y-chasis-radiogrc3a1fico.pdf>

Hewitt, D. (2012, mayo 25). Ventajas y desventajas de usar termopares. Recuperado el 26 de enero de 2023, de Geniolandia website: <https://www.geniolandia.com/13153522/como-probar-una-termocupla>

Hurtado, Q. (2021a, abril 26). Tipos de chumaceras y Aplicaciones. Recuperado el 29 de enero de 2023, de Lodacenter website: <https://www.quinterohurtado.com/post/tipos-de-chumaceras-y-aplicaciones>

Industry, M. (2022, noviembre 5). Centrifugal Fans Vs Axial Fans: How to Choose? Recuperado el 28 de enero de 2023, de Cooling Fan Manufacturer website: <https://coolingfans.net/centrifugal-fans-vs-axial-fans/>

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 5 de 11

Ingemecanica.com. (s/f). Correas de transmisión, Calculo y diseño. Recuperado el 13 de enero de 2023, de Ingemecanica.com website: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>

Instrumentación y equipos en Diagnostico por Imágenes, & Perfil, V. T. mi. (s/f). Instrumentacion. Recuperado el 2 de enero de 2023, de Blogspot.com website: <http://enmiradiologia.blogspot.com/2016/12/la-pelicula-radiografica.html>

Leister. (s/f). Procesos de secado con sopladores de aire caliente y calentadores infrarrojos. Recuperado el 2 de enero de 2023, de LeisterTechnologies website: <https://www.leister.com/es/Solutions/Applications/Drying-Process>

LogicBus. (s/f). Sensores de Temperatura Resistiva RTD - Tipos y Funcionamiento. Recuperado el 28 de enero de 2023, de Logicbus.com website: <https://www.logicbus.com.mx/sensor-temperatura-RTD.php>

Luchetti, S. (2021, junio 1). Sistema embebido y sus características. Recuperado el 22 de diciembre de 2022, de Tribalyte Technologies website: <https://tech.tribalyte.eu/blog-sistema-embebido-caracteristicas>

Mathas, C. (2011 10). Conceptos Básicos sobre sensores de temperatura. Recuperado el 26 de enero de 2023, de Digikey.com website: [https://www.digikey.com/es/articles/temperature-sensors-the-basics#:~:text=Son%20sensores%20RTD%20\(detector%20de,son%20estables%20a%20largo%20plazo.](https://www.digikey.com/es/articles/temperature-sensors-the-basics#:~:text=Son%20sensores%20RTD%20(detector%20de,son%20estables%20a%20largo%20plazo.)

Mecanismos y sistemas mecánicos. (2013, enero 31). Cadenas y correas dentadas. Recuperado el 29 de enero de 2023, de Mecanismos y sistemas mecánicos website: <https://tecnovehio.wordpress.com/mecanismos-de-transmision-del-movimiento/mecanismos-de-transmision-circular/cadenas-y-correas-dentadas/>

Nikolova, S., Toneva, D., Georgiev, I., Dandov, A., & Lazarov, N. (2018). Morphometric analysis of the frontal sinus: application of industrial digital radiography and virtual endocast. *Journal of Forensic Radiology and Imaging*, 12, 31–39. Recuperado de <http://epa.gov/radtown/industrial-radiography>

Oficina Técnica de Autoridad Nacional. (2009). REQUISITOS DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA EN RADIOGRAFIA INDUSTRIAL. Recuperado el 29 de enero de 2023, de Foroiberam.org website: <https://www.foroiberam.org/documents/193375/199992/REQUISITOS+DE+SEGURIDAD+RADIOL%C3%93GICA+EN+RADIOGRAF%C3%8DA+INDUSTRIAL/d76ee5e7-70f1-4cc6-98ff-1e3a189bb93d;jsessionid=6386D67BE00618BBFB881152B1056D5E?version=1.0>

Omega. (s/f). ¿Qué es un termistor? Recuperado el 27 de enero de 2023, de Omega.com website: <https://es.omega.com/prodinfo/termistores.html>

Popoola, A. I., & Olumodeji, I. A. (2022). Design and construction of a radiographic film dryer. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 15(2), 352–361. doi:10.30574/wjarr.2022.15.2.0798

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 6 de 11

PR Electronics. (2022, marzo 14). Los fundamentos de los sensores de temperatura RTD. Recuperado el 27 de enero de 2023, de Prelectronics.com website: <https://www.prelectronics.com/es/los-fundamentos-de-los-sensores-de-temperatura-rtd/>

iaea. (2018, abril 6). Radiografía industrial. Recuperado el 21 de diciembre de 2022, de laea.org website: <https://www.iaea.org/es/temas/radiografia-industrial>

Rasool Sadin, Gholam, Reza Chegini and Mehdi Khodadadi. (2014). *Development and Performance Evaluation of a Combined Infrared and Hot Air Dryer*. 10.

Reyes, J. S. N. (s/f). Elementos mecanicos volumen v. Recuperado el 29 de enero de 2023, de Slideshare.net website: <https://es.slideshare.net/JonathanSteveNezReye/elementos-mecanicos-volumen-v>

Ryan Smoot, Technical Support Engineer, CUI Devices. (2022, marzo 28). Comparación de ventiladores axiales y centrífugos. Recuperado el 28 de enero de 2023, de Digikey.es website: <https://www.digikey.es/es/articles/comparing-axial-fans-and-centrifugal-fans>

Sahagun, S. (2021, marzo 23). ¿Qué es un Termopar? Recuperado el 26 de enero de 2023, de Blog Logicbus website: <https://www.logicbus.com.mx/blog/que-es-un-termopar/>

Saldias, A. (2016, marzo 1). ▷¿Qué es un Sensor PT100? RTD para todo tipo de aplicaciones. Recuperado el 27 de enero de 2023, de SRC Sistemas de Regulación y Control website: <https://srcls.com/que-es-un-sensor-pt100/>

Saldias, A. (2018, noviembre 13). ▷ Tipos de SENSORES de Temperatura y sus diferencias. Recuperado el 27 de enero de 2023, de SRC Sistemas de Regulación y Control website: <https://srcls.com/tipos-sensores-temperatura/>

Sergio, C. (2020, junio 29). El control PID es el compensador más popular empleado en la mayoría Read more. Recuperado el 28 de enero de 2023, de Control Automático Educación website: <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/control-pid-de-temperatura-con-arduino/>

Slicetex. (s/f). Controlador PID del PLC. Recuperado el 25 de enero de 2023, de Slicetex.com website: <http://www.slicetex.com.ar/docs/an/an033/index.php>

S&P. (2017, abril 21). Ventiladores centrífugos: tipos y características. Recuperado el 28 de enero de 2023, de S&P BLOG DE VENTILACION EFICIENTE website: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventiladores-centrifugos/>

Tope, R. (s/f-a). Resistencias con aletas aluminizadas. Recuperado el 29 de abril de 2023, de Resistenciastope.com website: <https://www.resistenciastope.com/es/11-resistencias-aire/19-resistencias-con-aletas-aluminizadas/>

Tope, R. (s/f-b). Resistencias para el calentamiento de aire o gas. Recuperado el 29 de enero de 2023, de Resistenciastope.com website: <https://www.resistenciastope.com/es/listado-productos/11-resistencias-aire/>

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 7 de 11

Translink. (s/f). Sprockets. Recuperado el 29 de abril de 2023, de Translinkpt.com website: https://www.translinkpt.com/wp-content/uploads/2018/02/catalogo_pinones.pdf

Universidad de las Américas Puebla. (s/f). Proceso de secado. Recuperado el 21 de diciembre de 2022, de Udlap.mx website: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/capitulo5.pdf

Universidad nacional de colombia. (2013). PROTOCOLO GARANTIA DE LA CALIDAD DE LA IMAGEN RADIOGRAFICA. Recuperado el 29 de enero de 2023, de odontologia.unal.edu.co/docs website: http://www.odontologia.unal.edu.co/docs/habilitacion/prot_garantia_calidad_imagen_abril_2013.pdf

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS

(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

El documento que se evidencia a continuación muestra el proceso realizado en modalidad de pasantía en la empresa International Nuclear Industry S.A.S. El objetivo principal de este proceso fue el diseño de una secadora de radiografías industrial para agilizar el proceso de secado en casos donde el proceso de revelado radiográfico se realiza de forma manual, en el documento se evidencian cada una de las etapas del diseño, que dio como resultado un prototipo simulado desde una perspectiva electrónica y estructural de una secadora de radiografías industriales.

Por otra parte, se realizaron actividades complementarias durante el proceso de la pasantía, donde se realizó el mantenimiento a dos consolas de alivios térmicos. Para lograrlo, fue necesario indagar acerca de su funcionamiento y realizar un diagnóstico del estado inicial de la consola para finalmente realizar el correspondiente mantenimiento.

Abstract

The document shown below shows the process carried out as an internship in the company International Nuclear Industry S.A.S. The main objective of this process was the design of an industrial radiography dryer to speed up the drying process in cases where the radiographic development process is carried out manually, the document shows each of the design stages, which gave As a result, a simulated prototype from an electronic and structural perspective of an industrial radiography dryer.

On the other hand, complementary activities were carried out during the internship process, where maintenance was carried out on two thermal relief consoles. To achieve this, it was necessary to inquire about its operation and carry out a diagnosis of the initial state of the console to finally carry out the corresponding maintenance.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 8 de 11

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X	
2. La comunicación pública, masiva por cualquier procedimiento o medio físico, electrónico y digital.	X	
3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos;

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 9 de 11

ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado.

SI ___ NO x.

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos) en carta adjunta, expedida por la entidad respectiva, la cual informa sobre tal situación, lo anterior con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca

Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414

www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co

NIT: 890.680.062-2

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 10 de 11

Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el "Manual del Repositorio Institucional AAAM003"

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.



Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca

Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414

www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co

NIT: 890.680.062-2

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 6
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2021-09-14
		PAGINA: 11 de 11

j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. Nombre completo del proyecto.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, vídeo, etc.)
1. Análisis y diseño de secadora de radiografías y mantenimiento de consola de energía para alivios térmicos, para International Nuclear Industry.	- TEXTO E IMÁGENES

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafo)
Erazo Gómez Marco Aurelio	

21.1-51-20.

Análisis y diseño de secadora de radiografías y mantenimiento de consola de energía para alivios térmicos, para International Nuclear Industry.

Autor: Marco Aurelio Erazo Gómez.

Universidad de Cundinamarca

Facultad de ingeniería

Ingeniería electrónica

Fusagasugá, Colombia

2023

Análisis y diseño de secadora de radiografías y mantenimiento de consola de energía para alivios térmicos , para International Nuclear Industry.

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de ingeniero electrónico

Autor: Marco Aurelio Erazo Gómez

Director: Faider Humberto Barrero Sánchez

Universidad de Cundinamarca
Facultad de ingeniería
Ingeniería electrónica
Fusagasugá, Colombia
2023

Abstract

The project shown below shows the process carried out as an internship in the company International Nuclear Industry S.A.S. The main objective of this project was the design of an industrial radiography dryer to speed up the drying process in cases where the radiographic development process is carried out manually. For development purposes, firstly, a literature review was conducted to understand fundamental concepts involved in radiographic drying, such as the use and importance of industrial radiography and the stages of radiographic processing. In addition, the analysis of a variety of projects related to the development of radiographic dryers was made, which allowed broadening the perspective regarding the methodology to be followed for the design that was intended to be carried out. One of these projects was carried out by students from Jenderal Soerdiman University, who carried out the design of a radiographic film drying machine using a timer.

The next stage consisted of analyzing various references of radiography dryers available on the market to identify the systems, mechanisms and materials used in this type of device. Taking these factors into account, the requirements and subsystems to be incorporated into the prototype to be designed were selected. Step followed, the design process was carried out to provide a solution to each of the requirements raised and achieve a good operation of the machine. Throughout the design process, a 3D model was simultaneously developed in Tinkercad of the prototype with the mechanisms and materials incorporated, thus achieving a more precise and clear dimensioning of the characteristics selected for the prototype.

Once the prototype was designed with the necessary materials and devices for its operation, the simulated schematic circuit of the X-ray dryer was made. With this, it was possible to analyze the global operation of the designed system, from an electronic perspective and make the last necessary adjustments to obtain as a result a functional simulated prototype of an industrial radiography dryer.

On the other hand, complementary activities were carried out during the internship process, where maintenance was carried out on two thermal relief consoles. To achieve this, it was necessary to inquire about its operation and carry out a diagnosis of the initial state of the console to finally carry out the corresponding maintenance.

Resumen

El proyecto que se evidencia a continuación muestra el proceso realizado en modalidad de pasantía en la empresa International Nuclear Industry S.A.S. El objetivo principal de este proyecto fue el diseño de una secadora de radiografías industrial para agilizar el proceso de secado en casos donde el proceso de revelado radiográfico se realiza de forma manual. Para fines de desarrollo, en primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica para comprender conceptos fundamentales implicados en el secado radiográfico, como el uso e importancia de la radiografía industrial y las etapas del procesamiento radiográfico. Además, se hizo el análisis de una variedad de proyectos relacionados con el desarrollo de secadoras radiográficas, que permitieron ampliar la perspectiva con respecto a la metodología a seguir para el diseño que se pretendía realizar. Uno de estos proyectos fue el realizado por estudiantes de la Universidad Jeneral Soerdiman, quienes llevaron a cabo el diseño de una máquina secadora de película radiográfica usando un temporizador.

La siguiente etapa consistió en analizar diversas referencias de secadoras de radiografías disponibles en el mercado para identificar los sistemas, mecanismos y materiales utilizados en este tipo de dispositivos. Teniendo en cuenta estos factores, se seleccionaron los requerimientos y subsistemas a incorporar en el prototipo a diseñar. Paso seguido, se realizó el proceso de diseño para dar solución a cada uno de los requerimientos planteados y lograr un buen funcionamiento de la máquina. A lo largo del proceso de diseño, se desarrolló simultáneamente un modelo 3D en Tinkercad del prototipo con los mecanismos y materiales incorporados, logrando así tener un dimensionamiento más preciso y claro de las características seleccionadas para el prototipo.

Una vez diseñado el prototipo con los materiales y dispositivos necesarios para su funcionamiento, se realizó el circuito esquemático simulado de la secadora de radiografías. Con ello, se logró analizar el funcionamiento global del sistema diseñado, desde una perspectiva electrónica y realizar los últimos ajustes necesarios para obtener como resultado un prototipo simulado funcional de una secadora de radiografías industriales.

Por otra parte, se realizaron actividades complementarias durante el proceso de la pasantía, donde se realizó el mantenimiento a dos consolas de alivios térmicos. Para lograrlo, fue necesario indagar acerca de su funcionamiento y realizar un diagnóstico del estado inicial de la consola para finalmente realizar el correspondiente mantenimiento.

Contenido

Abstract	3
Resumen	4
1. Capítulo 1. Contexto	12
2. Capítulo 2. Actividades	13
2.1. Actividades principales.....	13
2.2. Subactividades	13
3. Capítulo 3. Marco de referencia.....	14
3.1 Antecedentes	14
3.2. Fundamentos teóricos	17
3.2.1. Procesamiento radiográfico	17
3.2.2. Película radiográfica.....	18
3.2.3. Calidad radiográfica	20
3.2.4. Secado.....	20
3.2.5. Sistema embebido	20
3.3. Marco legal.....	21
4. Capítulo 4. Plan de trabajo	23
4.1. Recopilación de información relacionada con el funcionamiento y características de las secadoras de películas radiográficas.	23
4.2. Elaboración de marco referencial de sistema de secado de películas radiográficas.....	23
4.2.1. Partes y métodos.....	23
4.2.2. TECNOLOGIAS DE SECADO	25
4.2.3. Desafíos del secado de radiografías	26
4.3. Análisis de las secadoras de radiografías en el mercado.	27
4.3.1. Gabinete de secado de películas radiográficas CCX-YJII.....	28
4.3.2. Cabina de secado de películas radiográficas SHSR-1	28
4.3.3. Secadora Structurix.....	29
4.4. Determinación de los requerimientos y subsistemas a incorporar en el prototipo diseñado.....	30
4.5. Solución a los requerimientos de diseño.	33
4.5.1. Sistema de transporte de la película radiográfica.....	33
4.5.2. Sistema de control de temperatura	46

4.5.3.	Cámara de secado	56
4.5.4.	Interfaz de usuario (UI)	61
4.5.5.	Sistema de control	66
4.6.	Mantenimiento a consolas de alivios térmicos para el área de producción de International Nuclear Industry	69
4.6.1.	Marco referencial de consolas de alivios térmicos	69
4.6.2.	Mantenimiento a los equipos de alivios térmicos	70
5.	Capítulo 5. Análisis de resultados	74
6.	Conclusiones	84
7.	Referencias	85
	Apéndice 1: Código de control de procesos en prototipo de secadora de radiografías industriales	91
	Apéndice 2: Aspectos de la simulación.....	91
A.2.1.	Justificación del uso de arduino uno como microcontrolador para la simulación en proteus	91
A.2.2.	Justificación del uso del driver L298N y sensores TCRT-5000 para la simulación del sistema de transporte en proteus	92
A.2.3.	Simulación del control de temperatura PID en proteus.	92

Índice de figuras

Figura 1. Proceso de obtención de imagen radiográfica utilizando la película radiográfica convencional. (Fuente: [4], traducida al español)	15
Figura 2. Reacción química en el proceso de revelado (Fuente: [10].).....	18
Figura 3. Ilustración de las etapas del procesamiento radiográfico (Fuente: [12].)	18
Figura 4. Estructura de la película radiográfica con doble capa de emulsión vs película monocapa. (Fuente: Elaboración propia.)	19
Figura 5. Ilustración de la cámara de secado de películas radiográficas (Fuente: elaboración propia)	24
Figura 6. Estructura de gabinete de secado de películas radiográficas CCX-YJII (Fuente: [20].)	28
Figura 7. Estructura de la cabina de secado de películas radiográficas SHSR-1 (Fuente: [21].)	29
Figura 8. Estructura de secador structurix (Fuente: [23].)	29
Figura 9. a) Eje giratorio de hierro. b) Eje giratorio con cilindro incorporado. C) Chumacera cuadrada.....	34
Figura 10. Dimensiones de las chumaceras de pared con montaje horizontal para eje de 8mm	35
Figura 11. Estructura y partes de un piñón con chaveta (Fuente: [24], resolución mejorada.)	36
Figura 12. Estructura y dimensiones del piñón seleccionado (Fuente: [25], resolución mejorada)	36
Figura 13. Distribución de tensiones en correas dentadas. (Fuente: [26].).....	38
Figura 14. Tensor de cadena de impresora 3d (Fuente: [27]).	39
Figura 15. Masa con las fuerzas aplicadas. (Fuente: elaboración propia.)	42
Figura 16. Motor CARDONE 47-4528. (Fuente: [28]).....	43
Figura 17. Diagrama de bloques del sistema de transporte radiográfico. (Fuente: elaboración propia.)	44
Figura 18. Modelo en Tinkercad del sistema diseñado para el transporte de la película radiográfica con sus partes (Fuente: elaboración propia).....	45
Figura 19. Vista de diferentes perspectivas del modelo en Tinkercad del sistema diseñado para el transporte de la película radiográfica (Fuente: elaboración propia)	46
Figura 20. Sistema de control PID (Fuente: Elaboración propia.).....	47
Figura 21. Sensor de temperatura PT100 (Fuente: [30].).....	49
Figura 22. Resistencia calefactora tubular aleteada (Fuente: [32].).....	51

Figura 23. Modelos 3D diseñados en Tinkercad a) Batería de resistencias calefactoras. b) Resistencias calefactoras aleteadas (Fuente: elaboración propia.).....	53
Figura 24. Relé de estado sólido Fotek SSR-25DA. (Fuente: [65])	54
Figura 25. Diagrama de bloques del control de temperatura del aire. (Fuente: elaboración propia.)	55
Figura 26. Modelo en Tinkercad del control de temperatura seleccionado para el prototipo. (Fuente: elaboración propia.)	55
Figura 27. Vista desde diferentes perspectivas del modelo del prototipo con control de temperatura. a) Vista superior, b) Vista frontal, c) Vista posterior. (Fuente: elaboración propia).	56
Figura 28. Modelo del prototipo con soportes para la cámara de secado (fuente: elaboración propia.)	57
Figura 29. Soportes diseñados para diferentes dispositivos de la secadora: a) Soporte para las chumaceras del sistema de transporte. b) Soporte para chumaceras del sistema de transporte con compartimiento para sensor de temperatura PT 100. c) Soporte para el tensor de correa. D) Soporte para el motor DC del sistema de transporte. e) Soporte para la resistencia calefactora. (Fuente: elaboración propia.)	58
Figura 30. Partes de la estructura externa de la Cámara de secado. a) Tapa lateral izquierda. b) Tapa lateral derecha. c) Lamina inferior. D) Tapa superior.	59
Figura 31. Prototipo con Cámara de secado incorporada. a) Sin tapa superior. b) Con tapa superior. (Fuente: elaboración propia.)	60
Figura 32. Vista desde diferentes perspectivas del prototipo con la Cámara de secado incorporada. a) Vista lateral izquierda. b) Vista lateral derecha. c) Vista frontal. d) Vista trasera. (Fuente: elaboración propia.	60
Figura 33. Display LCD 16X2 con módulo I2C (fuente: [35]).	62
Figura 34. a) Interruptor basculante KCD-101. b) Pulsador pbs-11b. (Fuentes: [36] y [37].) .	63
Figura 35. Diagrama de flujo del funcionamiento de la interfaz de usuario (UI). (Fuente: elaboración propia.)	64
Figura 36. Dispositivos de la interfaz de usuario diseñados en Tinkercad. (fuente: elaboración propia.)	65
Figura 37. Prototipo de la secadora radiográfica con interfaz de usuario incorporada (Fuente: elaboración propia.)	65
Figura 38. Microcontrolador ESP32 (Fuente: [38].)	69
Figura 39. Plan de mantenimiento. (Fuente: elaboración propia.)	71
Figura 40. Imagen de valoración de consola de consola de alivios térmicos.....	72
Figura 41. Limpieza de consolas de alivios térmicos.....	72
Figura 42. Antes y después, ajuste de las consolas. (Fuente: elaboración propia.)	73

Figura 43. Tapas del chasis antes y después del mantenimiento. (Fuente: elaboración propia.)	73
Figura 44. Diagrama de flujo del funcionamiento de la secadora en un ciclo de secado. (Fuente: elaboración propia.)	74
Figura 45. Simulación de secadora Radiográfica realizada en proteus. (Fuente: elaboración propia.)	75
Figura 46. Vista externa del diseño tridimensional de la secadora de radiografías. (fuente: elaboración propia.)	77
Figura 47. Vista interna del diseño tridimensional de la secadora de radiografías. (Fuente: elaboración propia.)	78
Figura 48. Circuito de acondicionamiento de la señal para la lectura del sensor PT-100 realizado en Proteus. (Fuente elaboración propia).....	95
Figura 49. Lectura de dos sensores PT100 con Arduino uno en proteus. (Fuente: elaboración propia).	96
Figura 50. Configuración del calentador en proteus. (Fuente: elaboración propia).....	101
Figura 51. Curva de calentamiento de la planta con una estimulación de 22 V rms.....	101
Figura 52. Ajuste de las ganancias del control PID a través de “PID Turner” de Matlab. (fuente: elaboración propia).	102
Figura 53. Control PID de temperatura simulado en Proteus. (Fuente: elaboración propia.)	103
Figura 54. Control PID de temperatura con setpoint de 220°C simulado en Proteus. (Fuente: elaboración propia.)	103

Índice de tablas

Tabla 1. Ficha técnica de gabinete de secado CCX-YJII	28
Tabla 2. Especificaciones técnicas de secador Structurix.	29
Tabla 3. Requerimiento N.º 1 del prototipo	30
Tabla 4. Requerimiento N.º2 del prototipo.	31
Tabla 5. Requerimiento N.º 3 del prototipo	31
Tabla 6. Requerimiento N.º4 del prototipo	32
Tabla 7. Requerimiento N.º5 del prototipo	32
Tabla 8. Especificaciones del Piñón seleccionado.	36
Tabla 9. Dimensiones para correas síncronas de perfil curvilíneo HTD	38
Tabla 10. Requerimientos técnicos para la elección del sensor de presencia	39
Tabla 11. Comparación de sensores de presencia presentes en el mercado – parte 1.....	40
Tabla 12. Comparación de sensores de presencia presentes en el mercado – parte 2.....	40
Tabla 13. Especificaciones técnicas del motor CARDONE 47-4528	44
Tabla 14. Especificaciones técnicas del Driver BTS7960.....	44
Tabla 15. Materiales y dispositivos seleccionados para en el sistema de transporte.....	45
Tabla 16. Requerimientos técnicos para la elección del sensor de temperatura	48
Tabla 17. Comparación de tipologías de sensores de temperatura.....	48
Tabla 18. Especificaciones den sensor de temperatura PT-100 seleccionado.....	49
Tabla 19. Comparación entre el ventilador axial y el ventilador centrifugo.	50
Tabla 20. Especificaciones del ventilador Dayton 4WT42	51
Tabla 21. Especificaciones del ventilador axial CNDF TFS1202512H	53
Tabla 22. Especificaciones del módulo Relé de estado sólido seleccionado.....	54
Tabla 23. Dispositivos y materiales seleccionados para el control de temperatura	54
Tabla 24. Piezas seleccionadas para la cámara de secado.	60
Tabla 25. Materiales y dispositivos seleccionados para la interfaz de usuario (UI)	66
Tabla 26. Cantidad de pines requeridos para la selección del microcontrolador.	67
Tabla 27. Comparativa de microcontroladores.....	68
Tabla 28. Ficha técnica de consola de energía 6WPCR/A.....	70
Tabla 29. Elementos requeridos para el mantenimiento técnico de la consola de alivios térmicos.	73
Tabla 30. Análisis de los subsistemas elaborados	78

Tabla 31. Evaluación de costos.	81
Tabla 32. Comparación de los pines del driver L298N y el BTS7960.....	92
Tabla 33. Valor de resistencia del sensor PT100 en un rango de 0°C a 99°C.....	93

1. Capítulo 1. Contexto

El presente documento tiene como objetivo mostrar el conocimiento científico adquirido, las problemáticas encontradas y las actividades desarrolladas en la empresa International Nuclear Industry S.A.S durante el desarrollo de la pasantía. El objetivo social de esta empresa es principalmente la calibración y mantenimiento de equipos detectores de radiación, transporte de material radioactivo, y desarrollo de proyectos estratégicos que implementan el campo de la ingeniería. Durante la pasantía, se abordaron dos objetivos principales: el diseño de una secadora de radiografías industriales y el mantenimiento de dos consolas de energía para alivios térmicos de soldadura industrial.

La radiografía industrial, es una técnica que permite a través de las imágenes generadas determinar posibles grietas o defectos en componentes industriales, esta herramienta tiene un amplio uso en diversos sectores industriales, como la petroquímica, nuclear, militar, aeroespacial y fundición, entre otros. Para realizar el análisis de la imagen radiográfica en una muestra, es necesario que esta tenga previamente un procesamiento, que consiste básicamente en cuatro etapas: revelado, fijado, lavado y secado. Este proceso cuando se realiza de forma manual puede tardar un tiempo extenso, teniendo en cuenta que el secado convencional (a temperatura ambiente) puede tardar alrededor de 20 a 30 minutos. Por esta razón, se diseñó una secadora de radiografías que permitirá agilizar el procesado de muestras radiográficas industriales en laboratorios de ensayos no destructivos (END) donde el procesamiento radiográfico se realiza de forma manual.

Por otra parte, la soldadura es un proceso de fabricación en el cual se unen dos materiales distintos, normalmente metales, derriéndolos y agregando un material de relleno derretido, el cual posee un punto de fusión menor al de la pieza a soldar [1]. Las condiciones de calentamiento y enfriamiento durante el proceso de soldadura determinan las propiedades de la aleación resultante, entre estas la resistencia a la tracción, dureza y ductilidad. El uso de alivios térmicos se debe a la necesidad de resistir la fractura frágil de la aleación durante y después del proceso de soldadura. Estas propiedades deseadas se logran mediante el calentamiento posterior a la aleación con el fin de reducir las tensiones residuales en los materiales, estas tensiones pueden no agrietar la pieza de inmediato, pero reducen significativamente la vida de la estructura o componente soldado, teniendo en cuenta esta información se evidencia la importancia de que los dispositivos utilizados para el tratamiento térmico estén en buenas condiciones para su uso, en este caso se realizó un mantenimiento a dos consolas de alivios térmicos para soldadura industrial.

2. Capítulo 2. Actividades

2.1. Actividades principales

- Diseño de secadora de radiografías industriales para International Nuclear Industry S.A.S.
- Mantenimiento a equipos de alivios térmicos para el área de producción de International Nuclear Industry S.A.S.

2.2. Subactividades

- Recopilación de información del funcionamiento y características de las secadoras de radiografías industriales.
- Determinación de los requerimientos y subsistemas a incorporar en el prototipo diseñado.
- Selección de materiales y dispositivos a utilizar en cada uno de los subsistemas incorporados en el prototipo diseñado.
- Diseño esquemático de la secadora de radiografías,
- Simulación del prototipo diseñado.
- Recopilación de información del funcionamiento y características de los alivios térmicos, con un enfoque en la consola de energía.
- Evaluación del estado de las consolas de tratamiento térmico que requieren el mantenimiento.
- Análisis de soluciones tecnológicas viables de acuerdo con los requerimientos de mantenimiento.

3. Capítulo 3. Marco de referencia

Para desarrollar las actividades propuestas en el presente proyecto es necesario comprender los procesos relacionados y el funcionamiento de las secadoras de radiografías industriales, así como la metodología y características para la elaboración de proyectos de esta índole. En esta sección se analizaron algunos proyectos de investigación y artículos científicos importantes para la comprensión y enfoque correcto de la investigación realizada durante el desarrollo del proyecto. Entre los temas analizados se incluyen la definición de la radiografía industrial, el funcionamiento de secadoras de radiografía industrial, metodologías de diseño para dispositivos de secado, dispositivos y mecanismos necesarios para el correcto funcionamiento de las secadoras de radiografía industrial, tecnologías empleadas en las secadoras disponibles en el mercado, así como la normatividad legal que relacionada con este tipo de dispositivos.

3.1 Antecedentes

Según el organismo internacional de energía atómica (IAEA), la radiografía industrial es un método que permite analizar diversos materiales con la finalidad de detectar defectos no visibles en componentes industriales, de esta forma se realiza un control de calidad de las piezas internas de un dispositivo industrial sin la necesidad de destaparlo o dañarlo, esta técnica puede ser muy útil en casos donde no es viable o es difícil acceder al material que se desea inspeccionar [1]. Este tipo de ensayo no destructivo (END), basa su funcionamiento en la capacidad de los rayos X y los rayos gamma de penetrar distintos materiales [2], el proceso consiste en apuntar un haz de rayos X o rayos gamma al dispositivo o pieza a inspeccionar, los rayos que atraviesan el material son registrados en una película radiográfica, la cual está elaborada con una lámina poliéster(acetato) y recubierta por una delgada capa de emulsión fotosensible que interacciona con los rayos X que atraviesan el dispositivo analizado [3], en función de su material, espesor y de las posibles discontinuidades internas que pueda llegar a tener, en la Figura 1. se evidencia una gráfica alusiva al proceso de obtención de una radiografía usando rayos-X. Después de un procesamiento químico de la película radiográfica, se obtiene una imagen en escala de grises la estructura inspeccionada lo que permite el control de calidad de las piezas o dispositivos industriales. Con la evolución tecnológica, se ha implementado la técnica de captación de imágenes radiográficas digitales, que permite una mejor definición de la imagen obtenida sin necesidad del proceso químico de revelado de la radiografía convencional, sin embargo, en este caso el enfoque de la investigación será hacia la radiografía convencional, ya que el dispositivo a diseñar (secadora de radiografía) permite agilizar la etapa de secado en el procesamiento de la película radiográfica convencional.

