

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de Investigación

**Diseño de un sistema de control y alimentación  
inalámbrica para la medición en tiempo real de  
temperatura, presión y contenido humedad en un  
horno con cámara de vacío para el secado de frutas**

Josue Marshall Tinoco Villa

Para optar el Grado Académico de  
Bachiller en Ingeniería Mecatrónica

Huancayo, 2023

Repositorio Institucional Continental  
Trabajo de investigación



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

**INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE  
INVESTIGACIÓN**

**A** : FELIPE GUTARRA MEZA  
Decano de la Facultad de Ingeniería

**DE** : GRIMALDO WILFREDO QUISPE SANTIVÁÑEZ  
Asesor de trabajo de investigación

**ASUNTO** : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de  
investigación

**FECHA** : 14 de Setiembre de 2023

---

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para saludarlo y en vista de haber sido designado asesor del trabajo de investigación titulado: "DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL Y ALIMENTACIÓN INALÁMBRICA PARA LA MEDICIÓN EN TIEMPO REAL DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y CONTENIDO HUMEDAD EN UN HORNO CON CÁMARA DE VACÍO PARA EL SECADO DE FRUTAS", perteneciente al/la/los/las estudiante(s) JOSUE MARSHALL TINOCO VILLA, de la E.A.P. de Ingeniería Mecatrónica; se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 20 % de similitud (informe adjunto) sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI  NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores  
(Nº de palabras excluidas: ) SI  NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI  NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios de legalidad, presunción de veracidad y simplicidad, expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales – RENATI y en la Directiva 003-2016-R/UC.

Esperando la atención a la presente, me despido sin otro particular y sea propicia la ocasión para renovar las muestras de mi especial consideración.

Atentamente,



Asesor de trabajo de investigación  
GRIMALDO WILFREDO QUISPE SANTIVÁÑEZ

## **DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD**

Yo, JOSUE MARSHALL TINOCO VILLA, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. 45096745, de la E.A.P. de Ingeniería Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. El trabajo de investigación titulado: "DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL Y ALIMENTACIÓN INALÁMBRICA PARA LA MEDICIÓN EN TIEMPO REAL DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y CONTENIDO HUMEDAD EN UN HORNO CON CÁMARA DE VACÍO PARA EL SECADO DE FRUTAS", es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecatrónico.
2. El trabajo de investigación no ha sido plagiado ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. El trabajo de investigación es original e inédito, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.

14 de Setiembre de 2023.



Josue Marshall Tinoco Villa

DNI. No. 45096745

# Trabajo de Investigacion

---

## ORIGINALITY REPORT

---

20%

SIMILARITY INDEX

18%

INTERNET SOURCES

6%

PUBLICATIONS

10%

STUDENT PAPERS

---

## PRIMARY SOURCES

---

1	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Internet Source	2%
2	Submitted to Universidad Continental Student Paper	2%
3	<a href="http://tesis.pucp.edu.pe">tesis.pucp.edu.pe</a> Internet Source	1%
4	<a href="http://repositorio.continental.edu.pe">repositorio.continental.edu.pe</a> Internet Source	1%
5	Submitted to Indian Institute of Technology Jodhpur Student Paper	<1%
6	Submitted to Universidad Internacional de la Rioja Student Paper	<1%
7	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Internet Source	<1%
8	<a href="http://repositorio.uncp.edu.pe">repositorio.uncp.edu.pe</a> Internet Source	<1%
9	<a href="http://descubrearduino.com">descubrearduino.com</a>	

Internet Source

<1 %

10

[www.coursehero.com](http://www.coursehero.com)

Internet Source

<1 %

11

Submitted to Universidad Privada Boliviana

Student Paper

<1 %

12

[dspace.ups.edu.ec](http://dspace.ups.edu.ec)

Internet Source

<1 %

13

[dokumen.pub](http://dokumen.pub)

Internet Source

<1 %

14

[downloads.hindawi.com](http://downloads.hindawi.com)

Internet Source

<1 %

15

[ebiltegia.mondragon.edu](http://ebiltegia.mondragon.edu)

Internet Source

<1 %

16

[repositorio.utc.edu.ec](http://repositorio.utc.edu.ec)

Internet Source

<1 %

17

Alejandro Restrepo Román, Iván D. Bedoya, Andrés A. Amell. "Comparative, numerical, and experimental study of the influence of infrared radiation on a radiative-convective drying system for kaolin clay", Case Studies in Thermal Engineering, 2023

Publication

<1 %

18

Submitted to Tecsup

Student Paper

<1 %

19	<a href="http://livrepository.liverpool.ac.uk">livrepository.liverpool.ac.uk</a> Internet Source	<1 %
20	<a href="http://beei.org">beei.org</a> Internet Source	<1 %
21	<a href="http://repositorio.ucss.edu.pe">repositorio.ucss.edu.pe</a> Internet Source	<1 %
22	<a href="http://www.slideshare.net">www.slideshare.net</a> Internet Source	<1 %
23	<a href="http://ejournal.pnc.ac.id">ejournal.pnc.ac.id</a> Internet Source	<1 %
24	<a href="http://www.semanticscholar.org">www.semanticscholar.org</a> Internet Source	<1 %
25	Milad Amiri, Dariusz Mikielwicz. "Three-dimensional numerical investigation of hybrid nanofluids in chain microchannel under electrohydrodynamic actuator", Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2022 Publication	<1 %
26	Xueqian Su, Ken Hurley, Zhiyuan Xu, Yixiang Xu, Laban Rutto, Sean O'Keefe, Holly Scoggins, Yun Yin. "Performance of alternative drying techniques on hop ( <i>Humulus lupulus</i> L.) aroma quality: an HS-SPME-GC-MS-O and chemometrics combined approach", Food Chemistry, 2022 Publication	<1 %

27	<a href="#">idoc.pub</a> Internet Source	<1 %
28	<a href="#">1library.co</a> Internet Source	<1 %
29	Martines-López Enrique, Lira-Cortés Leonel. "Evaluación de los factores de influencia en el modelo de Luikov durante el secado de ladrillo", Ingeniería, Investigación y Tecnología, 2016 Publication	<1 %
30	Thayla B. Roratto, Ricardo L. Monteiro, Bruno A.M. Carciofi, João B. Laurindo. "An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables", LWT, 2020 Publication	<1 %
31	Submitted to Universidad de Piura Student Paper	<1 %
32	<a href="#">repository.unad.edu.co</a> Internet Source	<1 %
33	<a href="#">semarakilmu.com.my</a> Internet Source	<1 %
34	<a href="#">www.scielo.cl</a> Internet Source	<1 %
35	<a href="#">vtechworks.lib.vt.edu</a> Internet Source	<1 %

36	Submitted to Universidad Católica de Santa María Student Paper	<1 %
37	ph02.tci-thaijo.org Internet Source	<1 %
38	www.sciengtexopen.org Internet Source	<1 %
39	www.saro.de Internet Source	<1 %
40	P. Santhoshkumar, K.S. Yoha, J.A. Moses. "Drying of seaweed: Approaches, challenges and research needs", Trends in Food Science & Technology, 2023 Publication	<1 %
41	cecalc.ula.ve Internet Source	<1 %
42	Submitted to The University of Manchester Student Paper	<1 %
43	www.osapublishing.org Internet Source	<1 %
44	A. Coloma-Paxi, R. Paquita-Ninaraqui, R. Velásquez-Huallpa, R. L. Abarca. "Efecto del escaldado y la temperatura en la cinética de secado de las hojas de quinua (Chenopodium quinoa Willd.), variedad Salcedo INIA", Agro Sur, 2017	<1 %

45

Enfa Fu, Mingjun Yi, Qianling Liu, Zhenggang Xiao. "Solvent transport dynamics and its effect on evolution of tensile properties of nitrocellulose (NC)-based propellants under hot-air drying process", Defence Technology, 2023

Publication

---

46

Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC

Student Paper

---

47

Milan Mlađen, Jelena Banović, Jovan Galić, Gordana Gardašević, Milica Petković. "Speech quality assessment in visible light communications", 2023 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), 2023

Publication

---

48

Submitted to Sheffield Hallam University

Student Paper

---

49

[patents.google.com](https://patents.google.com)

Internet Source

---

50

[staff.kmutt.ac.th](http://staff.kmutt.ac.th)

Internet Source

---

51

Abdul Azis Lihawa, Elyas Palantei, Yusri Syam Akil. "The Effect of Wave Stirring Mechanism in Improving Heating Uniformity in

<1 %

<1 %

<1 %

<1 %

<1 %

<1 %

<1 %

Microwave Chamber For Fishing Industry",  
2021 International Conference on Artificial  
Intelligence and Mechatronics Systems  
(AIMS), 2021

Publication

52

[old.sztaki.hu](http://old.sztaki.hu)

Internet Source

<1 %

53

[ri2.bib.udo.edu.ve](http://ri2.bib.udo.edu.ve)

Internet Source

<1 %

54

Lina Sheng, Luxin Wang. "Approaches for a more microbiologically and chemically safe dried fruit supply chain", Current Opinion in Biotechnology, 2023

Publication

<1 %

55

Submitted to Universidad de La Laguna

Student Paper

<1 %

56

[dinac90.wordpress.com](http://dinac90.wordpress.com)

Internet Source

<1 %

57

[repositorio.esan.edu.pe](http://repositorio.esan.edu.pe)

Internet Source

<1 %

58

[www.ariel.fisica.ru](http://www.ariel.fisica.ru)

Internet Source

<1 %

59

[www.dspace.uce.edu.ec](http://www.dspace.uce.edu.ec)

Internet Source

<1 %

60

Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru

<1 %

61 [cires.htmlplanet.com](http://cires.htmlplanet.com) <1 %  
Internet Source

---

62 [dademuch.com](http://dademuch.com) <1 %  
Internet Source

---

63 [hal-centralesupelec.archives-ouvertes.fr](http://hal-centralesupelec.archives-ouvertes.fr) <1 %  
Internet Source

---

64 [repositorio.escuelamilitar.edu.pe](http://repositorio.escuelamilitar.edu.pe) <1 %  
Internet Source

---

65 [www.sc.ehu.es](http://www.sc.ehu.es) <1 %  
Internet Source

---

66 Pulkit Singh, Ram Krishn Mishra, Siddhaling Urolagin, Vishnu Sharma. "Enhancing Security by Identifying Facial Check-in using Deep Convolutional Neural Network", 2021 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N), 2021  
Publication

---

67 [es.slideshare.net](http://es.slideshare.net) <1 %  
Internet Source

---

68 [publications.polymtl.ca](http://publications.polymtl.ca) <1 %  
Internet Source

---

69 [rcientificas.uninorte.edu.co](http://rcientificas.uninorte.edu.co) <1 %  
Internet Source

---

70	<a href="http://www.dropbox.com">www.dropbox.com</a> Internet Source	<1 %
71	<a href="http://www.leyboldproducts.es">www.leyboldproducts.es</a> Internet Source	<1 %
72	<a href="http://www.shopwiki.ie">www.shopwiki.ie</a> Internet Source	<1 %
73	Samuel Verdú Amat. "Aplicación del análisis de imagen hiperespectral y tridimensional al control de procesos y productos en la industria harinera y sus derivados.", Universitat Politecnica de Valencia, 2016 Publication	<1 %
74	<a href="http://aleph23.uned.ac.cr">aleph23.uned.ac.cr</a> Internet Source	<1 %
75	<a href="http://cicytac.cba.gov.ar">cicytac.cba.gov.ar</a> Internet Source	<1 %
76	<a href="http://repositorio.une.edu.pe">repositorio.une.edu.pe</a> Internet Source	<1 %
77	<a href="http://repositorio.upao.edu.pe">repositorio.upao.edu.pe</a> Internet Source	<1 %
78	<a href="http://repositorio.ute.edu.ec">repositorio.ute.edu.ec</a> Internet Source	<1 %
79	<a href="http://www.ibm.com">www.ibm.com</a> Internet Source	<1 %

80	"ROC&C Table of Content", 2019 IEEE International Fall Meeting on Communications and Computing (ROC&C), 2019 Publication	<1 %
81	Submitted to Universidad Catolica De Cuenca Student Paper	<1 %
82	Submitted to University of Strathclyde Student Paper	<1 %
83	cvc.cervantes.es Internet Source	<1 %
84	etda.libraries.psu.edu Internet Source	<1 %
85	pesquisa.bvsalud.org Internet Source	<1 %
86	prezi.com Internet Source	<1 %
87	repositorio.espe.edu.ec Internet Source	<1 %
88	repositorio.ug.edu.ec Internet Source	<1 %
89	repositorio.usm.cl Internet Source	<1 %
90	rio.upo.es Internet Source	<1 %

---

91	<a href="https://tesis.ucsm.edu.pe">tesis.ucsm.edu.pe</a> Internet Source	<1 %
92	<a href="http://www.cacic2016.unsl.edu.ar">www.cacic2016.unsl.edu.ar</a> Internet Source	<1 %
93	<a href="http://www.donde-comprar.es">www.donde-comprar.es</a> Internet Source	<1 %
94	<a href="http://www.electrogeekshop.com">www.electrogeekshop.com</a> Internet Source	<1 %
95	<a href="http://www.itenlinea.com">www.itenlinea.com</a> Internet Source	<1 %
96	<a href="http://www.jove.com">www.jove.com</a> Internet Source	<1 %
97	<a href="http://www.kwalt-clf.com">www.kwalt-clf.com</a> Internet Source	<1 %
98	<a href="http://www.scribd.com">www.scribd.com</a> Internet Source	<1 %
99	M. M. Hussain. "NUMERICAL SIMULATION OF TWO-DIMENSIONAL HEAT AND MOISTURE TRANSFER DURING DRYING OF A RECTANGULAR OBJECT", Numerical Heat Transfer Part A Applications, 6/2003 Publication	<1 %
100	JADER RODRIGUEZ CORTINA. "CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA INTENSIFICACION DEL PROCESO DE SECADO	<1 %

---

DE TOMILLO (Thymus Vulgaris L.):  
APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS DE  
POTENCIA Y SECADO INTERMITENTE",  
Universitat Politecnica de Valencia, 2013

Publication

101

[www.tandfonline.com](http://www.tandfonline.com)

Internet Source

<1 %

Exclude quotes On

Exclude matches Off

Exclude bibliography On

# Trabajo de Investigacion

GRADEMARK REPORT

FINAL GRADE

GENERAL COMMENTS

**/20**

PAGE 1

PAGE 2

PAGE 3

PAGE 4

PAGE 5

PAGE 6

PAGE 7

PAGE 8

PAGE 9

PAGE 10

PAGE 11

PAGE 12

PAGE 13

PAGE 14

PAGE 15

PAGE 16

PAGE 17

PAGE 18

PAGE 19

PAGE 20

PAGE 21

PAGE 22

---

PAGE 23

---

PAGE 24

---

PAGE 25

---

PAGE 26

---

PAGE 27

---

PAGE 28

---

PAGE 29

---

PAGE 30

---

PAGE 31

---

PAGE 32

---

PAGE 33

---

PAGE 34

---

PAGE 35

---

PAGE 36

---

PAGE 37

---

PAGE 38

---

PAGE 39

---

PAGE 40

---

PAGE 41

---

PAGE 42

---

PAGE 43

---

PAGE 44

---

PAGE 45

---

PAGE 46

---

PAGE 47

---

PAGE 48

---

PAGE 49

---

PAGE 50

---

PAGE 51

---

PAGE 52

---

PAGE 53

---

PAGE 54

---

PAGE 55

---

PAGE 56

---

PAGE 57

---

## **AGRADECIMIENTO**

Le agradecemos a Dios por darnos la vida, a nuestros padres por darnos la posibilidad de estudiar una profesión y al profesor por transmitirnos conocimientos y valores que nos serán muy útiles a lo largo de nuestra vida.

