

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 1 de 12</b>

21.1

<b>FECHA</b>	viernes, 9 de diciembre de 2022
--------------	---------------------------------

Señores  
**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA**  
 BIBLIOTECA  
 Ciudad

<b>UNIDAD REGIONAL</b>	Sede Fusagasugá
<b>TIPO DE DOCUMENTO</b>	Trabajo De Grado
<b>FACULTAD</b>	Ingeniería
<b>NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO</b>	Pregrado
<b>PROGRAMA ACADÉMICO</b>	Ingeniería Electrónica

El Autor(Es):

<b>APELLIDOS COMPLETOS</b>	<b>NOMBRES COMPLETOS</b>	<b>No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN</b>
Martínez Sabogal	Niyiret Dayanna	1069768630
Pérez Hincapié	Santiago	1072593797

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

<b>APELLIDOS COMPLETOS</b>	<b>NOMBRES COMPLETOS</b>
Guerrero Guerrero	Andrés Felipe
Palacios Yepes	Edwin

**TÍTULO DEL DOCUMENTO**

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca  
 Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414  
[www.ucundinamarca.edu.co](http://www.ucundinamarca.edu.co) E-mail: [info@ucundinamarca.edu.co](mailto: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*

 <b>UDECA</b> UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 2 de 12</b>

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE PASTEURIZACIÓN DE ALIMENTOS LÍQUIDOS BASADO EN CALEFACCIÓN POR INDUCCIÓN.

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

<b>EXCLUSIVO PARA PUBLICACIÓN DESDE LA DIRECCIÓN INVESTIGACIÓN</b>	
<b>INDICADORES</b>	<b>NÚMERO</b>
ISBN	
ISSN	
ISMN	

<b>AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO</b>	<b>NÚMERO DE PÁGINAS</b>
31/10/2022	73

<b>DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS</b> (Usar 6 descriptores o palabras claves)	
<b>ESPAÑOL</b>	<b>INGLÉS</b>
1. Calentamiento por inducción electromagnética	Electromagnetic induction heating
2. Calentamiento por resistencia eléctrica	Electrical resistance heating
3. Pasteurización	Pasteurization
4. Prototipo	Prototype
5. Alimentos líquidos	Liquid food
6. Conmutación de voltaje cero (ZVS)	Zero Voltage Switching (ZVS)

<b>FUENTES (Todas las fuentes de su trabajo, en orden alfabético)</b>
A. Acevedo Picon, J. Barrero Perez, and J. Gelvez Figueredo, "Calentamiento por inducción electromagnética: diseño y construcción de un prototipo," <i>Revista UIS Ingenierías</i> , vol. 6, no. 1, pp. 69–76, 2007.
A. Alvis, I. Caicedo, and P. Peña, "Determinación de propiedades termofísicas de alimentos en función de la concentración y la temperatura empleando un programa computacional," <i>Informacion Tecnologica</i> , vol. 23, no. 1, pp. 111–116, 2012, doi: 10.4067/S0718-07642012000100012.
A. Rodríguez Hernández <i>et al.</i> , "PLAN ENERGETICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO ENERGÉTICO 2050."

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 3 de 12</b>

Alibaba.com, "Hot Cold Water Pipe Pex Pipe Din 16892/3 Pex Gre." [https://www.alibaba.com/product-detail/hot-cold-water-pipe-pex-pipe\\_60488705969.html](https://www.alibaba.com/product-detail/hot-cold-water-pipe-pex-pipe_60488705969.html) (accessed Oct. 13, 2022).

Application of inductive forced heating as a new approach to food industry heat exchangers: A case study—Tomato paste pasteurization. [https://www.researchgate.net/publication/324576447\\_Application\\_of\\_inductive\\_forced\\_heating\\_as\\_a\\_new\\_approach\\_to\\_food\\_industry\\_heat\\_exchangers\\_A\\_case\\_study-Tomato\\_paste\\_pasteurization](https://www.researchgate.net/publication/324576447_Application_of_inductive_forced_heating_as_a_new_approach_to_food_industry_heat_exchangers_A_case_study-Tomato_paste_pasteurization) (accessed Sep. 15, 2021).

B. C. M. Salomão, A. P. Slongo, and G. M. F. Aragão, "Heat resistance of Neosartorya fischeri in various juices," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 40, no. 4, pp. 676–680, May 2007, doi: 10.1016/J.LWT.2006.03.008.

C. Bolívar Guerrero and F. Giraldo Ramos, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CALENTADOR POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA EL MONTAJE DE RODAMIENTOS." [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/2839>

C. Ferreira, M. Moreira, and M. A. P. Dinis, "Energias alternativas...", no. 14, 2009, [Online]. Available: <http://www.cm-lousada.pt/VSD/Lousada/vPT/Publica/Agenda/Eventos/jornadas+do+ambiente.htm>

C. Lamo, N. C. Shahi, A. Singh, and A. K. Singh, "Pasteurization of guava juice using induction pasteurizer and optimization of process parameters," *Lwt*, vol. 112, no. February, p. 108253, 2019, doi: 10.1016/j.lwt.2019.108253.