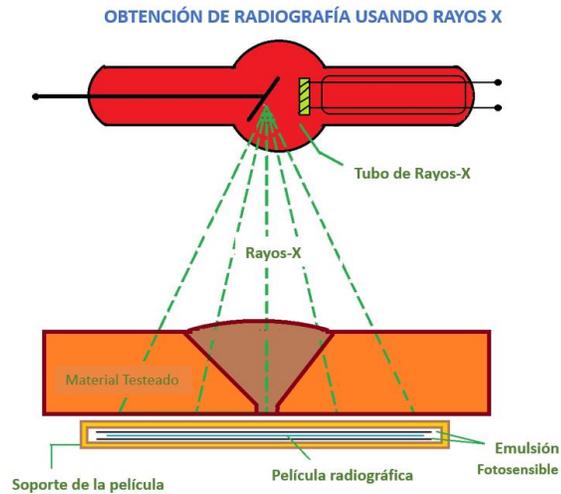


Figura 1. Proceso de obtención de imagen radiográfica utilizando la película radiográfica convencional.
(Fuente: [4], traducida al español)

Los fabricantes suelen utilizar este tipo de prueba para asegurarse de que sus productos estén en buen estado antes de ponerse en venta, además la radiografía industrial puede ser utilizada para el diagnóstico de hormigón y una gran variedad de soldaduras, como las de gasoductos o tuberías de agua, partes y piezas de vehículos o aviones, control de calidad de instalaciones nucleares y otras instalaciones industriales [1].

Diseño de máquina secadora de película de radiografía usando Temporizador

Este proyecto de la Facultad de Física de la Universidad Jenderal Soerdiman de Indonesia permitió conocer en detalle cada una de las etapas del procesamiento de películas radiográficas para obtener una imagen visible: revelado, enjuague, fijación, lavado y secado. Se identificaron los requisitos esenciales para el funcionamiento de una secadora de radiografías, como la cámara de secado, el control de temperatura, la fuente de calor y los conductos de evacuación del aire procesado. El diseño llevado a cabo en este proyecto obtuvo buenos resultados, logrando secar 2 películas radiográficas en 27 minutos. Además, sus autores llevaron a cabo una encuesta a profesionales del campo de la radiología, con respecto a diferentes aspectos de la secadora diseñada, la cual dio como resultado que el 100% de los encuestados calificó como muy buena la facilidad de operación de la secadora, el 74 % calificó la apariencia de la secadora como muy buena, y el 100% de los encuestados calificó como muy buena la calidad radiográfica de la película posteriormente a su secado, con lo cual se puede concluir que el proyecto cumplió con los objetivos de diseño, lo que amplió la perspectiva en cuanto a las posibles metodologías para controlar el tiempo de procesamiento y la temperatura, así como la interfaz de usuario a desarrollar [5].

Diseño y construcción de un secador de películas radiográficas

Este proyecto realizado por el Departamento de Física y la Facultad de Ciencias de la Universidad Federal de tecnología Akure, consiste en diseñar y construir una secadora de radiografías para los procesos de diagnóstico hospitalario. Según los autores, muchas instituciones médicas de Nigeria emplean el método de secado al aire libre para secar las radiografías el cual es un proceso lento e impredecible, debido a que depende de los factores climáticos. Esta es una problemática que retrasa los diagnósticos y puede llegar a ser mortal en casos de emergencia, por lo tanto, el objetivo de la investigación y diseño expuesto en este proyecto está enfocado en abordar esta problemática por medio del diseño de dicha secadora.

Este proyecto señala cada una de las partes empleadas en su diseño, entre las cuales se evidencia una pantalla LCD, un sensor de temperatura y humedad, un ventilador de succión, un calentador, y un microcontrolador ATmega 328p. Esta información es beneficiosa, dado que proporciona una idea de los posibles dispositivos a utilizar, así como de los procesos esenciales para el funcionamiento de la secadora a diseñar. En cuanto a su temperatura de secado, esta secadora tiene un rango de funcionamiento que va desde los 30°C a los 55°C, y logra secar 5 radiografías en 5,1 minutos [13].

Caso de estudio secador de bandejas para hierbas aromáticas dedicado a la microindustria

Teniendo en cuenta la poca documentación disponible sobre el diseño de secadoras de radiografías industriales, se analizó un proyecto de diseño que involucra el secado por aire caliente, el cual es el método más utilizado en el uso de radiografías industriales. En este caso, se examinó el diseño de un secador de bandejas para hierbas aromáticas dedicado a la microindustria.

En este diseño, se utiliza un control de temperatura basado en la convección forzada, que mantiene el secador a una temperatura de 30 a 60°C. La fuente generadora de calor utilizada son resistencias eléctricas (niquelinas o de nicrom), accionadas por un controlador programable, y se incorpora un ventilador dentro de la cámara que permite circular el aire uniformemente, para regular la temperatura y evitar que las hierbas se sequen demasiado. El sistema de control programable monitorea y manipula las variables de temperatura y humedad para conservar las propiedades nutritivas de las plantas aromáticas. Con respecto a la interfaz de usuario, el sistema dispone de un pulsador para iniciar el ciclo de secado y seleccionar el tipo de hierba aromática a secar, y se puede apreciar el rango de temperaturas y el tiempo de secado [6].

En este caso de estudio, se analizó la metodología utilizada en el desarrollo del proyecto de secado de hierbas aromáticas, así como las tecnologías y materiales utilizados, para identificar aspectos aplicables al diseño de la secadora de radiografías. Entre los dispositivos y metodologías están las posibles ubicaciones planteadas para la fuente de calor, el material de las tuberías de conducción de aire caliente, el aislante térmico y el tipo de resistencia de calefacción.

Caso de estudio desarrollo y evaluación del rendimiento de un secador combinado de aire caliente y radiación infrarroja.

En este estudio llevado a cabo por el departamento de agrotecnología de la universidad de Teherán en conjunto con el de la universidad de Gorgan, se desarrolló un secador de aire caliente combinado con radiación infrarroja a una escala de laboratorio, donde el usuario podía variar algunos parámetros, tales como: la temperatura del aire de entrada a la cámara de secado, el caudal de aire y la distancia de la fuente de infrarrojos [61]. Se realizaron pruebas del secador utilizando capas finas de tomate, bajo la combinación de diferentes parámetros de secado, observando los siguientes resultados:

Al aumentar la temperatura de secado, el tiempo de secado se redujo debido al aumento de potencia infrarroja, por lo que el tiempo de secado más corto correspondió a las temperaturas de 80°C y 60°C. En cuanto a la velocidad del aire, se evidencio que el tiempo de secado se reduce al aumentar la velocidad del aire de secado, esto se debe al aumento de la tasa de la evaporación de la humedad. Sin embargo, al superar la velocidad del aire de 1,1 m/s, el tiempo de secado aumenta, debido al efecto de enfriamiento y la reducción de la temperatura de la superficie.

En relación con la temperatura del aire, los resultados mostraron que el aumento en la misma produce una reducción en el tiempo de secado. Por otro lado, al aumentar la distancia entre el producto y la lampara infrarroja, el tiempo de secado aumenta debido a la reducción de transferencia de calor al producto.

Este proyecto fue de gran utilidad para comprender de una manera más precisa la influencia de cada uno de los factores involucrados en el proceso de secado, así como para conocer los beneficios que puede proporcionar la incorporación de la tecnología infrarroja en el proceso de secado.

3.2. Fundamentos teóricos

En esta sección se describen algunos de los conceptos que se encontraron relevantes y que tienen un mayor impacto para el desarrollo del presente proyecto.

3.2.1. Procesamiento radiográfico

La capacidad de que las radiografías tomadas puedan brindar información determinante y clara sobre un objeto examinado se define como calidad radiográfica, esta calidad radiográfica puede verse influenciada por los factores de radiación en la toma de la radiografía o por el posterior procesamiento de la película. El procesamiento radiográfico consta de 5 etapas las cuales son revelado, enjuague, fijación, lavado y secado. La etapa de revelado consiste en sumergir la película radiográfica en un líquido revelador que reacciona con los halogenuros de plata presentes en la película y como resultado se obtiene una imagen visible de la pieza radiografiada.

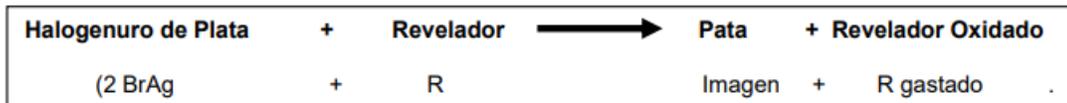


Figura 2. Reacción química en el proceso de revelado (Fuente: [10].)

Como se observa en la Figura 2. la reacción ocurrida en la etapa de revelado radiográfico es básicamente una reacción REDOX (una reacción de oxidación y reducción), el halogenuro de plata se reduce y pasa a formar plata metálica que da como resultado la obtención de la imagen visible, y por su parte el líquido revelador se oxida para obtener dicha plata metálica. Posteriormente un líquido de enjuague limpia los restos de la solución reveladora para que no se mezclen en la siguiente etapa, la fijación, como su nombre lo indica en esta sección se realiza la fijación de la imagen obtenida, eliminando los granos de halogenuro de plata que no fueron expuestos a la radiación ionizante y que aún permanecen en la película radiográfica, además, en esta etapa se endurece la emulsión (véase 4.2.2), para que la película sea resistente a la abrasión mecánica, el secado con aire caliente y su posterior almacenamiento [10].

La etapa posterior consiste en un lavado con agua circulando, el cual tiene como objetivo eliminar cualquier sustancia que pudo haber quedado impregnada en la película radiográfica, posteriormente la etapa final del ciclo de procesamiento es el secado, este tiene como objetivo eliminar el agua presente en la emulsión, el método más común de secado es por convección de aire, esta técnica tiene tres factores importantes a tener en cuenta en el proceso, la temperatura del aire, la humedad y el flujo de aire a través de la emulsión [11], en la Figura 3. se puede observar una ilustración grafica de las etapas del procesamiento radiográfico descritas anteriormente.

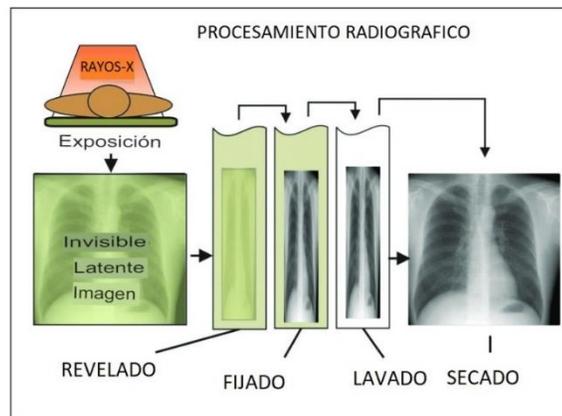


Figura 3. Ilustración de las etapas del procesamiento radiográfico (Fuente: [12].)

3.2.2. Película radiográfica.

La película radiográfica es una lámina expuesta a los rayos X que inciden sobre la pieza o dispositivo a inspeccionar, de esta forma se obtiene una imagen latente de dicha pieza, sin

embargo, es necesario realizar un posterior procesamiento, que permite obtener la radiografía como una imagen visible para los respectivos análisis de la pieza.

Composición

La película radiográfica consta de tres capas principalmente:

Emulsión: la que es sensible a la radiación ionizante (rayos X o luz visible) y la cual registra la imagen radiográfica, está compuesta por una matriz de gelatina que suspende cristales fotosensibles de haluro de plata. las películas pueden tener una doble capa de emulsión, que permiten obtener imágenes con una menor dosis de radiación, o una sola capa, para lograr imágenes más detalladas. Cabe resaltar que una capa de emulsión radiográfica tiene un espesor de 4 micras.

Base de la película: la base es una lámina plástica poliéster que sirve como soporte para la emulsión radiográfica, tiene un espesor de 0.18 mm Esta base es delgada y maleable, pero a su vez tiene cierta rigidez, esto le permite soportar la presión ejercida por los rodillos en el procesamiento radiográfico, es transparente para absorber la mínima cantidad de luz, tiene un leve tinte azul que ayuda a resaltar el contraste, y está construida para soportar condiciones de calor, humedad y exposición química [14].

Capa protectora: esta es una capa delgada y translúcida que va sobrepuesta a la emulsión radiográfica, y protege la superficie de la emulsión de daños mecánicos y de procesamiento como arañazos o rasgaduras [15].

En la Figura 4. se logra apreciar la estructura tanto de las películas radiográficas con doble capa de emulsión como las de una capa, identificando cada una de sus partes.

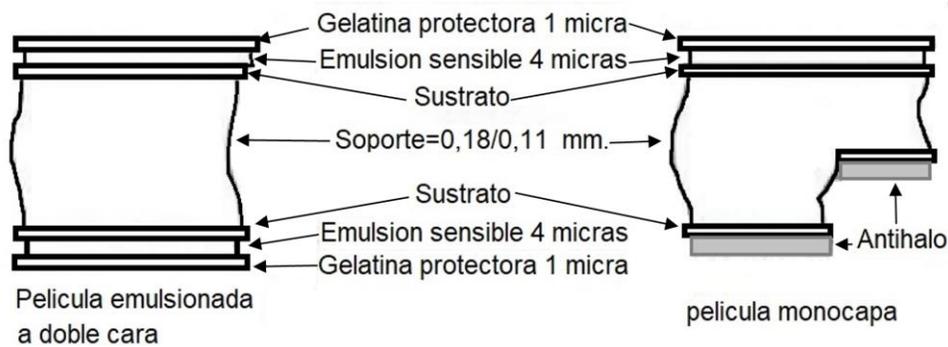


Figura 4. Estructura de la película radiográfica con doble capa de emulsión vs película monocapa. (Fuente: Elaboración propia.)

- Características

La película radiográfica se caracteriza por tener un tamaño estándar de 15x30 cm y 12,7x30 cm, con un grosor de 0,2 mm, y cuenta con cuatro propiedades importantes: velocidad, tamaño de grano en la emulsión radiográfica, contraste y duración de la exposición a la radiación

(García, s.f.). Es importante destacar que cuanto más pequeño sea el tamaño del grano, mayor será la calidad de la imagen y el nivel de detalle, pero se prolongará el tiempo de exposición a la radiación ionizante durante la toma de la radiografía.

En cuanto a las condiciones ambientales idóneas para el almacenamiento de las películas radiográficas, se requiere una temperatura máxima de 20°C y una humedad no superior al 50% [16]. Estas películas deben ser almacenadas en un cuarto oscuro sin radiaciones circundantes, ya que, de lo contrario, podrían velarse. Además, según las fichas técnicas revisadas de secadoras de películas radiográficas industriales, se identificó que la temperatura de secado no debe superar los 65°C, debido a que una temperatura superior podría producir una distorsión en la radiografía [11].

3.2.3. Calidad radiográfica

La calidad de la imagen radiográfica se refiere a la capacidad de una radiografía para proporcionar una representación precisa y detallada de la estructura interna de un objeto o material inspeccionado. Entre las características que influyen en la calidad radiográfica, están la claridad, el contraste, la resolución y la fidelidad de los detalles capturados en la imagen radiográfica. Una imagen radiográfica de alta calidad permite una interpretación precisa de posible defectos o características relevantes presentes en el material inspeccionado. Para lograr una buena calidad de imagen radiográfica, es necesario considerar factores como la sensibilidad de la película radiográfica, el procesamiento adecuado de la película y el cumplimiento de las normas y estándares aplicables a la radiografía industrial.

3.2.4. Secado

El proceso de secado consiste en la eliminación de agua o sustancias volátiles (humedad) de un sustrato ya sea sólido, líquido o gaseoso. Dicha humedad está almacenada como una solución líquida dentro de la microestructura del sólido. Para que ocurra el proceso de secado de un sustrato es necesario que ocurran dos procesos termodinámicos simultáneamente, los cuales son transferencia de energía térmica al sustrato, y transferencia de humedad interna a la superficie externa del sustrato, la rapidez con que ocurran estos procesos determina la velocidad de secado de un sustrato.

La transferencia de energía térmica al sustrato húmedo se puede realizar a través de distintos métodos entre los fundamentales se encuentran la convección, conducción y radiación, en algunos casos estos métodos se pueden combinar para obtener los resultados deseados [7].

3.2.5. Sistema embebido

Los sistemas embebidos son sistemas de procesamiento computacional utilizados con la finalidad de realizar unas tareas de control específicas, cubriendo de esta forma las necesidades concretas de un sistema. El procesamiento del sistema se lleva a cabo por medio de un microcontrolador, el cual incorpora una serie de interfaces de entrada y salida que le

permite tener un control de los procesos realizados en un sistema, además de una memoria de tamaño reducido [8].

Este tipo de sistemas son utilizados en dispositivos o tareas que requieran control en tiempo real de los procesos ejecutados, debido a que ejecutan acciones autónomas, de manera ininterrumpida y sin necesidad de mantenimiento frecuente. Los sistemas embebidos se utilizan en gran variedad de sectores ocupacionales como la salud, la autotrónica, telecomunicaciones, electrónica de consumo, militar y el sector industrial. En este último presentan una serie de beneficios como la versatilidad en la personalización del sistema, la interfaz de usuario, las tareas específicas que desempeña el microcontrolador, y la utilización de una amplia gama de periféricos, en cuanto a la rentabilidad, se obtiene una reducción de costos dado que permite diseñar un sistema con el hardware esencial para su funcionamiento, y la posibilidad de prescindir de PLC o controladores lógicos programables. Además, facilitan el mantenimiento del sistema al permitir la sencilla sustitución de componentes averiados [9].

3.3. Marco legal

En esta sección se describen los lineamientos y normativas que rigen el procesamiento de películas radiográficas, estas normas estipulan las condiciones idóneas de procesamiento para obtener una alta calidad y fiabilidad de las imágenes radiográficas generadas, además, teniendo en cuenta que el dispositivo diseñado tendrá uso en ambientes radioactivos, también debe cumplir una serie de normativas que tienen como fin reducir el riesgo de exposición de los operarios a distintos tipos de radiación.

NORMA ISO 5579

Esta norma internacional expone las reglas generales de la radiografía industrial por rayos X y gamma para la detección de discontinuidades, mediante técnicas que utilizan película, aplicables a la inspección de productos y materiales metálicos.

NORMA ISO 11699 – 1

La norma estándar internacional ISO 11699-1 establece la clasificación de sistemas de película radiográfica industrial (END), esta sección de la norma ISO 11699 está enfocada a asegurar la calidad de las imágenes radiográficas capturadas, en la medida que esta calidad esté influenciada por el sistema de procesamiento radiográfico utilizado, por esta razón en esta sección de la norma se especifica el procedimiento de prueba de un sistema de procesamiento radiográfico.

NORMA ISO 11699 – 2

La norma ISO 11699-2 describe el procedimiento de control para los usuarios del sistema de revelado de películas mediante el procesado de tiras de película pre-expuestas calibradas. Esta norma indica las responsabilidades del fabricante de las películas radiográficas, así como las responsabilidades del usuario de dichas películas.

Resolución 18 1434 de 2002

Esta resolución expedida por el ministerio de minas y energía describe el reglamento de protección y seguridad radiológica, que tiene como objetivo definir los requisitos y condiciones mínimas que debe cumplir una empresa o en su caso una persona natural, que deseen realizar o ejecutar prácticas que involucren la manipulación o exposición a radiación ionizante con el fin de reducir los riesgos de exposición a la radiación de las personas y privilegiar la seguridad de las fuentes de radiación.

*

4. Capítulo 4. Plan de trabajo

En este capítulo se evidencian las actividades desarrolladas para lograr el diseño de la secadora de radiografías. Se describen los pasos seguidos en el proceso de diseño, abarcando desde la investigación preliminar hasta la estructuración de cada uno de los subsistemas del prototipo.

4.1. Recopilación de información relacionada con el funcionamiento y características de las secadoras de películas radiográficas.

En esta sección se llevó a cabo una investigación bibliográfica sobre procesos, dispositivos, materiales y demás variables relacionadas con el procesamiento de películas radiográficas. El objetivo fue obtener una perspectiva amplia de los factores influyentes en el proceso de secado de radiografías. La información analizada se obtuvo de diversas fuentes relacionadas con el gremio de radiología, tales como el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), artículos científicos y documentos de proyectos de grado. Dicha información está implícita en el marco referencial, teniendo en cuenta que este se elaboró con los conceptos más relevantes encontrados en la bibliografía revisada. A continuación, se presenta el marco referencial desarrollado.

4.2. Elaboración de marco referencial de sistema de secado de películas radiográficas.

En esta sección se describen de una manera más detallada las características y aspectos relacionados con un sistema de secado de películas radiográficas.

4.2.1. Partes y métodos

Teniendo en cuenta la bibliografía revisada se logró identificar que los sistemas de secado radiográfico tienen dos partes esenciales para su funcionamiento: la cámara de secado y el módulo de control electrónico [13].

- **Cámara de secado**

La cámara de secado es un equipo diseñado para reducir la humedad presente en las radiografías. Como su nombre lo indica, se trata de una cabina en la que se depositan las radiografías para su tratamiento. La cámara de secado está equipada con una fuente de calor, que puede utilizar diversas tecnologías, siendo las más comunes la convección con aire caliente y la radiación infrarroja. Es esencial que el aire circule adecuadamente dentro de la cámara de secado, ya que este es el encargado de absorber la humedad de las radiografías. Por este motivo, es necesario incorporar elementos de ventilación que permitan el ingreso de aire fresco y seco, así como la evacuación de aire procesado. Es importante destacar que, para aprovechar la mayor parte del calor generado, la cámara de secado debe ser un ambiente controlado donde se priorice el poco intercambio de calor entre la cabina y el ambiente exterior.

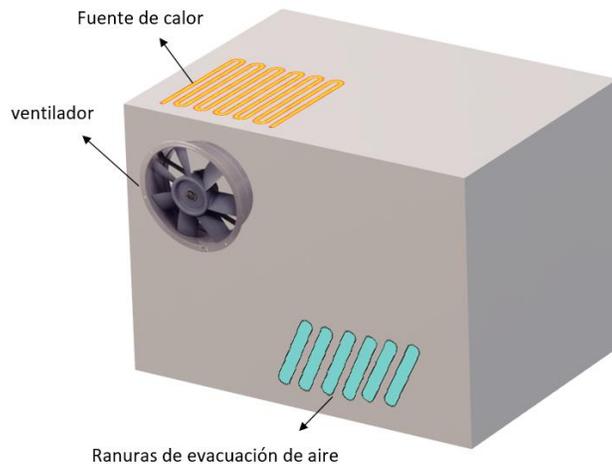


Figura 5. Ilustración de la cámara de secado de películas radiográficas (Fuente: elaboración propia).

En la Figura 5. se puede observar una representación gráfica de la cámara de secado donde se evidencian los componentes mencionados anteriormente para su correcto funcionamiento; fuente de calor, un ventilador para el ingreso de aire a la cámara y ranuras dispuestas para la evacuación del aire utilizado en el proceso.

- **Control Electrónico**

Para lograr realizar un buen secado radiográfico es necesario un control electrónico que permita supervisar y controlar las diferentes variables presentes en el proceso, tales como temperatura de la fuente de calor, el caudal de aire dentro de la cabina de secado y el tiempo utilizado en un ciclo de secado. Este control electrónico se realiza por medio de un microcontrolador el cual ejecuta acciones de control preestablecidas, teniendo en cuenta las lecturas detectadas por los periféricos involucrados en el sistema ya sean sensores o actuadores.

Con el control electrónico se pueden dirigir distintos procesos tales como:

- El tiempo de procesamiento durante el secado radiográfico: variable que según distintos proyectos se evidencia el uso de un temporizador para esta función [5].
- El control de temperatura: aunque en la información recolectada no se especifica la técnica precisa utilizada para controlar la temperatura, se evidencia el uso de sensores DHT-22 y termostatos para el monitoreo constante de la temperatura en la cámara de secado. Además, se utilizan ventiladores para el ingreso de aire a la cámara, un calentador para modificar la temperatura del aire ingresado, así como la implementación de un algoritmo en el microcontrolador para lograr el nivel apropiado de temperatura [13].
- La Interfaz de usuario: Esta desempeña un papel importante en la comunicación entre el usuario y la secadora. En este sentido, se evidencia el uso de pantallas LCD, teclados de 4x3, y botones. Estos elementos son utilizados para configurar el

funcionamiento deseado de la secadora y mostrar información relevante del proceso de secado.

- Control de seguridad: proceso que permite la operación segura de la secadora, protegiendo la seguridad tanto del equipo como de los usuarios, en este ámbito se ha encontrado el uso de relés de estado sólido, que permiten (por medio de una señal de control) interrumpir el suministro de energía al calentador, en caso de que la temperatura supere el valor requerido, lo que puede ser perjudicial para la calidad radiográfica y provocar el sobrecalentamiento del equipo [13].

4.2.2. TECNOLOGIAS DE SECADO

El secado es un proceso en el cual se elimina agua o sustancias volátiles (humedad) de un sólido, dicha humedad esta almacenada como una solución líquida dentro de la microestructura del sólido [7]. Este proceso de desecación puede ser realizado por medio de distintos métodos, ya sean mecánicos, no mecánicos, o fisicoquímicos. Teniendo en cuenta la investigación realizada sobre la composición y las características necesarias para el manejo correcto de las películas radiográficas, se analizaron diferentes tecnologías de secado para determinar la más adecuada para el prototipo diseñado, a continuación, se describen algunas tecnologías de secado utilizadas en el ámbito radiográfico:

4.2.2.1. Secado Natural

El secado natural es un método simple y económico utilizado desde la antigüedad, aprovechando la energía del movimiento del aire y la radiación solar para evaporar la humedad de las piezas a secar. Este método de secado se utiliza convencionalmente en el procesamiento de películas radiográficas de forma manual, sin embargo, posee una serie de desventajas como la lentitud del proceso debido a la alta humedad ambiental, la necesidad de un espacio amplio y bien ventilado, y la falta de control sobre la temperatura y el caudal de aire. Por lo tanto, aunque puede ser viable en condiciones ambientales adecuadas y con suficiente tiempo disponible, existen otras metodologías que ofrecen un mayor control y eficiencia en el proceso de secado.

4.2.2.2. Secado por aire caliente

Esta es una tecnología de secado sencilla y eficaz, por esta razón es comúnmente utilizado en el secado de productos industriales y alimentarios, este método realiza la transmisión de calor por medio de la convección forzada con aire caliente, la convección consiste en incorporar energía térmica en el producto a secar con ayuda del aire, esto hace que se combinen dos principios físicos al mismo tiempo que benefician la eficiencia del proceso de secado. Primero, el uso de aire caliente permite evacuar una mayor cantidad de humedad, debido a que el aire caliente almacena una mayor cantidad de humedad que el aire frío; en segundo lugar, la velocidad de evaporación aumenta cuando se somete una superficie húmeda a una corriente continua de aire, en especial si el aire usado en el proceso es fresco y seco [17].

Otros beneficios que puede aportar este método son la adaptabilidad de la temperatura, el volumen del aire, la distribución del aire y su caudal, lo que permite obtener los resultados de secado deseados. Por lo tanto, la tecnología de secado por convección forzada con aire caliente puede ser una opción viable para implementar en el prototipo diseñado.

4.2.2.3. Secado Infrarrojo

La calefacción infrarroja es una técnica de secado interesante, presenta una serie de ventajas con respecto a los métodos de secado convencionales, tales como: altas velocidades de secado y por lo tanto un ahorro energético significativo, elevados coeficientes de transferencia de calor, tiempos de procesamiento cortos, y una distribución uniforme de temperatura en el sustrato [18].

Sin embargo, un aspecto importante a tener en cuenta es que la penetración de la radiación térmica es tan buena que la energía térmica es absorbida muy rápidamente por el sustrato de secado y no penetra mucho en la masa húmeda, en consecuencia, las capas superficiales del sustrato secan pronto, pero la continua absorción de energía aumenta la temperatura interna del sustrato [19], esto ocasiona un efecto de tostado, el cual es un efecto indeseable para la finalidad requerida, ya que puede perjudicar las características y calidad de la imagen radiográfica, al aumentar la temperatura interna por encima de 65 °C como temperatura umbral.

4.2.2.4. Conclusión de tecnologías de secado

Teniendo en cuenta las tecnologías de secado analizadas en esta sección, y las ventajas y desventajas que pueden brindar el uso de cada una de estas técnicas, se llegó a la conclusión que el secado por convección de aire caliente es la tecnología más favorable para el uso en el dispositivo diseñado, teniendo en cuenta que permite agilizar el proceso de secado y tiene una alta versatilidad al permitir variar la temperatura, la distribución y el caudal del aire, factores que pueden ser utilizados para no sobrecalentar la superficie de la película radiográfica y de esta forma no afectar su calidad.

4.2.3. Desafíos del secado de radiografías

El secado de radiografías es un proceso fundamental en el campo de la radiología, puesto que la calidad de la imagen radiográfica puede verse afectada por la presencia de humedad. En el diseño, es importante tener en cuenta los desafíos asociados con este proceso para lograr resultados eficientes. A continuación, se presentan algunos aspectos relevantes.

4.2.3.1. Humedad residual

Uno de los principales desafíos en el secado de radiografías es eliminar completamente la humedad de las películas radiográficas. La presencia de humedad puede causar manchas y distorsiones en la imagen, lo que afecta la calidad radiográfica. Por lo tanto, el diseño de la secadora debe tener en cuenta mecanismos eficientes para lograr un secado completo de las radiografías, entre estos se evidencia el uso de una tecnología de secado eficiente, establecer

una temperatura óptima para lograr una evaporación completa de la humedad en las radiografías, en los proyectos de diseño analizados, la temperatura de secado oscila entre los 35°C y 60°C. Además, se debe implementar un sistema de ventilación adecuado para facilitar la circulación del aire y la extracción de la humedad residual.

4.2.3.2. Control de temperatura

El control preciso de la temperatura durante el secado es esencial para evitar daños en las radiografías y garantizar una calidad óptima de la imagen. Es necesario encontrar un equilibrio entre una temperatura lo suficientemente alta para acelerar el secado y no comprometer la integridad de las películas radiográficas. Por lo tanto, el control de temperatura diseñado debe ser preciso y confiable. En este sentido, es importante considerar la tecnología de control de temperatura que se utilizará. Los controladores PID son una opción eficiente para mantener la temperatura dentro de los rangos deseados. Estos controladores permiten monitorear y ajustar automáticamente la temperatura con base en las lecturas de un sensor de temperatura, proporcionando un control más preciso y estable en diferentes condiciones ambientales. Además, es recomendable emplear dispositivos de calentamiento regulables, que permitan tener un control de potencia para ajustar la cantidad de calor emitido, y de esta forma facilitar la obtención de la temperatura deseada evitando fluctuaciones bruscas en el proceso de secado.

También se debe tener en cuenta el diseño del sistema de calentamiento, considerando la distribución uniforme del calor en la cámara de secado, esto implica ubicar adecuadamente las fuentes de calor y utilizar medidas para minimizar las pérdidas térmicas.

4.3. Análisis de las secadoras de radiografías en el mercado.

Para elegir los sistemas, dispositivos y materiales adecuados para el prototipo de secadora de radiografías diseñado, se realizó una revisión bibliográfica previa de algunas secadoras radiográficas disponibles en el mercado. El objetivo fue analizar los dispositivos y materiales que componen estas secadoras, así como los beneficios que sus tecnologías les brindan. De esta manera, lograr obtener una perspectiva más amplia para determinar los dispositivos, materiales y sistemas a incorporar en el prototipo. Aunque inicialmente se planteó el análisis de la arquitectura del software y hardware de las secadoras del mercado, a pesar de los esfuerzos realizados durante el proceso de investigación, se encontró que la información disponible acerca de estos aspectos es limitada, ya que los fabricantes no proporcionan detalles específicos sobre estas características.

A continuación, se presentan algunas de las secadoras analizadas y las características encontradas, enfocando los aspectos que pudieron ser identificados y que son relevantes para el diseño del prototipo que se pretende llevar a cabo.

4.3.1. Gabinete de secado de películas radiográficas CCX-YJII

Entre los dispositivos analizados se encuentran los gabinetes de secado, en los cuales se insertan las radiografías directamente en la cámara de secado y permiten secar varias películas radiográficas al mismo tiempo. En el caso del gabinete de secado CCX-YJII, se pueden secar hasta 18 películas radiográficas simultáneamente, este gabinete cuenta con un control de temperatura PID y una pantalla digital LED para indicar el estado del proceso de secado, su estructura está diseñada en acero inoxidable laminado en frío lo cual le brinda resistencia y dureza. Además, el gabinete tiene una ventana de vidrio en la parte superior para supervisar el estado de las películas durante el proceso de secado. En la Figura 6. se evidencia la estructura del gabinete de secado CCX-YJII y en la Tabla 1. se pueden observar sus datos técnicos.



Figura 6. Estructura de gabinete de secado de películas radiográficas CCX-YJII (Fuente: [20].)