## **DEDICATORIA**

El siguiente trabajo va dedicado a las personas que hacen que nuestras metas y sueños sean posibles: nuestros padres. También va dedicado a nuestros docentes de la carrera que sin su ayuda no hubiese sido posible este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	8
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....	12
1.1 Planteamiento y formulación del problema .....	12
1.1.1 Problema General .....	13
1.1.2. Problemas específicos .....	13
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo General.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos .....	14
1.2 Justificación .....	14
1.2.1 Justificación practica .....	14
1.2.2 Justificación tecnológica.....	15
1.2.3 Justificación metodológica.....	15
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	16
2.1 Antecedentes del problema .....	16
2.2 Bases teóricas .....	17
2.2.1 Métodos de secado .....	17
2.2.2 Energía inalámbrica.....	18
2.2.3 Transmisión de datos .....	20
2.2.4 Buses seriales .....	20
2.2.5 Transceptores en radio frecuencia .....	21
2.2.6 Placas de desarrollo Arduino.....	22
2.3 Definición de términos básicos.....	24
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	26
3.1 Tipo de investigación .....	26
3.2. Alcance de investigación .....	26
3.3 Metodología de investigación.....	26
a. Compresión de la solicitud.....	27
b. Concepto de solución .....	27
c. Desarrollo del diseño .....	27

d. Elaboración de detalles.....	28
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN .....	28
4.1 Lista de Exigencias .....	28
4.2. Análisis de la solución.....	29
4.2.1 Caja negra.....	29
4.2.2 Estructura de funciones .....	30
4.2.3 Matriz morfológica .....	30
4.2.4 Matriz de evaluación.....	34
4.3. Diseño .....	35
4.3.1 Diseño mecánico .....	35
4.3.2 Diseño del sistema de alimentación.....	1
4.3.3 Diseño del sistema de control.....	4
CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	8
5.1 Señales del sistema de control y alimentación inalámbrica.....	8
5.2 Datos experimentales y modelos matemáticos de temperatura .....	10
5.3 Datos experimentales y modelos matemáticos de contenido de humedad ....	12
5.4 Costo del sistema de control y alimentación inalámbrica .....	14
CONCLUSIONES .....	15
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	17

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Proceso de secado con cámara de vacío
- Figura 2. Inducción electromagnética entre dos bobinas
- Figura 3. Circuito equivalente de transmisión de energía eléctrica inalámbrica
- Figura 4. Conexiones SPI con un solo receptor
- Figura 5. Pines de nRF24L01.
- Figura 6. Arduino Mega
- Figura 7. Arduino Uno Rev3
- Figura 8. Arduino Micro
- Figura 9. Arduino Nano
- Figura 10. Diagrama de la normativa VDI2221
- Figura 11. Caja negra del horno con cámara de vacío
- Figura 12. Estructura de funciones.
- Figura 13. Diagrama de la primera solución propuesta
- Figura 14. Diagrama de la segunda solución propuesta
- Figura 15. Diagrama de la tercera solución propuesta
- Figura 16. Vista isométrica del diseño propuesto
- Figura 17. Vista frontal del diseño propuesto
- Figura 18. Vista lateral del diseño propuesto
- Figura 19. Vista isométrica explosionada
- Figura 20. Fuente AC-DC EN55022,
- Figura 21. Reductor de voltaje DC-DC Lm2596
- Figura 22. Generador de pulsos y bobina emisora
- Figura 23. Ubicación del generador de pulsos en el gabinete del horno
- Figura 24. Circuito generador de tren de pulsos dividido por secciones según su funcionalidad
- Figura 25. Diagrama esquemático del funcionamiento del sistema de control y alimentación del horno con cámara de vacío
- Figura 26. Módulo transceptor nRF24L01
- Figura 27. Pines del módulo transceptor nRF24L01
- Figura 28. Ubicación del módulo transceptor nRF24L01 en el gabinete del horno
- Figura 29. Sensor de temperatura y humedad DHT21

Figura 30. Sensor de presión BMP085

Figura 31. Diagrama esquemático del sistema de alimentación control inalámbrico con las señales obtenidas en diferentes puntos

Figura 32. Señal de voltaje obtenida a la salida del generador de tren de pulsos

Figura 33. Señal de voltaje obtenida en la bobina receptora

Figura 34. Señal de voltaje rectificadora obtenida después del diodo Schottky

Figura 35. Comparación entre modelos matemáticos de temperatura propuestos y datos experimentales del secado de manzanas

Figura 36. Comparación entre modelos matemáticos de temperatura propuestos y datos experimentales del secado de plátanos

Figura 37. Comparación entre modelos matemáticos de contenido de humedad propuestos y datos experimentales del secado de manzanas

Figura 38. Comparación entre un matemático de contenido de humedad y datos experimentales del secado de plátanos

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Lista de exigencias

Tabla 2. Matriz morfológica

Tabla 3. Evaluación técnica y económica.

Tabla 4. Propiedades del acero inoxidable

Tabla 5. Propiedades del horno con cámara de vacío

Tabla 6. Especificaciones de la fuente elegida

Tabla 7. Especificaciones del convertidor DC-DC elegido

Tabla 8. Especificaciones del módulo transceptor nRF24L01

Tabla 9. Especificaciones del sensor de temperatura y humedad elegido

Tabla 10. Especificaciones del sensor de presión elegido

Tabla 11. Costos del sistema de control y alimentación inalámbrica

## RESUMEN

Los alimentos frescos cuentan con un alto nivel de agua y por son propensos a contaminación microbiana. Los procesos de secado pueden reducir el contenido de agua, y dependiendo la técnica, también menores niveles de actividad microbiana. El secado con cámara de vacío es de los procesos más utilizados porque permite menores tiempos de secado ya menor temperatura. Por otro lado, los trabajos que usan el efecto de inducción electromagnética en hornos de secado se limitan a aplicarlo para el calentamiento por inducción, además de que estos hornos no cuentan con cámara de vacío. Se propone un sistema de control y alimentación inalámbrica para el proceso de secado con cámara de vacío de frutas, con el sistema propuesto se obtienen datos en tiempo real. Se usa la normativa VDI 2221 como metodología de diseño, con la cual se comprendió los requerimientos del sistema de control y alimentación inalámbrica, se destaca el uso necesario de dos placas de desarrollo con microcontroladores y el uso de materiales que permitan el paso de ondas de radiofrecuencia para la transferencia de información y campos magnéticos variables para la transferencia de energía inalámbrica. Los componentes eléctricos del sistema de alimentación y control propuesto son: el generador de tren de pulsos, la bobina emisora y receptora, el diodo Schottky y los convertidores DC-DC. El material usado entre las bobinas es vidrio porque permite el paso de campos magnéticos variables, esto es necesario para que produzca el efecto de inducción electromagnética. El Arduino Micro, ubicado en el interior de la cámara de vacío, está conectado a los sensores temperatura, contenido de humedad y presión. La transferencia de datos del Arduino Micro al Arduino Uno, este último ubicado afuera de la cámara de vacío, se da de manera inalámbrica usando dos módulos transceptores nRF24L01 separados por vidrio dado que este material permite el paso de ondas de radiofrecuencia. Con los datos procesados por el Arduino Uno, se controla la resistencia calentadora, bomba de vacío y válvulas; componentes necesarios para extraer aire de la cámara de vacío y obtener la presión deseada. Finalmente, se comparó los datos experimentales con modelos matemáticos de temperatura y contenido de humedad del proceso de secado de manzanas y plátanos, a las presiones de 20kPa y 5kPa, respectivamente. Ante el desfase observado entre estos, se destacó la importancia de obtener datos en tiempo real de temperatura y contenido de humedad, además de su impacto en el proceso de secado con cámara de vacío.

## INTRODUCCIÓN

Los alimentos cuentan con un alto nivel de agua y por ende son propensos a contaminación microbiana, para solucionar este problema los procesos de secado son una buena opción, y dependiendo la técnica, también se consiguen menores niveles de actividad microbiana [1]. El método de secado con cámara de vacío en hornos se ha utilizado ampliamente debido a la menor temperatura y tiempo requerido. En los trabajos anteriormente realizados se proponen hornos de secado que utilizan el fenómeno de inducción electromagnética para el calentamiento, estos hornos no cuentan con cámara de vacío y sus componentes electrónicos no aprovechan el fenómeno de inducción electromagnética, dado que son cableados. El presente trabajo propone un sistema de control y alimentación inalámbrica que permita la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en un horno con cámara de vacío para el secado de frutas, haciendo uso del fenómeno de inducción electromagnética.

El presente trabajo es del tipo desarrollo tecnológico y está compuesta por cinco capítulos. El capítulo I está dedicado al planteamiento y formulación del problema, se muestran la tecnológica existente respecto a los métodos de secados teniendo en cuentas sus ventajas y desventajas, se detalla porque un sistema de control y alimentación inalámbrica satisface vacíos en la gama tecnológica existente.

El capítulo II muestra los antecedentes del problema usados para esta investigación, en base a esto se detallan los métodos de secados más utilizados junto a las perspectivas de investigación utilizadas y que puntos de mejora tiene el proceso de secado usando hornos con cámara de vacío. También se definen los términos básicos que se usaran en el resto del documento.

El alcance de la investigación y tipo de investigación se detallan en el capítulo III, también se detalla la metodología utilizada, VDI 2221, junto a las etapas de cada fase de diseño. La aplicación de la metodología se da en el capítulo IV, esta incluye el desarrollo de la lista exigencias, matriz morfológica, matriz de evaluación técnica y económica.

Se concluye la investigación con el capítulo V, donde se detallan las señales obtenidas del sistema de control y alimentación inalámbrica. El capítulo finaliza con la comparación entre datos experimentales y modelos matemáticos, se destaca la importancia que tienen el sistema de control y alimentación en la obtención de datos en tiempo real y como impacta esto en el proceso de secado de manzanas y plátanos.

# CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

## 1.1 Planteamiento y formulación del problema

Los alimentos frescos como las frutas, vegetales o carnes cuentan con un alto nivel de agua y por ende son propensos a contaminación microbiana; los procesos de secado pueden reducir el contenido de agua, y dependiendo la técnica, también menores niveles de actividad microbiana [1]. El secado además de aumenta el valor de los alimentos, reduce el espacio de almacenamiento y costos de transporte, lo cual es importante en países con sistemas de transporte deficientes, y si el proceso de secado se hiciera en el lugar donde se producen los alimentos también se reducirían las perdidas, siendo los pequeños productores los más beneficiados [2].

El secado por convección es de los métodos más utilizados, sin embargo, este método tiene un consumo energético relativamente alto y además de causar deterioro a los alimentos está limitado por el contenido de humedad del aire [3]. Por otra parte, el secado usando microondas proporciona unos menores tiempos de secado y menores niveles de consumo energético, sin embargo, una aplicación continua de microondas a los alimentos puede causar el sobrecalentamiento de estos y en consecuencia la calidad se verá afectada [4]. Otro punto por considerar es que, aunque el uso de microondas proporcione menores tiempos de secado, el calentamiento por microondas no es uniforme y puede afectar la calidad de los alimentos, esta falta de uniformidad se debe a factores relacionados al magnetrón, como la forma o tamaño de este último [5].

La liofilización es un proceso de secado que congela los alimentos para luego exponerlos a presiones bajas mediante una cámara de vacío previo al proceso de calentamiento, el secado por liofilización evita cambios indeseados en los alimentos, pero demanda más energía y es de los métodos más costosos [6]. El uso solo de las cámaras vacío permite el secado de alimentos a una menor temperatura y con un tiempo de secado menor, esto es así porque al reducir la presión en la cámara también se reduce el punto ebullición del agua, sin embargo, el uso solo de cámara de vacío no evita la contracción de los alimentos [7].

El secado usando cámaras de vacío se puede combinar con diferentes fuentes calor como, por ejemplo, resistencias eléctricas, colectores solares y calentamiento por inducción. En el calentamiento por inducción las bobinas y convertidores de potencia utilizados permiten que la eficiencia sea mayor al 90% y que además de poder controlar la potencia suministrada, la temperatura alrededor del objeto es menor dado que solo se calienta el objetivo [8]. Estas características han hecho que se estudie su aplicación a hornos de secado por convección, en este tipo de hornos los sensores están conectados por cables y por ello el uso de procesos con cámara de vacío se ve limitado [9]. Sin embargo, el fenómeno de inducción también se puede usar para suministrar energía eléctrica inalámbrica a los componentes electrónicos del horno, el presente trabajo propone un horno con cámara de vacío cuyos sensores y demás componentes obtengan energía eléctrica inalámbrica por inducción, logrando también mediciones en tiempo real de temperatura, presión y contenido de humedad en este tipo de hornos.

### **1.1.1 Problema General**

¿Cómo diseñar el sistema de control y alimentación inalámbrica para la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en un horno con cámara de vacío para el secado de frutas?

### **1.1.2. Problemas específicos**

- ¿Qué componentes electrónicos requiere el sistema de control y alimentación inalámbrica para la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en un horno con cámara de vacío para el secado de frutas?
- ¿Qué tipo de señales requiere el sistema de control y alimentación inalámbrica para la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en un horno con cámara de vacío para el secado de frutas?
- ¿Qué efecto tiene el uso de mediciones en tiempo real en comparación con el uso modelos matemáticos para la estimación de temperatura y contenido de humedad, en el proceso de secado de frutas usando un horno con cámara de vacío?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar el sistema de control y alimentación inalámbrica para la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en un horno con cámara de vacío para el secado de frutas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar los componentes electrónicos que requiere el sistema de control y alimentación inalámbrica para la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en un horno con cámara de vacío para el secado de frutas.
- Determinar qué tipo de señales requiere el sistema de control y alimentación inalámbrica para la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en un horno con cámara de vacío para el secado de frutas.
- Determinar el efecto que tiene el uso de mediciones en tiempo real en comparación con el uso modelos matemáticos para la estimación de temperatura y contenido de humedad, en el proceso de secado de frutas usando un horno con cámara de vacío.

## **1.2 Justificación**

### **1.2.1 Justificación practica**

Los alimentos por su alto contenido suelen ser propensos a contaminación microbiana; los procesos de secado pueden reducir el contenido de agua, y dependiendo la técnica, también menores niveles de actividad microbiana [1]. Los alimentos deshidratados no solo aumentan el valor de los alimentos, sino que también se reduce su espacio de almacenamiento y costos de transporte. El presente trabajo de investigación propone el diseño de un sistema de control y alimentación usando energía inalámbrica para un horno con cámara de vacío para el secado frutas.

### **1.2.2 Justificación tecnológica**

Los hornos de secado propuestos actualmente son en su gran mayoría por convección y no usan cámara de vacío. La inclusión de cámaras de vacío permite una menor temperatura y tiempo de secado para los alimentos, y aun que los alimentos se contraigan en el proceso, es una alternativa no tan costosa comparada con el proceso de liofilización que también usa cámara de vacío [7]. Por otro lado, en los pocos diseños de hornos por convección que usan el fenómeno de inducción electromagnética, esta se usa solo para el calentamiento [9], pese a que este fenómeno ha encontrado aplicación en muchos procesos de transferencia de energía inalámbrica [10]. En el presente trabajo de investigación propone el diseño de un sistema de control y alimentación usando energía inalámbrica para un horno con cámara de vacío para el secado frutas.