Convertidores CC-CA: inversores de onda cuadrada.

D. Mesa Puyo, "Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia Iván Duque Márquez Presidente de la República." [Online]. Available: [www.laimprentaeditores.com](http://www.laimprentaeditores.com)

D. of Energy, "Energy Conservation Program: Energy Conservation Standards for Residential Conventional Cooking Products", [Online]. Available: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/Consumer\\_Cooking\\_Products\\_SNOPR.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/Consumer_Cooking_Products_SNOPR.pdf)

E. Plumed, J. Acero, I. Lope, and J. M. Burdío, "Design methodology of high performance domestic induction heating systems under worktop," *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 300–306, 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2019.0693.

F. Forest, E. Labouré, F. Costa, and J. Y. Gaspard, "Principle of a multi-load/single converter system for low power induction heating," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 15, no. 2, pp. 223–230, 2000, doi: 10.1109/63.838094.

F. Martínez, "El petróleo," *Hist Vida*, no. 418, pp. 14–17, 2003, [Online]. Available: [https://www.enerclub.es/extfrontenerclub/img/File/nonIndexed/petroleo/secciones/pdf/caps\\_todos/AOP\\_FICHAS\\_DIDACTICAS.pdf](https://www.enerclub.es/extfrontenerclub/img/File/nonIndexed/petroleo/secciones/pdf/caps_todos/AOP_FICHAS_DIDACTICAS.pdf)

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 4 de 12</b>

Food & Wine en español, “Lo que desconocías sobre usar cobre al cocinar,” 2019. <https://foodandwineespanol.com/usarl-cobre-en-la-cocina/> (accessed Oct. 13, 2022).

G. Acosta Rivera, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CALEFACCIÓN PARA PILETAS DE AGUA MEDIANTE INDUCCIÓN MAGNÉTICA.”, Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.uisrael.edu.ec/bitstream/47000/1777/1/UISRAEL-EC-ELDT-378.242-2019-004.pdf>

G. Molina, “Sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética para el uso doméstico,” 2015.

G. W. Froning, D. Peters, P. Muriana, K. Eskridge, D. Travnicek, and S. S. Sumner, “International Egg Pasteurization Manual”.

G. Wang, Z. Wan, and X. Yang, “Induction heating by magnetic microbeads for pasteurization of liquid whole eggs,” *J Food Eng*, vol. 284, no. April, p. 110079, 2020, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110079.

GASNOVA (Asociación Colombiana del GLP), “INFORME ANUAL DEL GLP 2020,” 2020. [Online]. Available: [www.gasnova.co](http://www.gasnova.co)

H. Serrano and C. Alberto, “DISEÑO DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CON TRANSFORMADORES DE BAJO COSTO,” 2019.

H. W. E. Koertzen, J. D. van Wyk, and J. A. Ferreira, “An investigation of the analytical computation of inductance and ac resistance of the heat-coil for induction cookers,” *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, vol. 1992-Janua, pp. 1113–1119, 1992, doi: 10.1109/IAS.1992.244423.

H. W. Koertzen, J. D. van Wyk, and J. A. Ferreira, “Design of the half-bridge, series resonant converter for induction cooking,” *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, vol. 2, pp. 729–735, 1995, doi: 10.1109/pesc.1995.474899.

H. Young and R. Freedman, “Física universitaria.” [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/cuu>

I. H. S. Ambrell, “Acerca de Inducción Calentamiento,” 2018. Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: [https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell\\_PDFs/411-0169-06.pdf](https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0169-06.pdf)

International Rectifier, “DATASHEET IRF2110.” [Online]. Available: [www.irf.com](http://www.irf.com)

International Rectifier, “IRFP250N Power MOSFET.” [Online]. Available: [www.irf.com](http://www.irf.com)

J. Benito, “Tablas calores específicos de alimentos.”

J. Martínez Ledesma, “DESARROLLO DE UN INVERSOR RESONANTE PARA CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA,” 2013. Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/16739/Desarrollo%20de%20un%20Invers>

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 5 de 12</b>

or%20Resonante%20para%20Calentamiento%20por%20Inducci%C3%B3n%20Electromagn%C3%A9tica.pdf?sequence=1&isAllowed=y

J. Martínez Ledesma, “Desarrollo de un inversor resonante para calentamiento por inducción electromagnética.” México, 2013.

J. R. G. Pablo Hernández, Fernando Monterde, J. M. Burdío, “Power Loss Optimisation of Foil Coils for Induction Cooking,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 6, no. 11, pp. 951–952, 1967.