Tabla 1. Ficha técnica de gabinete de secado CCX-YJII

Especificaciones	Descripción
Rango de temperatura de funcionamiento	5 – 70 °C
Fluctuación de temperatura	≤ 1 °C
Tolerancia de la temperatura	± 2 °C
Voltaje de funcionamiento	CA 220 V, 50 Hz Potencia: 1215 W
Volumen	124L
Tamaño de la cámara de secado	59 × 37 × 57 cm
Dimensiones	64 × 50 × 94 cm
Peso neto	80 kg.
Capacidad de secado	18 películas al mismo tiempo

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2. Cabina de secado de películas radiográficas SHSR-1

Se observó que la estructura de esta cabina de secado se diferencia de la mayoría de los gabinetes de secado presentes en el mercado, incluyendo el gabinete CCX-YJJ abarcado anteriormente. Esta cabina es más alta, con dimensiones de 67x58x172 cm, como se puede apreciar en la Figura 7., pero no se encontraron especificaciones técnicas detalladas de este dispositivo. Utiliza convección forzada de aire caliente para secar las películas radiográficas y tiene dos estantes retráctiles para colocarlas. Además, sus puertas son de vidrio para supervisar el proceso de secado e incorpora un termostato para regular la temperatura de secado.



Figura 7. Estructura de la cabina de secado de películas radiográficas SHSR-1 (Fuente: [21].)

4.3.3. Secadora Structurix

La secadora Structurix se caracteriza por su diseño compacto y ligero, con medidas de 60x63x85 cm y un peso de tan solo 24 Kg. Debido a que las películas radiográficas se secan individualmente, la secadora tiene un tamaño reducido, lo que la hace muy útil para pruebas donde se requiere una alta portabilidad de la secadora. En la Figura 8. se evidencia la estructura de la secadora Structurix, y los demás datos técnicos brindados por el fabricante se evidencian en la Tabla 2.



Figura 8. Estructura de secador structurix (Fuente: [23].)

Tabla 2. Especificaciones técnicas de secador Structurix.

Especificaciones		Descripción
Dimensiones	Longitud	60 cm. con bandeja receptora extendida: 83 cm
	Ancho	63 cm.
	Altura	35 cm.
Peso	Vacío	24 kg.
Suministro energético	Voltaje	200-240V / 100-120V
	Amperaje	5-6 A / 10-12 A
	Consumo	1600 W
Ancho máximo de la película		37 cm.

Fuente: Elaboración propia. (Datos: General Electric Company [22])

Por medio del análisis realizado se lograron identificar características estructurales, fenómenos físicos y electrónicos que caracterizan una secadora radiográfica. Respectivamente, las características estructurales permitieron contar con un bosquejo de la distribución de las partes que conforman una secadora, logrando así identificar que un diseño óptimo que se encuentra en el mercado es el de la secadora structurix, debido a que permite realizar el secado en un espacio compacto, con una menor complejidad de uso para el usuario y una estructura sólida que soporta las condiciones a las que se ve expuesta durante el proceso de secado. En cuanto a los fenómenos físicos, se logró identificar que el control de temperatura tiene un rango de funcionamiento característico, el cual va de 5°C a 70°C.

4.4. Determinación de los requerimientos y subsistemas a incorporar en el prototipo diseñado

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica y el marco referencial realizado, así como el previo análisis de las características de las secadoras de radiografías presentes en el mercado, se consideró que el prototipo de secadora de radiografías industriales diseñado debe incorporar una serie de requerimientos o subsistemas para que tenga un correcto funcionamiento, en este apartado se describen los requerimientos necesarios para el funcionamiento de la secadora. El primer requerimiento, evidenciado en la Tabla 3. describe la necesidad de una interfaz de usuario para que se indique el funcionamiento deseado de la secadora. El segundo requerimiento descrito en la Tabla 4., es la necesidad de un ambiente controlado donde se realice el proceso de secado. El tercer requerimiento, descrito en la Tabla 5. es la necesidad de un control de temperatura que permita un control preciso y estable de la temperatura durante el proceso de secado. El cuarto requerimiento, presentado en la Tabla 6., es la necesidad de un sistema de transporte que permita ingresar y evacuar la película radiográfica de la cámara de secado. Finalmente, en la Tabla 7. se muestra el quinto requerimiento el cual consiste en la necesidad de un sistema que permita controlar las diferentes variables y procesos involucrados en el funcionamiento de la secadora.

Tabla 3. Requerimiento N.º 1 del prototipo

Identificación del requerimiento:	RF01
Nombre del requerimiento:	Interfaz de usuario.
Características:	Permite que el usuario indique el funcionamiento deseado de la secadora, además notifica al usuario el estado del proceso de secado en caso de estar en operación.
Descripción del requerimiento:	Este sistema comprende todos los dispositivos y software necesario para que el usuario interactúe con la secadora de radiografías, de manera general esta interfaz debe incorporar el sistema de encendido/apagado de la secadora, así como permitir seleccionar la temperatura de secado deseada por el

	usuario, sin embargo, durante en el desarrollo es posible agregar otras funciones que se consideren importantes para un mejor funcionamiento.
Prioridad del requerimiento: Alta.	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Requerimiento N.º 2 del prototipo.

Identificación del requerimiento:	RF02
Nombre del requerimiento:	Cámara de secado
Características:	Ambiente controlado donde se depositan las radiografías para realizar el proceso de secado.
Descripción del requerimiento:	Esta cámara debe priorizar el poco intercambio de calor entre el ambiente exterior para aprovechar eficientemente el calor generado. Además, debe tener las dimensiones y estructura necesaria para ubicar dentro una película radiográfica de 15x30 cm y demás componentes necesarios para el secado. Según los criterios investigados, se implementará la tecnología de convección de aire caliente como fuente de calor.
Prioridad del requerimiento: Alta.	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Requerimiento N.º 3 del prototipo

Identificación del requerimiento:	RF03
Nombre del requerimiento:	Control de temperatura
Características:	Permite controlar y supervisar la temperatura del aire utilizado para el secado de las películas radiográficas.
Descripción del requerimiento:	Este control debe permitir regular la temperatura de secado hasta un valor de 65° C, además teniendo en cuenta que este es un factor crítico para la conservación de la calidad radiográfica, debe tener una alta precisión, se considera que debe tener una tolerancia de $\pm 2^{\circ}$ C, y en caso de por alguna circunstancia superar el valor umbral de temperatura (65°C) se debe desactivar inmediatamente la fuente de calor para evitar mayores daños a la composición de la película radiográfica.

Prioridad del requerimiento: Alta.
--

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Requerimiento N.º4 del prototipo

Identificación del requerimiento:	RF04
Nombre del requerimiento:	Sistema de Transporte de la película radiográfica.
Características:	Permite el ingreso y/o evacuación de la película radiográfica a la cámara de secado.
Descripción del requerimiento:	Este sistema debe monitorear la entrada de la película radiográfica, con el fin de determinar si esta se encuentra en una correcta posición para su ingreso, además el método de transporte debe lograr ubicar correctamente la película dentro de la cámara de secado, así como permitir su evacuación al momento de ser requerido.
Prioridad del requerimiento: Alta.	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Requerimiento N.º5 del prototipo

Identificación del requerimiento:	RF05
Nombre del requerimiento:	Sistema de control.
Características:	Se encarga de dirigir, accionar, y regular el comportamiento de los diferentes dispositivos incorporados en el sistema en general de la secadora de películas radiográficas.
Descripción del requerimiento:	Este sistema ejecuta acciones de control preestablecidas a los diferentes actuadores del sistema, con el fin de regular las variables involucradas en el proceso de secado, tales como la temperatura y el caudal de aire en la cabina de secado, así como el tiempo utilizado en un ciclo de secado, y otras acciones de control necesarias en el sistema de transporte.
Prioridad del requerimiento: Alta.	

Fuente: elaboración propia.

4.5. Solución a los requerimientos de diseño.

Para cumplir con los requerimientos planteados para el prototipo a desarrollar, se llevó a cabo un proceso de diseño de los subsistemas necesarios. Esto implicó una evaluación de los dispositivos, materiales y estructuras necesarias, analizando la compatibilidad de cada material entre sí para lograr un correcto funcionamiento del equipo. Se consideraron factores como las condiciones ambientales idóneas para el proceso de secado, el tamaño de la radiografía y dispositivos que permitan un proceso de secado seguro, a continuación, se evidencia el desarrollo de diseño de los subsistemas a incorporar en el prototipo.

4.5.1. Sistema de transporte de la película radiográfica

En esta sección se describe la selección de los dispositivos y materiales para el sistema de transporte, en el cual se debe monitorear la entrada de la cámara de secado para determinar si hay una película radiográfica presente. Posteriormente, el transportador debe insertar correctamente la película radiográfica dentro de la cámara de secado y evacuar la película radiográfica cuando sea necesario. Además, se requiere monitorear la salida de la película con el fin de determinar su correcta evacuación de la cámara de secado. De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada con respecto a este apartado, a continuación, se describen los dispositivos seleccionados para el sistema de transporte.

Transportador de rodillos

Para lograr el transporte de la película a lo largo de la cámara de secado, se planteó el diseño de un transportador de rodillos, el cual consiste en un conjunto de rodillos dispuestos de forma paralela ubicados a ambos lados de la película radiográfica de manera que con su movimiento rotacional permitan el soporte y transporte de la película radiográfica a lo largo de la cámara de secado, estos rodillos serán impulsados a través de un sistema de piñones acoplado a una correa de transmisión en el que el engranaje motriz estará conectado a un motor DC, este motor estará dirigido por el sistema de control con el fin de regular la velocidad y controlar las acciones del sistema de transporte.

Los rodillos están compuestos principalmente por 3 partes:

1. Eje de giro: este es un elemento rectilíneo tubular y que permite el giro del cilindro.
2. Rodamientos: estos elementos están ubicados en los extremos del eje, permiten reducir la fricción entre el eje y las piezas conectadas a este.
3. Cilindro: es la superficie que envuelve el eje de giro y tiene contacto directo con la película radiográfica.

Se seleccionaron ejes giratorios de hierro de 8 mm de diámetro y 26 cm de longitud para soportar el cilindro y los demás elementos mecánicos necesarios para el movimiento del rodillo. En cuanto a los cilindros se decidió su fabricación en caucho con recubrimiento en neopreno, el cual tiene un buen rendimiento a altas temperaturas (hasta 149°C) y buenas propiedades mecánicas como resistencia a la abrasión, flexión y a los solventes. Estos cilindros tendrán una longitud de 22 cm, lo suficientemente largo para soportar la película radiográfica de 15 cm de ancho. Para acoplarse al eje de giro, los cilindros tendrán un diámetro

interior de 8 mm, mientras que el diámetro exterior será de 3 cm para evitar interferir con el movimiento de otros componentes giratorios como los engranajes y los rodamientos. Se utilizarán chumaceras de pared de montaje horizontal para dar soporte al eje de giro y fijarlo al chasis de la secadora. En la Figura 9. se evidencian los materiales utilizados para el transportador de rodillos.

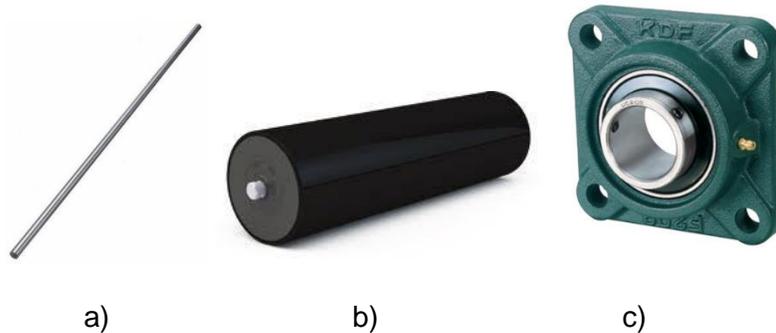


Figura 9. a) Eje giratorio de hierro. b) Eje giratorio con cilindro incorporado. C) Chumacera cuadrada.

Después de seleccionar los materiales para la fabricación de los rodillos del transportador, se procedió a calcular su peso para poder determinar el torque necesario del motor DC que impulsará el sistema de transporte. Para calcular el peso de los materiales se utilizó la fórmula del peso específico de cada material multiplicado por su volumen (ecuación (2)).

PESO DEL EJE METALICO

Se halló el volumen del eje metálico por medio de la formula del volumen de un cilindro la cual se evidencia en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y posteriormente se halló su peso teniendo en cuenta que la densidad del hierro es 7,8 gr/cm³.

$$volumen = \frac{\pi D^2 L}{4} \quad (1)$$

$$volumen = \frac{\pi (0,8cm)^2 (30cm)}{4}$$

$$volumen = 15,079 \text{ cm}^3$$

$$peso(gr) = volumen \times densidad \quad (2)$$

$$peso(gr) = 15.079 \text{ cm}^3 \times 7,8 \frac{gr}{\text{cm}^3}$$

$$peso(gr) = 117.6162 \text{ gr}$$

PESO DEL CILINDRO

Teniendo en cuenta su estructura, se usó la fórmula para hallar el volumen de un cilindro hueco (ecuación (3)) además para hallar el peso se tuvo en cuenta la densidad del polietileno de alta densidad la cual es de 0,97 gr/cm³.

$$volumen = \pi h (R^2 - r^2) \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 \text{volumen} &= \pi (22\text{cm}) ((1.5\text{cm})^2 - (0.4\text{cm})^2) \\
 \text{volumen} &= 144,45 \text{ cm}^3 \\
 \text{peso}(\text{gr}) &= \text{volumen} \times \text{densidad} \\
 \text{peso}(\text{gr}) &= 144,45 \text{ cm}^3 \times 0,97 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \\
 \text{peso}(\text{gr}) &= 140,12\text{gr}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

PESO DEL SOPORTE “CHUMACERA”

De acuerdo con las especificaciones brindadas por el fabricante de rodamientos NAYLAMP Mechatronics la chumacera para ejes de 8 mm de diámetro tiene unas dimensiones de 48*27*13mm y un peso de 26,4 gramos, en la Figura 10. Se logran apreciar con detalle las dimensiones de la chumacera seleccionada.

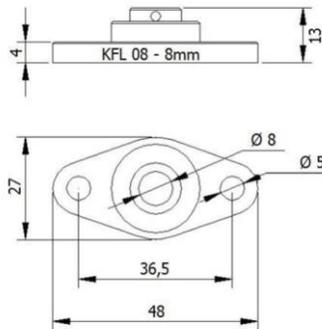


Figura 10. Dimensiones de las chumaceras de pared con montaje horizontal para eje de 8mm (Fuente: [23].)

➤ ENGRANAJES

Los engranajes permiten la transmisión del movimiento a los rodillos de transporte por medio de la correa de transmisión, estos piñones encajan en la correa de transmisión, de manera que cuando el engranaje motriz (acoplado a un motor DC) se mueva, arrastre a los piñones conducidos los cuales estarán conectados a los rodillos de la banda transportadora. Este sistema fue seleccionado debido a que ocupa un espacio reducido y permite un alto rendimiento en cuanto a transmisión de potencia, además teniendo en cuenta que no se va a utilizar a altas velocidades no producirá ruido en el proceso de transmisión.

Después de una revisión bibliográfica para determinar el tipo de engranaje adecuado para el sistema de transporte, se seleccionaron engranajes cilíndricos de dientes rectos, ya que son económicos, resistentes, duraderos, y encajan perpendicularmente al eje de giro del cilindro. Para su resistencia y durabilidad su fabricación se sugiere en acero C45, teniendo en cuenta que se utilizara en ambientes húmedos y a medianas temperaturas.

Para garantizar un acoplamiento seguro entre el piñón y el eje de giro del rodillo, se utilizará una chaveta. Esta pieza mecánica permite fijar el piñón al eje de giro evitando el movimiento

entre ambas partes, en la Figura 11. se muestra un ejemplo de un piñón con chaveta. Se busca que todos los engranajes del sistema estén en sincronía y operen a la misma velocidad. Para lograr esto, se eligió una relación de transmisión de 1:1, por lo tanto, cada engranaje tendrá el mismo número de dientes. Después de revisar las opciones disponibles en el mercado, se decidió usar piñones de 13 dientes, debido a que son los más comunes y facilitaría su reemplazo en caso de avería.

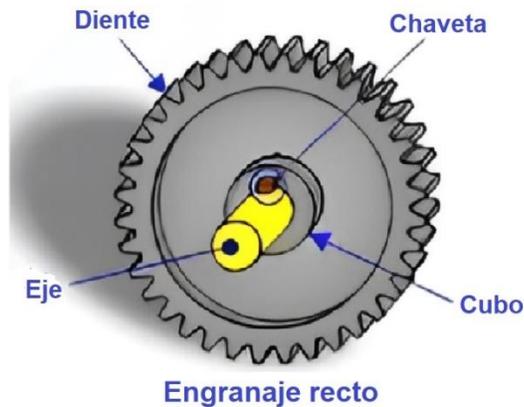


Figura 11. Estructura y partes de un piñón con chaveta (Fuente: [24], resolución mejorada.)

Realizando una búsqueda de las referencias de piñones comerciales disponibles en el mercado, se determinó que el piñón que cumple con las características requeridas y la normativa ISO 606 para elementos de unión en sistemas de transmisión de potencia es el siguiente (Figura 12.), sus especificaciones se pueden apreciar en la Tabla 8.

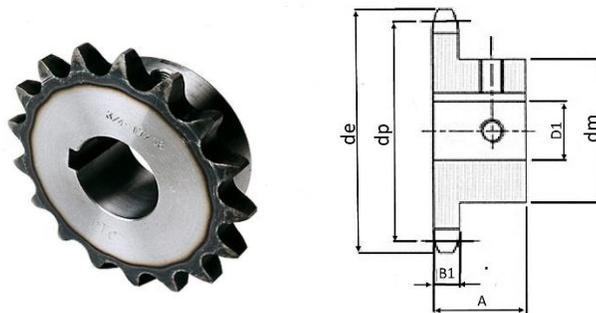


Figura 12. Estructura y dimensiones del piñón seleccionado (Fuente: [25], resolución mejorada).

Tabla 8. Especificaciones del Piñón seleccionado.

Características	Tamaño (mm)
Numero de dientes	13
Radio de los dientes	6
Ancho de los dientes (B1)	2.3
Paso de cadena	5
Diámetro externo (de)	27.3
Diámetro primitivo (dp)	25.05

Profundidad (A)	10
Diámetro de la chaveta (dm)	18
Diámetro de eje (D1)	8

Fuente: elaboración propia. (Datos: translink power transmisión, piñones y discos [25].)

PESO DEL PIÑÓN CON CHAVETA UTILIZADO

Teniendo en cuenta que los fabricantes no brindan el peso exacto de cada piñón, se procedió a calcular su volumen aproximado haciendo uso de la ecuación (3), posteriormente se obtuvo su peso con la ecuación (2), teniendo en cuenta que estos piñones son fabricados en acero C45 el cual tiene una densidad de 7,87 gr/cm³.

VOLUMEN DEL DEL PIÑÓN

$$\begin{aligned} \text{volumen} &= \pi h (R^2 - r^2) & (3) \\ \text{volumen} &= \pi (0.23\text{cm}) ((1.365\text{cm})^2 - (0.4\text{cm})^2) \\ \text{volumen} &= 1.23069 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

VOLUMEN DE LA CHAVETA

$$\begin{aligned} \text{volumen} &= \pi h (R^2 - r^2) & (3) \\ \text{volumen} &= \pi (0.77\text{cm}) ((0.9 \text{ cm})^2 - (0.4\text{cm})^2) \\ \text{volumen} &= 1.5724 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

PESO DEL PIÑÓN CON LA CHAVETA

$$\begin{aligned} \text{Volumen total} &= 1.23069 \text{ cm}^3 + 1.5724 \text{ cm}^3 \\ \text{Volumen total} &= 2.80309 \text{ cm}^3 \\ \text{peso}(\text{gr}) &= \text{volumen} \times \text{densidad} & (2) \\ \text{peso}(\text{gr}) &= 2.80309 \text{ cm}^3 \times 7.87 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \\ \text{peso}(\text{gr}) &= 22.07 \text{ gr} \end{aligned}$$

➤ CORREA DE TRANSMISION

La correa de transmisión es un componente mecánico que permite transmitir potencia de una manera eficiente y sin desfase. Consiste en un bucle de material flexible que conecta múltiples engranajes, lo que permite una transmisión de potencia silenciosa y con una mayor vida útil que otros sistemas de transmisión, como las cadenas.

Para elegir la correa de transmisión adecuada para el sistema de transporte diseñado, se analizaron las diferentes correas de transmisión disponibles en el mercado, llegando a la conclusión que la correa indicada a utilizar es una correa dentada síncrona, ya que evita cualquier tipo de desfase y permite un movimiento preciso, además de que no requiere engrase o lubricación de los componentes de transmisión.

Entre las correas síncronas se encuentran dos tipos de perfiles de dientes normalizados: trapecoidal y curvilíneo. Sin embargo, las correas dentadas con perfiles curvilíneos permiten una mejor distribución de las tensiones, concentrándolas en el centro de los dientes de engranaje, al contrario de las correas dentadas de perfil trapecoidal, en las que los niveles de tensión se concentran en su mayoría en la esquina de la base del diente del lado que arrastra la polea, lo cual reduce su duración, por esta razón se decidió optar por el uso de una correa síncrona de perfil curvilíneo, en la Figura 13. Se logra apreciar la distribución de tensiones de los dos tipos de correas síncronas mencionados en este párrafo.

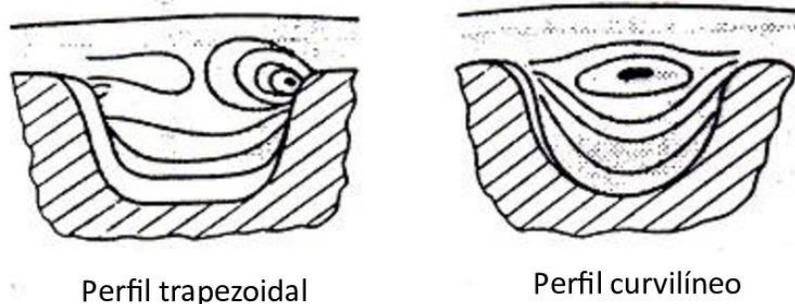


Figura 13. Distribución de tensiones en correas dentadas. (Fuente: [26].)

En la Tabla 9. Se evidencia las dimensiones normalizadas para las correas dentadas con perfil de diente curvilíneo.

Tabla 9. Dimensiones para correas síncronas de perfil curvilíneo HTD

Dimensiones para correas síncronas de perfil curvilíneo HTD		
Paso P mm	H mm	h1 mm
3	2.40	1.20
5	3.80	2.10
8	5.60	3.40
14	10.00	6.10

Fuente: elaboración propia. (Datos: correas de transmisión, ingemecanica.com [26].)

Considerando que el fabricante del piñón ha establecido un paso de cadena de 5 mm, se puede determinar con ayuda de la Tabla 9. Que la altura de los dientes de la correa de transmisión debe ser de 2.1 mm. De igual manera, de acuerdo con la normativa para sistemas de transmisión de potencia, el ancho mínimo requerido para un paso de 5 mm es de 9 mm [26]. Por lo tanto, se ha optado por utilizar una correa de transmisión con estas características: altura (h_1) de 2.1 mm, un paso de 5 mm y un grosor de 10 mm.

Es importante resaltar la necesidad de utilizar un tensor de cadena, este es un elemento que permite el correcto funcionamiento de la correa de transmisión, manteniendo la tensión correcta a lo largo del ciclo de servicio de la correa, en este caso se decidió utilizar un tensor de estiramiento de correa de impresora 3d dado que se ajusta a el grosor estimado y permite variar la tensión aplicada a la correa de transmisión, en la Figura 14. Se puede evidenciar un tensor de correa de impresora 3d.

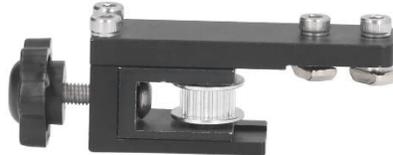


Figura 14. Tensor de cadena de impresora 3d (Fuente: [27]).

MONITOREO DE LA PELICULA RADIOGRAFICA

Para estimar la ubicación de la película radiográfica en la cámara de secado se utilizarán dos sensores de presencia, uno para detectar la entrada de la película y otro para confirmar su completa ubicación en la cámara y su posterior salida. Para seleccionar los sensores adecuados, se consideraron parámetros como el rango de medición, precisión en ambientes cerrados, resistencia a altas temperaturas y compatibilidad con el microcontrolador utilizado. Tras una revisión bibliográfica, se determinó que los sensores capacitivos, ultrasónicos y ópticos son adecuados para detectar materiales no metálicos como la película radiográfica. En la Tabla 10. Se especifican los requerimientos técnicos para los sensores de presencia necesarios en el monitoreo de la película radiográfica.

Tabla 10. Requerimientos técnicos para la elección del sensor de presencia

Parámetro técnico	Descripción
Tipo de sensor.	Capacitivo, ultrasónico o óptico
Tipo de comunicación	UART (lectura análoga o digital).
Distancia mínima de medición	0.5 cm a 3 cm
Temperatura de operación (ambiente de operación).	15°C a 60°C
Condiciones de operación.	Ambiente cerrado (cámara de secado).
Voltaje de operación	Max 5 V

Fuente: elaboración propia.

Una vez identificados los requerimientos técnicos necesarios para seleccionar los sensores de presencia adecuados, se analizaron varias referencias de sensores de presencia disponibles en el mercado. El objetivo era determinar el sensor que cumpliera con las prestaciones

necesarias para el prototipo diseñado. En las Tablas 11. Y 12. Se evidencia la comparación entre los sensores analizados más relevantes.

Tabla 11. Comparación de sensores de presencia presentes en el mercado – parte 1.

Referencia	HC-SR04	Sharp GP2Y0D805Z0F	Conjunto de sensores QTR-3RC
Sensor.			
Tipo de sensor.	Ultrasónico.	Infrarrojo-reflectivo.	Infrarrojo-reflectivo.
Tipo de lectura.	Digital.	Digital	Digital
Rango de medición.	4cm a 450 cm.	0.5 cm a 5 cm	3mm a 9mm
Dimensiones del circuito.	43 x 20 x 17 mm	21,6 x 8,9 x 10,4 mm	75mm x 13mm
Temperatura de operación.	10° C a 30°C.	-10°C a 60°C.	-10°C a 50°C.
Alimentación	5 V DC.	5 V DC.	3.3-5 V DC.
Consumo.	Suspendido < 2mA. Trabajando: 15mA.	Consumo medio: 5 mA.	Consumo medio: 100 mA.
Resolución.	0.3 cm.	No aplica.	No aplica.
Precio	\$6.000 COP	\$94.500	\$41.000

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Comparación de sensores de presencia presentes en el mercado – parte 2.

REFERENCIA	Sensor de proximidad LJC18A3-H-Z/BY PNP	Fotocélula WTB4FT- 22161120 ^a 00	Sensor Óptico EE-SY1200.
Sensor.			

Tipo de sensor.	CAPACITIVO	OPTICO.	OPTICO-INFRARROJO.
Tipo de lectura.	DIGITAL. Salida NPN NO (Detección: GND, Reposo: VCC)	DIGITAL.	FOTOTRANSISTOR
Rango de medición.	1mm a 5mm.	7mm a 120 mm	3mm a 9mm
Frecuencia de muestreo	0.5 Hz.	434 Hz	16 Hz
Dimensiones del circuito.	Diámetro 18mm Longitud 70mm	(An x Al x Pr) 16 mm x 40,1 mm x 12,1 mm	(An x Al x Pr) 3.2 cm x 1.9 cm x 1.1 cm.
Temperatura de operación.	-25 a 70°C	-40°C a 60 °C	-25°C a 85°C.
Alimentación	5 a 36V DC	12-24 V DC.	12 V DC
Consumo.	Consumo medio: 20 mA.	Consumo medio: 25 mA.	Consumo medio: 20 mA.
Resolución.	No aplica.	No aplica.	No aplica.
Precio	\$49.500 COP	\$1.765.000	\$50.000

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los factores comparados las Tablas 11. Y 12. Se analizó la viabilidad de cada uno de los sensores, permitiendo deducir el sensor adecuado para el monitoreo de la película radiográfica. El sensor HC-SR04, debido a su lectura ultrasónica, tiene baja precisión y su medición puede verse afectada por la orientación de la superficie medida. Además, no es adecuado para entornos cerrados con gran número de objetos, ya que el sonido puede rebotar en las superficies circundantes generando ecos y por lo tanto falsas mediciones.

En cuanto al sensor Sharp GP2Y0D805Z0F, es un sensor con un bajo consumo de corriente y una velocidad de muestreo cercana a los 400 Hz lo que permite una respuesta rápida, sin embargo, teniendo en cuenta su temperatura de operación, debe tener una ubicación estratégica en la cámara de secado para evitar que exceda su límite de temperatura.

Por su parte, el sensor QTR-3RC, es una muy buena opción para el prototipo, este arreglo de sensores ofrece mediciones cortas, confiables y de bajo costo. Además, en caso de fallo de uno de los sensores del arreglo, aun se pueden obtener mediciones confiables de los otros sensores en funcionamiento.

El Sensor de proximidad LJC18A3-H-Z/BY PNP es confiable y tiene una buena temperatura de operación que le permite ser ubicado en cualquier parte de la Cámara de secado. A pesar de ser un sensor industrial, su voltaje de funcionamiento es de 5 V, lo que permite una fácil integración a sistemas digitales como Arduino, Pícs o PLCS.

La Fococélula WTB4FT-22161120^a00 tiene un alto rendimiento y precisión en la detección de objetos reflectantes o poco transparentes. Sin embargo, su costo es considerablemente elevado en comparación con otras opciones analizadas.

Por último, se analizó el sensor Óptico EE-SY1200, que presenta buenas prestaciones a un bajo precio. Es compacto, lo que permite su ubicación en un espacio reducido, y soporta altas temperaturas permitiendo su ubicación dentro de la Cámara de secado, sin embargo, su disponibilidad en el mercado es limitada, lo que puede generar inconvenientes en caso de ser necesario reemplazar el sensor en el futuro.

Teniendo en cuenta las prestaciones y características de cada uno de los sensores analizados se optó por el uso de dos arreglos de sensores QTR-3RC para monitorear tanto la entrada como la salida de la película radiográfica, debido a que estos sensores tienen un bajo costo y cumplen con las especificaciones requeridas, además tiene la ventaja de brindar un monitoreo multipunto teniendo en cuenta que incorpora 3 sensores infrarrojos en la misma placa. La temperatura de operación de estos sensores no debe ser superior a 50 ° C, por esta razón con el fin de no afectar el correcto funcionamiento de estos dispositivos se deben ubicar a una distancia prudente de la fuente de calor en el diseño estructural del prototipo.

Parámetros para la selección del motor

Es necesario que el motor utilizado para impulsar el transportador de rodillos tenga el torque necesario para mover el total de la carga, para tener una mayor precisión y seguridad al momento de seleccionar el motor para esta función. Para dimensionar de mejor manera las fuerzas implicadas en el movimiento, en la Figura 15. Se logra apreciar un diagrama con las fuerzas aplicadas.

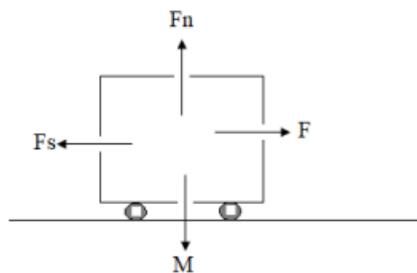


Figura 15. Masa con las fuerzas aplicadas. (Fuente: elaboración propia.)

se realizaron los siguientes cálculos para hallar el torque necesario para mover el transportador de rodillos.

Teniendo en cuenta que:

Peso total de los rodillos = 2.52 Kg.
Peso total de los piñones = 221 gr.
Peso del objeto a mover → M = 2.74 Kg
Fuera necesaria para mover el objeto → F
Fuerza de fricción → Fs.

Según la ley de coulomb de la fricción estática:

$$\text{Fuerza (F)} = \text{Peso de la carga (P)} \times \text{Coeficiente de fricción estática } (\mu_s) \quad (4)$$

En este caso el Coeficiente de fricción estática (μ_s) = 0.15 (metal – metal).