### **1.2.3 Justificación metodológica**

Se propone el diseño de un sistema de control y alimentación usando energía inalámbrica para un horno con cámara de vacío para el secado frutas, el uso de energía inalámbrica en este tipo hornos permitirá diseños más compactos y sencillos dado que no requerirá cableado para la conexión de sensores y controladores. El uso del sistema de control y alimentación propuesto también permite la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en la cámara de vacío.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del problema

El secado por convección es uno de los métodos más utilizados. Madhankumar et al. [11] diseñó un horno que cuenta con un sistema de ventilación, la transferencia de calor se da por radiación infrarroja y alcanza una temperatura entre 45°C-55°C. Wagiman et al. [12] propuso un diseño en el cual un colector solar es incorporado junto al horno y por medio de un sistema de ventilación se logra la deshidratación de frutas y vegetales, registró una temperatura máxima de 44.1°C. P. Quiñones-Reyes et al. [13] propuso un horno de convección híbrido que cuenta con un colector solar y resistencias eléctricas, estudio el control adecuado para dicha configuración. El secado por convección también se usa en conjunto con radiación de microondas dado que el tiempo de secado se reduce porque se aprovecha la polaridad de las moléculas de agua presentes en los alimentos, Zarein et al. [14] estudió un horno microondas con sistema de ventilación para el secado de manzanas en trozos, concluyó que la potencia óptima para el proceso de secado es de 600 W. En otra investigación, Hakim et al. [15] diseñó un horno microondas con ventilación para el secado de algas marinas, el horno tiene una capacidad de 6kg y requiere una potencia de 2kW. La implementación de colectores solares, hornos de microondas y secado por convección también se ha estudiado, Mangalla et al. [16] propuso dicho horno híbrido para el secado de papas y granos, la temperatura en la cámara se midió usando termocuplas del tipo k, se registró una temperatura de 60°C.

El calentamiento por inducción se ha usado en conjunto con el secado por convección, Bowornprasittikun et al [9] propuso dicha configuración y determinó la frecuencia de resonancia del circuito, 38.7 kHz, con la cual se obtiene la máxima temperatura, 77°C; el horno propuesto se probó con el secado de 0.5 kg de bananas, las cuales requirieron un tiempo de 6 horas y una temperatura de 55°C.

El uso de cámaras de vacío en el proceso de calentamiento permite reducir el tiempo y temperatura requerida para el secado de alimentos; Roratto et al. [17] implementaron una cámara de vacío junto a un colector solar y resistencias eléctricas para obtener vapor y calentar la cámara de vacío, la capacidad del horno propuesto

es 4kg y el tiempo de secado registrado para caquis y zanahorias fue de 3-4h. Do et al [18] optimizaron el proceso de secado de bananas en un horno con cámara de vacío y resistencias eléctricas sus resultados muestran que la temperatura óptima para el secado de bananas es 52.76 °C, a una presión de 0.006mmHg, y por 13.94 h, el proceso de requiere de 3.96kWh/kg. El uso cámaras de vacío en el proceso de secado se ve limitado por el costo de las tecnologías existentes en el mercado; por ello Hubbard et al. [19] diseñó y fabricó un horno con cámara de vacío usando un calentador de motores como fuente de calor, su propuesta pretende ser una alternativa barata y accesible a las propuestas comerciales, usa un control de temperatura simple usando la placa de desarrollo Arduino Uno, usó plástico para las pruebas y obtuvo que la energía especifica requerida fue de 1.17 kWh/g.

## **2.2 Bases teóricas**

### **2.2.1 Métodos de secado**

#### **a. Secado por convección**

El proceso de secado por convección usa aire y alguna fuente de calor como, por ejemplo, microondas, radiación infrarroja o colectores solares; dicho proceso de secado depende de la velocidad de aire [20].

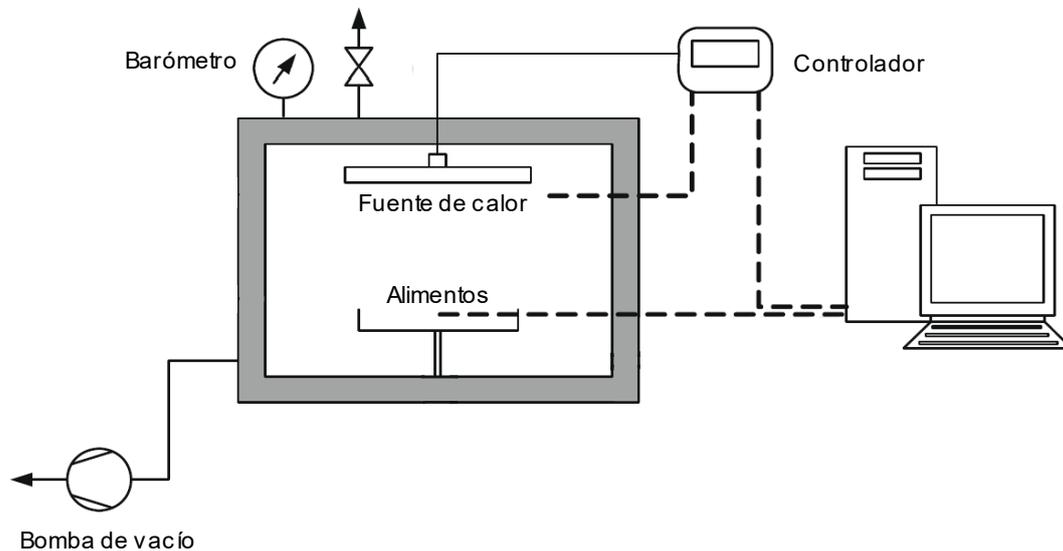
#### **b. Liofilización**

La liofilización es un proceso en el cual congelan los alimentos para luego ser expuestos a presiones bajas, por debajo de la presión atmosférica, en una cámara de vacío para luego iniciar proceso de calentamiento, el secado por liofilización evita cambios indeseados en los alimentos, pero demanda más energía y es de los métodos más costosos [6].

#### **c. Secado con cámara de vacío**

Al igual que en el método de liofilización se usa una cámara de vacío, sin embargo, este proceso no requiere congelar los alimentos; los alimentos húmedos al estar a una presión menor que la atmosférica requieren una menor temperatura y tiempo de secado, este proceso se puede combinar con diferentes fuentes de calor como microondas [21], resistencias eléctricas [18], o colectores solares y resistencias [17], por mencionar algunos.

La figura 1 muestra un diagrama esquemático del proceso de secado con cámara de vacío, primero se reduce la presión en la cámara con una bomba de vacío y luego se usa fuente de calor para llegar a la temperatura requerida de secado, finalmente se deja los alimentos a esta temperatura por el tiempo necesario para su secado; los sensores son monitoreados con un controlador y una computadora.

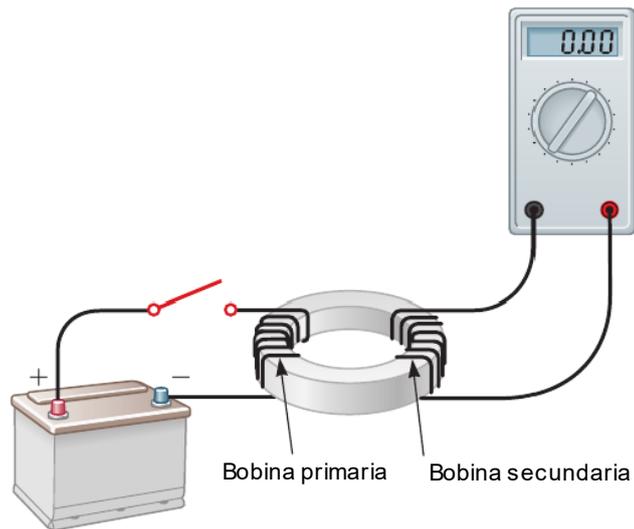


*Figura 1. Proceso de secado con cámara de vacío  
Adaptado de T. Swasdisevi et al.*

## 2.2.2 Energía inalámbrica

### a. Inducción electromagnética

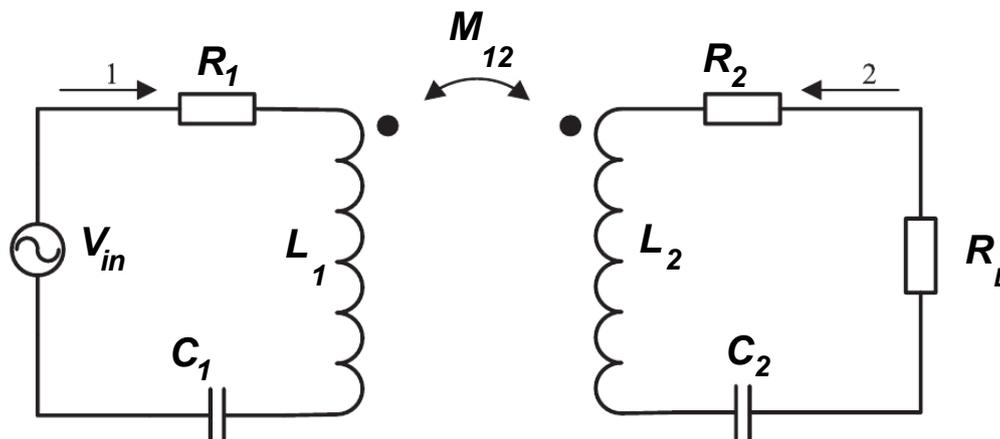
La ley de Faraday, indica que un flujo magnético que cambia en el tiempo induce una fuerza electromotriz [22]. La figura 2 muestra una fuente DC que cuando cierra el circuito produce una corriente en la bobina primaria, en los primeros instantes después de haber cerrado el circuito esta corriente produce un flujo magnético variable, dicho flujo magnético variable induce una corriente en la bobina secundaria, dando así una lectura en el amperímetro.



**Figura 2. Inducción electromagnética entre dos bobinas**  
 Adaptado de R. Serway y J. Jewett, 2017

### b. Transmisión de energía inalámbrica

Usando teoría de circuitos, la transmisión de energía inalámbrica puede representar con el circuito equivalente que se muestra en la figura 3 [23]. Una fuente voltaje variable está conectada al circuito emisor,  $L_1$ ,  $C_1$  y  $R_1$  son la inductancia, capacitancia y resistencia equivalente del circuito emisor, respectivamente;  $L_2$ ,  $C_2$  y  $R_2$  son la inductancia, capacitancia y resistencia equivalente del circuito receptor. La inductancia mutua es representada por  $M_{12}$ ;  $R_L$  representa la carga del circuito.



**Figura 3. Circuito equivalente de transmisión de energía eléctrica inalámbrica**  
 Elaboración propia

### c. Permeabilidad magnética

La permeabilidad magnética hace referencia a la capacidad que tienen los conductores de afectar y ser afectados por campos magnéticos, así como la

capacidad de convertirse en campos magnéticos [24]. Materiales no conductores como el vidrio no tiene la propiedad de permeabilidad magnética y por ende no interfiere con campos magnéticos externos.

### **2.2.3 Transmisión de datos**

#### **a. Transmisión asíncrona**

Los datos son enviados en paquetes, cada paquete consta de tres tipos de bits, bits que representan caracteres numéricos o alfabéticos, bits de paridad, bits de inicio o parada; en los sistemas asíncronos el dispositivo emisor y receptor operan con diferentes osciladores, pero a la misma frecuencia de reloj.

#### **b. Transmisión síncrona**

En la transmisión síncrona de datos, el dispositivo emisor y receptor operan con el mismo oscilador, ubicado en el dispositivo emisor; los bits se transmiten de forma continua por lo que el receptor debe saber cuándo comienzan los datos y el tiempo entre bits.

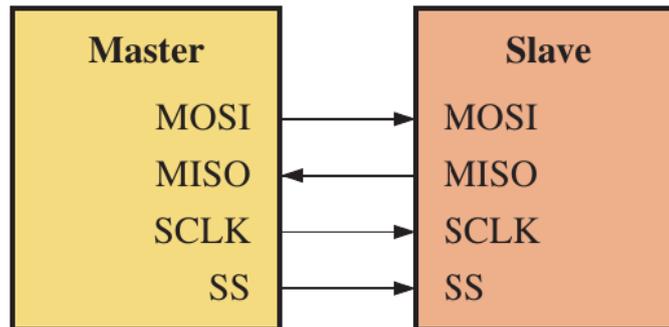
### **2.2.4 Buses seriales**

#### **a. Universal serial bus (USB)**

Es un bus serial estándar ampliamente usado para conectar periféricos a una computadora, el USB permite que los periféricos puedan ser conectados o desconectados cuando la computadora está funcionando, característica denominada como “hot swapping”.

#### **a. Serial-to-peripheral interface (SPI) bus**

Es una comunicación serial síncrona que usa cuatro conexiones para la comunicación entre el dispositivo emisor, “master”, y receptor, “slave”. Este estándar fue desarrollado por Motorola; la velocidad de transferencia de datos es de 10Mbps y permite conexión con múltiples receptores. La figura 4 muestra las conexiones SPI; MOSI es la conexión de datos del emisor al receptor, MISO del receptor al emisor, SCLK es la señal de reloj enviada desde el emisor al receptor, y SS es para la selección del receptor por parte del emisor, ya sea un con un solo receptor o múltiples receptores [25].



*Figura 4. Conexiones SPI con un solo receptor.*

*Tomado de T. Floy, 2015*

El bus SPI se usa en circuitos impresos para la comunicación entre microprocesadores o microcontroladores, y periféricos de circuitos integrados.

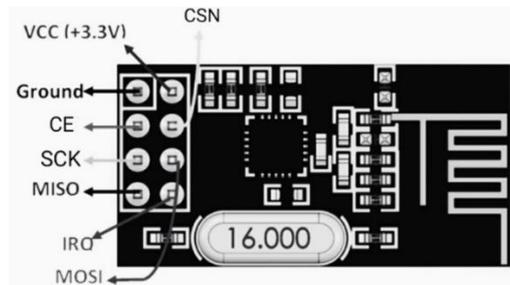
#### **b. I2C Bus**

Este bus solo requiere tres conexiones, incluyendo conexión a tierra, la primera conexión es llamada SDA y sirve para el envío de datos, la segunda conexión denominada SCL es para la señal de reloj. Además, al ser un bus interno, sirve principalmente para la conexión de circuitos integrados en circuitos impresos [25].

### **2.2.5 Transceptores en radio frecuencia**

#### **a. Módulo nRF24L01**

Es un módulo transceptor, es decir funciona como emisor y receptor, diseñado con el bus SPI, opera en la banda ISM a una frecuencia de 2.4GHz y con una velocidad de transferencia de datos de 2Mbps. Este módulo tiene un alcance de 100 m cuando se opera eficientemente por lo que es una buena opción para enviar y recibir datos de forma inalámbrica. La figura 5 muestra los pines del nRF24L01, se puede observar que al usar el bus estándar SPI, se cuenta con las conexiones MOSI, MISO, SCLK y SS.



**Figura 5. Pines de nRF24L01.**  
*Tomado de EIProCus, 2021*

## **b. Módulo nRF905**

Al igual que el nRF24L01, el nRF905 es un transceptor que también opera en la banda ISM, pero las frecuencias de 433MHz, 898MHz o 915MHz. Otro punto por destacar es que tiene más rango y más pines, sin embargo, su velocidad de transferencia de datos es de solo 50Kbps.

## **2.2.6 Placas de desarrollo Arduino**

### **a. Arduino Mega**

Pertenece a la familia mega, el Arduino Mega es una placa de desarrollo que tiene el microcontrolador ATmega2560; tiene 54 salidas o entradas digitales, 16 entradas analógicas, la frecuencia de reloj es de 16MHz. La figura 6 muestra un Arduino Mega.