Por lo tanto:

$$\text{Fuerza (F)} = (2,74 \text{ Kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2) \times 0.15 = 4.0278 \text{ N}$$

Según el principio de la palanca:

$$\text{Torque (T)} = F \times R \quad (5)$$

Donde:

F = Fuerza necesaria para mover la carga.

R = radio del eje de rotación = 1,3 cm = 0.013 m.

Por lo tanto:

$$\text{Torque (T)} = 4.0278 \text{ N} \times 0.013 \text{ m} = 0.0523614 \text{ N/m.}$$

Según los cálculos realizados es necesario un torque de 0.0523614 N/m para mover el transportador de rodillos, las directivas de la empresa sugirieron utilizar en este apartado un motor CARDONE 47-4528 el cual está disponible en la empresa, este motor tiene un torque nominal de 3 N/m lo que permitiría mover fácilmente el trasportador de rodillos, en la Figura 16. se evidencia el motor CARDONE seleccionado y sus especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 13.



Figura 16. Motor CARDONE 47-4528. (Fuente: [28])

Tabla 13. Especificaciones técnicas del motor CARDONE 47-4528

Especificaciones del motor CARDONE 47-4528	
Torque nominal	3 N/m
Velocidad de salida	75 r.p.m.
Voltaje de operación	12 V Dc.
Potencia	40 W

Fuente: elaboración propia.

Para regular la velocidad del motor CARDONE 47 -4528, se usará el driver BTS7960 el cual fue seleccionado debido a que permite controlar la velocidad del motor a través de señales digitales PWM, es económico y puede proporcionar la corriente necesaria para el funcionamiento del motor CARDONE 47 -4528. Las características de este driver se evidencian en la tabla 14.

Tabla 14. Especificaciones técnicas del Driver BTS7960.

Especificaciones del Driver BTS7960	
Voltaje de entrada	6 V a 27 V Dc
Corriente máxima	43 A.
Capacidad PWM	Hasta 25 KHz
Nivel de entrada de control	3.3 V – 5V
Modo de control	PWM o nivel de voltaje
Dimensiones	50x50x42 mm.
Peso	50 gr,

Fuente: elaboración propia. (datos tomados del datasheet del driver BTS7960).

Para una mejor comprensión del funcionamiento ideal del sistema, se elaboró un diagrama de bloques teniendo en cuenta los métodos y dispositivos seleccionados para llevar a cabo el transporte de la película radiográfica, en este diagrama se evidencian los principales procesos involucrados en el traslado de la película radiográfica a través del sistema de secado. En la Figura 17. se evidencia el diagrama de bloques realizado.

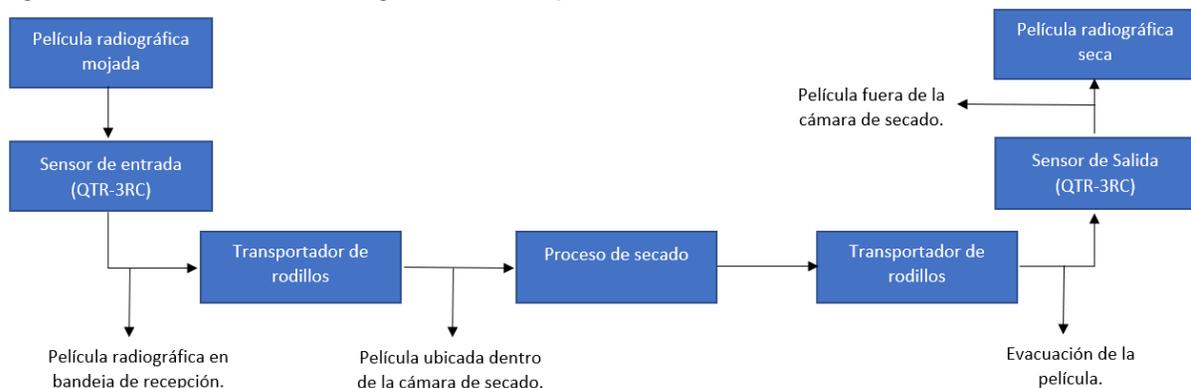


Figura 17. Diagrama de bloques del sistema de transporte radiográfico. (Fuente: elaboración propia.)

Materiales y dispositivos seleccionados para el sistema de transporte

De acuerdo con la revisión bibliográfica, cálculos y selección realizada, así como la información proporcionada por los fabricantes, los materiales y dispositivos a utilizar en el sistema de transporte de la película radiográfica son los evidenciados en la Tabla 15. En la cual se tienen en cuenta características como las dimensiones que fueron utilizadas para realizar el modelo tridimensional del prototipo, así como el peso de los elementos el cual se tuvo en cuenta para los cálculos del torque necesario en el motor.

Tabla 15. Materiales y dispositivos seleccionados para en el sistema de transporte.

Material	Cantidad	Peso	Peso total
Eje metálico	10	117.6162 <i>gr</i>	1.116,2 gr
Cilindro	10	140.12 <i>gr</i>	1.4012,2 gr
Soporte "chumacera"	10	26,4 gr	264 gr
piñón con chaveta	6	22,07 gr	132,4 gr
Tensor de correa de Transmisión	1	110 gr	110 gr
Motor CARDONE 47-4528	1	310 gr	310 gr
Driver BTS7960	1	50 gr	50 gr
Sensor QTR-3RC	2	6 gr	6 gr

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 18. se muestra un modelo 3D del prototipo del sistema de transporte radiográfico diseñado utilizando el software de diseño Tinkercad. Este software se seleccionó por su versatilidad y capacidad para diseñar piezas 3D complejas a escala real. La figura presenta los materiales y dispositivos previamente seleccionados, como el transportador de rodillos, el sistema de transmisión de potencia, el motor DC, y los sensores de monitoreo.

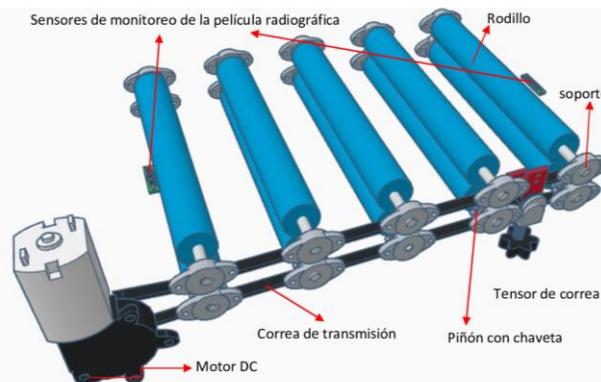


Figura 18. Modelo en Tinkercad del sistema diseñado para el transporte de la película radiográfica con sus partes (Fuente: elaboración propia).

Para una mejor visualización del dimensionamiento y ubicación de los dispositivos en el diseño realizado, en la Figura 19. Se puede observar el modelo realizado en Tinkercad desde diferentes perspectivas.

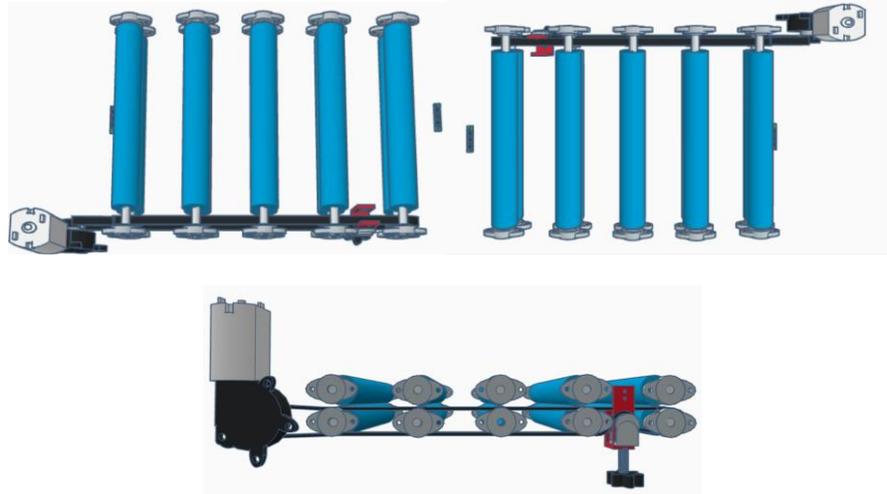


Figura 19. Vista de diferentes perspectivas del modelo en Tinkercad del sistema diseñado para el transporte de la película radiográfica (Fuente: elaboración propia).

4.5.2. Sistema de control de temperatura

Como su nombre lo indica este sistema permite mantener la temperatura del aire ingresado a la cámara de secado en un valor deseado, de acuerdo con la investigación desarrollada, el control de temperatura debe permitir variar la temperatura en un rango de 20°C a 65°C, además en caso de sobrecalentamiento, debe permitir la desactivación automática de la fuente de calor con el fin de evitar daños por sobrecalentamiento en la película radiográfica.

Para la elección del sistema de control de temperatura se realizó un análisis de los tipos de controladores disponibles a nivel industrial, de acuerdo con su acción de control los sistemas de control de temperatura se clasifican en: de dos posiciones (On - Off), proporcional, integral, derivativo, proporcional integral (PI) y proporcional integral derivativo (PID).

Según el análisis realizado y las tecnologías empleadas en los secadores radiográficos presentes en la industria, como el gabinete de secado CCX-YJII, se determinó que el sistema de control de temperatura adecuado para el prototipo diseñado es el tipo PID, que ofrece precisión y estabilidad en la variable a controlar gracias a la utilización de acciones proporcionales, derivativas e integrativas en la señal de control. Además, permite una rápida respuesta del sistema, aumentando su eficiencia y ahorro energético.

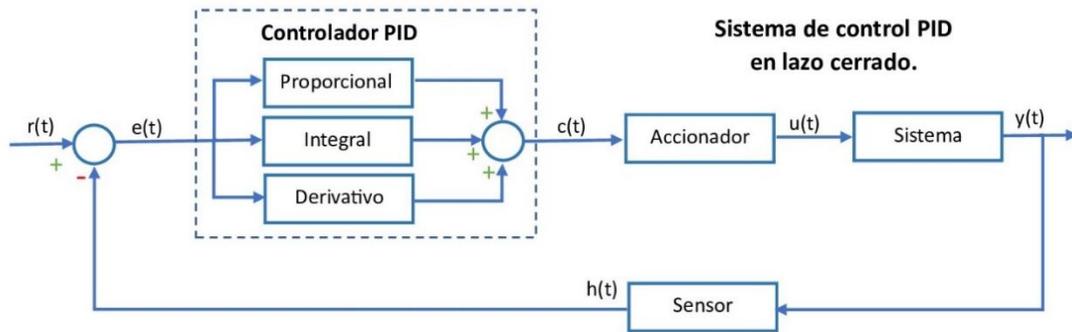


Figura 20. Sistema de control PID (Fuente: Elaboración propia.)

Como se evidencia en la Figura 20. El control PID seleccionado, genera una señal de control a partir del error, este error consiste en la diferencia entre la referencia de temperatura deseada y el valor medido por un sensor de temperatura presente en el proceso; la señal de control generada actúa sobre el accionador que en este caso es una resistencia calefactora ubicada paralelamente al ingreso del aire, modificando así, la temperatura del aire impulsado. Por lo tanto, para el desarrollo del control de temperatura es necesario la elección de tres componentes principales: sensores de temperatura para el monitoreo constante de la temperatura del aire en la cámara de secado, una resistencia calefactora para modificar la temperatura del aire ingresado a la cámara, y ventiladores que permiten la convección forzada del aire, y un microcontrolador para generar la señal de control y monitorear el proceso en tiempo real. La elección del microcontrolador se realizó posteriormente (Véase 4.5.5.) considerando las funciones y variables necesarias para el diseño completo de la secadora.

4.5.2.1. Sensor de temperatura

Este dispositivo se encarga de medir las fluctuaciones de temperatura en la cámara de secado mediante señales eléctricas. Es crucial asegurar que la temperatura se mantenga dentro de un rango óptimo durante el proceso de secado para garantizar la seguridad y evitar cualquier posible afectación en la calidad radiográfica. Por lo tanto, la elección de un sensor de temperatura preciso es esencial para evitar mediciones inexactas, así como seleccionar un dispositivo de alta calidad con una construcción adecuada para resistir los rangos de temperatura y las condiciones del entorno en el que se utilizará.

En la Tabla 16. se evidencian los requerimientos técnicos con los que debe cumplir el sensor de temperatura a utilizar.

Tabla 16. Requerimientos técnicos para la elección del sensor de temperatura

Parámetro técnico	Descripción
Tipo de comunicación	UART (lectura analógica o digital).
Rango mínimo de temperatura de trabajo	10°C a 90 °C
Precisión mínima	± 2°C
Material y construcción	Resistencia a altas temperaturas y humedad.
Condiciones de operación.	Ambiente cerrado (cámara de secado).
Voltaje de operación	Max 5 V

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de realizar una correcta elección sensor de temperatura a utilizar, se realizó una revisión bibliográfica con respecto a las diferentes tipologías de sensores de temperatura, en la cual se encontró que los sensores de temperatura más utilizados son los termopares, los termistores y los detectores de temperatura por resistencia (RTD). Se compararon estas tipologías según varios criterios como precisión, estabilidad, rango de temperatura, entre otros factores. La Tabla 17. muestra los resultados de la comparación.

Tabla 17. Comparación de tipologías de sensores de temperatura.

CRITERIO	TERMOPAR	RTD	TERMISTOR
Rango de temperaturas	Muy amplio (-267°C-2315°C)	Amplio (-50°C-500°C)	Estrecho (-50°C a 150°C)
Precisión	Mediana	Alta	Mediana
Estabilidad a largo plazo	Deficiente (en especial ambientes corrosivos)	Bueno	Deficiente
Linealidad	Razonable	Buena	Deficiente
Autocalentamiento	No	Bajo	Alto.
Respuesta	Rápida	Buena	Rápida
Intercambiabilidad	Bueno	Excelente	Deficiente
Ventajas	Sencillo y barato.	Resistente a la corrosión	Alta sensibilidad a la temperatura.

Fuente: elaboración propia.

Tras comparar los distintos factores y criterios en la Tabla 17., se concluyó que el sensor de temperatura por resistencia (RTD) es el más adecuado para el prototipo debido a su alta linealidad y precisión en un amplio rango de temperaturas, así como su resistencia a la corrosión, el cual es un aspecto crucial teniendo en cuenta que se utilizara en un entorno húmedo y corrosivo. Se selecciono un sensor RTD de platino, el cual no se ve afectado por la corrosión ni la oxidación. Específicamente se optó por los sensores PT100 debido a su precio económico y la confiabilidad de sus lecturas, además, estos sensores tienen la ventaja de que

interrumpen el circuito cuando deja de funcionar correctamente. Por otra parte, los sensores PT100 tienen una alta precisión con un error de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. los demás detalles acerca de las especificaciones del sensor PT100 seleccionado, se pueden evidenciar en la Tabla 18.

Tabla 18. Especificaciones del sensor de temperatura PT-100 seleccionado.

Especificaciones del sensor de temperatura seleccionado	
Sensor de temperatura	Pt 100
Tipo de sensor	Resistivo (RTD)
Tipo de lectura	Análoga (compatible con comunicación UART)
Precisión	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ de -10°C a $+ 85^{\circ}\text{C}$
Conexión	3 hilos
Dimensiones	Diámetro 4 mm Longitud 30mm
Longitud del cable	1 metro
factor de temperatura de resistencia	Positivo
variación de resistencia es función de la temperatura	$0.385 \Omega/^{\circ}\text{C}$ nominal

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 21. se puede evidenciar el sensor de temperatura PT-100 seleccionado para su uso en el prototipo.



Figura 21. Sensor de temperatura PT100 (Fuente: [30].)

5.5.2.2. Ventiladores

Los ventiladores son elementos clave en la operación del control de temperatura, permiten la circulación forzada del aire hacia la cámara de secado. Los tipos más comunes de ventiladores utilizados en la industria son los axiales y los centrífugos, se compararon ambos tipos, para determinar cuál es el más adecuado para el prototipo. En la Tabla 19. se evidencian los resultados obtenidos en la comparación realizada.

Tabla 19. Comparación entre el ventilador axial y el ventilador centrífugo.

Características	Ventilador Axial	Ventilador centrífugo
Tipo de diseño	Aspas montadas en un eje accionado por un motor	Rodete que gira dentro de una carcasa en forma de caracol.
Tipo de flujo de aire	Flujo de aire paralelo al eje central	Flujo de aire perpendicular al eje central
Resistencia al flujo de aire	Baja	Alta
Capacidad de presión	Baja presión	Alta presión
Volumen de aire	Proporciona grandes volúmenes de aire a baja presión	Menor volumen de aire a alta presión
Peso y tamaño	Mas ligero y menos voluminoso	Mas pesado y voluminoso
Ruido	Menos ruidoso	Mas ruidoso
Eficiencia	Mayor eficiencia en la transmisión del aire	Menor eficiencia en la transmisión del aire
Uso recomendado	Aplicaciones donde la resistencia al flujo de aire es baja, como en estructuras donde no hay sistemas de conducción	Operaciones donde se requiere una alta presión del aire como en conductos de ventilación
Mantenimiento	Fácil reparación y mantenimiento debido a su estructura simplificada con menos piezas	Requiere mas mantenimiento debido a su compleja estructura con mas piezas móviles
Costo	Menor costo	Mayor costo

Fuente: elaboración propia.

En base a la Tabla 19. y la investigación bibliográfica realizada, se concluyó que el ventilador axial es el más adecuado para el prototipo, debido a que proporciona grandes volúmenes de aire a baja presión, cabe resaltar que es necesario un alto volumen de aire para que interactúe con la superficie húmeda de la película radiografía y de esta manera la velocidad de evaporación aumente (véase 4.2.3.2.). Además, los ventiladores axiales son más efectivos para mover aire en un espacio reducido, son menos costosos y requieren un menor mantenimiento en comparación con los ventiladores centrífugos.

Teniendo en cuenta estas estimaciones, se le informo a los directores de la empresa International Nuclear Industry sobre la necesidad de utilizar ventiladores axiales en el prototipo diseñado. En respuesta, se sugirió utilizar los ventiladores axiales Dayton 4WT42, los cuales están disponibles en la empresa y permitirían ahorrar costos en la construcción física del prototipo. Así pues, se vio necesario el uso de dos ventiladores Dayton para lograr cubrir la superficie lateral de la película radiográfica. Las especificaciones de este ventilador se evidencian en la Tabla 20.

Tabla 20. Especificaciones del ventilador Dayton 4WT42

Especificaciones del ventilador Dayton 4WT42	
Referencia	4WT42
Tipo	Ventilador Axial
Voltaje nominal	115 V AC
Potencia eléctrica	27 W
Dimensiones	L x A: 171 x 151 mm
Profundidad	51 mm
Temperatura de operación	-10°C – 70°C
Flujo de aire	239 CFM
Velocidad	3200 R.P.M.

Fuente: elaboración propia (Datos: Hoja de datos Dayton® AC Axial Fans [31])

4.5.2.2. Resistencia calefactora

Las resistencias calefactoras son dispositivos que disipan una energía en forma de calor cuando se les aplica una corriente eléctrica (efecto joule), realizando una revisión bibliográfica acerca de este apartado, se identificó que las resistencias de calefacción de aire funcionan por convección, normalmente están fabricadas en materiales altamente resistivos como el nicrom y recubiertas con un blindaje en acero inoxidable, su diseño es tubular con una cantidad de aletas que pueden tener formas planas o helicoidales, en este caso se escogió un diseño con aletas planas como se evidencia en la Figura 22. ya que estas aletas le permiten una mayor zona de contacto con el aire circulante y generan una poca obstrucción a su paso. Cabe resaltar que estas resistencias deben ubicarse dentro de una carcasa a la cual se le denomina batería de calefacción, la cual permite una instalación segura dentro de conductos de ventilación y protege las conexiones del calor generado.



Figura 22. Resistencia calefactora tubular aleteada (Fuente: [32].)

Se realizaron algunos cálculos para calcular la potencia térmica requerida en la resistencia calefactora para calentar el aire impulsado por los ventiladores seleccionados, con ayuda de la fórmula para la determinación de requerimiento térmico para el calentamiento de un gas a presión atmosférica la cual se evidencia en la ecuación (6), los cálculos realizados son los siguientes:

$$kW = \frac{CFM * lbs/ft^3 * 60 min * Cp * \Delta T * SF}{3412 Btu/KW} \quad (6)$$

CFM = tasa del flujo de aire = 239

lbs/ft^3 = Densidad del aire a temperatura inicial (25°C) = $1.19 kg/m^3 = 0.0805 lb/ft^3$

Cp. = calor específico del aire = 0.244 Kcal/Kg

ΔT = aumento de temperatura en °F.

$\Delta T = \text{Temperatura final} - \text{temperatura inicial}$

$\Delta T = 158°F(70°C) - 77°F(25°C) = 81°F$

SF = Factor de seguridad sugerido = 1.2 ft^2

$$kW = \frac{239 * 0.0805 lbs/ft^3 * 60 \text{ min} * 0.244 \text{ Kcal/Kg} * 81°F * 1.2 \text{ ft}^2}{3412 \text{ Btu/KW}}$$

$$kW = 8.024$$

Según los cálculos realizados, se determinó que la resistencia necesaria para calentar el flujo de aire de un ventilador Dayton 4WT42 es de 8.024 kW, este valor representa una potencia excesivamente alta teniendo en cuenta que la potencia de consumo en los secadores radiográficos analizados es de máximo 1.6 kW. Por lo tanto, no es viable utilizar este tipo de ventilador, ya que la resistencia necesaria tendría un consumo excesivo de energía eléctrica. Para resolver este problema, se propuso utilizar dos ventiladores con un flujo de aire máximo de 30 CFM (pies cúbicos por minuto) cada uno, lo que permitiría reducir la potencia requerida en la resistencia calefactora a 2 kW. Es importante destacar que en estos cálculos, se consideró que la potencia térmica obtenida se aproxima a la potencia eléctrica debido al alto rendimiento en la transformación de energía eléctrica en energía térmica por efecto Joule [53]. A continuación, se evidencian los cálculos realizados de potencia térmica requerida para un ventilador con flujo de aire de 30 CFM:

$$kW = \frac{CFM * lbs/ft^3 * 60 \text{ min} * Cp * \Delta T * SF}{3412 \text{ Btu/KW}} \quad (6)$$

$$kW = \frac{30 * 0.0805 lbs/ft^3 * 60 \text{ min} * 0.244 \text{ Kcal/Kg} * 81°F * 1.2 \text{ ft}^2}{3412 \text{ Btu/KW}}$$

$$kW = 1.0071$$

Se realizó el análisis de una amplia variedad de ventiladores disponibles en el mercado, con el objetivo de seleccionar un ventilador con un tamaño adecuado para cubrir una gran parte de la película radiográfica, y un flujo de aire generado cercano a los 30 CFM, un factor crítico para lograr la calefacción adecuada del aire mediante una resistencia calefactora de 2 kW. Después del análisis, se llegó a la conclusión de que el ventilador TFS1202512H era una opción viable, debido a que además de ser económico, cuenta con las especificaciones necesarias para el proyecto. En la Tabla 21. se evidencian sus especificaciones técnicas.

Tabla 21. Especificaciones del ventilador axial CNDF TFS1202512H

REFERENCIA	TFS1202512H
Tipo de ventilador	Axial
Voltaje de operación	12 V DC
Potencia	2.28 W
Dimensiones	(Ancho x Alto x Profundidad) 120 mm x 120 mm x 25 mm
Corriente	0.19 A
Velocidad de giro	1800 R.P.M.
Flujo de aire	65.63 CFM
Peso	126 gr.

Fuente: elaboración propia (Datos tomados de [50]).

Cabe resaltar que para lograr el flujo de aire requerido de 30 CFM en el ventilador seleccionado, es necesario reducir su velocidad. Se optó por esta opción debido al alto costo de ventiladores con estas dimensiones y un flujo de aire aproximado a 30 CFM. Para regular la velocidad del ventilador TFS1202512H seleccionado y reducir su flujo de aire, se utilizará un controlador L298N. Como medida de prevención térmica en caso de sobrecalentamiento, se suspenderá el suministro de energía eléctrica a las resistencias calefactoras si el sensor de temperatura no funciona correctamente y/o la temperatura registrada en la cámara de secado es superior a 65°C, en la Figura 23. se evidencia el modelo 3D de la batería de resistencias calefactoras diseñado en Tinkercad para el prototipo.

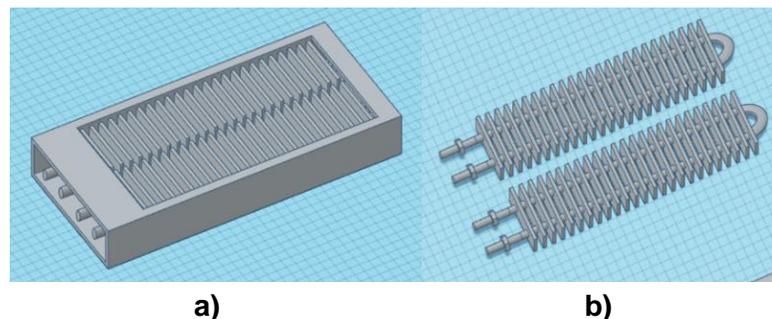


Figura 23. Modelos 3D diseñados en Tinkercad a) Batería de resistencias calefactoras. b) Resistencias calefactoras aleteadas (Fuente: elaboración propia.)

Para regular la potencia calorífica de la resistencia calefactora y en consecuencia la temperatura del aire, se hará uso de un relé de estado sólido (SSR), el cual permite interrumpir o entregar la potencia a la resistencia por medio de una señal de control generada por el microcontrolador. Para realizar su elección se tuvieron en cuenta algunos factores como la capacidad de carga la cual debe ser superior a 2 kW y la compatibilidad con la fuente de alimentación que en este caso será de 110 V AC. En consecuencia, se seleccionó el Fitek SSR-25DA, que cumple con las características de capacidad de carga y voltaje de funcionamiento requeridos, además permite un control preciso de la potencia entregada a la resistencia debido a que implementa un detector de cruce pro cero de la fuente alterna, en la

Figura 24. Se evidencia el relé seleccionado y en la Tabla 22. se encuentran sus especificaciones técnicas.



Figura 24. Relé de estado sólido Fotek SSR-25DA. (Fuente: [65])

Tabla 22. Especificaciones del módulo Relé de estado sólido seleccionado.

Referencia	Fotek SSR-25DA
Corriente máxima de carga	25 amperios
Voltaje de carga	24 V AC – 380 V AC
Voltaje de control	3 V – 32 V DC
Tiempo de Respuesta	ON < 10 ms, OFF < 10 ms
Detección de cruce por cero	Si
Dimensiones	36 x 45 x 26 mm.

Fuente: elaboración propia. (Datos: datasheet del Relé Fotek SSR-25DA).

Materiales y dispositivos seleccionados para el control de temperatura.

Tras realizar los cálculos correspondientes y seleccionar los materiales adecuados en esta sección, se ha determinado que se requieren los siguientes dispositivos para lograr un control de temperatura efectivo dentro de la cámara de secado:

Tabla 23. Dispositivos y materiales seleccionados para el control de temperatura

Dispositivo	Cantidad
Sensor de temperatura PT-100	2
Ventilador CNDF TFS1202512H	2
Puente H L298N	1
Batería de resistencias calefactoras	1
Relé de estado sólido Fotek SSR-40DA.	1

Fuente: elaboración propia.

Para comprender de mejor manera el control de temperatura diseñado, en la Figura 25. Se muestra un diagrama de bloques donde se evidencian los procesos que intervienen en la regulación de temperatura durante el secado radiográfico.

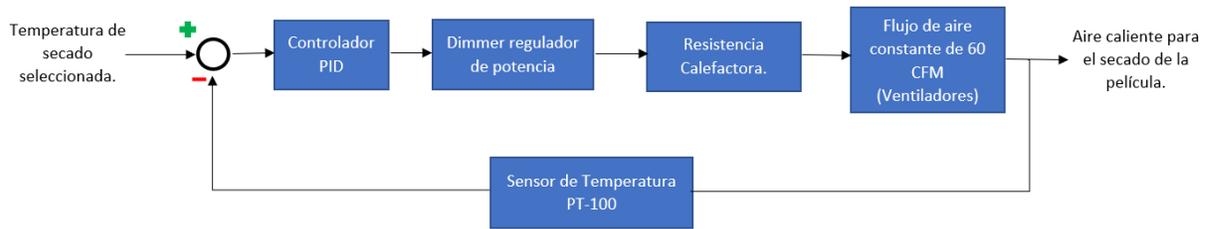


Figura 25. Diagrama de bloques del control de temperatura del aire. (Fuente: elaboración propia.)

Posteriormente, se modelaron los dispositivos del control de temperatura en Tinkercad para integrarlos en el diseño del prototipo diseñado. La ubicación de los dispositivos necesarios para el control de temperatura se puede evidenciar en la Figura 26. allí la fuente de calor (ventiladores y batería de calefacción) es perpendicular a la ubicación del sistema de rodillos. Esta disposición se eligió para favorecer la circulación de una corriente continua de aire fresco a través de la película radiográfica. Los sensores PT-100 se ubicaron al lado de dos chumaceras del sistema de rodillos, con el fin de fijarlos al chasis de la secadora (el cual se diseñó posteriormente), a través del mismo compartimiento utilizado para fijar las chumaceras.

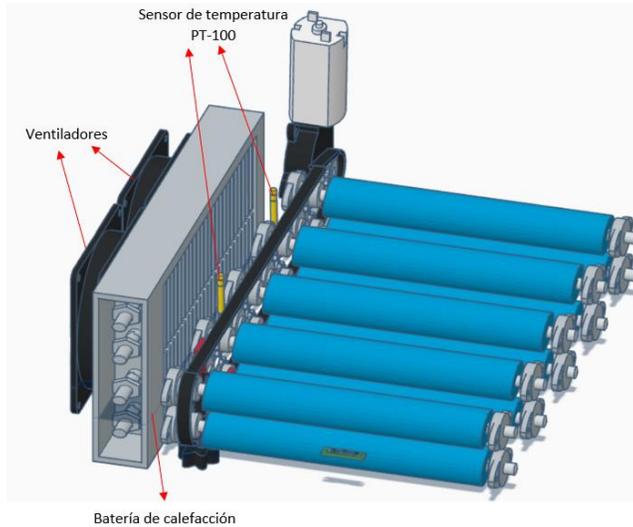


Figura 26. Modelo en Tinkercad del control de temperatura seleccionado para el prototipo. (Fuente: elaboración propia.)

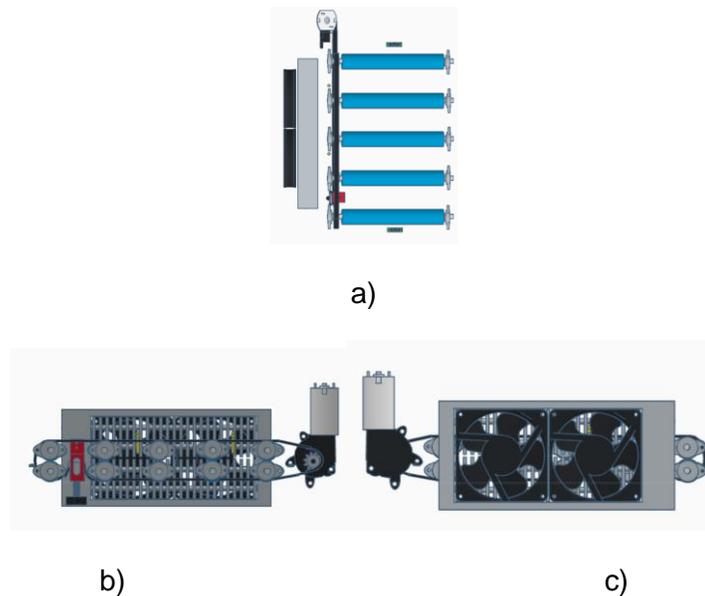


Figura 27. Vista desde diferentes perspectivas del modelo del prototipo con control de temperatura. a) Vista superior, b) Vista frontal, c) Vista posterior. (Fuente: elaboración propia).

Para tener una mejor comprensión de la ubicación de los componentes del control de temperatura en el prototipo, en la Figura 27. se evidencia el prototipo desde diferentes perspectivas.

4.5.3. Cámara de secado

En esta sección se aborda el diseño de la cámara de secado, entre los parámetros para su desarrollo, se tuvo en cuenta que esta debe contener y dar soporte a los dispositivos y materiales necesarios para el secado radiográfico, por consiguiente, para su elaboración se consideró previamente la ubicación de los dispositivos elegidos para el sistema de transporte radiográfico y control de temperatura. Además, para tener un secado eficiente y aprovechar la mayor parte del calor generado esta cámara debe priorizar poco intercambio de calor entre el ambiente exterior y la cámara de secado, por lo tanto, será un ambiente cerrado a excepción de los compartimientos de circulación de aire, los cuales permiten la expulsión del aire húmedo producto de su utilización en el proceso de secado.

Según la investigación realizada, una cámara de deshumidificación puede ser fabricada en aluminio, acero incluso con materiales como madera o concreto, el factor importante es que sea lo más hermética posible [34], teniendo en cuenta esto, se optó por la fabricación de la cámara de secado en acero inoxidable tipo 304, debido su larga vida útil, alta resistencia a la corrosión y a los impactos, y permite la construcción de estructuras complejas debido a su excelente soldabilidad. en cuanto a las secadoras radiográficas analizadas, se evidencia la fabricación en su gran mayoría en acero inoxidable. Para el prototipo se utilizaron láminas de acero inoxidable de 1,5 mm de espesor para garantizar la rigidez de la superficie de la cámara.

En primer lugar, se diseñaron los soportes necesarios para fijar los dispositivos que lo requirieron para darle estabilidad a la secadora. cómo se evidencia en la Figura 28. fue necesario diseñar diferentes tipos de soportes utilizados para fijar distintos dispositivos los cuales son: las chumaceras utilizadas para asegurar el sistema de transporte, las resistencias calefactoras, el motor utilizado para accionar el sistema de transporte, y en tensor de correa.

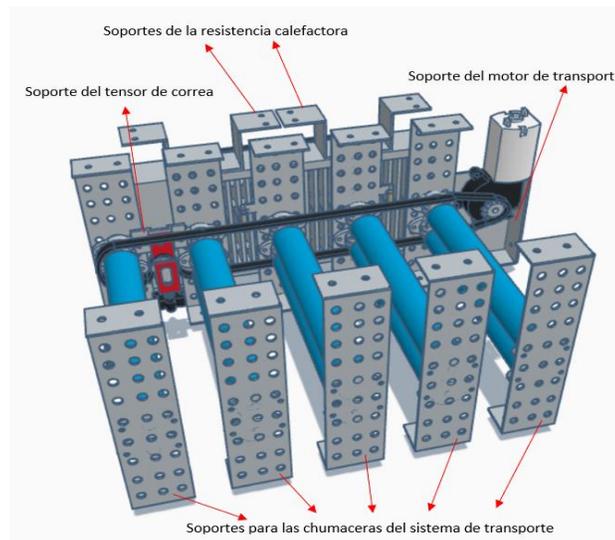


Figura 28. Modelo del prototipo con soportes para la cámara de secado (fuente: elaboración propia.)

A continuación, se describen las características de los soportes diseñados:

Los soportes para las chumaceras del sistema de transporte se diseñaron con unas dimensiones de 21 cm de alto y 5 cm de ancho, para esta estructura se utilizaron laminas perforadas con perforaciones de 50 mm, con el fin de que no obstruyan el paso del aire circulante, en la Figura 29. a). se evidencia la estructura del soporte para las chumaceras, sin embargo, en este diseño se evidencian pocas perforaciones en la estructura, esto se debe a limitaciones del software de diseño utilizado, sin embargo, en condiciones reales las láminas utilizadas tendrían una mayor cantidad de perforaciones. En la parte central de estos soportes se pueden evidenciar 4 pequeños orificios de 5 mm de diámetro, los cuales tienen la finalidad de ensamblar las chumaceras a el soporte lo cual se logra a través de tonillos de 13/64". Para asegurar estos soportes a la cámara de secado se le agregaron dos pestañas de 3 cm de largo, están ubicadas en la parte superior e inferior respectivamente, y con dos orificios circulares de 6,3 mm de diámetro, para ensamblar el soporte a la cámara de secado por medio de dos tornillos de 1/4".

En la Figura 29 b). se evidencia un soporte que cuenta con las mismas características del descrito anteriormente, con la particularidad de que se le agrego un pequeño compartimiento para sostener un sensor pt 100, el cual se puede observar en la sección lateral izquierda.

El soporte evidenciado en la Figura 29 c). fue diseñado para sostener el tensor de correa, los orificios de 6,3 mm ubicados en las secciones laterales están destinados a ensamblarlo a los

dos soportes de chumaceras ubicados en sus laterales (observar Figura 28.), por su parte los orificios ubicados en el centro tienen un diámetro de 3,9 mm y coinciden con el diámetro de los orificios ubicados en el tensor de cadena para su fijación, de acuerdo con las dimensiones estos se fijan por medio de dos tornillos de 5/32”.

En la Figura 29. d). se evidencia el soporte para el motor DC utilizado en el sistema de transporte, los tres orificios ubicados en la parte central tienen un diámetro de 7,3 mm y son utilizados para ensamblar el motor a el soporte usando tornillos de 19/64”. los 4 orificios en las pestañas laterales se utilizan para fijar el soporte a la cámara de secado usando tornillos de 1/4”.

Por último, en la Figura 29 e). se evidencia el soporte diseñado para sujetar la resistencia calefactora, las dimensiones de esta estructura tienen un largo de 14,8 cm de largo y 3,6 cm de ancho, cuenta con dos pestañas las cuales tienen dos orificios de 6,3 mm de diámetro a través de los cuales se ensambla el soporte a la cámara de secado. Cabe resaltar que la sección inferior de este soporte debe estar soldada a la resistencia calefactora y de esta forma lograr una fijación más segura teniendo en cuenta que en caso de que la resistencia se desubique se pueden generar graves daños en los dispositivos de la secadora.

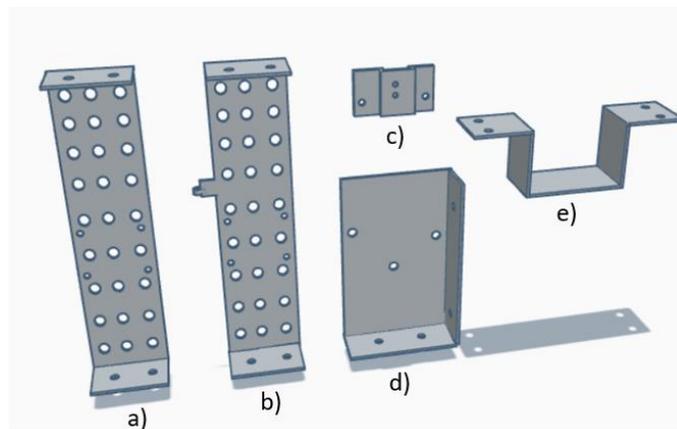


Figura 29. Soportes diseñados para diferentes dispositivos de la secadora: a) Soporte para las chumaceras del sistema de transporte. b) Soporte para chumaceras del sistema de transporte con compartimiento para sensor de temperatura PT 100. c) Soporte para el tensor de correa. D) Soporte para el motor DC del sistema de transporte. e) Soporte para la resistencia calefactora. (Fuente: elaboración propia.)

Una vez diseñados los soportes que dieran estabilidad a los dispositivos involucrados en el proceso de secado, se procedió a diseñar la estructura externa de la cámara de secado, para su elaboración se tuvieron en cuenta la ubicación, las dimensiones de las estructuras, y las funciones necesarias de los dispositivos ubicados dentro de la cámara, como resultado se obtuvo una estructura con 4 partes fundamentales: tapa lateral izquierda, tapa lateral derecha, lamina inferior, y tapa superior. En la Figura 30. se observan las partes de la estructura externa en la cámara de secado.

Las tapas laterales izquierda y derecha, evidenciadas en la Figura 30. a) y 30. b) cuentan con una serie de pestañas en su contorno, las cuales permiten el ensamble a la lámina inferior y la tapa superior, mediante los orificios observados, los cuales tiene un diámetro de 6,3 mm y se aseguran con tornillos de $\frac{1}{4}$ ". Otro factor notable en estas estructuras es el diseño de bandejas para la recepción y la salida de las películas radiográficas. La bandeja de recepción tiene una inclinación de 45° y unas dimensiones de 23 cm de largo y 20 cm de ancho, está tiene la finalidad de sostener la película radiográfica al inicio del proceso de secado, en cuanto a la bandeja de salida se evidencia que no tiene ninguna inclinación y cuenta con unas dimensiones de 30 cm de largo y 20 cm de ancho, su objetivo es recibir la película radiográfica una vez termine el proceso de secado. También se observa el diseño de soportes para los sensores utilizados en el monitoreo de la entrada y salida de la película radiográfica, los cuales son unas pequeñas laminas con unas dimensiones de 3,6 cm de largo y 1,3 cm de ancho.

En la Figura 30. c) y 30. d) se observa las estructuras de la lámina inferior y la tapa superior, que cuentan con una serie de orificios que se acoplan a los orificios de las láminas laterales, los soportes de las chumaceras, y de la resistencia calefactora para su correcto ensamblaje. cabe resaltar que en este caso se insertaron directamente tornillos de $\frac{1}{4}$ " en los orificios del modelo diseñado lo que le da un aspecto más realista. En la tapa superior se acoplan los soportes de la resistencia calefactora, por esta razón esta tiene una mayor cantidad de tornillos que la lámina inferior, además esta tapa dispone de aperturas para el ingreso y la evacuación de aire a la cámara de secado. En la sección frontal se evidencia una rejilla para la salida del aire utilizado en el proceso de desecación, mientras que en la sección trasera se ubicaron dos orificios que coinciden con el tamaño de los ventiladores implementados para permitir el ingreso de aire a la Cámara. Sin embargo, debido a la perspectiva de la figura, estos orificios no se logran ver en la imagen.

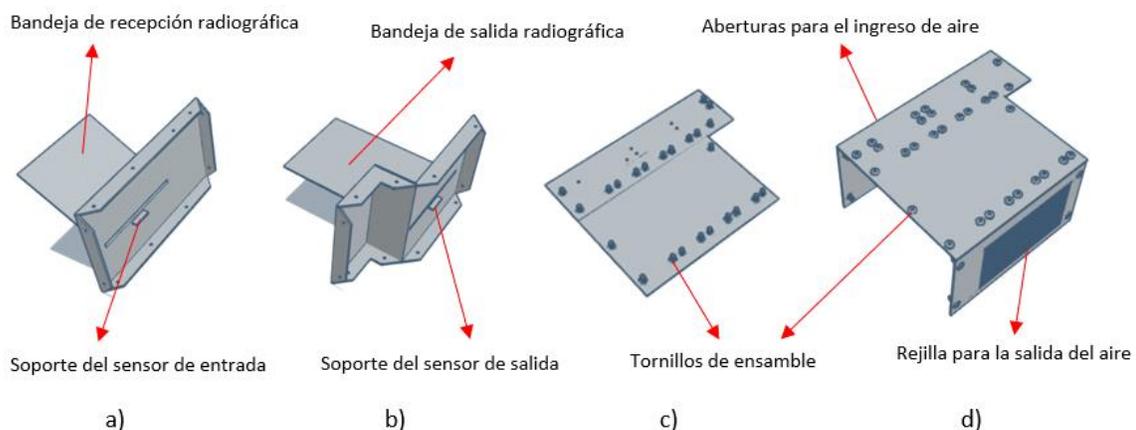


Figura 30. Partes de la estructura externa de la Cámara de secado. a) Tapa lateral izquierda. b) Tapa lateral derecha. c) Lamina inferior. D) Tapa superior.

En la Figura 31. se evidencia el prototipo diseñado con la Cámara de secado incorporada, en la imagen se puede observar el correcto acople entre la variedad de piezas diseñadas, como lo son los soportes de las chumaceras con las tapas laterales, y en general el acople de las piezas internas y externas de la cámara de secado. en la Figura 32. se puede evidenciar el

prototipo desde diferentes perspectivas y algunas medidas de la estructura, con lo cual se puede lograr un mejor dimensionamiento del tamaño y el aspecto del prototipo.

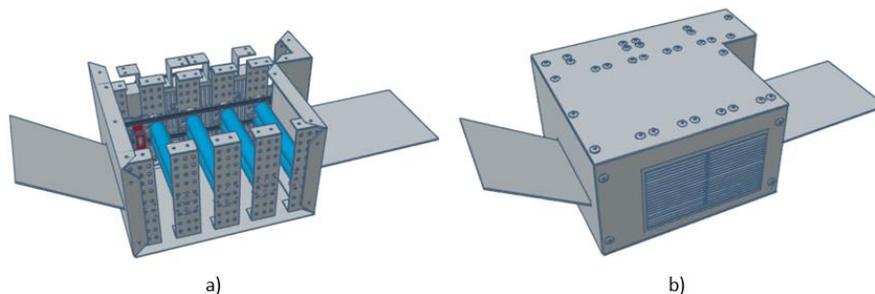


Figura 31. Prototipo con Cámara de secado incorporada. a) Sin tapa superior. b) Con tapa superior. (Fuente: elaboración propia.)

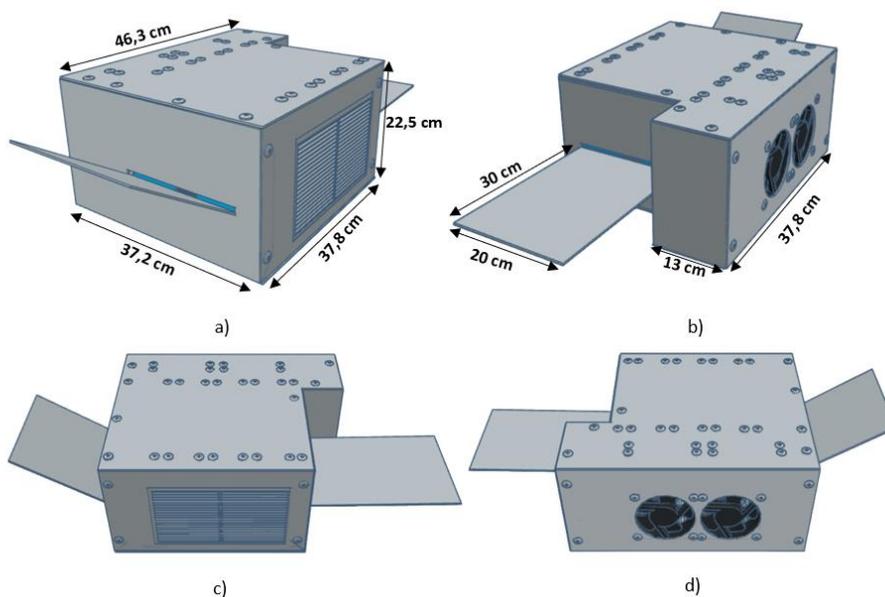


Figura 32. Vista desde diferentes perspectivas del prototipo con la Cámara de secado incorporada. a) Vista lateral izquierda. b) Vista lateral derecha. c) Vista frontal. d) Vista trasera. (Fuente: elaboración propia.)

Materiales y dispositivos seleccionados para la cámara de secado

A continuación, se detalla el total de piezas diseñadas para la cámara de secado:

Tabla 24. Piezas seleccionadas para la cámara de secado.

Materiales	Cantidad	Dimensiones
Tapa lateral derecha	1	(An x Al x Pr) 33cm x 21,7cm x 37,2cm
Tapa lateral izquierda	1	(An x Al x Pr) 20cm x 21,7cm x 37,2cm

Lamina inferior	1	(An x Al x Pr) 46,3cm x 0,2cm x 37,3cm
Tapa superior	1	(An x Al x Pr) 46,3cm x 26,5cm x 38cm
Soporte para el sistema de transporte	8	(An x Al x Pr) 5cm x 21cm x 3,2cm
Soporte para el sistema de transporte con compartimiento para sensor PT-100	2	(An x Al x Pr) 6,3cm x 21cm x 3,2cm
Soporte para el motor del sistema de transporte	1	(An x Al x Pr) 7,8cm x 12,6cm x 3,2cm
Soporte para el tensor de correa	1	(An x Al x Pr) 5cm x 2,8cm x 0,6cm
Soporte para resistencia calefactora	2	(An x Al x Pr) 14,8cm x 4,6cm x 3,6cm

Fuentes: elaboración propia.

4.5.4. Interfaz de usuario (UI).

De acuerdo con los parámetros planteados para el diseño de la secadora, la interfaz de usuario diseñada debe permitir al usuario indicar el funcionamiento deseado de la secadora, así como notificar el estado de los parámetros más importantes durante el proceso de secado, por lo tanto, analizando el funcionamiento de la secadora se identificaron los siguientes requerimientos para un buen funcionamiento de la interfaz de usuario (UI):

- Interruptor de encendido y apagado.
- Selección de la velocidad de secado.
opciones:
alta: 1 minuto. Con esta selección la temperatura de secado se ajusta a 65°C.
media: 3 minutos. Con esta selección la temperatura de secado se ajusta a 40°C.
baja: 5 minutos. Con esta selección la temperatura de secado se ajusta a 25°C.
- Activador de inicio, pausa y cancelación del proceso.
- Interruptor de modo automático, cuando la secadora entre en este modo realizara el proceso de secado de manera automática una vez detecte la presencia de una película radiográfica en la bandeja de entrada.
- Indicar al usuario la presencia o ausencia de una película radiográfica en la bandeja de entrada.
- Indicar al usuario el estado del proceso de secado.
Posibles estados:
Ingresando película radiográfica.
Secando película radiográfica.
Extrayendo película radiográfica.
Proceso de secado terminado.
Error en el sistema, no es posible ejecutar el proceso de secado. Este estado se indicará, en caso de que el sistema de control note que las condiciones de alguno o

varios de los dispositivos que componen la secadora no estén en correctas condiciones para su funcionamiento.

Una vez identificados los requerimientos, se analizaron diferentes tipologías de interfaz de usuario, con el fin de identificar la tipología adecuada según las características necesarias para la interacción con el sistema. Teniendo en cuenta que se requiere recibir por parte del usuario una cantidad de información reducida, se optó por el uso de una interfaz de preguntas y respuestas, en la cual se utiliza una pantalla para interactuar y preguntarle al usuario las acciones que pretende que realice el sistema, el usuario ingresa una respuesta a través de un componente de entrada (un pulso en un botón, un clic del mouse, etc.) y el sistema actúa de acuerdo a esta acción de una manera preprogramada. Los elementos seleccionados para esta interfaz son los siguientes:

Componente visual

Para indicarle al usuario las opciones de funcionamiento y el estado tanto de la secadora como del proceso de secado, y teniendo en cuenta que es necesario indicar poca cantidad de información al usuario, se seleccionó un display LCD 16x2 en la cual se presentará la información a través de datos alfanuméricos, además este dispositivo tiene buenas prestaciones, cuenta con un bajo consumo de energía, y compatibilidad con una gran variedad de microcontroladores entre ellos MCU, PIC´S y Arduino. Sin embargo, este display requiere de una gran cantidad de pines (16 pines) para su conexión con el microcontrolador lo cual puede generar inconvenientes en la disponibilidad de pines del microcontrolador, para evitar esta problemática se utilizará un módulo controlador LCD I2C PCD8544 que permitirá gestionar la pantalla mediante el bus I2C, empleando solamente dos pines (SDA y SCL), en la Figura 33. se evidencia una pantalla LCD 16x2 con un módulo I2C incorporado.



Figura 33. Display LCD 16X2 con modulo I2C (fuente: [35]).

Controles de entrada

En esta etapa se describen los dispositivos utilizados para seleccionar el funcionamiento deseado a la secadora, en primer lugar, se identificó el interruptor a utilizar para el encendido y apagado de la secadora, de acuerdo con un análisis previo de diferentes tipologías de interruptores, el adecuado para esta función es el interruptor basculante de dos posiciones KCD-101, con el cual se reduce el riesgo de accionamiento accidental. Posteriormente se identificaron los controles de entrada para seleccionar las demás funciones de la secadora, en

este caso se empleó un diseño con tres pulsadores momentáneos pbs-11b de dos pines con las siguientes designaciones: pulsador para la selección de velocidad de secado, pulsador para inicio, pausa y cancelación del proceso de secado, y pulsador para activación y desactivación del funcionamiento en modo automático. En la Figura 34. Se evidencian los controles de entrada seleccionados para el prototipo.



Figura 34. a) Interruptor basculante KCD-101. b) Pulsador pbs-11b. (Fuentes: [36] y [37].)

A continuación, se realiza una descripción con mayor detalle de las características de funcionamiento de cada uno de los pulsadores utilizados:

- Pulsador para la selección de velocidad de secado.
Una vez encendida la secadora, el sistema solicita la velocidad de secado que desea el usuario, cada pulsación generará un cambio en la velocidad de secado, iniciando en una velocidad de secado alta y decrementando la velocidad con cada pulsación.
- Pulsador para inicio, pausa y cancelación del proceso de secado.
Habiendo seleccionado la velocidad de secado, una pulsación en este botón generará el inicio o pausa del proceso de secado, en caso de que se realicen 3 pulsaciones seguidas se generará una cancelación del proceso de secado, y se volverá a solicitar la velocidad de secado requerida.
- Pulsador para activación o desactivación del modo automático.
Una vez seleccionada la velocidad de secado, se puede accionar este pulsador para activar el modo automático, el cual consiste en que una vez la secadora detecte una película radiográfica en la bandeja de entrada inicie automáticamente el proceso de secado, para desactivar este modo basta con accionar nuevamente el pulsador de modo automático.

Para una mejor comprensión del funcionamiento de la interfaz de usuario (UI) diseñada, se realizó un diagrama de flujo donde se evidencian las etapas y los procesos realizados dentro de la interfaz, en la Figura 35. se evidencia el diagrama de flujo realizado.

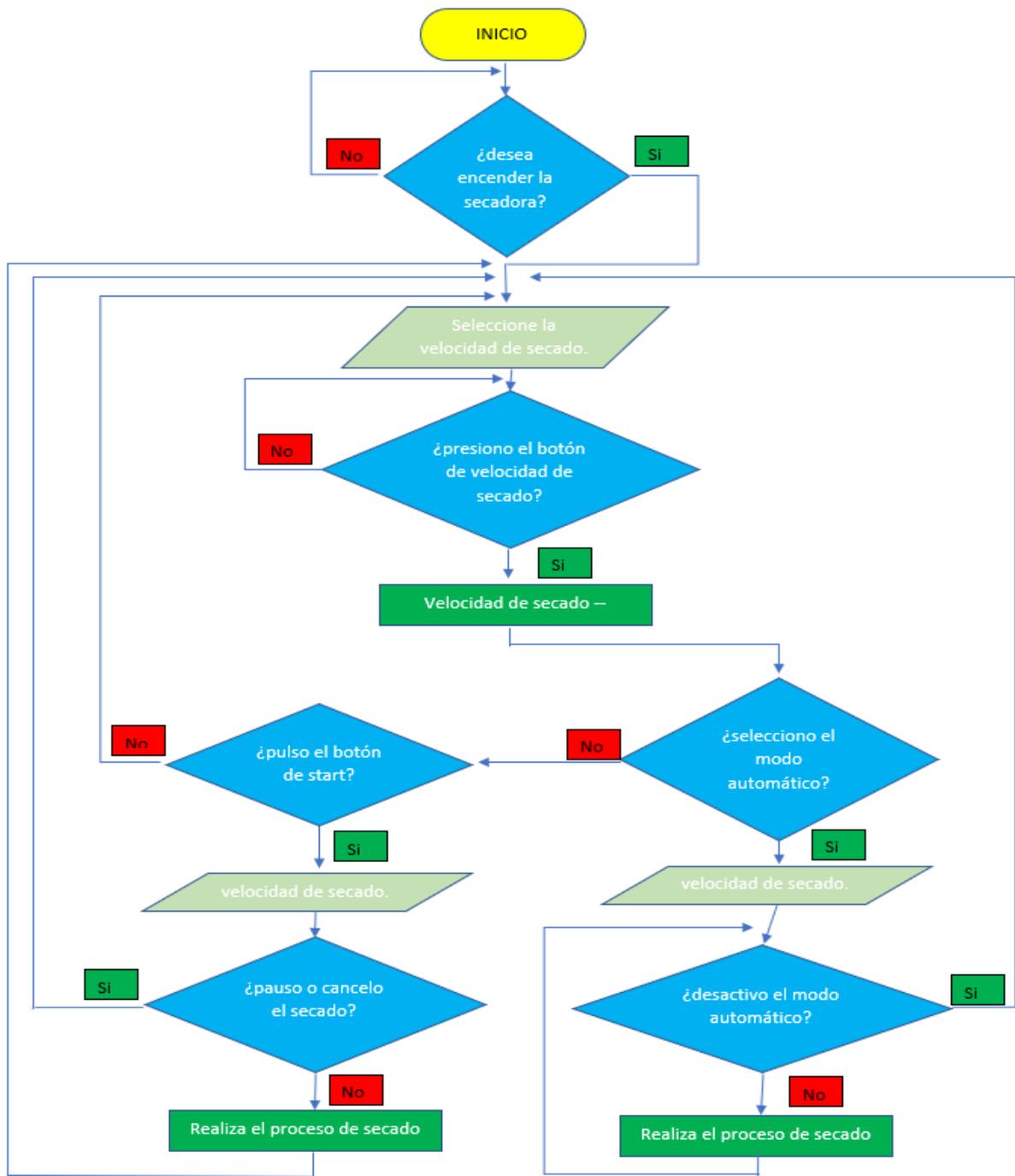


Figura 35. Diagrama de flujo del funcionamiento de la interfaz de usuario (UI). (Fuente: elaboración propia.)

Una vez establecidos los dispositivos a utilizar en la interfaz de usuario (UI), se procedió a realizar su diseño en Tinkercad, para sus dimensiones se utilizaron los datos brindados por los proveedores, además se diseñó una pequeña caja de acero inoxidable de 1.5 mm de espesor con dimensiones de 10,8 cm (alto) x 24,2 cm (ancho) x 8,2 cm (profundidad), la cual

es asegurada por la sección interior con tornillos de ¼”, esta fue diseñada con la finalidad de que soporte los dispositivos de la interfaz de usuario y demás dispositivos electrónicos que estén fuera de la cámara de secado, en la Figura 36. se pueden observar cada una de las piezas diseñadas para este apartado.

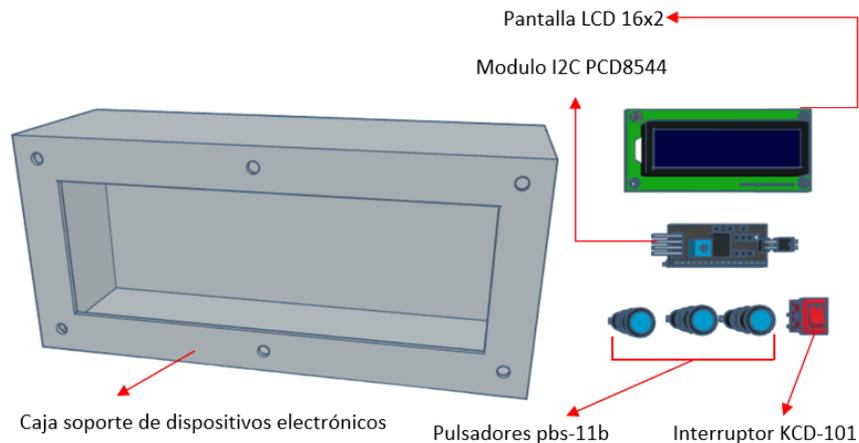


Figura 36. Dispositivos de la interfaz de usuario diseñados en Tinkercad. (fuente: elaboración propia.)

En la Figura 37. se evidencia los dispositivos de la interfaz de usuario integrados a el prototipo de la secadora, además, se le añadieron las designaciones a el interruptor y los pulsadores las cuales indican la funcionalidad de cada uno de estos.

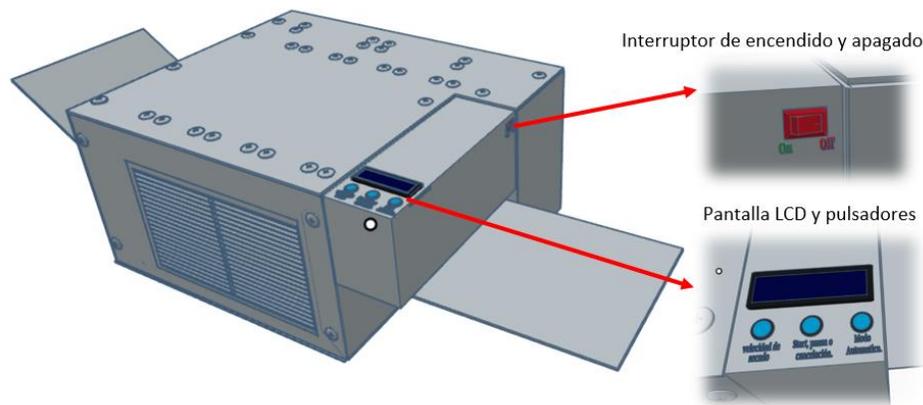


Figura 37. Prototipo de la secadora radiográfica con interfaz de usuario incorporada (Fuente: elaboración propia).

Materiales y dispositivos seleccionados para la interfaz de usuario (UI)

De acuerdo con la selección realizada en esta sección, los dispositivos necesarios para la interfaz de usuario (UI) son los siguientes:

Tabla 25. Materiales y dispositivos seleccionados para la interfaz de usuario (UI)

Materiales	Cantidad
Display LCD 16x2	1
Modulo controlador I2C PCF8574	1
Pulsador pbs-11b	3
Interruptor KCD-101	1

Fuente: elaboración propia.

4.5.5. Sistema de control

En este apartado se describe la elección del sistema de control de la secadora, el cual es el encargado de monitorear y regular las acciones de todos los actuadores seleccionados para el funcionamiento de la secadora. Por lo tanto, este sistema debe controlar el transporte, el tiempo y la temperatura de secado, y la interfaz de usuario (UI).

Teniendo en cuenta que el tiempo de secado es un factor importante para la calidad radiográfica, se utilizará un reloj de tiempo real (RTC) ya que este proporciona una fuente precisa y confiable de tiempo, con lo cual se asegura que se cumpla el tiempo establecido para el proceso de secado. Se selecciono el RTC DS3231, debido a que su oscilador interno es compensado por un sensor de temperatura, lo cual es un factor favorable teniendo en cuenta que la temperatura puede variar significativamente durante el proceso de secado.

Posteriormente se realizó una revisión bibliográfica para identificar el microcontrolador que posea las características para llevar a cabo el control de los sistemas incorporados en la secadora, se tuvieron en cuenta los siguientes criterios para la selección del microcontrolador adecuado:

- Arquitectura de memoria del microcontrolador, en este apartado se requiere un microcontrolador que cuente con todos los bloques de memoria integrados, para que logre guardar el código del sistema.
- Ancho del bus, el cual es la cantidad de bits con la que cuenta el microcontrolador para ejecutar una instrucción. En este caso se prevé utilizar un microcontrolador que cuente con 16 bits, esto con el fin de que el control de temperatura tenga un buen rendimiento y precisión. Además, de esta forma se podrán implementar mejoras en un futuro al sistema.
- Se tuvieron en cuenta el número de pines necesarios para ejecutar los diferentes procesos, para lo cual se realizó un conteo del número de entradas/salidas tanto digitales como analógicas, y puertos i2c necesarios para el funcionamiento de la secadora.

- Seguridad y fiabilidad, este criterio se abordó con el fin de seleccionar un microcontrolador que soporte ambientes adversos en temas de temperatura y polución. Además, se tuvo en cuenta funciones de seguridad y protección contra el sobrecalentamiento y prevenir incendios.
- Facilidad de programación, dado que este criterio puede ahorrar tiempo y esfuerzo durante el proceso de desarrollo, logrando así reducir costos y mejorar la eficiencia del proyecto. Además, una interfaz clara y bien documentada puede ayudar a reducir la curva de aprendizaje, lo cual implica que programadores nuevos puedan comenzar a trabajar con el microcontrolador de manera rápida y eficaz.

De acuerdo con los requerimientos planteados, se realizó un análisis de la cantidad de pines requeridos entre entradas/salidas, pines seriales y pines analógicos, para así tener un punto de partida y iniciar la búsqueda del microcontrolador, en la Tabla 26. se evidencia el análisis de pines realizado.

Tabla 26. Cantidad de pines requeridos para la selección del microcontrolador.