**Figura 6. Arduino Mega**  
*Tomado de Arduino store, 2022*

### **b. Arduino Uno Rev3**

Pertenece a la familia clásica, el Arduino Uno es una placa de desarrollo que cuenta con el microcontrolador Atmega328P; tiene 14 salidas o entradas digitales, 6

entradas analógicas, la frecuencia de reloj es de 16MHz. La figura 7 muestra un Arduino Uno Rev3.



**Figura 7. Arduino Uno Rev3**  
*Tomado de Arduino store, 2022*

### **c. Arduino Micro**

El Arduino Micro también pertenece a la familia clásica, cuenta con un microcontrolador ATmega32U4, tiene 20 entradas o salidas digitales junto a 12 entradas analógicas, por otra parte, su frecuencia de reloj es de 16MHz al igual que las otras familias. La figura 8 muestra un Arduino Micro.



**Figura 8. Arduino Micro**  
*Tomado de Arduino store, 2022*

### **d. Arduino Nano**

Pertenciente a la familia Nano, el Arduino Nano es de las placas de desarrollo más pequeñas, las dimensiones de su circuito impreso son de 18 x 45 mm; tiene 22 salidas o entradas digitales, cuenta con el microcontrolador ATmega328 y la frecuencia de reloj es de 16MHz. La figura 9 muestra un Arduino Nano.



**Figura 9. Arduino Nano**  
*Tomado de Arduino store, 2022*

### 2.3 Definición de términos básicos

**Banda ISM:** Las bandas ISM, industriales, científicas y médicas, son parte del espectro de radio reservadas para el uso en el ámbito industrial, científico o médico. Dispositivos Bluetooth o WiFi utilizan las frecuencias de la banda ISM.

**Bomba de vacío:** Es un tipo de bomba que extrae gas de un compartimiento sellado, usualmente con el fin de reducir la presión en el compartimiento.

**Bobina:** La bobina o inductor es un componente eléctrico que se opone a los cambios de corriente, al pasar la corriente por el inductor se almacena energía en el campo magnético.

**Bus:** Es un conjunto de cables o conexiones y unas especificaciones eléctricas, como, por ejemplo, formato de señal, frecuencia de reloj, o velocidad de transferencia de datos e impedancias.

**Campo magnético:** Es un campo vectorial, es decir cada punto del espacio se le asigna un vector, describe la influencia que magnética que tiene una corriente.

**Circuito resonante:** Es un circuito conformado por una bobina y un condensador, el nombre de circuito resonante se da porque a la frecuencia de resonancia se alcanza la máxima oscilación del circuito.

**Condensador:** Componente eléctrico que almacena voltaje.

**Convertidor DC-DC:** Es un dispositivo electrónico que convierte una señal de voltaje a otra señal de voltaje de mayor o menor nivel, también es conocido como regulador de voltaje.

**Convertidor AC-DC:** Es un circuito eléctrico diseñado para conversión corriente o voltaje alterno en corriente o voltaje directo, la corriente directa es ampliamente usada por la gran mayoría de dispositivos electrónicos.

**Diodo:** Dispositivo electrónico formado por semiconductores tipo p y tipo n diseñado para permite el paso de corriente en un solo sentido.

**Espectro de radiofrecuencia:** Es una parte del espectro electromagnético que abarca las frecuencias de 3Hz a 3GHz, las ondas electromagnéticas en este rango de frecuencias se llaman ondas de radio y son ampliamente usada en telecomunicaciones.

**Placa de desarrollo:** Son dispositivos que cuenta con un microcontrolador programable, las placas de desarrollo más conocidas y comerciales son las de Arduino.

**Oscilador:** Es un circuito que produce una señal periódica, suele ser una señal sinusoidal, de pulsos, o triangular; el oscilador es alimentado por una fuente DC.

**Resistencia calentadora:** Es un tipo de resistencia de potencia diseñada especialmente para convertir electricidad en calor

**Sensor:** Es un dispositivo que mide una cantidad física del ambiente y la convierte en datos que pueden ser interpretados por humanos o por computadoras.

**Señal de reloj:** Es una señal de voltaje o corriente que posee dos estados, alto y bajo, y que oscila entre estos dos estados como si fuera un metrónomo para sincronizar las acciones de los circuitos digitales.

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1 Tipo de investigación**

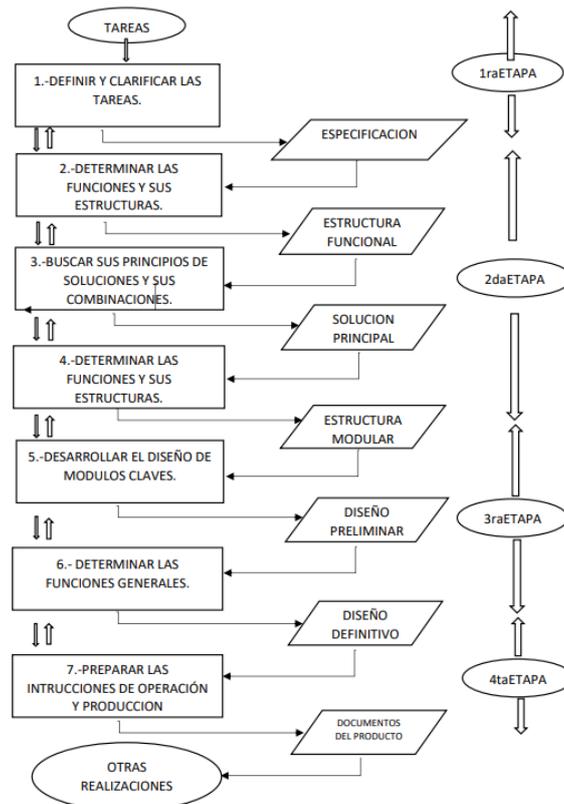
La presente investigación es del tipo desarrollo tecnológico, se hace uso de los conocimientos generados por las ciencias básicas, primero se identifica una problemática en la sociedad y mediante una metodología sistemática de ingeniería se da solución al problema o se mejora las soluciones existentes.

### **3.2. Alcance de investigación**

El alcance de la investigación es descriptivo porque se especificará las características y procesos del sistema de control y alimentación inalámbrica para la medición en tiempo real de temperatura, presión y contenido humedad en un horno con cámara de vacío para el secado de frutas.

### **3.3 Metodología de investigación**

Para el desarrollo de la presente investigación se aplica la normativa VDI 2221. La normativa VDI 2221 está basada en la normativa VDI222, ya que es una versión más actual, y sirve para el diseño sistemático de productos y sistemas técnicos [26]. La figura 10 muestra un diagrama explicativo de la normativa VDI221.



**Figura 10. Diagrama de la normativa VDI2221.**  
*Adaptado de J. Jänsch y H. Birkhofer, 2006*

### a. Compresión de la solicitud

En base al problema o proceso a mejorar se determinarán los requerimientos básicos y añadidos opcionales que necesite el usuario final.

### b. Concepto de solución

Se establece que funciones que debe realizar el diseño propuesto, después se halla el concepto de solución tomando en cuenta varias alternativas que satisfagan diferentes aspectos del problema o proceso a mejorar. Esta etapa también incluye el desarrollo de la caja negra, estructura de funciones y matriz morfológica.

### c. Desarrollo del diseño

En esta etapa, correspondientes al diseño, se asignan las dimensiones y el material para el horno con cámara de vacío propuesto junto a sus demás componentes. En esta etapa también se eligen los componentes más adecuados para el sistema de control y alimentación inalámbrico.

#### d. Elaboración de detalles

En esta etapa se muestran los resultados obtenidos, entre ellos, los obtenidos experimentalmente, modelos matemáticos o simulaciones numéricas. Además, en esta etapa se incluyen los costos del diseño propuesto.

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

### 4.1 Lista de Exigencias

Como primera etapa de diseño se desarrolla una lista de exigencias donde especifican los requerimientos necesarios o recomendados para el diseño. La tabla 1 muestra la lista de exigencia para diseño, para cada denominación se especifica si es una exigencia o un deseo, cada denominación tiene una breve descripción.

**Tabla 1. Lista de exigencias**

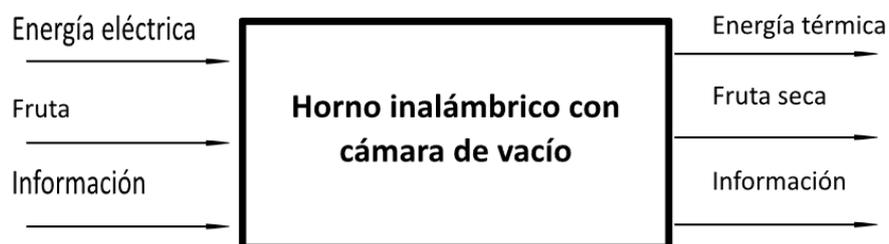
LISTA DE EXIGENCIAS		
Proyecto:		
Denominación	Exigencia o Deseo	Descripción
Función	E	El secado al vacío de las frutas siempre debe ser monitoreando con las variables de temperatura, humedad y presión usando computadora o laptop.
Geometría	D	La cámara de vacío del horno debe tener la capacidad de unos 5 kg de frutas, estas deben poder ser acomodadas de forma ordenada y separada para garantizar su correcto proceso.
Mantenimiento	E	Las partes del sistema de control y alimentación deben ser de fácil desmontaje para su respectivo mantenimiento y/o reemplazo de estos.
Seguridad	D	El diseño debe contar con un sistema de bloqueo eléctrico para la seguridad en la operación de la máquina y contar con cubiertas de seguridad para evitar accidentes

Material	D	Las partes no electrónicas del horno con cámara de vacío deben estar compuestas en su mayoría por acero inoxidable ya que es el material más usado en el mercado y proporciona buenos resultados en comparación con su precio.
Costo	E	El costo del sistema de control y alimentación debe ser asequible pero que esto no implique afectar el rendimiento del sistema.
Energía	E	Se debe usar vidrio para las zonas del horno por donde pasaran campos magnéticos variables, de no usarse vidrio estos campos no pasaran y no se producirá el efecto de inducción electromagnética.
Información	E	Se debe usar vidrio para las zonas del horno por donde pasaran ondas de radio, estas pertenecen al rango de 2.4GZ de la banda ISM.

## 4.2. Análisis de la solución

### 4.2.1 Caja negra

La caja negra muestra los insumos, recursos energéticos e información que entra el horno con cámara de vacío de manera general, la figura 11 muestra las entradas y salidas del horno.

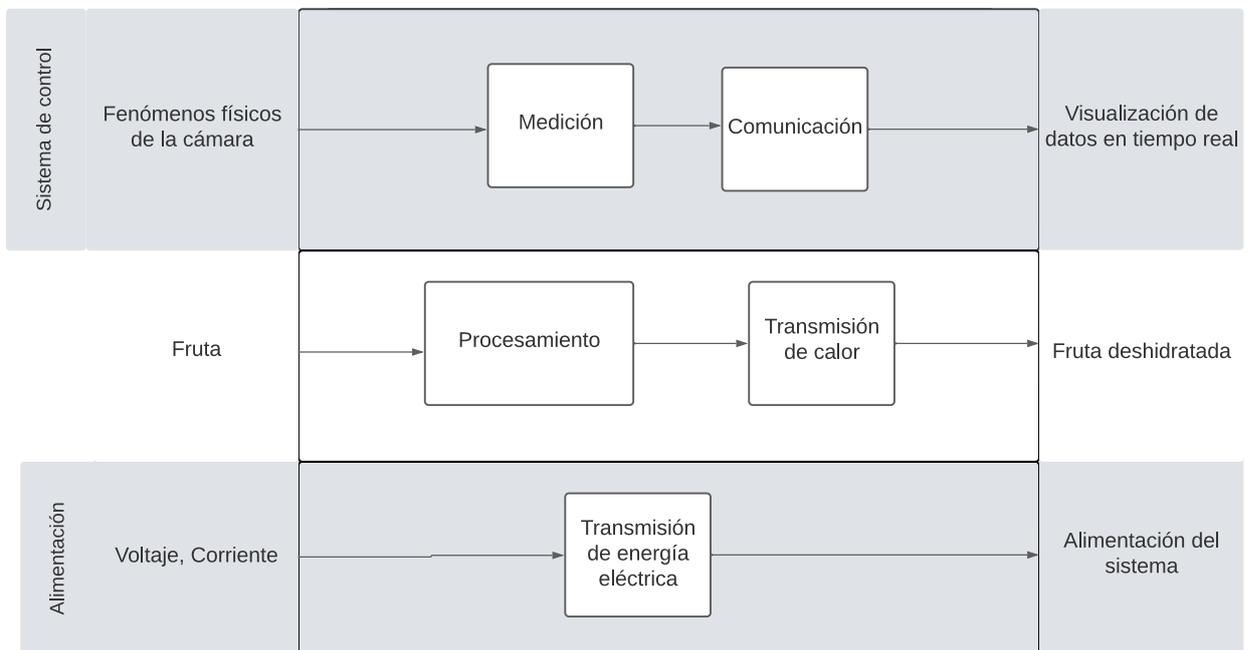


**Figura 11. Caja negra del horno con cámara de vacío.**

*Elaboración propia.*

#### 4.2.2 Estructura de funciones

La estructura de función proporciona más detalles de lo que debe hacer y contener el diseño propuesto. La figura 12 muestra la estructura de funciones, se observa que el sistema de control debe ser capaz de reconocer las variables de interés en la cámara de vacío, es decir, temperatura, presión y contenido de humedad.

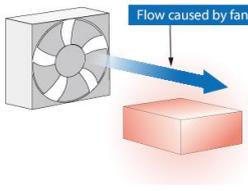
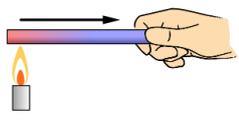
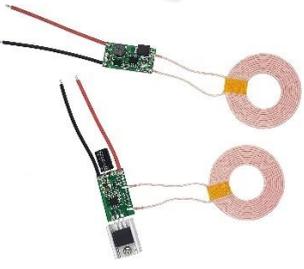
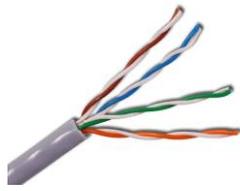


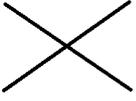
**Figura 12. Estructura de funciones.**  
**Elaboración propia.**

#### 4.2.3 Matriz morfológica

En la segunda etapa de la metodología utilizada se realizan combinaciones considerando múltiples opciones que cumplan con los objetivos especificados en la estructura de funciones, para llegar así a tres propuestas de diseño. La tabla 2 muestra la matriz morfológica en donde para para cada categoría se proponen varias opciones.