Nombre del dispositivo	Cantidad	Cantidad de pines requeridos (C/U)	Tipo de pines	Cantidad total de pines
Sensor QTR-3RC	2	3	E/S digitales	6
Driver L298-N	1	6	4 salidas digitales, 2 salidas PWM.	6
Driver BTS7960	1	3	2 salidas digitales, 1 salidas PWM.	3
Sensor PT-100	2	1	Entrada analógica.	2
Relé de estado sólido Fotek SSR-40DA	1	1	Salida digital	1
Pantalla LCD 16X2 con controlador I2C PCD8544	1	2	Pines I2C (SDA y SCL).	2
RTC DS3231	1	2	Pines I2C (SDA y SCL).	2
Interruptor de encendido	1	1	Entrada digital.	1
Botones de control	3	1	Entrada digital	3
Total				24

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 26. se evidencia que se requiere un total de 24 pines para ejecutar las funciones de la secadora, los cuales se distribuyen de la siguiente manera: 17 pines de E/S digitales, 2 entradas analógicas (ADC), 2 salidas PWM, y un 1 Puerto I2C. Con esta información se realizó una tabla comparativa para analizar las características de diferentes microcontroladores y determinar el más adecuado. Es importante destacar que los datos utilizados en esta tabla fueron obtenidos de los datasheets de los microcontroladores. La tabla comparativa realizada es la siguiente:

Tabla 27. Comparativa de microcontroladores.

Microcontrolador	MSP430FR6989	ATSAM3X8E	ESP32	STM32F103C8T6	PIC24FJ28GA010
especificaciones					
Velocidad Procesador	16 MHz	84 MHz	240 MHz	72 MHz	32 MHz
Ancho de bus	16 bits	32 bits	32 bits	32 bits	16 bits
Memoria RAM	4 KB	96 KB	520 KB	20 KB	4 KB
Memoria Flash	128 KB	512 KB	4 MB	64 KB	128 KB
Total de pines	99	144	38	48	100
Protocolos de comunicación	I2C, SPI, UART.	CAN, I2C, SPI, USART	Bluetooth, Wi-Fi, CAN, I2C, SPI, UART.	CAN, I2C, SPI, USART.	I2C, SPI, UART.
Entradas analógicas	2	12	18	10	6
Resolución ADC	12 bits	12 bits	12 bits	12 bits	10 bits
Pines E/S DIGITALES	38	62	34	37	28
Salidas PWM	8	7	16	4	2
Resolución PWM	16 bits	12 bits	16 bits	16 bits	16 bits
Pines de interrupción	16	10	34	60	16
Consumo energético en funcionamiento	100 μ A	16 – 30 mA	80 - 240 mA	9 – 22 mA	9 – 20 mA
Protecciones contra sobre voltaje, subvoltaje y cortocircuito.	Si	Si	Si	Si	Si
Protección contra sobrecalentamiento	Si	Si	Si	Si	Si
Precio en \$COP	188.500	167.200	35.000	42.500	35.000

Fuente: elaboración propia.

Después de analizar los datos de la tabla comparativa (Tabla 27). Se concluye que el ESP32 es la opción más adecuada para ser utilizado como microcontrolador del prototipo diseñado. El ESP32 tiene un bajo costo, un consumo de energía bajo y un alto rendimiento, cuenta con los pines necesarios para la totalidad de periféricos de la secadora y no es complejo de programar, incluso se puede hacer en el entorno de desarrollo (IDE) de Arduino. Además, el ESP32 posee varias protecciones de seguridad, como protección contra voltaje, subvoltaje, cortocircuito y sobrecalentamiento, estas características brindan seguridad al equipo y a el usuario ante eventos no deseados. A continuación, se describen las características principales de este microcontrolador:

- ✓ Procesador Tensilica Xtensa 32bits LX6 hasta 240MHz.
- ✓ Co-procesador de ultra bajo consumo (20 μ A).
- ✓ Comunicación serie UART, SPI e I2C.

- ✓ Wi-Fi integrado (802.11 b/g/n).
- ✓ Bluetooth integrado (BLE)
- ✓ Memoria Flash SPI de 4 MB.
- ✓ Memoria RAM de 520 KB
- ✓ Capacidad de interrupción (hasta 14 fuentes)
- ✓ Modo SLEEP de ahorro de energía
- ✓ Memoria de Programa de 32 bits.



Figura 38. Microcontrolador ESP32 (Fuente: [38].)

4.6. Mantenimiento a consolas de alivios térmicos para el área de producción de International Nuclear Industry.

Para realizar un correcto mantenimiento y reparación de los equipos de alivios térmicos, se elaboró un marco referencial, y también se hizo una búsqueda de instrucciones de mantenimiento de los equipos (manual de usuario y planos eléctricos), donde a pesar de que se había registrado la existencia de un manual técnico de mantenimiento en los archivos de la empresa, después de una ardua búsqueda, este se consideró extraviado. Después de identificar los equipos de alivio térmico y evaluar su condición, se procedió a llevar a cabo el mantenimiento y reparación correspondientes.

4.6.1. Marco referencial de consolas de alivios térmicos

La soldadura es un proceso de unión de materiales, principalmente metales, que se logra mediante la fusión y aporte de un material de relleno derretido [39]. Durante este proceso, se aplica calor para fundir el material base, lo cual puede afectar sus propiedades microestructurales, como resistencia mecánica, rigidez, maleabilidad y resistencia a la fractura. El impacto en las propiedades del material depende de su composición química y la rapidez con la que se enfríe después del proceso de soldadura, el uso de alivios térmicos surge de la necesidad de evitar la fractura frágil mediante el calentamiento posterior y de reducir las tensiones residuales. Aunque estas tensiones pueden no provocar grietas inmediatas, si disminuyen significativamente la vida útil de los componentes soldados. Por tanto, los alivios térmicos permiten controlar el calentamiento de los componentes a una temperatura específica durante un tiempo determinado, además de regular la velocidad de enfriamiento de la pieza soldada [40].

Este sistema automatizado utiliza mantas calefactoras para calentar de manera uniforme la zona de soldadura, alcanzando temperaturas de hasta 1150°C. la temperatura se controla con precisión mediante sensores tipo termocupla que se colocan en el material soldado. A diferencia del método tradicional de calentamiento con llama, este sistema ofrece ventajas operativas como un control preciso y rápido de la temperatura durante todo el proceso, así como la seguridad y comodidad de los operarios, quienes no están expuestos a quemadores de gas que podrían limitar sus movimientos y causar quemaduras u otros accidentes.

La consola de energía 6WPCR/A 73KVA 6 vías (21115R) permite un control preciso de calentamiento durante los procesos de soldadura. Tiene una capacidad eléctrica de 73 KVA y puede conectar hasta 24 mantas calefactoras en 6 canales. Todo el sistema es controlado digitalmente. La alimentación eléctrica de las mantas calefactoras se realiza mediante conectores de panel tipo CAM lock de 300 amperes, lo que permite la conexión de hasta cuatro mantas por canal. Además, la consola cuenta con dos salidas auxiliares para la alimentar equipos externos como soldadores de termocupla o registradores de temperatura. Se puede encontrar más información en la ficha técnica brindada por el fabricante la cual se evidencia en la Tabla 28.

Tabla 28. Ficha técnica de consola de energía 6WPCR/A.

Consola de energía 6WPCR/A 73KVA 6 vía (21115R)	Consola de energía 6WPCFA/A 73KVA 6 vía (21115FA)
6 controladores de rampa con circuito interruptor.	1 maestro.
6 contactores Albright.	5 controladores de esclavos.
6 luces de calentador.	
3 circuitos transformadores de corriente.	
1 ventilador de refrigeración de instrumentos de 6 pulgadas.	
2 tomacorrientes de 120 voltios.	
La consola estará pre-calibrada y testeada.	

Fuente: elaboración propia (datos tomados de industrial, 2022).

4.6.2. Mantenimiento a los equipos de alivios térmicos

Después de recopilar la información sobre las consolas de alivios térmicos, se procedió a desarrollar un diagrama del plan del procedimiento a seguir para el mantenimiento (Figura 39.), se analizaron varios tipos de mantenimiento, pero se destacaron dos para implementar en el proceso. El mantenimiento correctivo es de gran importancia en este caso, debido a un fallo significativo detectado durante la evaluación del equipo. Además, se propone aplicar un mantenimiento preventivo al equipo cada mes para prevenir futuros fallos y asegurar su correcto funcionamiento. Con esta medida, se pretende reducir el riesgo de accidentes para los operarios y mejorar la productividad general del proceso.

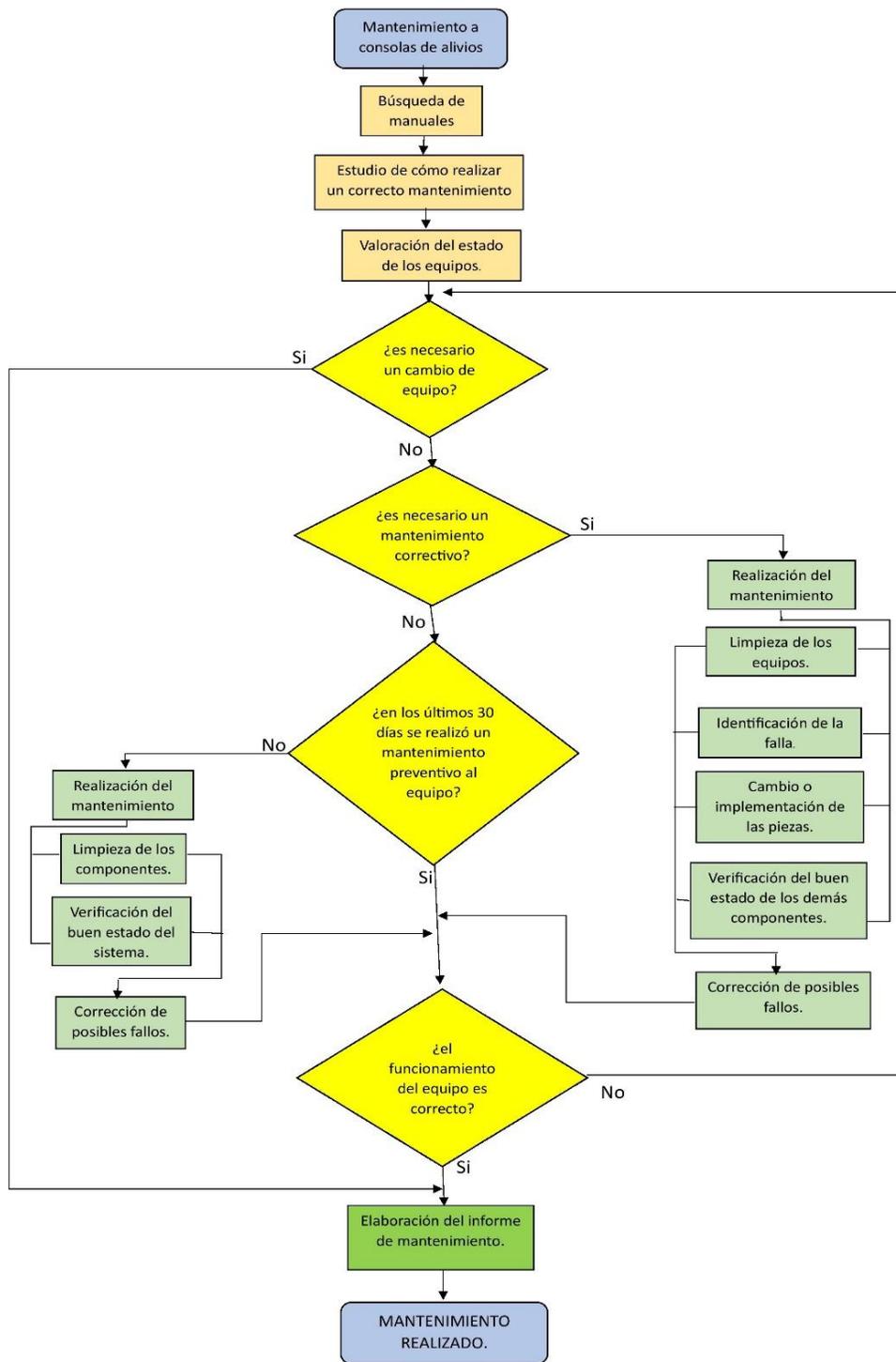


Figura 39. Plan de mantenimiento. (Fuente: elaboración propia.)

A través de la inspección inicial de las consolas de alivios térmicos, se identificaron diversos factores que requieren atención en el mantenimiento, los cuales son:

- Se detecto acumulación de suciedad y oxido en algunas partes de los equipos.
- Se observo la ausencia de algunos tornillos en las placas de ensamble.
- Deficiencia en el cableado de alimentación.



Figura 40. Imagen de valoración de consola de consola de alivios térmicos.

Para realizar el correcto mantenimiento y limpieza de las consolas de alivios térmicos se utilizaron las siguientes herramientas y productos: Sopladora, Brocha, Alcohol industrial y toallas.



Figura 41. Limpieza de consolas de alivios térmicos.

En la Figura 41. se evidencia la limpieza realizada a las consolas de alivios térmicos. En primera instancia, se utilizó la sopladora para remover el polvo y partículas de los lugares de difícil acceso, posteriormente se utilizó el alcohol industrial para hacer el mantenimiento a los elementos electrónicos. Por último, se colocaron los tornillos faltantes en las placas de ensamble. En la Figura 42. Y 43., se puede evidenciar una comparación entre el estado previo y el estado actual del equipo tras el mantenimiento.



Figura 42. Antes y después, ajuste de las consolas. (Fuente: elaboración propia.)



Figura 43. Tapas del chasis antes y después del mantenimiento. (Fuente: elaboración propia.)

Con respecto a la detección de los cables de alimentación deteriorados, se decidió sustituir este cableado por uno nuevo, los elementos solicitados a la empresa para la realización de este mantenimiento fueron los siguientes:

Tabla 29. Elementos requeridos para el mantenimiento técnico de la consola de alivios térmicos.

Elementos requeridos para el mantenimiento técnico de la consola de alivios térmicos	
Cantidad	Materiales
5 metros	Cable color VERDE cobre tipo THW calibre 4 AWG.
5 metros	Cable color BLANCO cobre tipo THW calibre 4 AWG.
5 metros	Cable color NEGRO cobre tipo THW calibre 4 AWG.
2	Clavija trifilar 50 A 250 V caucho.
3	Terminales 4 AWG para ponchar.

Fuente: elaboración propia.

Para la elección del calibre del cable a utilizar se tuvo en cuenta el estándar AWG, el ambiente de trabajo de las consolas, así como el tipo de alimentación, que en este caso es una alimentación trifásica, en consecuencia, se seleccionó el cable tipo THW 4 AWG debido a que este tiene una gran resistencia a voltajes y temperaturas altas.

5. Capítulo 5. Análisis de resultados

En esta sección se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los requerimientos planteados para el diseño y un correcto funcionamiento del prototipo, a partir de los datos de los resultados obtenidos se realizó una evaluación de la viabilidad de las soluciones propuestas para el diseño del prototipo.

En la Figura 44. se muestra un diagrama de flujo del funcionamiento lógico del código para un ciclo de secado, este código fue desarrollado en el microcontrolador Arduino para el prototipo simulado del proyecto.

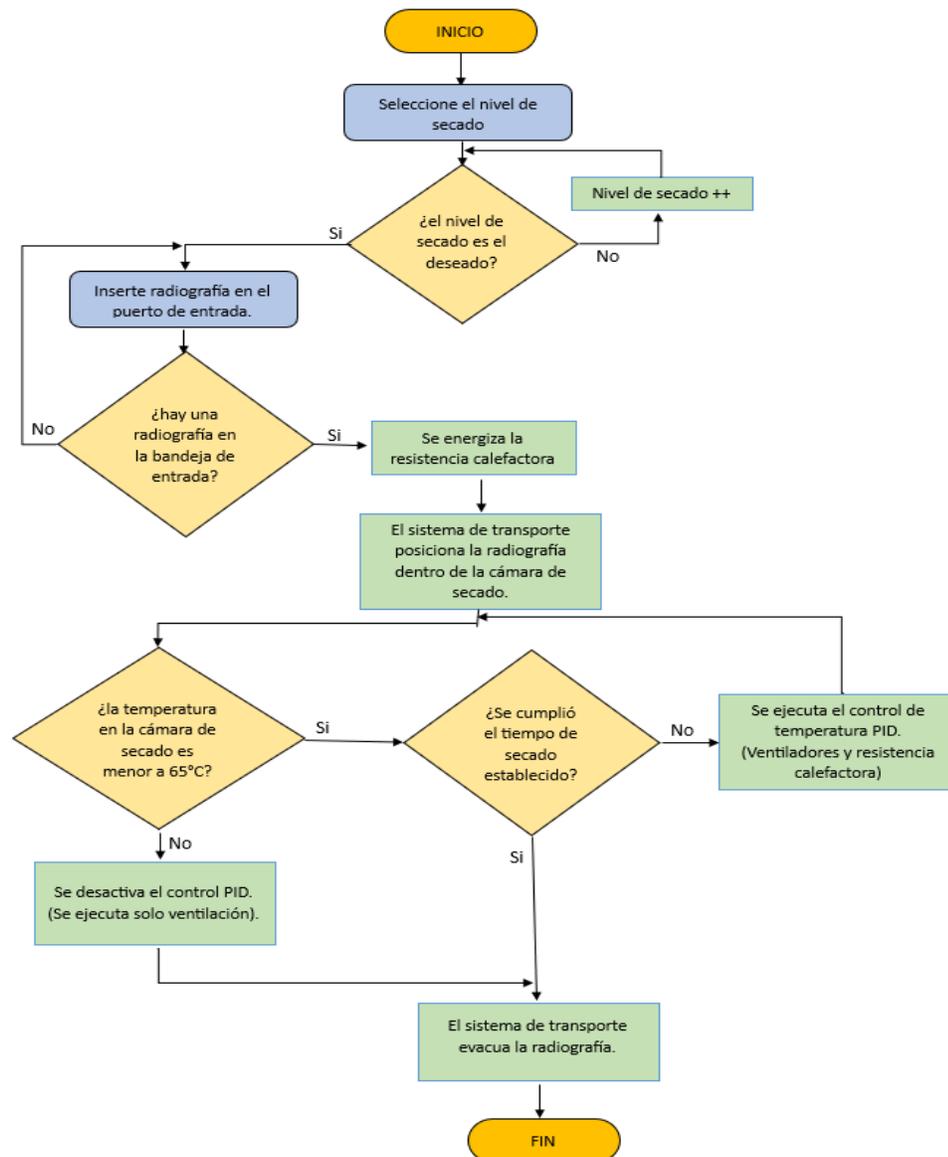


Figura 44. Diagrama de flujo del funcionamiento de la secadora en un ciclo de secado. (Fuente: elaboración propia.)

La Figura 45. evidencia la lógica de la secadora durante un ciclo de secado, la funcionalidad del código fue verificada en una versión de prueba por un mes del programa de simulación para circuitos Proteus. Además, se llevaron a cabo algunas pruebas para demostrar el funcionamiento del sistema a las directivas de la empresa, el código desarrollado se puede encontrar en el Apéndice 1, bajo el título “Código de control de procesos en prototipo de secadora de radiografías industriales”. A continuación, se evidencia la simulación del circuito electrónico realizado en Proteus:

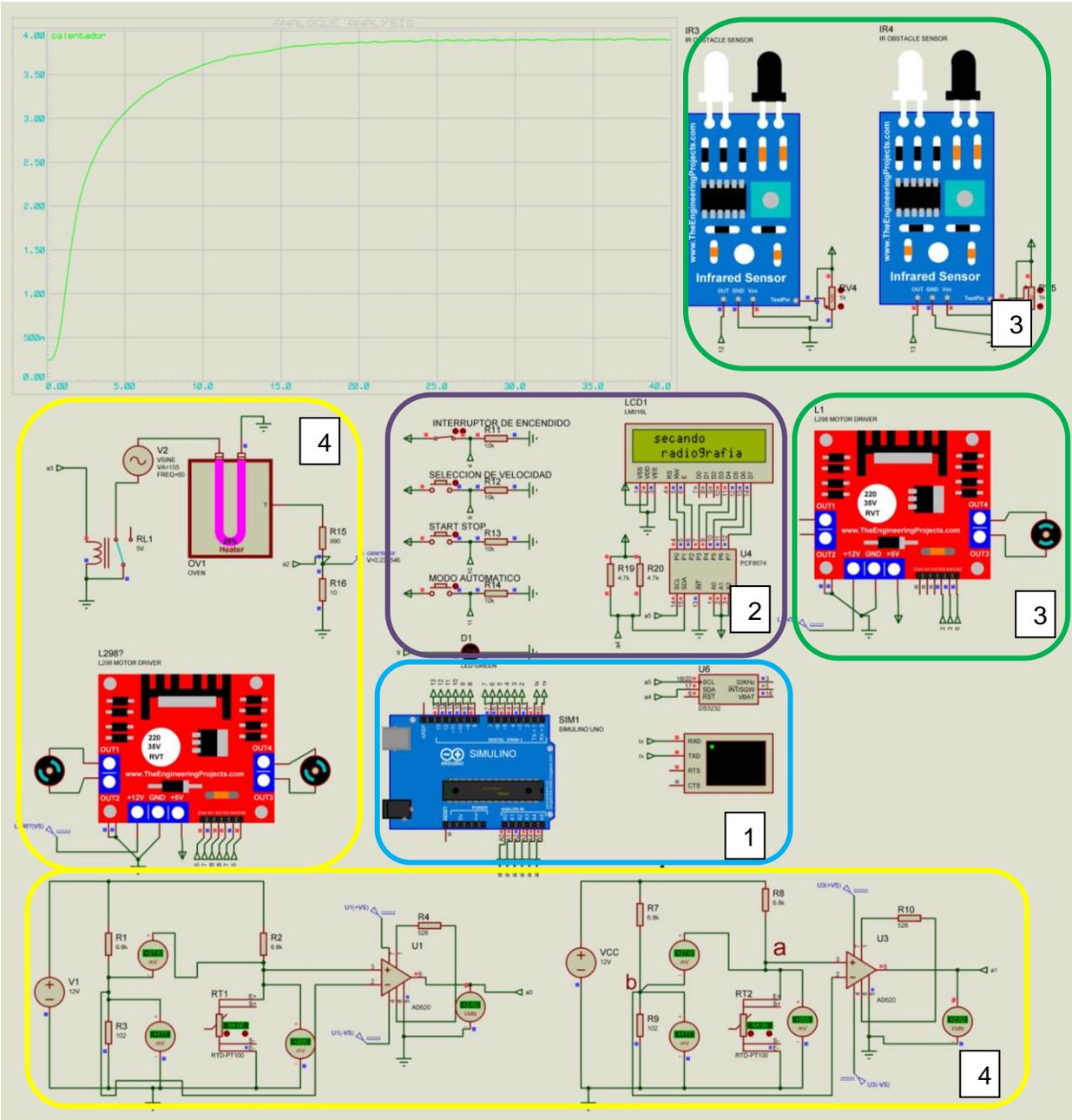


Figura 45. Simulación de secadora Radiográfica realizada en proteus. (Fuente: elaboración propia.)

En la Figura 45. Se enumeraron los subsistemas electrónicos simulados. A continuación, se describen a detalle la función de cada uno de subsistemas y sus particularidades:

1. Sistema de control: encargado de supervisar los procesos y ejecutar las acciones de control pertinentes, está compuesto por la tarjeta de desarrollo Arduino y el código desarrollado para su funcionamiento. Además, se complementa con un RTC DS 3231 para tener un control preciso del tiempo durante el proceso de secado. Las razones por las cuales se utilizó la placa Arduino UNO en la simulación del prototipo se evidencian en el apéndice A.2.1. bajo el título “Justificación del uso de arduino uno como microcontrolador para la simulación en proteus”.
2. Interfaz de usuario (UI): la interfaz de la secadora está compuesta por varios elementos, entre ellos un interruptor de encendido, botones para la selección de la velocidad de secado, inicio, pausa, o cancelación de proceso, y activación/desactivación del modo automático. Además, se incorporó una pantalla LCD la cual permite notificarle al usuario el estado y novedades del proceso de secado. La comunicación con la pantalla se realizó por medio de un circuito integrado PCF8574, el cual permite la transmisión de datos a través del protocolo I2C, de esta forma se ahorran varios pines para su uso en otras tareas de la secadora.
3. Sistema de transporte: el sistema de transporte de la película radiográfica cuenta con un transportador de rodillos que permite ingresar y evacuar la película de la cámara de secado, este transportador es accionado por un motor DC el cual es el evidenciado en la simulación, además el sistema cuenta con un driver L298N (BTS7960 para el prototipo real) que permite regular la velocidad del transportador. Para monitorear la entrada y la salida de la película se incorporaron dos sensores TCRT-5000 en la simulación, que permiten determinar el correcto posicionamiento de la película dentro de la cámara de secado, así como su ingreso y evacuación cuando el proceso de secado lo requiera. En el apéndice A.2.2 se evidencian las razones del uso de estos componentes en la simulación del sistema de transporte.
4. Control de temperatura: el sistema de control de temperatura permite mantener la temperatura de la cámara de secado en un valor específico según la velocidad de secado seleccionada por el usuario. Este sistema consta de un relé que interrumpe o entrega la potencia a la resistencia calefactora en función de la señal de control generada por el controlador PID implementado en la placa Arduino UNO, de esta forma se regula la temperatura dentro de la cámara de secado, como se evidencia en la gráfica de la temperatura en la resistencia (ubicada en la sección superior izquierda de la simulación de la Figura 45.) el control de temperatura es estable, en este caso se había seleccionado en la simulación una velocidad de secado alta, en la cual la temperatura de secado es de 65°C, por lo tanto, la temperatura necesaria en la resistencia calefactora para lograr este valor es de 390°C (Véase apéndice A.2.3.), por esta razón la temperatura se estabiliza en este valor de referencia (setpoint). En cuanto a los ventiladores, un driver L298N regula su velocidad para que el flujo de aire hacia la cámara sea el adecuado según los criterios de diseño del sistema de ventilación (según los cálculos 30 CFM). Dentro de la cámara de secado, paralelamente a los ventiladores, son ubicados dos sensores de temperatura PT-100 que proporcionan la

retroalimentación de la temperatura para el control PID, además le dan seguridad al sistema, dado que en caso de que la temperatura supere el valor umbral de 65°C, se desactiva el sistema de calefacción, dejando en funcionamiento la ventilación mientras se realiza la evacuación de la película radiográfica para evitar deterioros en la calidad de la imagen. Para el desarrollo del control de temperatura fue necesario realizar el acondicionamiento de la señal para la lectura del sensor PT100 con el microcontrolador, ajustar las ganancias del control PID para lograr una respuesta estable en estado estacionario, y hallar la temperatura necesaria en la resistencia para lograr la temperatura deseada del aire ingresado a la cámara de secado, esta serie de cálculos se evidencian en el apéndice A.2.3. Simulación del control de temperatura PID en proteus.

Con respecto al diseño estructural de la secadora, se llevó a cabo un prototipo elaborado en el software de desarrollo de modelos tridimensionales Tinkercad, en el cual se incorporaron todos los subsistemas, dispositivos y materiales seleccionados para el funcionamiento de la secadora, el prototipo realizado se evidencia a continuación:

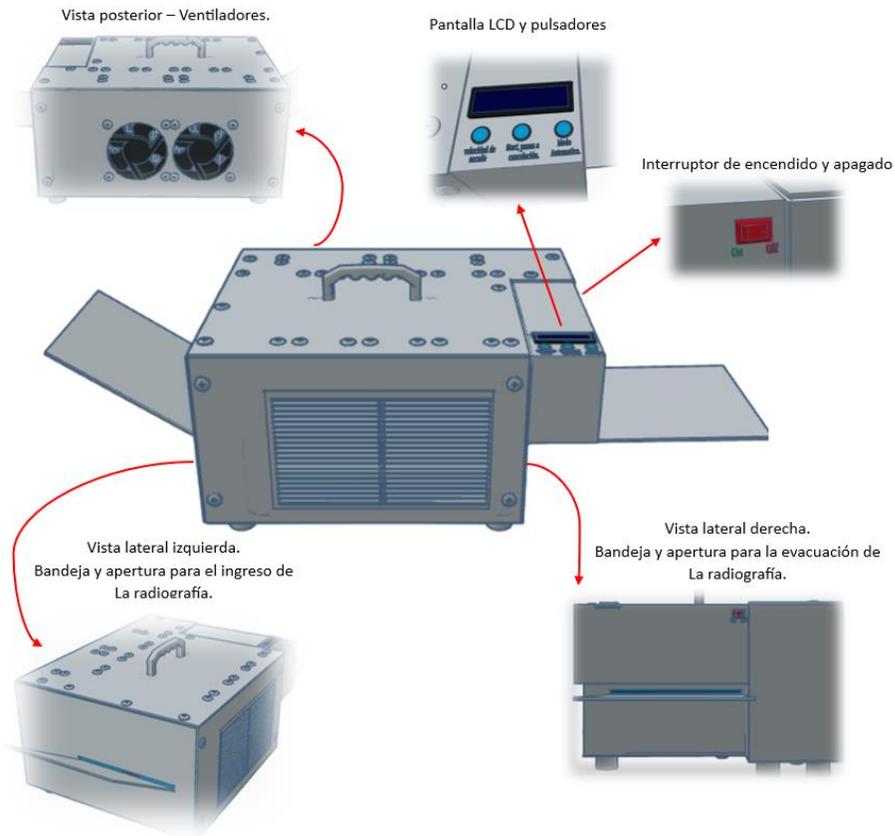


Figura 46. Vista externa del diseño tridimensional de la secadora de radiografías. (fuente: elaboración propia.)

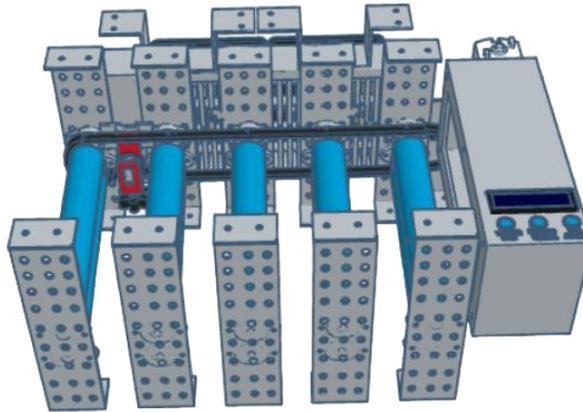


Figura 47. Vista interna del diseño tridimensional de la secadora de radiografías. (Fuente: elaboración propia.)

En la Figura 46. y Figura 47. se evidencia que cada una de los dispositivos y partes incorporadas en el prototipo se han ensamblado correctamente. una de las ventajas de realizar este diseño tridimensional en una escala real, es que permitió determinar si un componente específico podía ser ubicado en una posición determinada o si era necesario buscar alguna alternativa. De esta forma, se logró evaluar la viabilidad del diseño durante el desarrollo, realizando los ajustes necesarios para que las piezas encajen y tengan un buen funcionamiento. La selección, ubicación y denominación de cada uno de los componentes de la secadora se pueden evidenciar en el proceso de diseño de cada uno de los subsistemas de la secadora.

Teniendo en cuenta los resultados del diseño de cada subsistema elaborado en Tinkercad y las pruebas de simulación realizadas en Proteus, se realizó la evaluación y análisis de la funcionalidad del prototipo de la secadora radiográfica bajo diferentes parámetros, en la Tabla 30. se evidencia el análisis realizado al prototipo.