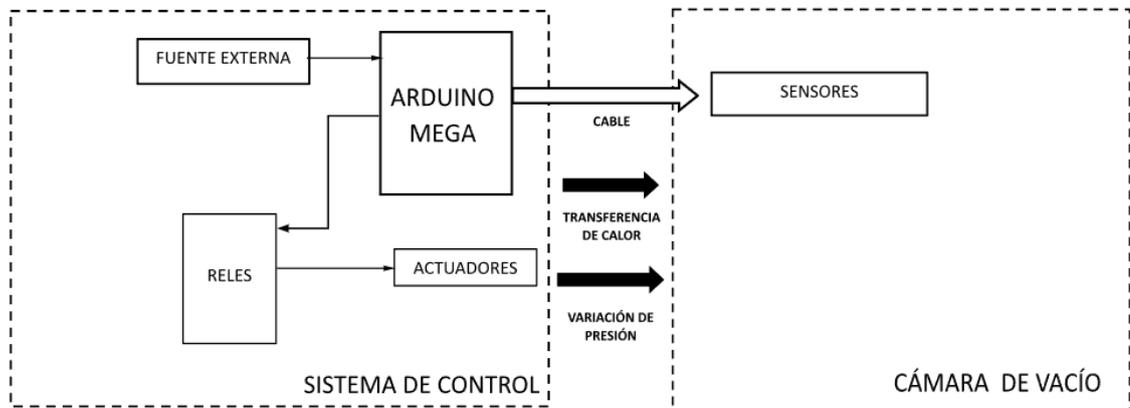
**Tabla 2. Matriz morfológica**

	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Procesamiento	Cámara de vacío	Liofilización	Secado con aire
Transmisión de calor en la cámara	 <p>Radiación</p>	 <p>Convección forzada</p>	 <p>Conducción</p>
Transmisión de energía eléctrica	 <p>inalámbrico</p>	 <p>Cableado</p>	
Comunicación	 <p>Cableado</p>	 <p>Módulo nRF24L01</p>	 <p>Transmisor inalámbrico DMX512 LED</p>

Sensor de presión	 manómetro	 BMP085	
Sensor de temperatura	 DTH21	 Termocupla	 Pirómetro
Controlador Externo	 Arduino Uno R3	 Arduino Mega	
Controlador Interno	 Arduino Nano	 Arduino Micro	

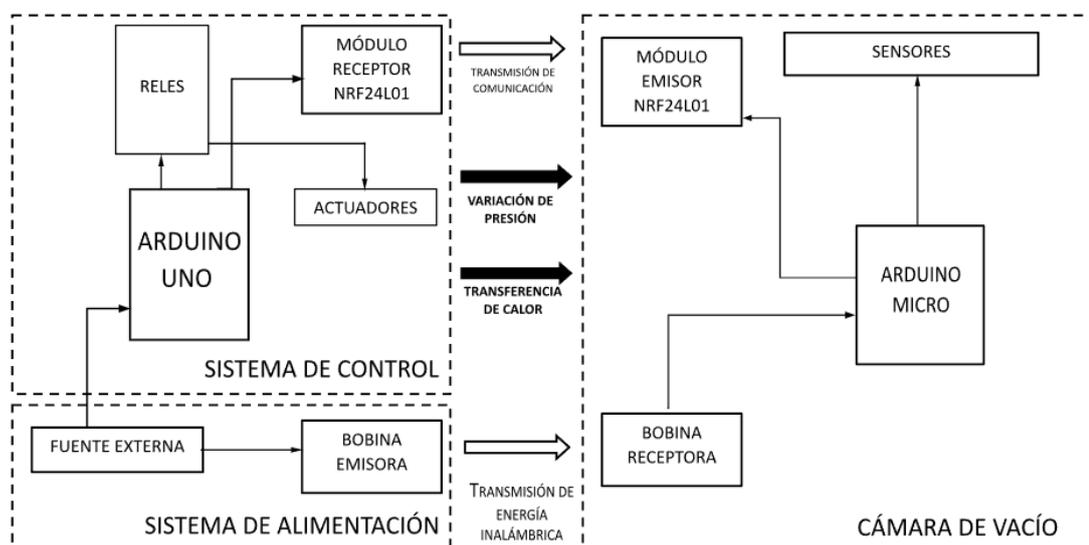
#### 4.2.3.1 Conceptos de solución

- **Solución 1:** En la primera solución los sensores y la placa de desarrollo Arduino Mega estarán conectadas por un cable, el Arduino Mega se conectará a un relé que activa los actuadores del horno de acuerdo con los datos que se reciban de los sensores, estos datos podrán ser monitoreados en un ordenador y todo el sistema será alimentado por una fuente externa.



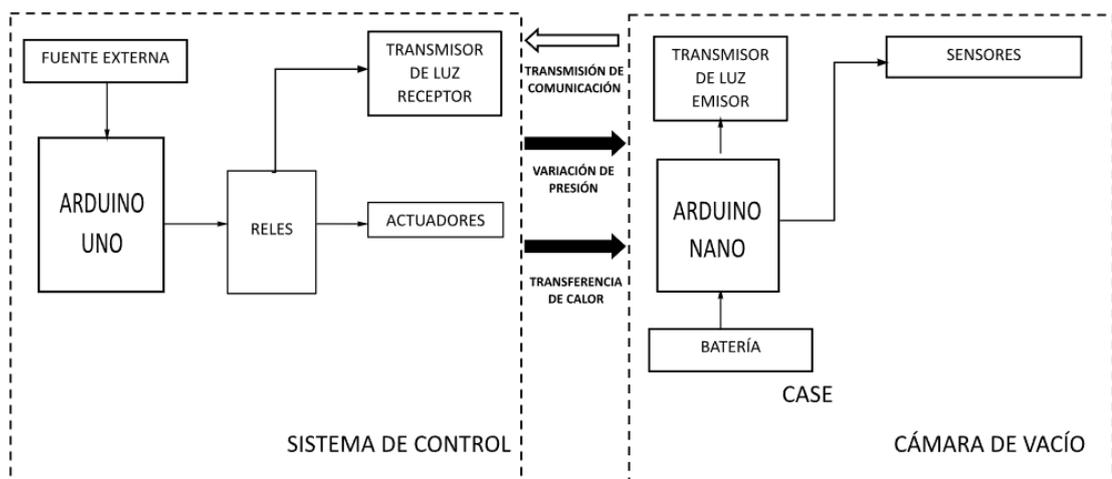
**Figura 13. Diagrama de la primera solución propuesta**  
*Elaboración propia.*

- **Solución 2:** Esta solución obtiene energía eléctrica por medio de inducción electromagnética, se usará un Arduino Micro para la comunicación entre los sensores y el módulo transceptor nRF24L01. El Arduino Uno, ubicado fuera de la cámara de vacío, se conectará a un relé que activa los actuadores en función de los datos que se reciban de los sensores controlados por el Arduino Micro; para la visualización de datos obtenidos de los sensores se usará un ordenador.



**Figura 14. Diagrama de la segunda solución propuesta**  
*Elaboración propia.*

- Solución 3:** En esta solución cuenta con un case en donde se situará la placa de desarrollo Arduino Nano conectada a un transmisor de luz y a una batería que alimentará a todo el sistema. Los datos de los sensores se enviarán mediante el transmisor de luz emisor hacia el transmisor de luz receptor que estará conectado con el Arduino Uno afuera de la cámara de vacío, este Arduino se conectará a un relé que activa los actuadores de acuerdo con los datos que reciba. Este sistema de control se alimentará eléctricamente por medio de una fuente externa.



**Figura 15. Diagrama de la tercera solución propuesta**  
*Elaboración propia.*

#### 4.2.4 Matriz de evaluación

Para elección de la solución óptima se hace una evaluación técnica y económica considerando diez criterios que tienen un alto impacto en diseño. La tabla 2 muestra la evaluación técnica y económica realizada, los valores obtenidos de valor técnico y económico se comparan con la solución que tiene un valor de 1. Se concluye que la solución 2 con un valor técnico y económico de 0,84, es la que más se aproxima a la solución ideal y por ello es la solución elegida.

**Tabla 3. Evaluación técnica y económica.**

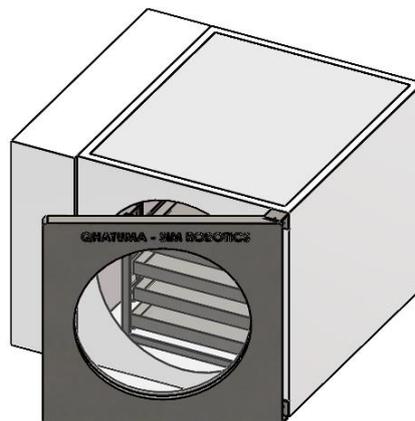
CRITERIOS		Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución ideal	
CRITERIOS	peso (g)	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp

Funcionalidad	3	3	9	3	9	3	9	4	12
Diseño	4	2	8	3	12	4	16	4	16
Seguridad	4	3	12	3	12	3	12	4	16
Fabricación	4	3	12	4	16	2	8	4	16
Montaje	3	3	9	4	12	3	9	4	12
Tamaño	4	2	8	3	12	4	16	4	16
Mantenimiento	4	3	12	3	12	2	8	4	16
Costo de fabricación	3	3	9	4	12	3	9	4	12
Accesibilidad del material	4	2	8	4	16	3	12	4	16
Facilidad de manipulación	4	2	8	3	12	4	16	4	16
<b>TOTAL</b>			<b>95</b>		<b>125</b>		<b>115</b>		<b>148</b>
<b>Valor técnico y económico</b>			<b>0,64</b>		<b>0,84</b>		<b>0,78</b>		<b>1,00</b>

### 4.3. Diseño

#### 4.3.1 Diseño mecánico

La figura 16 muestra la vista isométrica del horno con cámara de vacío propuesto, en el interior de la cámara de vacío se cuenta con una estructura de 4 bandejas, el material elegido es acero inoxidable por las características adecuadas ante la humedad y evitar así la corrosión. La tabla 4 muestra las propiedades del acero inoxidable.



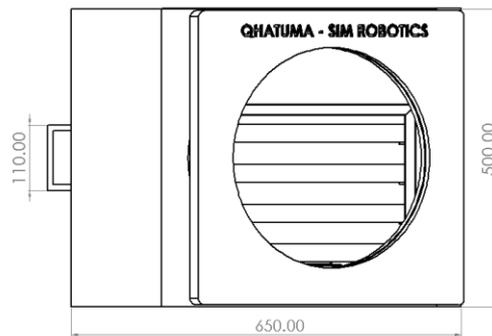
**Figura 16. Vista isométrica del diseño propuesto**  
**Elaboración propia.**

**Tabla 4. Propiedades del acero inoxidable**

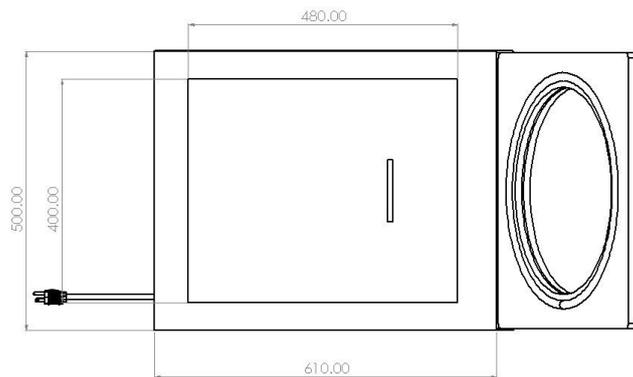
Densidad volumétrica	8 g/cm <sup>3</sup>
Límite de elasticidad	250.000 MPa

Resistencia máxima a tracción	540.000 MPa
Módulo de Young	193.000 GPa
Coefficiente de Poisson	0.300 su

La figura 17 muestra la vista frontal del horno con cámara de vacío propuesto junto a las dimensiones propuestas, se cuenta con una manecilla para una tapa de un gabinete ubicado en la parte lateral izquierda del horno en donde se ubican todos los componentes electrónicos. La figura 18 muestra la vista lateral del horno con cámara de vacío, en esta vista se puede ver las dimensiones del gabinete.



**Figura 17. Vista frontal del diseño propuesto**  
**Elaboración propia.**



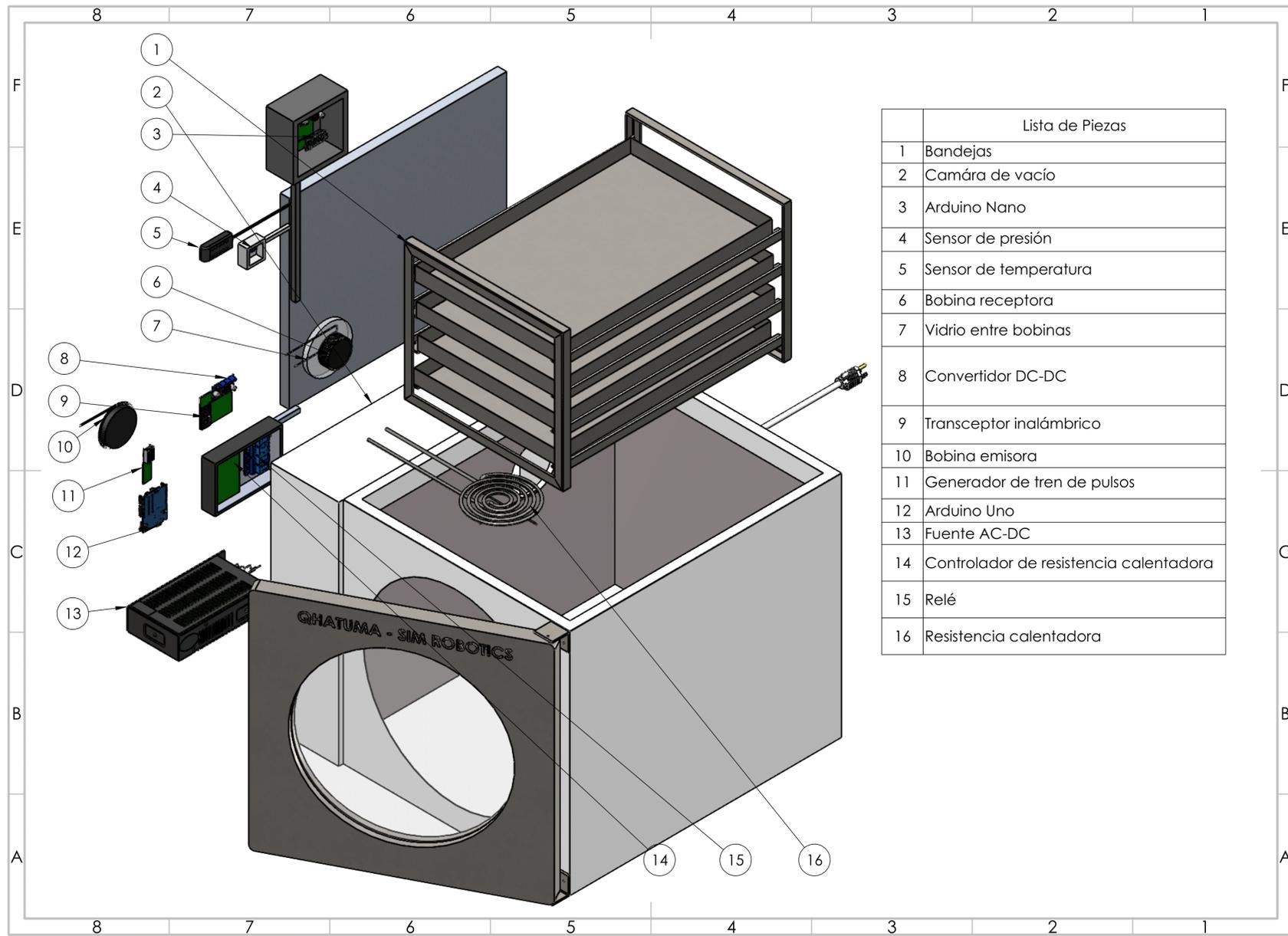
**Figura 18. Vista lateral del diseño propuesto**  
**Elaboración propia.**

**Tabla 5. Propiedades del horno con cámara de vacío**

Masa	32,476 kg
Volumen	56,93 m <sup>3</sup>
Área superficial	7,54 m <sup>2</sup>
Centro de masa	X = -159.75mm Y = -36.02mm Z = 112.60mm

**Elaboración propia**

La tabla 5 muestra las propiedades del horno con cámara de vacío. La figura 19 muestra una vista explosionada del horno con cámara de vacío en donde se puede observar las bandejas, la resistencia calentadora, y los componentes electrónicos necesarios para el sistema de control y alimentación inalámbrico, los detalles de dichos componentes se ven en la siguiente sección. Se usa vidrio entre las bobinas emisora y receptora para la transferencia de energía inalámbrica, dado que permiten el paso campos magnéticos variables.