Tabla 30. Análisis de los subsistemas elaborados

Sistema de transporte				
Parámetros	Nivel			Descripción del motivo
	Alto	Medio	bajo	
Flexibilidad en el ingreso y salida de la película	X			<p>Con el uso del controlador L298N (BTS7960 en un entorno real) para regular la velocidad del motor que impulsa el transportador de rodillos, con el cual se logró tener flexibilidad en la velocidad del sistema de transporte la cual se puede aumentar o disminuir en los casos que el proceso así lo requiera.</p> <p>Por su parte, el uso del transportador de rodillos permite secar la película de una manera más rápida o eficiente, debido a la presión generada por los rodillos en ambas caras de la película. Además, su funcionamiento permite el transporte efectivo de la película a lo largo de la cámara de secado.</p>

Monitoreo de ingreso y evacuación de la película.		X		<p>La utilización de sensores TCRT-5000 en la simulación del prototipo, permitió simular la detección del ingreso, ubicación y evacuación de la película radiográfica de la cámara de secado, identificando el estado del proceso durante el ciclo de secado. Por lo tanto, este sistema de sensores dio acceso evaluar la funcionalidad general del prototipo.</p> <p>Por otra parte, la selección de sensores QTR para el monitoreo de la entrada y salida de la película de la cámara de secado en un entorno real, brinda una ventaja extra al obtener un monitoreo multipunto a lo largo de la película; en caso de que algún sensor infrarrojo falle, se puede compensar con la lectura de otro sensor, garantizando la fiabilidad del monitoreo de la película.</p>
Fiabilidad de la transmisión de potencia.	X			<p>El sistema por correa de transmisión desarrollado permite una transmisión de potencia precisa y sin necesidad de lubricación, además, el tensor de correa puede mantener la tensión adecuada a lo largo del ciclo de servicio de la correa de transmisión, factores que garantizan la fiabilidad de la transmisión de potencia.</p>
Control de temperatura				
Parámetros	Nivel			Descripción del motivo
	Alto	Medio	bajo	
Fiabilidad de la resistencia calefactora	X			<p>Para la resistencia calefactora se optó por su fabricación en nicrom con un diseño aleteado que le permite un mayor contacto con el aire circulante, además para el cálculo de su potencia se tuvo en cuenta el flujo de aire utilizado, por lo cual se considera que tendrá un buen funcionamiento en su implementación.</p>
Fiabilidad del flujo de aire	X			<p>Se requiere un flujo de aire de 30 CFM para alcanzar la temperatura máxima requerida para el secado de las radiografías, por lo tanto, se utilizó un controlador L298N, el cual permitió regular la velocidad de los ventiladores para alcanzar el flujo de aire adecuado.</p>
Monitoreo de la temperatura	X			<p>Para esta función se eligieron sensores PT-100 debido a su alta linealidad y precisión en un amplio rango de temperaturas, además tienen una respuesta rápida y estabilidad en las lecturas a largo plazo. Otros factores favorables son su resistencia a la corrosión y la confiabilidad de sus mediciones. En caso de que se produzca una falla en el sensor, no se generan lecturas erróneas, sino que el circuito se abre, lo cual permite identificar rápidamente la falla en el sistema.</p>
Variabilidad de la potencia térmica	X			<p>La potencia térmica generada por la resistencia depende de la señal de control aplicada al relé SSR, esta señal es generada en base al control PID simulado con la placa Arduino UNO. El control PID seleccionado permite una respuesta rápida del sistema y una alta variabilidad de la potencia térmica, en la simulación realizada se hicieron pruebas con diferentes requerimientos de potencia en la resistencia</p>

				calefactora, obteniendo resultados estables como se evidencia en el apéndice A.2.3.
Seguridad contra sobrecalentamiento		X		Para este factor se tiene en cuenta la confiabilidad del monitoreo de temperatura, en caso de registrar una lectura por encima a 65°C, se suspenderá el suministro de energía eléctrica a la resistencia calefactora, además, se dejara activada la ventilación y se evacuará la película radiográfica de la cámara de secado, con el fin de proteger la calidad radiográfica.
Interfaz de usuario (UI)				
Parámetros	Nivel			Descripción del motivo
	Alto	Medio	bajo	
Velocidad de ejecución de comandos		X		Este factor esta correlacionado con el microcontrolador utilizado, y se pudo evidenciar que tanto el proceso para inicializar la comunicación, como para el intercambio de datos, cuenta con una velocidad de ejecución aceptable.
Nivel de complejidad de manejo (interacción)		X		Se seleccionó una interfaz de preguntas y respuestas la cual facilita la interacción con el usuario, sin embargo, la interacción es limitada por la baja cantidad de información que se puede mostrar en la pantalla LCD.
Estética de la interfaz	X			La ubicación de los botones, interruptor y pantalla de la interfaz, le dan una buena estética al prototipo y facilitan su interacción con el usuario.
Complejidad de programación		X		La programación del prototipo con Arduino facilita su desarrollo debido a la gran cantidad de librerías disponibles, sin embargo, la gran cantidad de periféricos utilizados en el sistema aumenta su complejidad.
Facilidad de actualización			X	Este tipo de sistemas hardware no presentan oportunidad de actualización
Sistema de control				
Parámetros	Nivel			Descripción del motivo
	Alto	Medio	bajo	
Cubrimiento de todas las variables de control.	X			El microcontrolador seleccionado, tiene los protocolos de comunicación y los puertos requeridos para controlar todos los periféricos necesarios en la secadora.
Precisión del tiempo de proceso.	X			Se incorporo un reloj de tiempo real RTC DS3231, el cual es de alta precisión debido a que su oscilador interno es compensado por un sensor de temperatura, y permite un control preciso del tiempo de procesado en la secadora.
Velocidad de procesamiento	X			El microcontrolador ESP32 seleccionado para su uso en el prototipo físico, cuenta con una velocidad de 240 MHz para ejecutar las tareas de procesamiento de las diferentes variables implicadas.
Protecciones de seguridad.	X			El ESP32 cuenta con protecciones de seguridad en caso de sobrecalentamiento, así como en situaciones de alto voltaje, subvoltaje y cortocircuito. De esta manera se evitan posibles riesgos para los usuarios y el equipo.
Cámara de secado				
Parámetros	Nivel			Descripción del motivo
	Alto	Medio	bajo	

Hermeticidad	X			La cámara de secado fue diseñada para que el intercambio de aire se realice únicamente a través de los puertos de ventilación, esto facilita el control de temperatura de la cámara y aprovechar la mayor parte del calor generado.
Estabilidad y durabilidad	X			Se decidió fabricar la cámara en acero inoxidable tipo 304 con un espesor de 1,5 mm, esto asegura la estabilidad de la cámara de secado, así como de las estructuras que soportan los distintos dispositivos de la secadora. Además, el uso de este material proporciona una alta resistencia a la corrosión y a los impactos, lo que permite prolongar la vida útil de la secadora.
Ensamble y compatibilidad	X			Las piezas diseñadas para la cámara de secado así los soportes para los dispositivos en su interior encajan correctamente, esto se evidenció en el prototipo tridimensional realizado.

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 30. en general los dispositivos y materiales seleccionados para el funcionamiento de la secadora permiten que esta tenga un buen rendimiento en cuanto a la ejecución de los distintos procesos necesarios para el secado de las películas radiográficas.

Evaluación de costos

Basado en los dispositivos y materiales seleccionados de acuerdo con el proceso de selección y diseño realizado, el costo requerido para llevar a cabo el sistema a una escala profesional es el que se muestra a continuación:

Tabla 31. Evaluación de costos.

Equipos y materiales	Valor C/U	Cantidad	Valor
Eje metálico de 30 cm – diámetro 8 mm	\$9.800	10	\$98000 COP
Cilindro de caucho con recubrimiento en neopreno	\$18.000	10	\$180000 COP
Chumacera – cojinete	\$4600	10	\$46000 COP
piñón con chaveta	\$6300	11	\$69300 COP
Tensor de correa de transmisión	\$38000	1	\$38000 COP
Correa de transmisión dentada 10 mm	\$18000	1	\$18000 COP
Motor CARDONE 47-4528	\$89900	1	\$89900 COP
Sensor QTR-3RC	\$25000	2	\$50000 COP
Batería de resistencias calefactoras	\$200000	1	\$200000 COP
Ventilador CNDF TFS1202512H	\$18000	2	\$36000 COP
Puente H L298N	\$13000	1	\$26000 COP

Driver BTS7960	\$40000	1	\$40000 COP
Sensor de temperatura PT-100	\$41500	2	\$83000 COP
Amplificador de instrumentacion AD620	\$16000	2	\$32000 COP
Relé Fotek SSR-25DA	\$38000	1	\$38000 COP
Lamina de acero inoxidable 304 de 1.5 mm de espesor.	\$198000	2	\$396000COP
Lamina de acero inoxidable 304 perforada	\$96000	1	\$96000COP
Display LCD 16x2 + interface serial I2C	\$21000	1	\$21000COP
Interruptor basculante KCD.101	\$1800	1	\$1800COP
Pulsador pbs-11b	\$1300	3	\$3900COP
RTC DS3231	\$33000	1	\$33000COP
Tarjeta de Desarrollo ESP32	\$35000	1	\$35000COP
Cables jumper	\$300	30	\$9000 COP
Fuente 12V-5Amp	\$54600	1	\$54600 COP
Total			\$1'694.500 COP

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados obtenidos en el análisis de costo evidenciado en la Tabla 31. demuestran que el prototipo diseñado es viable y puede generar un impacto positivo en la empresa, esto teniendo en cuenta los beneficios que puede aportar la utilización de un equipo de esta índole en situaciones donde se requiere un procesamiento rápido de las películas radiográficas.

OBSERVACIONES DE ESTANDARES DE CALIDAD

Para garantizar la calidad en el proceso de secado radiográfico, es necesario cumplir con una serie de normativas que aseguren el cumplimiento de los estándares de calidad en todo el procesamiento radiográfico, incluyendo la etapa de secado. Estas normativas también garantizan la calidad radiográfica y la seguridad de los operarios durante el proceso.

Con respecto a la calidad radiográfica, la norma ISO 11699-1 establece los requisitos de sensibilidad que deben cumplir las películas radiográficas para detectar la mayor cantidad posible de defectos o discontinuidades en el material inspeccionado. Por otra parte, la norma ISO 5579 especifica el procedimiento técnico necesario para la toma de radiografías industriales, mientras que la norma ISO 11699-2 establece los requisitos para un correcto procesamiento radiográfico (revelado, fijado y secado).

En cuanto al proceso de secado, la norma ISO 11699-2 establece que la temperatura debe controlarse según la clasificación del sistema de película especificado y las recomendaciones del fabricante de la película. Según la investigación realizada, en la gran mayoría de los casos, la temperatura durante el proceso de secado no debe superar los 65°C. Esto asegura que la

película radiográfica no sufra daños y que las imágenes producidas sean de una buena calidad.

Es importante destacar que en la secadora de radiografías no se hace uso de radiación ionizante, sin embargo, su entorno de uso puede estar expuesto a dicha radiación debido a que es necesaria para la toma de las radiografías. por esta razón es necesario que las personas naturales y jurídicas que hagan uso de esta secadora en ambientes radiactivos cumplan con el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica establecido en la resolución 18 1434 de 2002. Dicha resolución establece los requisitos para la protección de los operarios contra la exposición a la radiación y para la seguridad de las fuentes de radiación utilizadas. Por lo tanto, es fundamental seguir dicha normativa con el fin de garantizar la seguridad y salud de las personas involucradas en el uso de la secadora y en su entorno de trabajo.

6. Conclusiones

El método de secado por convección de aire caliente, que fue seleccionado en el desarrollo del proyecto, es una de las opciones más favorables, debido a que aumenta la velocidad de secado sin afectar la calidad radiográfica, siempre y cuando se controle adecuadamente la temperatura dentro de la cámara de secado.

El desarrollo del prototipo de una secadora de radiografías industriales, así como las demás actividades llevadas a cabo dentro de la empresa International Nuclear Industry, permitieron desarrollar diferentes habilidades interdisciplinarias, tales como: sistemas embebidos, procesos realizados en radiología industrial, fenómenos mecánicos, diseño industrial, instrumentación, electrónica y demás aspectos de índole investigativo que aportaron en el desarrollo del proyecto.

Según la teoría investigada, la implementación del equipo diseñado para el secado de películas radiográficas puede ser muy útil en laboratorios y en ambientes donde se requiere un secado rápido de las películas. Esto se debe a que proporciona una serie de ventajas, como el aumento en la velocidad del proceso de secado, su automatización, la protección de la calidad radiográfica y el ahorro de espacio al no requerir gabinetes de secado para radiografías húmedas.

El sistema de transmisión de potencia diseñado para el transporte de la película radiográfica tiene grandes ventajas con respecto a otros métodos de transmisión, debido a que permite una alta eficiencia de transmisión en un espacio reducido. Además, el uso de una correa de transmisión síncrona permite un movimiento preciso evitando cualquier tipo de desfase, eliminando la necesidad de lubricación de los componentes de transmisión.

El control PID diseñado para el control de temperatura en el proceso de secado radiográfico, permite alcanzar el valor de temperatura de referencia requerido, sin tener un sobreimpulso en la respuesta transitoria del calentador simulado, esto indica que permitiría un proceso de secado sin picos no deseados de temperatura, logrando preservar la calidad radiográfica de la película procesada. Asimismo, el sistema tiene oscilaciones de temperatura insignificantes en estado estacionario, lo que evidencia un control efectivo de temperatura con precisión y confiabilidad durante el proceso de secado.

7.Referencias

- [1] S. Nikolova, D. Toneva, I. Georgiev, A. Dandov, y N. Lazarov, "Morphometric analysis of the frontal sinus: application of industrial digital radiography and virtual endocast", J. Forens. Radiol. Imaging, vol. 12, pp. 31–39, 2018.
- [2] "Radiografía industrial", laea.org, 06-abr-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/temas/radiografia-industrial>. [Consultado: 21-dic-2022].
- [3] O. Chaverri-Quirós y M. Conejo-Solís, "Radiografía Industrial: comparación entre el método tradicional y digital empleando rayos X", Rev. Tecnol. Marcha, vol. 30, núm. 3, p. 119, 2017.
- [4] S. Anand, "Radiography test (RT)", Welding and NDT, 18-oct-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.weldingandndt.com/radiography-testing/>. [Consultado: 27-dic-2022].
- [5] Efita Pratiwi Adi, Anita Nur Mayani, Hendri Ermawan, "Design of Radiography Film Dryer Machine Using Timer", Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, Indonesia.
- [6] V. L. Q. de La Torre, "Secador de bandejas para hierbas aromaticas dedicado a la microindustria", Universidad tecnica del norte, Ibarra-Ecuador, 2016.
- [7] Universidad de las Américas Puebla, "Proceso de secado", Udlap.mx. [En línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/capitulo5.pdf. [Consultado: 21-dic-2022].
- [8] S. Luchetti, "Sistema embebido y sus características", Tribalyte Technologies, 01-jun-2021. [En línea]. Disponible en: <https://tech.tribalyte.eu/blog-sistema-embebido-caracteristicas>. [Consultado: 22-dic-2022].
- [9] "Sistemas embebidos y su aportación a la industria", Oasys, 05-jul-2018. [En línea]. Disponible en: <https://oasys-sw.com/sistemas-embebidos-industria/>. [Consultado: 22-dic-2022].
- [10] L. Á. González, "La película radiográfica, pantalla de refuerzo y chasis radiográfico", librossanitarios.com, 08-invierno-2012. [En línea]. Disponible en: <https://librossanitarios.files.wordpress.com/2012/12/la-pelc3adcula-radiogrc3a1fica-pantalla-de-refuerzo-y-chasis-radiogrc3a1fico.pdf>. [Consultado: 02-ene-2023].
- [11] "Drying time - X-ray film processing", Tpub.com. [En línea]. Disponible en: <http://armymedical.tpub.com/MD0954/Drying-Time-X-Ray-Film-Processing-71.htm>. [Consultado: 02-ene-2023].
- [12] R. Behling, "serie de pasos en el procesamiento químico de la película radiográfica", Researchgate.net. [En línea]. Disponible en:

https://www.researchgate.net/figure/The-series-of-steps-in-the-chemical-processing-of-radiographic-film_fig42_325342963. [Consultado: 03-ene-2023].

[13] A. I. Popoola y I. A. Olumodeji, "Design and construction of a radiographic film dryer", World J. Adv. Res. Rev., vol. 15, núm. 2, pp. 352–361, 2022.

[14] A. A. García, "Película Radiográfica", Blogspot.com. [En línea]. Disponible en: <https://rayos2013.blogspot.com/2013/05/obtencion-de-la-pelicula-radiografica.html>. [Consultado: 02-ene-2023].

[15] Instrumentación y equipos en Diagnostico por Imágenes y V. T. "Instrumentacion", Blogspot.com. [En línea]. Disponible en: <http://enmiradiologia.blogspot.com/2016/12/la-pelicula-radiografica.html>. [Consultado: 02-ene-2023].

[16] "Film Processing and Darkroom", Glaciermedicaled.com. [En línea]. Disponible en: https://www.glaciermedicaled.com/courses/301/10_Darkroom.htm. [Consultado: 02-ene-2023].

[17] "Procesos de secado con sopladores de aire caliente y calentadores infrarrojos", LeisterTechnologies. [En línea]. Disponible en: <https://www.leister.com/es/Solutions/Applications/Drying-Process>. [Consultado: 29-abr-2023].

[18] A. García Pereira, S. Muñiz Becerá, A. Hernández Gómez, L. M. González, y D. Fernández Valdés, "Análisis comparativo de la cinética de deshidratación Osmótica y por Flujo de Aire Caliente de la Piña (Ananas Comosus, variedad Cayena lisa)", Rev. cienc. téc. agropecu., vol. 22, núm. 1, pp. 62–69, 2013.

[19] M. F. Arévalo, "SECADO SECADO", Personal.us.es. [En línea]. Disponible en: https://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec_far/secado.pdf. [Consultado: 29-abr-2023].

[20] "Gabinete de secado por rayos X", Chinacaremedical.com. [En línea]. Disponible en: https://es.chinacaremedical.com/xray-film-cassette_p2154.html. [Consultado: 04-ene-2023].

[21] "X-ray film drying cabinet ShSR-1", ZAVET. [En línea]. Disponible en: <https://zavet-trade.com/x-ray-film-drying-cabinet-shsr-1.html>. [Consultado: 04-ene-2023].

[22] General Electric Company., "Structurix Dryer", Ndtsupply.com. [En línea]. Disponible en: <https://content.ndtsupply.com/assets/Uploads/structurix-dryer.pdf?clientId=1047446527.1672864284>. [Consultado: 04-ene-2023].

[23] "Chumacera D8mm KFL08", Naylamp Mechatronics - Perú. [En línea]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/rodamientos/272-chumacera-d8mm-kfl08.html>. [Consultado: 12-ene-2023].

[24] "Estudio de la rueda dentada", Mec.es. [En línea]. Disponible en: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/operadores/ope_ruedentada.htm. [Consultado: 08-ene-2023].

- [25] “Piñones y discos / engranajes / cremalleras Pignons et disques / engrenages / crémaillères Sprockets and plate wheels / gears / racks”, Translinkpt.com. [En línea]. Disponible en: https://www.translinkpt.com/wp-content/uploads/2018/02/catalogo_pinones.pdf. [Consultado: 29-abr-2023].
- [26] “Correas de transmisión”, Ingemecanica.com. [En línea]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>. [Consultado: 13-ene-2023].
- [27] FYSETC Tensor de correa Ender 3 para impresora 3D, eje Y 4020, correa sincrónica elástica, para Creality Ender-3 de 1.575 x 0.787 in, perfil de aluminio con ranura en V (4020, negro).
- [28] Cardone 47 – 4528 Remanufacturado Importación ventana Lift Motor.
- [29] “Slicetex - AN033: Controlador PID del PLC”, Com.ar. [En línea]. Disponible en: <http://www.slicetex.com.ar/docs/an/an033/index.php>. [Consultado: 25-ene-2023].
- [30] “Sensor de Temperatura RTD Platino – PT100 – 3 hilos 4x30mm”, Electronilab.co. [En línea]. Disponible en: <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-temperatura-rtd-platino-pt100-3-hilos/>. [Consultado: 29-abr-2023].
- [31] D. Ac y A. Fans, “Dayton ® AC Axial Fans”, Mazcr.com. [En línea]. Disponible en: <http://mazcr.com/img/imagenes/Dayton-AC-Axial-Fans-OIPM.pdf>. [Consultado: 29-abr-2023].
- [32] R. Tope, “Resistencias con aletas aluminizadas”, Resistenciastope.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.resistenciastope.com/es/11-resistencias-aire/19-resistencias-con-aletas-aluminizadas/>. [Consultado: 29-abr-2023].
- [33] “Módulo Dimmer 4000W Con Caja”, VISTRONICA S.A.S. [En línea]. Disponible en: <https://www.vistronica.com/potencia/modulo-dimmer-4000w-con-caja-detail.html>. [Consultado: 29-abr-2023].
- [34] “Wood-Mizer Chile - Construcción de una cámara de secado”, Woodmizer.cl. [En línea]. Disponible en: <http://www.woodmizer.cl/2017/hornossecadores/construccion-de-una-camara-de-secado.html>. [Consultado: 09-feb-2023].
- [35] “Pantalla LCD 1602 con módulo I2C soldado - Display 16x2 dígitos”, Tecnopura, 27-may-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecnopura.com/producto/pantalla-lcd-1602-con-modulo-i2c-soldado-display-16x2-digitos/>. [Consultado: 09-mar-2023].
- [36] “Interruptor Basculante 2 Pines KCD1-101 Rojo”, Electronilab.co. [En línea]. Disponible en: <https://electronilab.co/tienda/interruptor-basculante-2-pines/>. [Consultado: 29-abr-2023].
- [37] “PULSADORES PBS-11A/PBS-11B AUTOBLOQUEANTE/MOMENTANEO 12mm”, Roboticsec.com. [En línea].

Disponible en: <https://roboticsec.com/producto/pulsadores-pbs-11a-pbs-11b-autobloqueante-momentaneo-12mm/>. [Consultado: 10-mar-2023].

[38] “TARJETA DE DESARROLLO ESP32 WIFI BLUETOOTH”, MACTRONICA. [En línea]. Disponible en: <https://www.mactronica.com.co/tarjeta-de-desarrollo-esp32-wifi-bluetooth>. [Consultado: 29-abr-2023].

[39] “Ensayos No Destructivos por radiografía digital”, SCI, 04-oct-2021. [En línea]. Disponible en: <https://scisa.es/radiografia-industrial-digital/>. [Consultado: 21-dic-2022].

[40] M. A. baños., “EL revelado radiografico”, Webs.um.es. [En línea]. Disponible en: https://webs.um.es/mab/miwiki/lib/exe/fetch.php?media=lectura_12.pdf. [Consultado: 02-ene-2023].

[41] R. Cheaytani, “Qué correa elegir”, Guías de compra DirectIndustry, 29-ene-2019. [En línea]. Disponible en: <https://guide.directindustry.com/es/que-correa-elegir/>. [Consultado: 12-ene-2023].

[29] E. al Alejandro Pérez Pastor, “Medida de la temperatura del aire utilizando termopares”, Murciaeduca.es, 2013. [En línea]. Disponible en: http://ftp.murciaeduca.es/programas_educativos/Nuevo1/LIBROETSIA/descripcin_de_la_prctica15.html. [Consultado: 26-ene-2023].

[42] D. Hewitt, “Ventajas y desventajas de usar termopares”, Geniolandia, 25-may-2012. [En línea]. Disponible en: <https://www.geniolandia.com/13153522/como-probar-una-termocupla>. [Consultado: 26-ene-2023].

[43] C. Mathas, “Conceptos Básicos sobre sensores de temperatura”, Digikey.com, 10-2011. [En línea]. Disponible en: [https://www.digikey.com/es/articles/temperature-sensors-the-basics#:~:text=Son%20sensores%20RTD%20\(detector%20de,son%20estables%20a%20largo%20plazo](https://www.digikey.com/es/articles/temperature-sensors-the-basics#:~:text=Son%20sensores%20RTD%20(detector%20de,son%20estables%20a%20largo%20plazo). [Consultado: 26-ene-2023].

[44] “Los fundamentos de los sensores de temperatura RTD”, Prelectronics.com, 14-mar-2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.prelectronics.com/es/los-fundamentos-de-los-sensores-de-temperatura-rtd/>. [Consultado: 27-ene-2023].

[45] A. Saldias, “▷ Tipos de SENSORES de Temperatura y sus diferencias”, SRC Sistemas de Regulación y Control, 13-nov-2018. [En línea]. Disponible en: <https://srcsl.com/tipos-sensores-temperatura/>. [Consultado: 27-ene-2023].

[46]- A. L. Global, “Tipos de Ventiladores - clasificacion”, Aire Limpio Global, 18-may-2020. [En línea]. Disponible en: <https://airelimpioglobal.com/tipos-de-ventiladores/>. [Consultado: 27-ene-2023].

[47] S&P, “Ventiladores centrífugos: tipos y características”, S&P BLOG DE VENTILACION EFICIENTE, 21-abr-2017. [En línea]. Disponible en:

<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/ventiladores-centrifugos/>. [Consultado: 28-ene-2023].

[48] mxcoolingfans, “Centrifugal fans vs axial fans: How to choose?”, Cooling Fan Manufacturer, 05-nov-2022. [En línea]. Disponible en: <https://coolingfans.net/centrifugal-fans-vs-axial-fans/>. [Consultado: 28-ene-2023].

[49] Ryan Smoot, Technical Support Engineer, CUI Devices, “Comparación de ventiladores axiales y centrifugos”, Digikay.es, 28-mar-2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.digikay.es/es/articles/comparing-axial-fans-and-centrifugal-fans>. [Consultado: 28-ene-2023].

[50] “Ventilador axial de 12V (120x120x25)”, JULPIN Electrónica. [En línea]. Disponible en: <https://www.julpin.com.co/inicio/otros-componentes/1874-ventilador-axial-de-12v-120x120x25.html>. [Consultado: 02-may-2023].

[51] C. Sergio, “El control PID es el compensador más popular empleado en la mayoría Read more”, Control Automático Educación, 29-jun-2020. [En línea]. Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/arduino/control-pid-de-temperatura-con-arduino/>. [Consultado: 28-ene-2023].

[52] R. Tope, “Resistencias para el calentamiento de aire o gas”, Resistenciastope.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.resistenciastope.com/es/listado-productos/11-resistencias-aire/>. [Consultado: 29-ene-2023].

[53] P. Carlos, “Energía térmica Vs energía eléctrica”, Nergiza, 27-mar-2013. [En línea]. Disponible en: <https://nergiza.com/energia-termica-vs-energia-electrica/>. [Consultado: 29-ene-2023].

[54] J. S. N. Reyes, “Elementos mecanicos volumen v”, Slideshare.net. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/JonathanSteveNezReye/elementos-mecanicos-volumen-v>. [Consultado: 29-ene-2023].

[55] “Cadenas y correas dentadas”, Mecanismos y sistemas mecánicos, 31-ene-2013. [En línea]. Disponible en: <https://tecnovehio.wordpress.com/mecanismos-de-transmision-del-movimiento/mecanismos-de-transmision-circular/cadenas-y-correas-dentadas/>. [Consultado: 29-ene-2023].

[56] “Tipos de engranajes y sus aplicaciones”, Clr.es, 17-may-2019. [En línea]. Disponible en: <https://clr.es/blog/es/tipos-de-engranajes-y-sus-aplicaciones/>. [Consultado: 29-ene-2023].

[57] “Tipos de engranajes y cómo saber cuál necesito”, Blog Mootio: tips para inventores y reparadores | MOOTIO Components, 21-sep-2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.mootio-components.com/blog/es/tipos-de-engranajes-cual-necesito/>. [Consultado: 29-ene-2023].

[58] Q. H. Ltda, “Tipos de chumaceras y Aplicaciones”, quinterohurtadoltda, 26-abr-2021.

- [59] I. R. 001 2009 T. de La, "REQUISITOS DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA EN", Foroiberam.org. [En línea]. Disponible en: <https://www.foroiberam.org/documents/193375/199992/REQUISITOS+DE+SEGURIDAD+RADIOL%C3%93GICA+EN+RADIOGRAF%C3%8DA+INDUSTRIAL/d76ee5e7-70f1-4cc6-98ff-1e3a189bb93d;jsessionid=6386D67BE00618BBFB881152B1056D5E?version=1.0>. [Consultado: 29-ene-2023].
- [60] Universidad nacional de colombia, "PROTOCOLO GARANTIA DE LA CALIDAD DE LA IMAGEN RADIOGRAFICA", odontologia.unal.edu.co/docs. [En línea]. Disponible en: http://www.odontologia.unal.edu.co/docs/habilitacion/prot_garantia_calidad_imagen_abril_2013.pdf. [Consultado: 29-ene-2023].
- [61] Rasool Sadin, Gholam, Reza Chegini and Mehdi Khodadadi, "Development and Performance Evaluation of a Combined Infrared and Hot Air Dryer", p. 10, 2014.
- [62] "Pt100 probe conversion table", GUILCOR. [En línea]. Disponible en: <https://www.guilcor.com/content/31-table-de-conversion-des-sondes-pt100>. [Consultado: 01-jun-2023].
- [63] E. Gómez, "Cómo conectar una PT100 ¿Qué es una RTD?", Rincón Ingenieril, 19-jul-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.rinconingenieril.es/como-conectar-una-pt100/>. [Consultado: 1-jun-2023].
- [64] C. Diaz, H. Gabriel, y A. Salinas, "OBTENCIÓN DE UNA ECUACIÓN EMPÍRICA PARA CANALES ANULARES", laea.org. [En línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/009/29009954.pdf. [Consultado: 01-jun-2023].
- [65] "Rele De Estado Solido Ssr-40 Da 40a 24-380vac Fotek Arduino", Com.co. [En línea]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-596659216-rele-de-estado-solido-ssr-40-da-40a-24-380vac-fotek-arduino-_JM. [Consultado: 07-jun-2023].

Apéndice 1: Código de control de procesos en prototipo de secadora de radiografías industriales

El código elaborado para el control de los procesos del prototipo de la secadora de radiografías industriales puede ser visualizado en el siguiente enlace que conduce a un repositorio de código:

https://github.com/MarcoErazoGo/codigo_secadora.git

Apéndice 2: Aspectos de la simulación.

A.2.1. Justificación del uso de Arduino uno como microcontrolador para la simulación en proteus

Para la simulación del prototipo en el entorno de proteus, se optó por utilizar la placa Arduino uno como microcontrolador en lugar del microcontrolador ESP32 seleccionado para el prototipo real. Este ajuste se justifica por varias razones, listadas a continuación:

- Arduino uno tiene una amplia disponibilidad y soporte en el entorno de simulación de proteus, lo que facilita su integración y programación en la simulación. Por el contrario, el ESP32 al ser un microcontrolador relativamente nuevo, cuenta con muy poca disponibilidad de librerías para su simulación en proteus.
- Arduino uno cuenta con la capacidad del procesamiento necesaria para llevar a cabo la simulación del proyecto de la secadora. Aunque el ESP32 tiene una capacidad de procesamiento mayor, el Arduino UNO puede llevar a cabo la simulación del control de este proyecto en particular, además ambos microcontroladores cuentan con los protocolos de comunicación UART y I2, utilizados en el prototipo diseñado.
- Se tiene en cuenta que la simulación se realiza en una versión de prueba de proteus, lo cual implica ciertas limitaciones en términos de disponibilidad de componentes y modelos de dispositivos. En este caso, Arduino UNO, es la opción más viable y compatible con la versión de prueba de proteus.
- Utilizar una placa Arduino UNO en la simulación puede simplificar el proceso de desarrollo al aprovechar la compatibilidad y la familiaridad existente con esta plataforma. El código y las librerías desarrolladas para arduino uno en la simulación se puede reutilizar y adaptar fácilmente al ESP32 en el prototipo real, lo que agiliza el desarrollo y reduce la posibilidad de errores.

A.2.2. Justificación del uso del driver L298N y sensores TCRT-5000 para la simulación del sistema de transporte en proteus.

Teniendo en cuenta que el Driver BTS7960 no tiene librería hasta el momento para su uso en el simulador Proteus, se hará uso en la simulación del Driver L298N debido a que se encuentra disponible para su uso en Proteus y su funcionamiento es muy similar al BTS7960, en la Tabla 32. se presenta una comparación de los pines de estos dos drivers donde se evidencia su similitud en términos de funcionalidad.

Tabla 32. Comparación de los pines del driver L298N y el BTS7960.

Pines Driver BTS7960	Pines Driver L298N
Salida motor A (IN1)	Salida Motor A (IN 1)
Salida motor A (IN2)	Salida motor A (IN2)
Salida motor B (IN3)	Salida motor B (IN3)
Salida motor B (IN4)	Salida motor B (IN4)
PWM del motor A (PWM1)	PWM del motor A (ENA)
PWM del motor B (PWM2)	PWM del motor A (ENB)
Voltaje lógico (VCC)	Voltaje lógico (VCC)
Voltaje de motor (VM)	Voltaje de motor (VM)
Tierra (GND)	Tierra (GND)

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, el sensor QTR-3RC seleccionado para el monitoreo de entrada y salida de la película en el prototipo real no está disponible para su uso en proteus, por esta razón se ha optado por utilizar en la simulación el sensor infrarrojo reflectivo de corta distancia TCRT-5000, el cual está incluido en la biblioteca de componentes de proteus. Aunque estos sensores difieren en algunas características, ambos son sensores de detección reflectivos-infrarrojos y pueden ser simulados de manera similar en cuanto a detección de objetos, lo que permite evaluar y probar la funcionalidad general del prototipo diseñado en el entorno virtual de proteus.

A.2.3. Simulación del control de temperatura PID en proteus.

Para lograr el desarrollo de la simulación del control PID en proteus, fue necesario realizar una serie de procedimientos previamente, entre los cuales se encuentran el acondicionamiento de la señal para la lectura del PT-100 con el microcontrolador Arduino, los cálculos para determinar la temperatura necesaria en la resistencia calefactora, de manera que se logre alcanzar la temperatura deseada del aire ingresado a la cámara de secado , y el ajuste de

ganancias del control PID para lograr una respuesta estable del sistema, y lograr un control preciso de la temperatura durante el proceso de secado. Esta serie de procedimientos se evidencian a continuación.

- **ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL DE LECTURA DEL PT-100**

Los sensores PT 100 pertenecen al grupo de transductores de pequeña señal, lo que significa que una variación de la temperatura causará una variación muy pequeña en la resistencia de salida del PT100, como se evidencia en la Tabla 33., por lo tanto, usar un divisor de tensión simple para convertir la variación de resistencia en una señal de tensión no sería efectivo. La salida del divisor resistivo tendría dos componentes, el voltaje asociado al valor de la temperatura y un voltaje constante que no aporta nada a la medición. Al amplificar la salida del divisor de tensión, se aplicaría una ganancia sobre ambas componentes, lo cual es indeseable, debido a que se saturaría el amplificador con el voltaje constante, debido a esto es necesario eliminar la componente constante, para lograr una mayor precisión en la medición.

Tabla 33. Valor de resistencia del sensor PT100 en un rango de 0°C a 99°C

° C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.28
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	113.99	114.38	114.77	115.15
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.85	118.24	118.62	119.01
50	119.40	119.78	120.16	120.55	120.93	121.32	121.70	122.09	122.47	122.86
60	123.24	123.62	124.01	124.39	124.77	125.16	125.54	125.92	126.31	126.69
70	127.07	127.45	127.84	128.22	128.60	128.98	129.37	129.75	130.13	130.51
80	130.89	131.27	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32
90	134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12

Fuente: elaboración propia. (datos tomados de [datos tomados de: [62]).

Para acondicionar la señal se utilizará un puente de Wheatstone el cual permite medir con gran precisión cambios relativos en la resistencia del PT100. Este método permite eliminar la componente constante de la señal y obtener solo la parte del voltaje que se debe a la temperatura [63]. La salida del puente de Wheatstone es la tensión que existe entre los puntos A y B de la Figura 48. Para lograr el funcionamiento deseado, el puente de Wheatstone debe estar equilibrado, para conseguir esto, se tienen en cuenta los siguientes cálculos, relacionados con el puente de Wheatstone evidenciado en la Figura 48.:

$$V_{out} = V_a - V_b \quad (7)$$

$$V_a = \frac{V_{cc} * R_{pt100}}{R_8 + R_{pt100}} \quad (8)$$

$$V_b = \frac{V_{cc} * R_9}{R_7 + R_9} \quad (9)$$

Para que el puente de Wheatstone este en equilibrio $V_{out} = 0$ y por lo tanto:

$$R_9 = R_{pt100} \quad \text{y} \quad R_8 = R_7$$

De acuerdo con este análisis del circuito del puente, la resistencia R_9 debe ser igual a la resistencia del PT100 a 0°C , está en teoría tiene un valor de 100Ω , sin embargo, la simulación tiene un par de compensaciones y su valor en la simulación a 0°C es de 102Ω , por este motivo $R_9 = 102 \Omega$. Por su parte, las resistencias R_7 y R_8 también deben ser equivalentes, en este caso se usaron resistencias de $6,8 \text{ k}\Omega$, debido a que éstas permiten reducir la corriente que circula a través de las ramas del puente Wheatstone y sin embargo su valor es lo suficientemente bajo para que no caiga toda la tensión en ellas.

Posteriormente se analizó el circuito con la máxima lectura que se requiere para el prototipo, en este caso será necesario medir en un rango de temperatura de 0°C a 80°C , teniendo en cuenta las equivalencias de temperatura Vs. resistencia del sensor PT100 mostradas Tabla 18. a una temperatura de 80°C la resistencia del PT100 es de 130.9Ω , con la compensación de la resistencia en el circuito, su valor es de 132.9Ω , por lo tanto se hicieron los siguientes cálculos haciendo uso de las ecuaciones (7), (8) y (9) para hallar el voltaje en la salida del puente de Wheatstone.

$$V_a = \frac{12V * 132.9\Omega}{6800\Omega + 132.9\Omega} = 0.23 \text{ V}$$

$$V_b = \frac{12V * 100\Omega}{6800\Omega + 100\Omega} = 0.177 \text{ V}$$

$$V_{out} = V_a - V_b = 0.23 - 0.177 = 0.053 \text{ V}$$

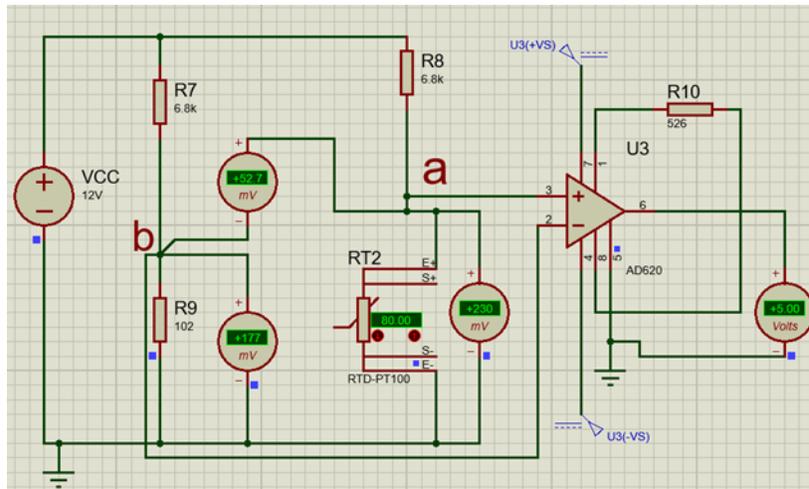


Figura 48. Circuito de acondicionamiento de la señal para la lectura del sensor PT-100 realizado en Proteus. (Fuente elaboración propia).

En la Figura 48. se evidencia el circuito diseñado para el acondicionamiento de la señal para lectura de un sensor PT-100. Cómo se puede observar los cálculos realizados coinciden con las lecturas de voltaje realizadas en los nodos A y B, y la salida del puente de Wheatstone en el software de simulación, sin embargo, la señal de salida del puente de Wheatstone tiene una amplitud insuficiente para ser leída directamente en un microcontrolador, por esta razón se amplificó la señal para que su variación este en el rango de 0 a 5 V, para lograrlo se utilizó el amplificador de instrumentación AD620 en configuración diferencial, los cálculos realizados para esta etapa del circuito fueron los siguientes:

En primer lugar, se calcula la ganancia necesaria para obtener la salida deseada.

$$G = \frac{V_{salida}}{V_{entrada}} = \frac{5V}{0.0527} = 94.88 \quad (10)$$

Teniendo en cuenta la ganancia necesaria se halla la R_g para el amplificador, según la hoja de datos del AD620.

$$R_g = \frac{49400}{94.88 - 1} = 526\Omega \quad (11)$$

Habiendo hallado estos valores se le añadió la etapa de amplificación a la simulación realizada, y como se evidencia en la Figura 48. el circuito funciona de acuerdo con los parámetros requeridos, al aplicarle un voltaje de 52,7 mV a la entrada del amplificador, correspondiente a una lectura de 80°C en el PT100, se evidencia una salida de 5 V.

Posteriormente se duplicó este circuito para el acondicionamiento de la señal del segundo sensor PT100 y se realizó su lectura por medio del microcontrolador Arduino, teniendo en cuenta que se conoce el voltaje recibido a 80°C (5V) y que la variabilidad de la resistencia es directamente proporcional a la temperatura, se utilizó la ecuación (12) para determinar la temperatura leída en los puertos ADC de la placa Arduino UNO.

$$T (^{\circ}\text{C}) = \frac{V_{\text{adc}} * 80}{5} \quad (12)$$

Como se evidencia en la Figura 49. se logró una correcta lectura de la temperatura en los dos sensores PT100, en este caso se realizó la prueba con el sensor N° 1 a 46°C y el sensor N°2 a 73 °C. En la lectura del puerto serial se visualiza la lectura de estos dos sensores.

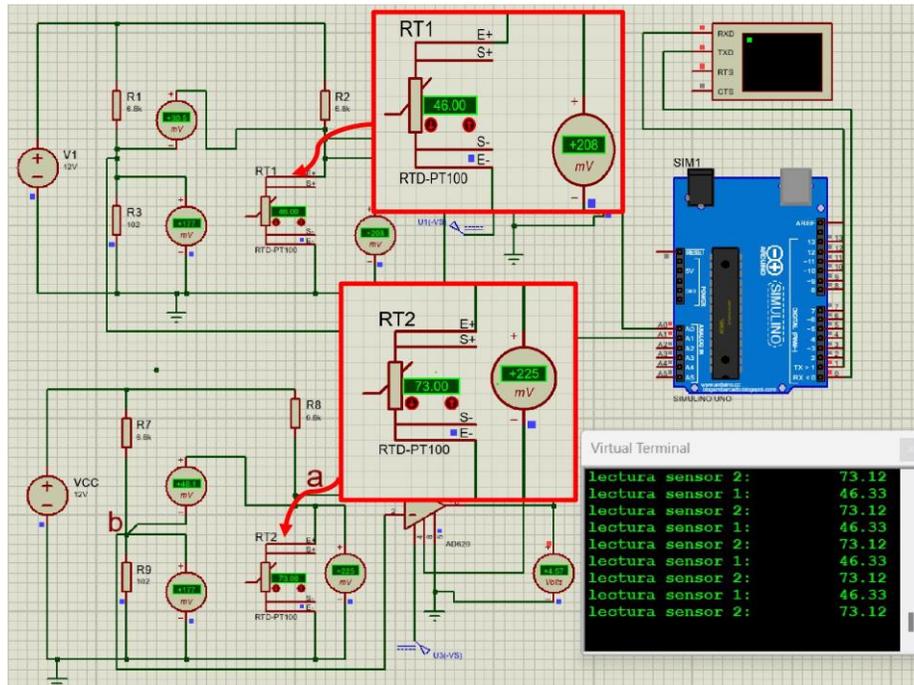


Figura 49. Lectura de dos sensores PT100 con Arduino uno en proteus. (Fuente: elaboración propia).

- **Cálculos de la temperatura en la resistencia calefactora**

Para simular el control de temperatura fue necesario calcular la temperatura a la que debe llegar la resistencia calefactora para que el flujo de aire ingresado alcance la temperatura de 65 °C, esto debido a que en la simulación el calentador no tiene interacción con el flujo de aire ingresado. Para lograrlo se utilizó la ley de enfriamiento de Newton, la cual se evidencia en la ecuación (13).

$$Q = h * A_{\text{tranf.}} * \Delta T \quad (13)$$

Donde:

- Q es la tasa de flujo de calor transferido (en vatios, W).
- h es el coeficiente de transferencia de calor por convección (en W/(m²*°C)).
- A_{tranf.} es el área de transferencia de calor (en metros cuadrados, m²).
- ΔT es la diferencia de temperatura entre la resistencia calefactora y el aire circulante (en grados Celsius, °C).

Conociendo la temperatura del aire a temperatura ambiente, es posible determinar la temperatura de la resistencia calefactora a través de la diferencia de temperatura, la cual se despeja de la ecuación (13), Obteniendo la ecuación (14):

$$\Delta T = Q / (h * A_{\text{tranf.}}) \quad (14)$$

Sin embargo, para utilizar esta ecuación es necesarios hallar los datos que la componen, en primer lugar se calculó el coeficiente de transferencia de calor por convección h. este valor depende de varios factores, entre estos la velocidad del aire, la temperatura de la resistencia y del aire, y la geometría de la resistencia, una ecuación comúnmente utilizada para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección en aplicaciones con aire forzado es la ecuación de Dittus – Boelter [64], evidenciada en la ecuación (15).

$$h = (0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.4}) / D. \quad (15)$$

Donde Re es el número de Reynolds, Pr es el número de Prandtl, y D es el diámetro hidráulico de la resistencia. Estos para metros puede calcularse de la siguiente forma:

$$Re = \rho * v * L / \mu. \quad (16)$$

- Rho es la densidad del aire, 1.29 Kg/m^3 .
- V es la velocidad del aire, 1.944 m/s , este valor se halló de la siguiente forma:

1 CFM es aproximadamente igual a $0.0004719 \text{ m}^3/\text{s}$. Entonces, para un ventilador la tasa de flujo de aire es:

$$30 \text{ CFM} * 0.0004719 \text{ m}^3/\text{s} = 0.014 \text{ m}^3/\text{s}. \quad (17)$$

Como hay dos ventiladores, la tasa de flujo de aire total será el doble:

$$0.014 \text{ m}^3/\text{s} * 2 = 0.028 \text{ m}^3/\text{s}. \quad (18)$$

La velocidad del aire puede ser calculada dividiendo la tasa de flujo de aire entre el área de la sección transversal de los ventiladores, por lo tanto:

$$\text{Velocidad del aire} = \text{Tasa de flujo de aire total} / \text{Área de la sección transversal} \quad (19)$$

$$\text{Velocidad del aire} = 0.028 \text{ m}^3/\text{s} / (0.12 \text{ m} * 0.12\text{m}) = 1.944 \text{ m/s}$$

- L es la longitud de las aletas de la resistencia calefactora.

En este caso se realizó la sumatoria de la longitud de todas las aletas las cuales tiene una longitud de 6 cm cada una, lo que da como resultado una longitud total de 3 m.

- mu es la viscosidad dinámica del aire.

A una temperatura de 25°C el aire tiene una viscosidad dinámica de 18.4 η .

Por lo tanto, de acuerdo con la ecuación **(16)** el número de Reynold (Re) para la resistencia calefactora del prototipo es:

$$Re = \frac{1.29 \text{ Kg/m}^3 * 1.944 \text{ m/s} * 3 \text{ m}}{18.4 \eta}$$

Re = 0.40887 (el número de Reynold es adimensional).

Por su parte para el cálculo del número de Prandtl, se tiene lo siguiente:

$$Pr = Cp * \mu / k \quad (20)$$

- Cp es el calor específico de la resistencia calefactora, en este caso es una resistencia de nicrom, el cual tiene un calor específico de 440 J/Kg °K.
- μ es la viscosidad dinámica del aire, como se menciona anteriormente tiene un valor de 18.4 μ Pa*s.
- k es la conductividad térmica del aire la cual tiene un valor de 0.02 W/m °K.

Por lo tanto:

$$Pr = (440 \text{ J/Kg } ^\circ\text{K} * 18.4 \eta) / 0.02 \text{ W/m } ^\circ\text{K}$$

Pr= 404800 (el número de Prandtl es un numero adimensional).

Por último, se calculó el diámetro hidráulico de la siguiente forma:

$$Dh = 4 * A / P \quad (21)$$

- A es el área de la sección transversal de la resistencia calefactora.

$$A = 4 \text{ cm} * 27 \text{ cm} = 108 \text{ cm}^2 = 1.08 \text{ m}^2. \quad (22)$$

- P es el perímetro de la resistencia calefactora.

$$P = 27 \text{ cm} + 27 \text{ cm} + 12 \text{ cm} + 12 \text{ cm} = 78 \text{ cm} = 0.78 \text{ m}. \quad (23)$$

Por lo tanto:

$$Dh = 4 * 1.08 \text{ m}^2 / 0.78 \text{ m} = 0.0879 \text{ m}.$$

Una vez obtenidos todos los valores necesarios, se procedió a calcular el coeficiente de transferencia por convección (h), de acuerdo con lo estipulado en la ecuación **(15)**.

$$h = (0.023 * 0.40887 ^{0.8} * 404800^{0.4}) / 0.0879 \text{ m}.$$

$$h = 22.382 \text{ W / m}^2\text{°C}$$

Paso seguido, se realizó el cálculo del área de transferencia de calor, para esto se tuvo en cuenta el área de la superficie lateral de cada una de las aletas de la resistencia calefactora, debido a que estas son las encargadas de transmitir el calor a el aire.

$$A_{\text{transf}}(\text{una aleta}) = (4 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}) \times 2 = 48 \text{ cm}^2. \quad (24)$$

En esta fórmula el área se multiplica por 2 debido a las dos caras de una aleta de la resistencia, posteriormente se multiplico este valor por la cantidad de aletas de la resistencia, la cual tiene un total de 50 aletas dando como resultado un área de transferencia de calor de 240 m^2 .

Para calcular la tasa de flujo de calor transferido (Q), se puede calcular multiplicando la potencia de la resistencia por la eficiencia. En general las resistencias calefactoras tienen una eficiencia alta, la cual puede oscilar entre el 80% y 98%, en este caso se estimó una eficiencia de 95% para la resistencia calefactora del prototipo.

$$Q = \text{Potencia} \times \text{Eficiencia}. \quad (25)$$

$$Q = 2000 \text{ W} \times 0.95 = 1900 \text{ W}.$$

Habiendo quedado solo con una incógnita en la ley de enfriamiento de newton se procedió a calcular la diferencia de temperatura entre el aire y la resistencia calefactora.

$$\Delta T = Q / (h \times A_{\text{tranf.}}) \quad (14)$$

$$\Delta T = 1900 \text{ W} / (22.382 \text{ W / m}^2\text{°C} \times 240 \text{ m}^2).$$

$$\Delta T = 365.9 \text{ °C}$$

Conociendo la diferencia de temperatura, así como la temperatura del aire, es posible hallar la temperatura de la resistencia calefactora.

$$\Delta T = T_2 - T_1. \quad (26)$$

- T2 es la temperatura de la resistencia.
- T1 es la temperatura del aire ingresado.

Por lo tanto, despejando T2 de la formula, se obtiene que la temperatura necesaria en la resistencia es:

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 365.9 \text{ °C} + 25 \text{ °C} = 390.9 \text{ °C} \quad (27)$$

De acuerdo con los cálculos realizados, es necesaria una temperatura de 390.9 °C en la resistencia, para que logre calentar el flujo de aire de 60 CFM de los ventiladores a una temperatura de 65°C, por lo tanto, 390 ° C sería el setpoint del controlador de temperatura.

Para realizar la simulación también fue necesario el cálculo del coeficiente de resistencia térmica de la resistencia, en este caso se hizo este cálculo por medio de la ley de Fourier para la conducción del calor a través de un material, la fórmula es la siguiente:

$$R = \Delta T_{\text{proceso}} / Q \quad (28)$$

Donde:

- R es la resistencia térmica (°C / W)
- $\Delta T_{\text{proceso}}$ es la diferencia de temperatura entre los puntos de entrada y salida del flujo de calor (°C)
- Q es la tasa de flujo de calor la cual, de acuerdo con los cálculos realizados en la ecuación anterior, es de 1900 W.

Por lo tanto:

$$R = (65^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) / 1900 \text{ W} = 0.021052 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{W}.$$

Una vez obtenidos los datos, se configuro el calentador con la resistencia térmica y la tasa de flujo de aire de la resistencia calefactora, para que funcione de acuerdo con estos parámetros de la planta en la vida real. En la Figura 27. Se evidencia el proceso de configuración del calentador en proteus, el divisor de voltaje evidenciado en la salida del calentador, se realizó debido a que el calentador en la simulación muestra los cambios temperatura en una relación de voltaje, por cada °C de variación muestra un aumento o disminución de voltaje de 1 V, por lo tanto teniendo en cuenta que se van a trabajar temperaturas de aproximadamente 400°C (equivalente a 400 V), se realizó este divisor que divide el voltaje 100 veces, para poder medir la variación de temperatura a través del microcontrolador, así una lectura de 400°C equivaldría a 4 V.

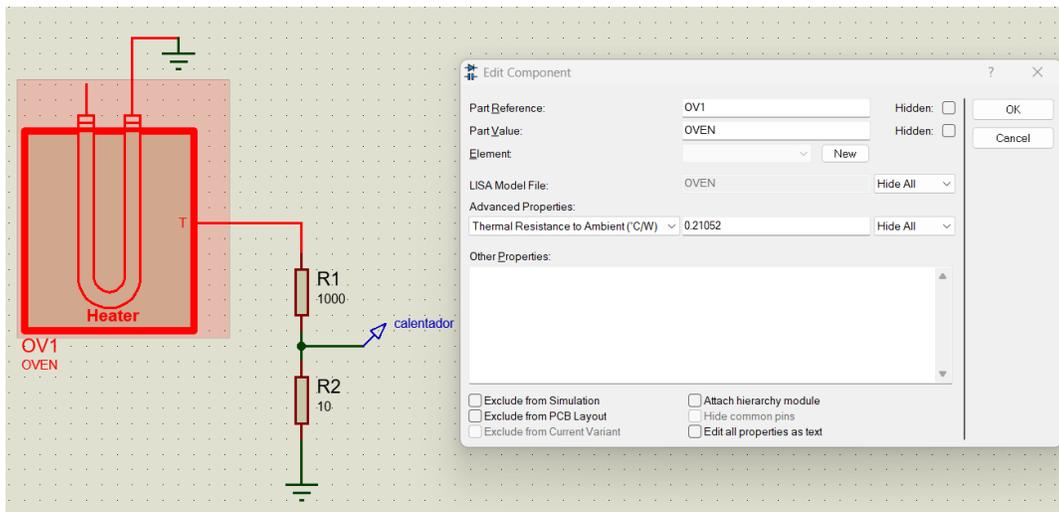


Figura 50. Configuración del calentador en proteus. (Fuente: elaboración propia).

La siguiente etapa consistió en hallar la función de transferencia de la planta, de acuerdo con el siguiente modelo de primer orden:

$$P(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (29)$$

Este modelo está representado en su forma continua, donde K es la ganancia de la planta, τ es la constante de tiempo del proceso y $-\theta$ es el retardo del proceso.

Para hallar estos datos, se energizó el calentador con un 20 % del voltaje nominal de alimentación, que es de 110 V AC Rms a una frecuencia de 60 Hz, por lo tanto, la curva de calentamiento obtenida con una estimulación de 22 V rms es la siguiente:

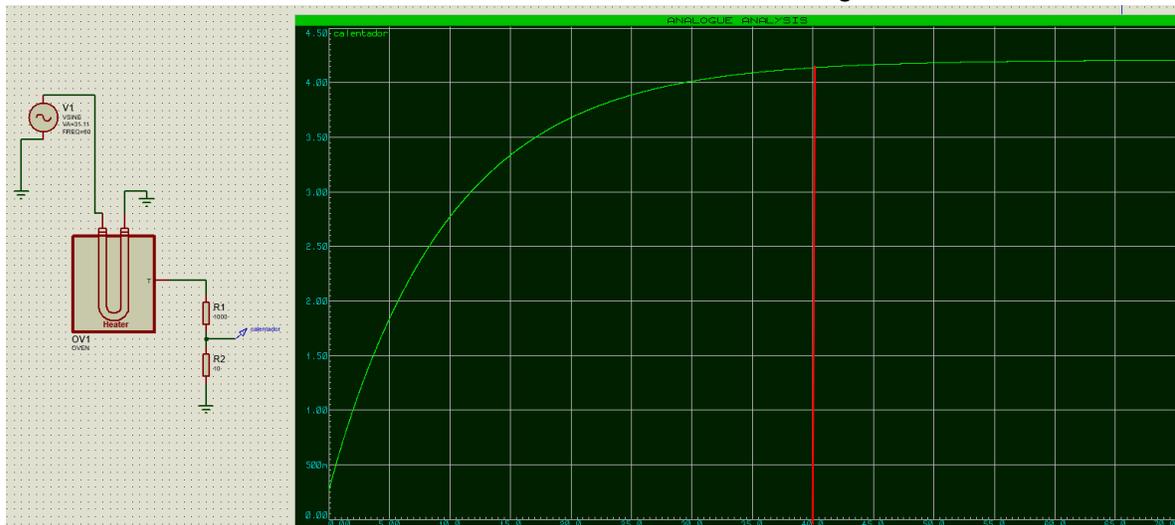


Figura 51. Curva de calentamiento de la planta con una estimulación de 22 V rms.

Se evidencia que la gráfica comienza en 25 °C (250mV) y llega hasta 425°C (4.25 V), por lo tanto, es posible obtener la ganancia de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{Y_{final} - Y_{inicial}}{U_{final} - U_{inicial}} = \frac{425 - 25}{22 - 0} = 18.182 \quad (30)$$

De la curva de calentamiento, evidenciada en la Figura 28. se logra apreciar el tiempo de establecimiento del proceso, el cual es aproximadamente 40 segundos, con esto podemos hallar la constante de tiempo haciendo uso de la siguiente formula:

$$\text{Testablecimiento} = 4\tau \quad (31)$$

Por lo tanto $\tau = 10$.

Por otra parte, se evidencia que el calentador simulado no tiene retardo, puesto que responde instantáneamente a los estímulos de voltaje. Por lo tanto, la función de transferencia del calentador es la siguiente:

$$P(s) = \frac{18.182}{10s + 1} \quad (32)$$

Una vez obtenida la función de transferencia se usó la app de Matlab “PID Tuner” para ajustar las ganancias del controlador PID, y así lograr un buen rendimiento de la planta con un sobre impulso máximo de 5%.

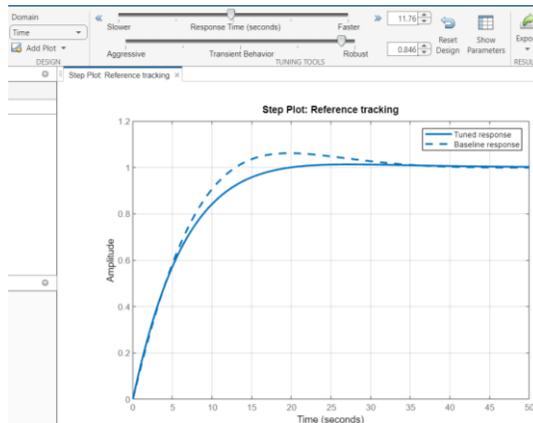


Figura 52. Ajuste de las ganancias del control PID a través de “PID Turner” de Matlab. (fuente: elaboración propia).

Una vez ajustadas las ganancias, se implementó el control PID en proteus con la placa Arduino uno, un relé, un circuito detector de cruce por cero y el calentador utilizado, además se hizo uso de la librería “PID_v1”, obteniendo el resultado deseado. Como se evidencia en la Figura 53. el control PID desarrollado es estable y logra alcanzar la referencia de 390 °C en 20 segundos, además no tiene sobre impulso lo que ayuda a proteger la película radiográfica de temperaturas superiores que puedan afectar su calidad. En la simulación se evidencia un circuito de cruce por cero, debido a que en el entorno de proteus no se encuentran disponibles relays con detectores de cruce por cero como el Fotek SSR 25-DA, por su parte esta función permite un control más preciso de la potencia entregada a la resistencia calefactora, al activar el relé cuando la señal alterna de carga tenga un valor cercano o igual a 0.

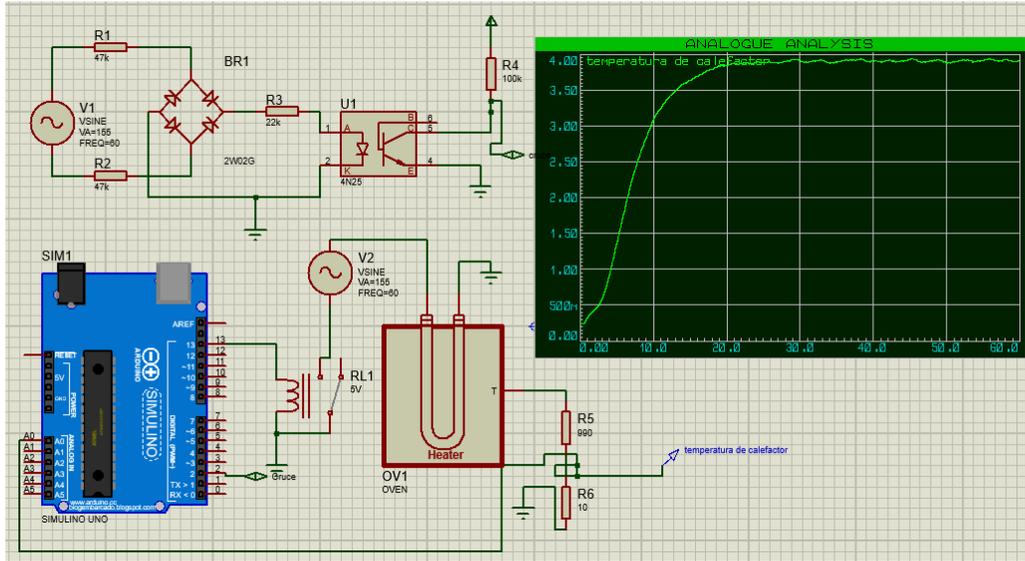


Figura 53. Control PID de temperatura simulado en Proteus. (Fuente: elaboración propia.)

Además, se realizaron pruebas al control de temperatura, con diferentes setpoints, teniendo en cuenta los casos en donde se requiere un proceso de secado más lento, y por lo tanto una temperatura de secado menor. Como resultado el sistema logro alcanzar las diferentes temperaturas de referencia, como se evidencia en la Figura 54. en la cual el Setpoint es una temperatura de 220°C.

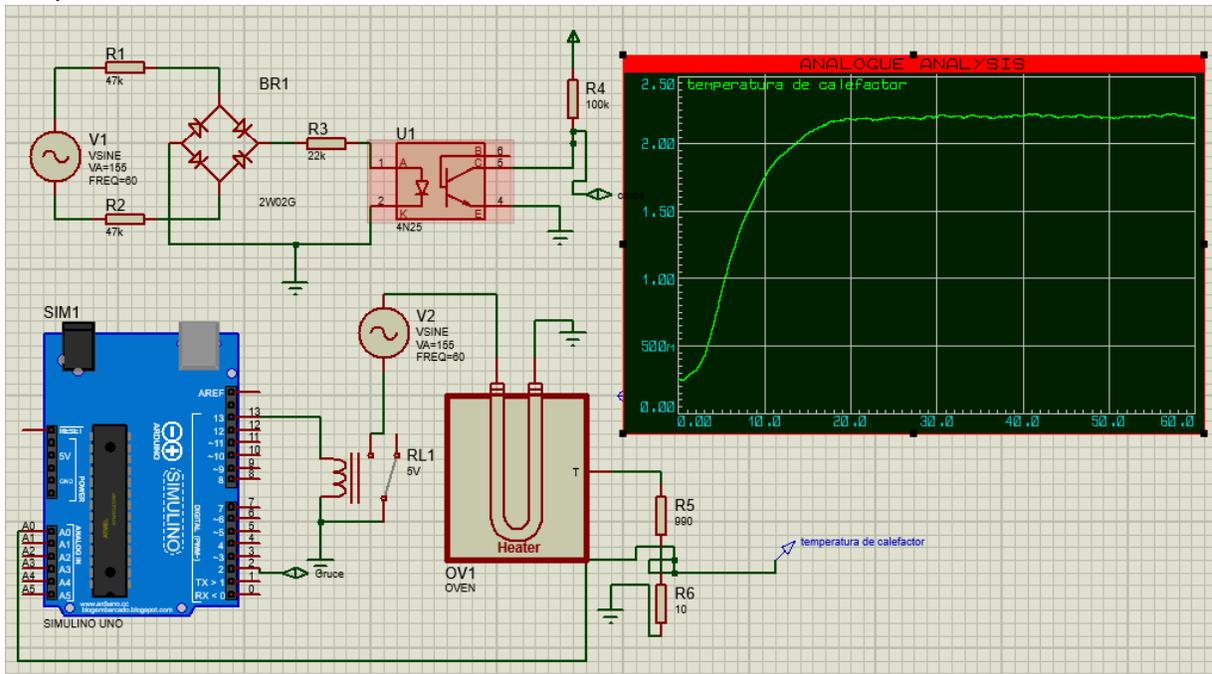


Figura 54. Control PID de temperatura con setpoint de 220°C simulado en Proteus. (Fuente: elaboración propia.)