**Figura 19. Vista isométrica explosionada**  
**Elaboración propia**

## 4.3.2 Diseño del sistema de alimentación

### 4.3.2.1 Convertidores

Para el desarrollo del sistema alimentación inalámbrica, se requiere de una fuente que convierta corriente alterna a corriente directa, es decir un convertidor AC/DC, esto es así porque de los dispositivos electrónicos que se usaran trabajan con corriente DC. La figura 20 muestra la fuente elegida. La tabla 6 muestra las especificaciones de la fuente elegida.



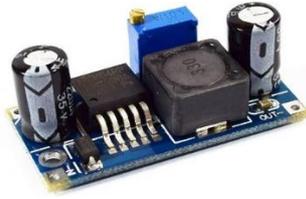
*Figura 20. Fuente AC-DC EN55022,  
Tomado de Mean Well, 2020*

**Tabla 6. Especificaciones de la fuente elegida**

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Potencia de salida	120 W
Voltaje de salida	24 V
Corriente de salida	5 A
dimensiones	113.5 x 40 x 125.2 mm

*Tomado de Mean Well, 2020*

El Arduino Micro y el Arduino Uno requieren un voltaje menor 12 V para correcto su funcionamiento, por lo que es necesario el uso de un reductor de voltaje. La figura 21 muestra el reductor de voltaje elegido. La tabla 7 muestra las especificaciones del reductor de voltaje elegido.



**Figura 21. Reductor de voltaje DC-DC Lm2596**  
**Tomado de Naylamp Mecatronics, 2021**

**Tabla 7. Especificaciones del convertidor DC-DC elegido**

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Voltaje de entrada	4.5V a 40V
Voltaje de salida	1.23V a 37V
Potencia de salida	25W
dimensiones	43 x 21 x 13 mm

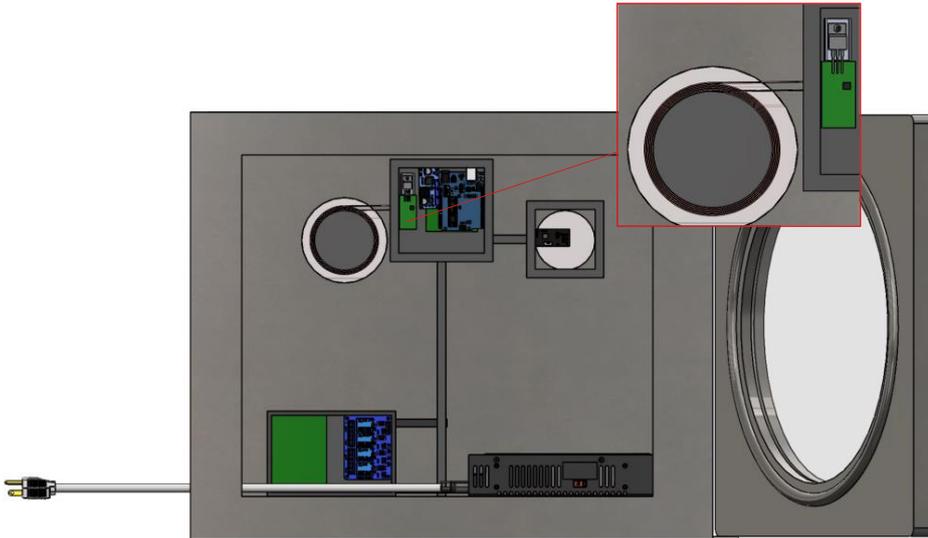
**Tomado de Naylamp Mecatronics, 2021**

#### **4.3.2.2 Generador de tren de pulsos**

El proceso transmisión de energía eléctrica se da mediante el generador de pulsos mostrado en la figura 22. Este generador de pulsos esta conectado a una bobina emisora y está en el gabinete ubicado en la parte lateral izquierda del horno, como se muestra en la figura 23.

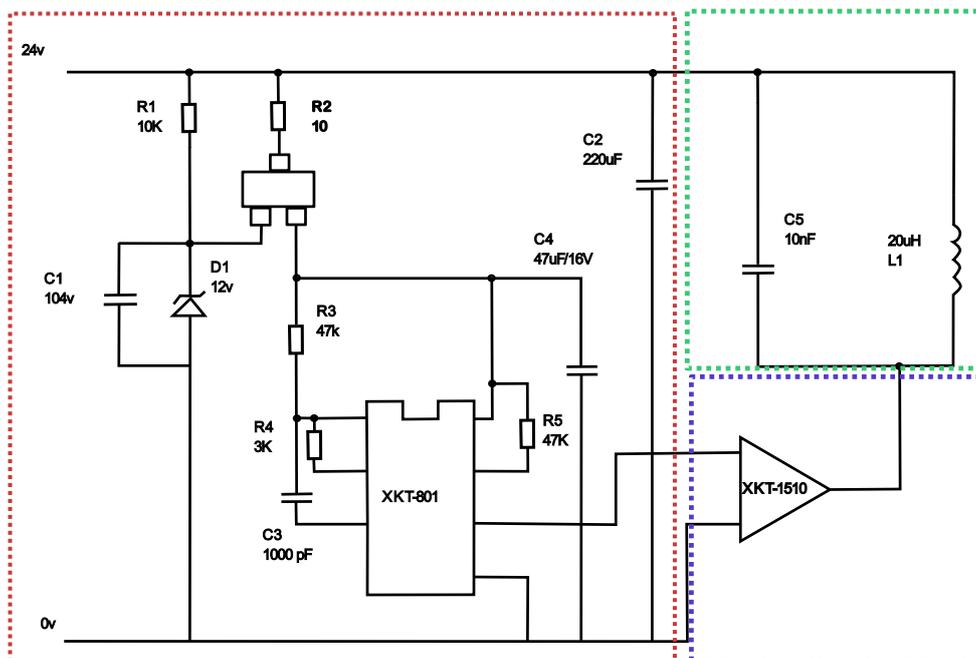


**Figura 22. Generador de pulsos y bobina emisora**  
**Tomado de Taidacent, 2021**



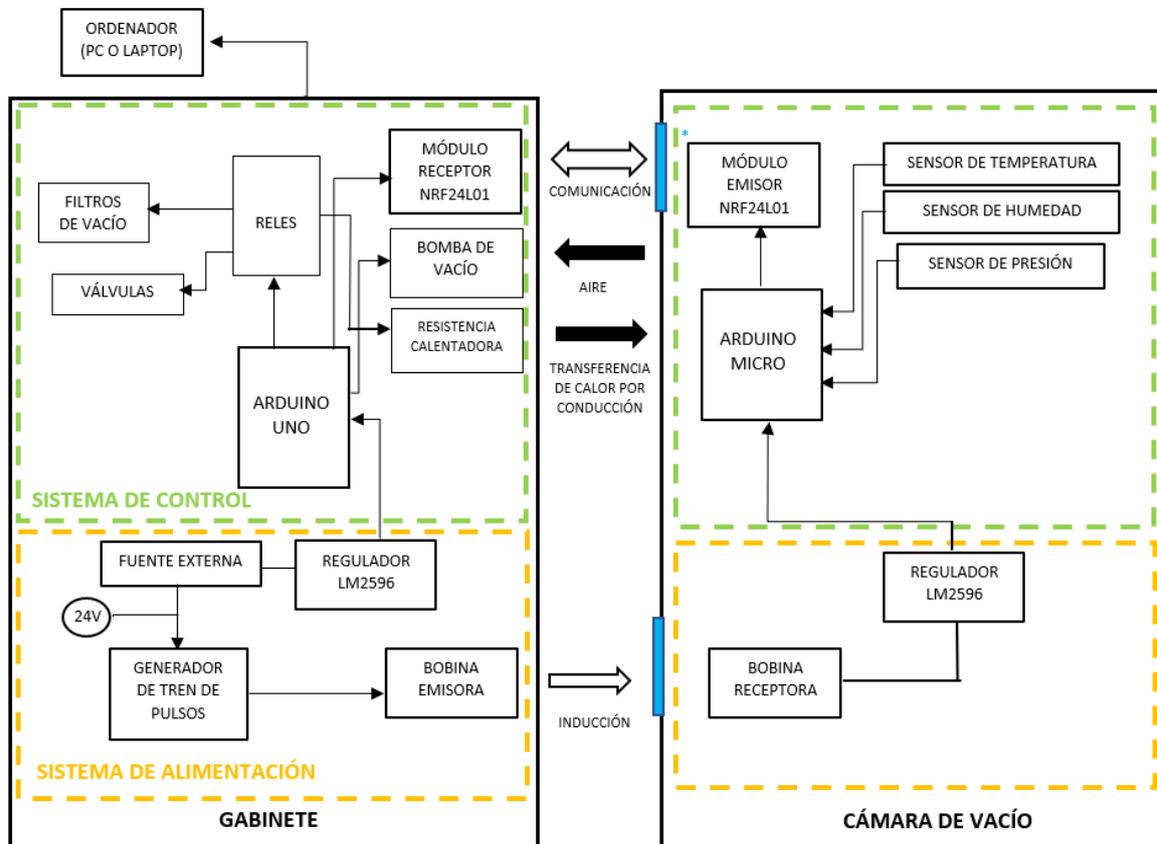
**Figura 23. Ubicación del generador de pulsos en el gabinete del horno**  
*Elaboración propia*

La figura 24 muestra el circuito generador de tren de pulsos dividido por secciones en base a la función de cada uno. La primera sección, recuadro rojo, es un oscilador; la segunda sección, recuadro azul, hace la función de interruptor y transforma la señal triangular positiva de la fuente de 24 V a una señal cuadrática. La última sección, recuadro verde, es un circuito resonante conformado por el inductor,  $L_1$ , que representa la bobina emisora, y el capacitor,  $C_5$ ; la frecuencia de resonancia es de 223.5kHz.



**Figura 24. Circuito generador de tren de pulsos dividido por secciones según su funcionalidad**  
*Elaboración propia*

La bobina emisora induce un voltaje en la bobina receptora por medio de inducción electromagnética; este voltaje pasa por un diodo y un convertidor DC-DC para luego poder entregar corriente al Arduino Micro. El Arduino Micro está ubicado en la cámara de vacío. La figura 25 muestra un diagrama esquemático con todos los componentes principales del sistema de control y alimentación del horno con cámara de vacío.



**Figura 25. Diagrama esquemático del funcionamiento del sistema de control y alimentación del horno con cámara de vacío**  
*Elaboración propia*

### 4.3.3 Diseño del sistema de control

El Arduino Micro está conectado a los sensores de temperatura, contenido de humedad y presión; los datos obtenidos de estos sensores son enviados al exterior de la cámara de vacío mediante el módulo transceptor nRF24L01, que en este caso actúa como emisor. La figura 26 muestra módulo transceptor nRF24L01.



**Figura 26. Módulo transceptor nRF24L01**  
*Tomado de Naylamp Mecatronics, 2021*

La tabla 8 muestra las especificaciones del módulo transceptor nRF24L01.

**Tabla 8. Especificaciones del módulo transceptor nRF24L01**

Especificación	Valor
Rango de Frecuencia	2.4 GHZ en la banda ISM
Velocidad de transferencia de datos	2 Mb/s
Nivel de potencia máximo	0 dBm
Rango de comunicación	100m (espacio abierto)
Voltaje de operación	1.9 – 3.6V
Corriente máxima de operación	13.5 mA

**Tomado de how to mechatronics, 2021**

La figura 27 muestra los pines del módulo transceptor nRF24L01, se observa que tres de sus pines son del tipo SPI. Los pines SPI se conectan con los pines SPI de la placa de desarrollo Arduino utilizada. Los pines VCC y GND son para alimentación y tierra, respectivamente.

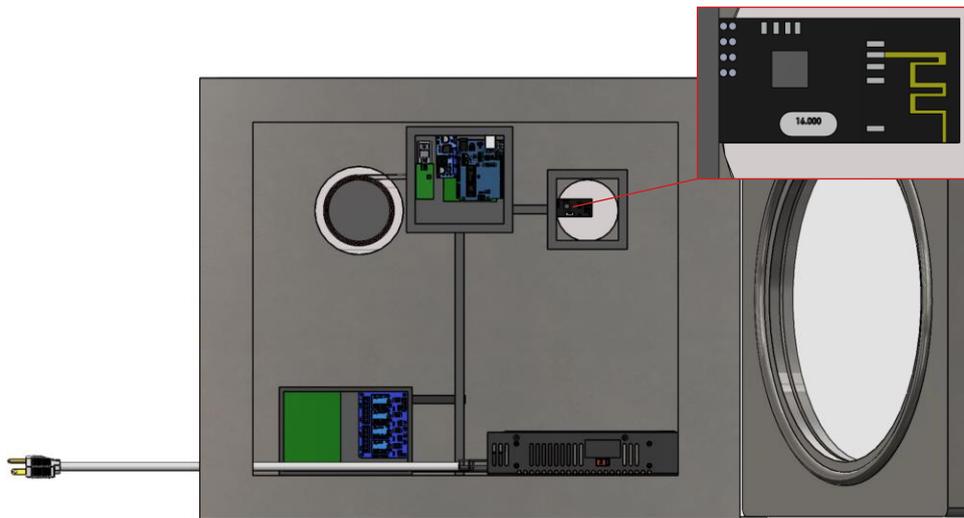


**Figura 27. Pines del módulo transceptor nRF24L01**

**Tomado de how to mecatronics, 2021**

Los pines CSN y CE puede conectarse a cualquier pin digital de placa de desarrollo Arduino, estos pines sirven para cambiar entre el modo emisor y el modo receptor. En el modo emisor el nivel de potencia es de 0 dBm y entonces el módulo transceptor nRF24L01 solo requiere 11.3 mA. Por otro lado, cuando el módulo transceptor nRF24L01 opera como receptor, este requiere una corriente de 13.5mA.

En el exterior de la cámara de vacío hay módulo transceptor nRF24L01 que está en modo receptor, este se conecta el Arduino Uno. Todos los datos obtenidos y procesados por el Arduino Uno son enviados a un ordenador. La figura 28 muestra la ubicación del módulo transceptor nRF24L01 que recibe la información del interior de la cámara de vacío. Se usa vidrio entre los módulos transceptores nRF24L01, dado que este material permite el paso de ondas de radio.



**Figura 28. Ubicación del módulo transceptor nRF24L01 en el gabinete del horno**  
Tomado de Naylamp Mecatronics, 2021

#### 4.3.3.1 Sensores

Como se mencionó en la sección anterior, en Arduino Micro esta conectado a todos los sensores dentro de la cámara de vacío. La figura 29 muestra el sensor de temperatura y humedad utilizado junto a la función de cada uno de sus cables, el cable rojo para alimentación, el negro para tierra, y el amarillo es para transferir datos. Para la transferencia de datos el sensor de temperatura y humedad DHT21 usa un pin digital de Arduino Micro.



**Figura 29. Sensor de temperatura y humedad DHT21**  
Tomado de Electropeak, 2021

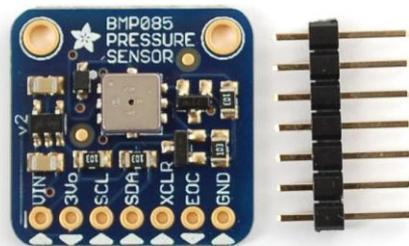
La tabla 9 muestra las especificaciones del sensor de temperatura y humedad elegido.

**Tabla 9. Especificaciones del sensor de temperatura y humedad elegido**

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Voltaje de operación	3.5V – 5.5V
Corriente	1mA – 1.5mA
Rango de temperatura	-40 – 80°C
Rango de humedad relativa	0 a 100% RH
Dimensiones	60 x 28 x 13 mm

*Tomado de Electropack, 2021*

La figura 30 muestra el sensor de presión utilizado junto a los pines disponibles. Se observa que dos de sus pines, SDA y SCL, son pertenecientes al bus I2C. El pin SDA es para la transferencia de datos, mientras que el pin SCL es la señal de reloj. Por otra parte, los pines VIN y GND son para la alimentación y tierra, respectivamente.



**Figura 30. Sensor de presión BMP085**  
*Tomado de adafruit, 2010*

La tabla 10 muestra las especificaciones del sensor de presión elegido.

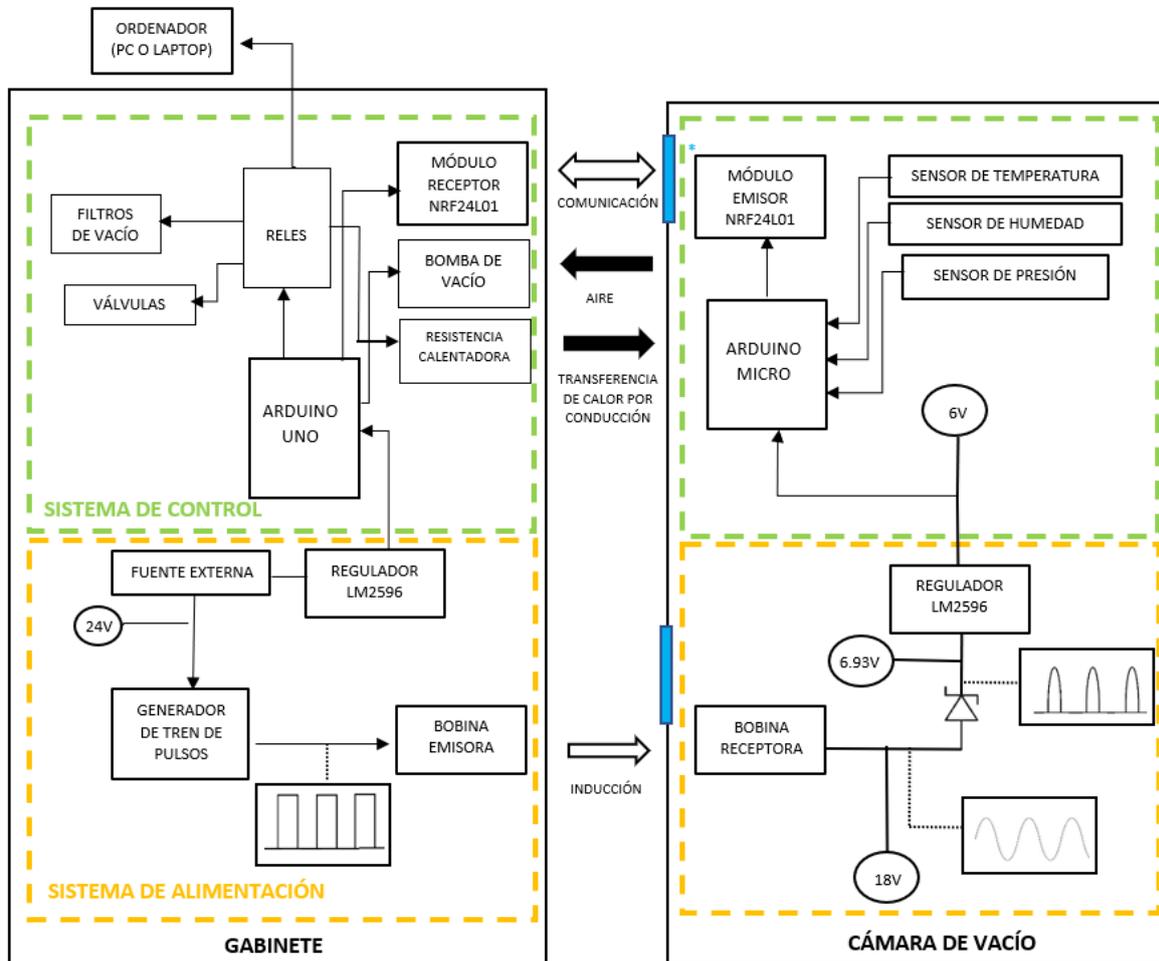
**Tabla 10. Especificaciones del sensor de presión elegido**

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Voltaje de operación	3.3V
Rango de temperatura	-40 – 85°C
Rango de presión	30kPa – 110kPa

## CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

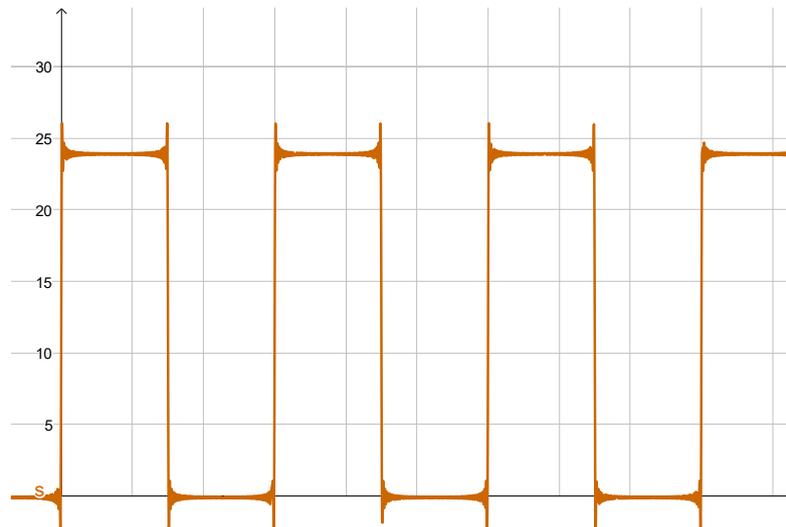
### 5.1 Señales del sistema de control y alimentación inalámbrica

La figura 31 muestra las señales de voltaje obtenidas, a la salida del generador del tren de pulsos y antes de la bobina emisora, en la bobina receptora, a la salida del diodo Schottky.



**Figura 31. Diagrama esquemático del sistema de alimentación control inalámbrico con las señales obtenidas en diferentes puntos**  
*Elaboración propia*

Como resultado del generador de tren de pulsos, se obtiene una señal de voltaje cuadrática con una amplitud de 24 V, como se ve en la figura 32.



**Figura 32. Señal de voltaje obtenida a la salida del generador de tren de pulsos**  
Elaboración propia

La señal de voltaje cuadrática de la bobina emisora produce un campo magnético variable en la bobina emisora, este campo magnético variable induce un voltaje en la bobina receptora, la señal de voltaje en la bobina emisora es semi sinusoidal y tiene un voltaje pico a pico de 18 V como se muestra en la figura 33.



**Figura 33. Señal de voltaje obtenida en la bobina receptora**  
Elaboración propia

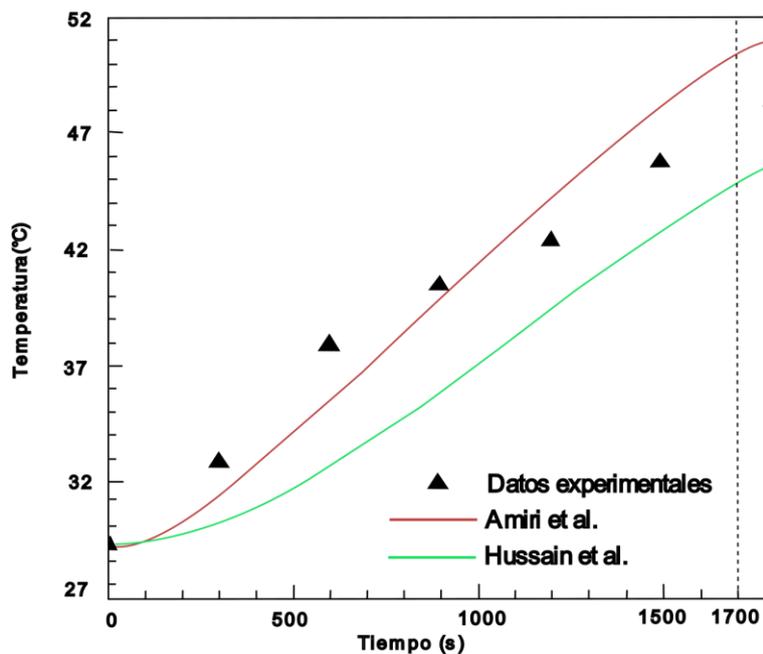
La señal de voltaje sinusoidal en la bobina receptora no es adecuada para funcionamiento de los componentes electrónicos en el sistema de control, por lo que se usa un diodo Schottky y el convertidor DC-DC para proporcionar el voltaje adecuado a los componentes. La figura 34 muestra la señal de voltaje obtenida a la salida del diodo Schottky, esta señal tiene un voltaje máximo de 6,92 V, como resultado de la caída de voltaje en el diodo.



**Figura 34. Señal de voltaje rectificadora obtenida después del diodo Schottky**  
*Elaboración propia*

## 5.2 Datos experimentales y modelos matemáticos de temperatura

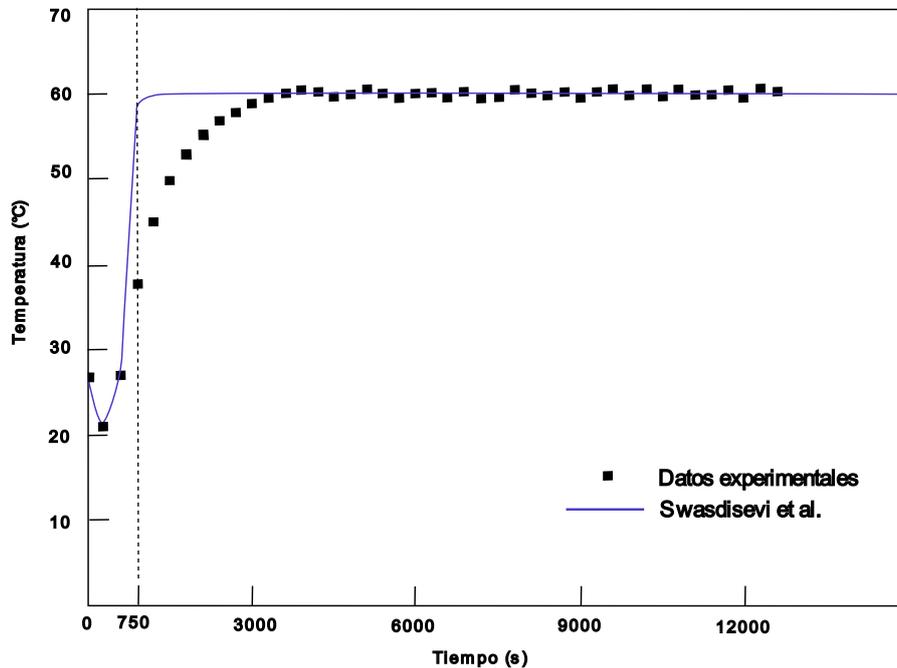
Para la estimación de temperatura se toma en cuenta dos modelos matemáticos propuestos que estiman la temperatura en el proceso de secado manzanas con cámara de vacío a una presión de 20kPa, y se comparan con datos experimentales, como se muestra en la figura 35.



**Figura 35. Comparación entre modelos matemáticos de temperatura propuestos y datos experimentales del secado de manzanas**  
*Elaboración Propia*

Para el proceso de secado de manzanas primero se debe llegar a la temperatura de 50°C y luego mantener dicha temperatura hasta que termine el proceso. Cuando

el tiempo transcurrido es de 1700s, el primer modelo matemático propuesto por Amiri et al. [27], línea roja, indica que ya se llegó a 50°C; el segundo modelo matemático propuesto por Hussain et al. [28], línea verde, indica que aun no se llegó a la temperatura deseada. Los datos reales indican que ambos modelos tienen un desfase, y de usarse estos, conllevaría a que el proceso de secado se realice o muy pronto o muy tarde.



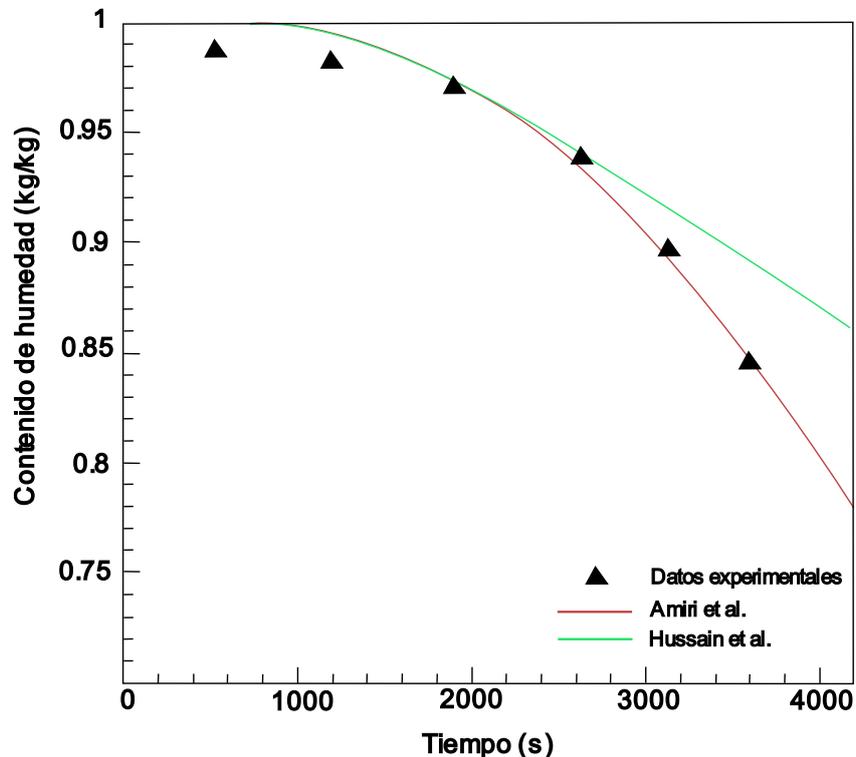
**Figura 36. Comparación entre modelos matemáticos de temperatura propuestos y datos experimentales del secado de plátanos**  
*Elaboración propia*

La figura 36 muestra la comparación entre un modelo matemático para estimar la temperatura de plátanos en procesos de cámara de vacío a una presión 5kPa propuesto por Swasdisevi et al. [29], y los datos experimentales de dicho proceso.

En el proceso de secado plátanos el modelo matemático indica que, a los 750 s de haberse iniciado el calentamiento, ya se llegó a la temperatura de secado requerida, 60°C. Por el contrario, los datos experimentales indican que en ese instante la temperatura es 38°C. En este caso el uso de este modelo matemático traería como consecuencia que ya no se siga incrementado la temperatura en la cámara de vacío, pese a que aun se requiere subir la temperatura.

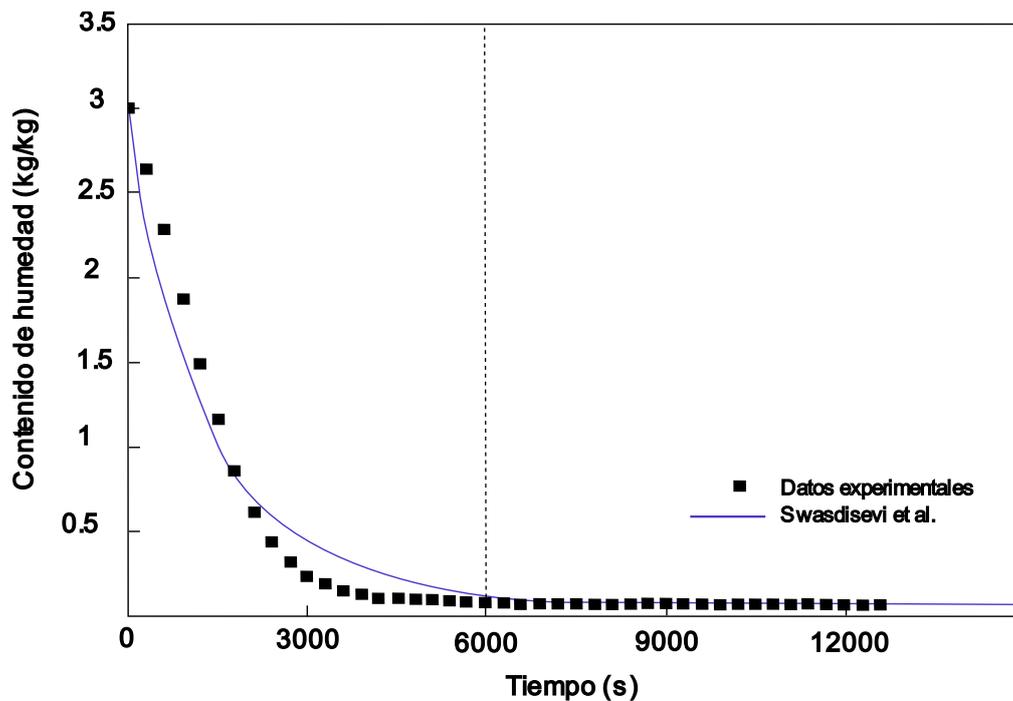
### 5.3 Datos experimentales y modelos matemáticos de contenido de humedad

En el contenido de humedad en manzanas se toma en cuenta dos modelos matemáticos propuestos que estiman el contenido de humedad en el proceso de secado manzanas con cámara de vacío a una presión de 20kPa, y se comparan con datos experimentales, como se muestra en la figura 37.



**Figura 37. Comparación entre modelos matemáticos de contenido de humedad propuestos y datos experimentales del secado de manzanas**  
*Elaboración propia*

El contenido de humedad es estimado de una manera más precisa por modelo matemático propuesto por Amiri et al. [27], línea roja. Por lo que para el contenido de humedad de manzanas el modelado matemático si permite saber de manera más precisa cuando el contenido de humedad llega a cero. Por otra parte, para el contenido de humedad en plátanos, se usa el modelo matemático propuesto por Swasdisevi et al. [29], y se compara con los datos experimentales del proceso de secado con cámara de vacío a una presión de 20kPa, como se muestra en la figura 38.



**Figura 38. Comparación entre un matemático de contenido de humedad y datos experimentales del secado de plátanos**  
*Elaboración propia*

El contenido de humedad estimado indica que la humedad llegó a cero a los 6000 s de haber iniciado el proceso, sin embargo, dicho contenido de humedad ya había alcanzado ese valor a los 3000s, de acuerdo con los datos experimentales. El uso del modelo matemático para la estimación de contenido de humedad en el proceso de secado traería como consecuencia que los plátanos se sigan secando en la cámara de vacío, cuando ya no es necesario y solo se consumiría más potencia de la requerida realmente.

Las mediciones en tiempo real permiten obtener los valores de temperatura y contenido de humedad necesarios para el correcto monitoreo del proceso de secado, que de estimarse usando modelos matemáticos, afectaría el proceso de secado.

#### 5.4 Costo del sistema de control y alimentación inalámbrica

La tabla 11 muestra la cantidad, descripción y precio total para cada componente utilizado en el sistema de control y alimentación inalámbrica del horno con cámara de vacío.

**Tabla 11. Costos del sistema de control y alimentación inalámbrica**

N°	Elemento	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
1	DTH21	Sensor de temperatura y humedad	1	S/ 38.00	S/ 38.00
2	BMP085	Sensor de presión para Arduino	1	S/ 03.00	S/ 03.00
3	nRF24L01	Módulo de comunicación inalámbrica	2	S/ 08.00	S/ 16.00
4	Generador de tren de pulsos	Taidacent XKT-801-48	1	S/ 86.20	S/ 86.20
5	LM2596	Convertidor DC-DC	2	S/ 02.30	S/ 04.60
6	NDR-120-24	Fuente de 24 V y 5A	1	S/ 90.00	S/ 90.00
7	Arduino Uno R3	Placa de desarrollo con microcontrolador Atmega328P	1	S/ 60.00	S/ 60.00
8	Arduino Micro	Placa de desarrollo con microcontrolador Atmega328P	1	S/ 110.00	S/ 110.00
9	Medio metro de hilo de cobre	Hilo para embobinado de 0.8 mm	1	S/ 05.00	S/ 05.00
TOTAL					S/ 412.80

## CONCLUSIONES

El presente trabajo propuso un sistema de control y alimentación inalámbrica para el proceso de secado con cámara de vacío de frutas. Para el proceso de diseño se usó la normativa VDI 2221, con la cual se comprendió los requerimientos del sistema de control y alimentación inalámbrica, se destacó el uso necesario de dos placas de desarrollo con microcontroladores y la elección de materiales que permitan el paso de ondas de radiofrecuencia para la transferencia de información y campos magnéticos variables para la transferencia de energía inalámbrica, en base a esto se propuso un concepto de solución. Los componentes eléctricos necesarios para el sistema de alimentación fueron el generador de tren de pulsos, la bobina emisora y receptora, el diodo Schottky y los convertidores DC-DC. Mediante la señal de voltaje cuadrática variable, proporcionada por el generador tren de pulsos, se generó un campo magnético variable en la bobina emisora, este campo magnético variable indujo una señal de voltaje sinusoidal en la bobina receptora. El material usado entre las bobinas es vidrio porque permite el paso de campos magnéticos variables. La amplitud de las señales de voltaje obtenidas se redujo en cada etapa, los 24 V de la señal cuadrática en la bobina emisora se redujeron a 9 V perteneciente a una señal aproximadamente sinusoidal, al pasar a la bobina receptora. Por otra parte, se usó un diodo Schottky para obtener una señal semi sinusoidal positiva para que el convertidor DC-DC pueda trabajar correctamente, el diodo Schottky produjo otra caída de voltaje y como consecuencia se obtuvo un voltaje de 6.92 V. El sistema de alimentación propuesto permitió la correcta alimentación del Arduino Micro, ubicado en el interior de la cámara de vacío, el cual se conectó a los sensores temperatura, contenido de humedad y presión. La transferencia de datos del Arduino Micro al Arduino Uno, este último ubicado afuera de la cámara de vacío, se realizó de manera inalámbrica con un módulo transceptor nRF24L01 que en este primer caso actuó como emisor. El Arduino Uno recibió los datos mediante un módulo transceptor nRF24L01, que para este segundo caso actuó como receptor. Los dos módulos transceptores nRF24L01 fueron separados por vidrio dado que este material permite el paso de ondas de radiofrecuencia. Con los datos procesados por el Arduino Uno, se controló la resistencia calentadora, bomba de vacío y válvulas; componentes necesarios para quitar el aire de la cámara de vacío y obtener la presión deseada. Finalmente, se comparó los datos experimentales con modelos matemáticos de temperatura y

contenido de humedad del proceso de secado de manzanas y plátanos, a las presiones de 20kPa y 5kPa, respectivamente. En el secado de manzanas se comparó dos modelos matemáticos propuestos anteriormente con datos experimentales, se observó un desfase entre estos, tanto para el contenido de humedad como para temperatura. En el secado plátanos se compararon datos experimentales con un modelo matemático para la estimación de contenido de humedad y temperatura, al igual que el caso anterior se observó un desfase entre estos. Se destacó la importancia de obtener datos en tiempo real de temperatura y contenido de humedad, además de su impacto en el proceso de secado con cámara de vacío.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] D. Wang, M. Zhang, R. Ju, A. S. Mujumdar, and D. Yu, "Novel drying techniques for controlling microbial contamination in fresh food: A review," *Drying Technology*, vol. 41, no. 2, pp. 172–189, 2022, doi: 10.1080/07373937.2022.2080704.
- [2] N. N. Nagwekar, V. B. Tidke, and B. N. Thorat, "Seasonal Nutritional Food Security to Indian Women through Community-level Implementation of Domestic Solar Conduction Dryer," *Ecology of Food and Nutrition*, vol. 59, no. 5, pp. 525–551, Sep. 2020, doi: 10.1080/03670244.2020.1752686.
- [3] D. Huang, Y. Tao, W. Li, S. A. Sherif, and X. Tang, "Heat transfer characteristics and kinetics of *Camellia oleifera* seeds during hot-air drying," *J Therm Sci Eng Appl*, vol. 12, no. 3, Jun. 2020, doi: 10.1115/1.4045118/1065510.
- [4] D. Huang, P. Yang, X. Tang, L. Luo, and B. Sunden, "Application of infrared radiation in the drying of food products," *Trends Food Sci Technol*, vol. 110, pp. 765–777, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.TIFS.2021.02.039.
- [5] A. Hazervazifeh, A. M. Nikbakht, and S. Nazari, "Industrial Microwave Dryer An Effective Design to Reduce Non-Uniform Heating," *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, vol. 14, no. 4, pp. 110–121, 2021, doi: 10.37221/EAEF.14.4\_110.
- [6] S. Bhatta, T. S. Janezic, and C. Ratti, "Freeze-Drying of Plant-Based Foods," *Foods 2020, Vol. 9, Page 87*, vol. 9, no. 1, p. 87, Jan. 2020, doi: 10.3390/FOODS9010087.
- [7] M. C. Karam, J. Petit, D. Zimmer, E. Baudelaire Djantou, and J. Scher, "Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review," *J Food Eng*, vol. 188, pp. 32–49, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.JFOODENG.2016.05.001.
- [8] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdio, "Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2509–2520, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2281162.
- [9] M. Bowornprasittikun, T. Thanamai, S. Nutwong, A. Sangswang, and S. Naetiladdanon, "Induction food dehydrator with temperature control," *iEECON 2019 - 7th International Electrical Engineering Congress, Proceedings*, Mar. 2019, doi: 10.1109/IEECON45304.2019.8938830.
- [10] L. Sun, D. Ma, and H. Tang, "A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 490–503, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.04.016.
- [11] S. Madhankumar, K. S. R. Muthukhumaran, R. A. Navaneeth, M. Padmanabhan, and K. M. Shriram, "Design and Modelling of Automated Hot Oven Food Dehydrator," *2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, ICACCS 2021*, pp. 1130–1134, Mar. 2021, doi: 10.1109/ICACCS51430.2021.9441881.
- [12] A. Wagiman, C. J. Wei, E. M. Ci, M. L. T. Seng, M. A. H. Mohamad, and Z. Noranai, "Design and Performance Evaluation of Hybrid Photovoltaic Thermal Solar Dehydrator," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 28, no. 2, pp. 181–189, Oct. 2022, doi: 10.37934/ARASET.28.2.181189.

- [13] P. Quiñones-Reyes, J. C. Barragan-Barajas, J. A. Ramos-Frutos, and I. M. Robles-Onofre, "Networked control system for a hybrid dehydrator from the design of experiments," *2019 28th International Fall Meeting on Communications and Computing, ROC and C 2019 - Proceedings*, pp. 34–39, Mar. 2019, doi: 10.1109/ROCC.2019.8873541.
- [14] M. Zarein, S. H. Samadi, and B. Ghobadian, "Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, vol. 14, no. 1, pp. 41–47, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.JSSAS.2013.06.002.
- [15] A. R. Hakim, W. T. Handoyo, and A. W. Prasetya, "Design and Performance of Scaled-Up Microwave Dryer for Seaweed Drying," *Squalen Bulletin of Marine and Fisheries Postharvest and Biotechnology*, vol. 15, no. 3, pp. 141–152, Dec. 2020, doi: 10.15578/SQUALEN.454.
- [16] L. K. Mangalla *et al.*, "Experimental Study on the Performance Characteristics of a Microwave - Solar Heating Dryer," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 797, no. 1, p. 012017, Mar. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/797/1/012017.
- [17] T. B. Roratto, R. L. Monteiro, B. A. M. Carciofi, and J. B. Laurindo, "An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables," *LWT*, vol. 140, p. 110777, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.LWT.2020.110777.
- [18] L. T. K. Do, L. T. K. Vu, D. T. A. Phan, and N. T. Dzung, "Mathematical Modeling and Optimization of Lowtemperature Vacuum Drying for Banana," *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 47–61, 2021, doi: 10.34302/CRPJFST/2021.13.4.5.
- [19] B. R. Hubbard, L. I. Putman, S. Techtmann, and J. M. Pearce, "Open Source Vacuum Oven Design for Low-Temperature Drying: Performance Evaluation for Recycled PET and Biomass," *Journal of Manufacturing and Materials Processing 2021, Vol. 5, Page 52*, vol. 5, no. 2, p. 52, May 2021, doi: 10.3390/JMMP5020052.
- [20] J. G. Salinas, J. A. Alvarado, B. Bergenståhl, and E. Tornberg, "The influence of convection drying on the physicochemical properties of yacón (*Smallanthus sonchifolius*)," *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, vol. 54, no. 10, pp. 2951–2961, Oct. 2018, doi: 10.1007/S00231-018-2334-2/FIGURES/7.
- [21] R. L. Monteiro, J. O. de Moraes, J. D. Domingos, B. A. M. Carciofi, and J. B. Laurindo, "Evolution of the physicochemical properties of oil-free sweet potato chips during microwave vacuum drying," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 63, p. 102317, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.IFSET.2020.102317.
- [22] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for scientists and engineers, with modern physics*, 10th ed. 2017.
- [23] M. Kiani and M. Ghovanloo, "The circuit theory behind coupled-mode magnetic resonance-based wireless power transmission," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 59, no. 9, pp. 2065–2074, 2012, doi: 10.1109/TCSI.2011.2180446.
- [24] C. Kittel, "Theory of the Dispersion of Magnetic Permeability in Ferromagnetic Materials at Microwave Frequencies," *Physical Review*, vol. 70, no. 5–6, p. 281, Sep. 1946, doi: 10.1103/PhysRev.70.281.
- [25] T. L. Floyd, *Digital fundamentals*, 11th ed. 2015.
- [26] J. Jansch, H. Birkhofer, and R. Methods, "THE DEVELOPMENT OF THE GUIDELINE VDI 2221-THE CHANGE OF DIRECTION," *Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference*, 2006.

- [27] M. Amiri, M. bagher Ayani, P. Ziolkowski, and D. Mikielwicz, "Numerical analysis of vacuum drying of a porous body in the integrated domain," *J Food Process Eng*, vol. 45, no. 4, p. e14006, Apr. 2022, doi: 10.1111/JFPE.14006.
- [28] M. M. Hussain and I. Dincer, "NUMERICAL SIMULATION OF TWO-DIMENSIONAL HEAT AND MOISTURE TRANSFER DURING DRYING OF A RECTANGULAR OBJECT," <http://dx.doi.org/10.1080/713838150>, vol. 43, no. 8, pp. 867–878, 2011, doi: 10.1080/713838150.
- [29] T. Swasdisevi, S. Devahastin, P. Sa-Adchom, and S. Soponronnarit, "Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice," *J Food Eng*, vol. 92, no. 1, pp. 100–106, May 2009, doi: 10.1016/J.JFOODENG.2008.10.030.