L. Idarraga Ortiz and R. Afanador Muñoz, “Diseño y construcción del sistema de control de un puente inversor resonante.” 2006.

L. Valle Espinosa, “Evaluación de un método alternativo de pasteurización por inyección directa de ozono en vino de frutas elaborado a partir de un mosto combinado de manzana (*pyrus malus* L.), pera (*pyrus communis* L.) y uva (*vitis vinifera* L.)” 2016.

longitudprimitiva.jpg (971x7971).  
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut121/longitudprimitiva.jpg>  
 (accessed Oct. 13, 2022).

LTspice Simulator | Analog Devices. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html> (accessed Oct. 28, 2022).

M. M. Jovanovic, W. A. Tabisz, and F. C. L, “ZERO-VOLTAGE-SWITCHING TECHNIQUE IN HIGH-FREQUENCY OFF-LINE CONVERTERS’.”

M. Tipán Quise and D. Florez Santos, “Diseño y construcción de un prototipo de pasteurizadora para el procesamiento de 50 litros de leche/hora,” 2018.

N. D. Martínez Sabogal *et al.*, “EVALUACIÓN COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS DE CALEFACCIÓN EN APLICACIONES INDUSTRIALES.”

N. D. Martínez Sabogal, S. Pérez Hincapié, A. F. Guerrero Guerrero, and E. Palacios Yepes, “Sistema de calentamiento por inducción para biodigestores anaeróbicos a escala,” Fusagasugá, Cundinamarca. Colombia, Sep. 2022. Accessed: Oct. 13, 2022. [Online]. Available: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/2512/1863>.

Naciones Unidas, “Paz, dignidad e igualdad en un planeta sano | Naciones Unidas.” <https://www.un.org/es/global-issues/population> (accessed Sep. 05, 2021).

P. M. de Souza and A. Fernández, “Consumer acceptance of UV-C treated liquid egg products and preparations with UV-C treated eggs,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 14, pp. 107–114, 2012, doi: 10.1016/j.ifset.2011.12.005.

R. L. Steigerwald, “A comparison of half-bridge resonant converter topologies,” *APEC 1987 - 2nd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Conference Proceedings*, vol. 3, no. 2, pp. 135–144, 2015, doi: 10.1109/APEC.1987.7067142.

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 6 de 12</b>

R. Morales-Caporal, *Aplicación del Calentamiento por Inducción en Baja Potencia: Uso Doméstico, Agrícola y para Laboratorio*. 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/301593999>

S. Garro Acón *et al.*, “Modelación y simulación de Disipadores de calor para Procesadores de computadora en COMSOL Multiphysics,” 2012.

S. Vergara Gómez, “Estrategias tecnológicas para optimizar la producción y la vida útil de zumo de granada,” 2014.

TABLAS Y DIAGRAMAS DE PROPIEDADES (SISTEMA INTERNACIONAL).

Termocupla          Tipo          K          Con          Sonda          De          30MM.  
<https://www.vistronica.com/sensores/temperatura/termocupla-tipo-k-con-sonda-de-30mm-detail.html> (accessed Nov. 02, 2022).

V. Crisafulli, “New IHR Filed Stop II IGBT technology, the best efficiency for high frequency Induction Cooking Applications.,” no. May, pp. 20–22, 2014.

Vicente. Esteve Gómez, *Influencia de los componentes parásitos en el análisis y diseño de inversores resonantes paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción*. Universitat de València, Servei de Publicacions, 2003.

W. González, J. M. Aller, S.-B. Lászlo, and J. W. Horvart, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BOBINAS DE CALENTAMIENTO PARA HORNOS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA,” *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 17, no. 66, pp. 28–37, 2013, [Online]. Available: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-48212013000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212013000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en)

## RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS

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

### Resumen

La pasteurización de alimentos líquidos consiste en elevar la temperatura de un alimento durante un tiempo y temperatura determinada, con el fin de inactivar los microorganismos que puedan afectar la integridad del producto y la salud del consumidor. La pasteurización es un proceso que se emplea frecuentemente en la industria de alimentos procesados donde se emplean elevadas cantidades de combustibles fósiles con el fin aumentar la temperatura de grandes volúmenes de alimento.

Teniendo en cuenta el principio de pasteurización, en el presente proyecto se diseñó e implementó un prototipo de pasteurización basado en calentamiento por inducción. Para ello se realizó una extensa investigación sobre el principio de pasteurización en alimentos líquidos y calentamiento inductivo esto con el objetivo de conocer los rangos de tiempo y temperatura al que operan los distintos tipos de pasteurización.

De esta manera el método de pasteurización utilizado fue la pasteurización VAT que requiere de una temperatura de 60°C. De igual forma se obtiene un circuito inductivo de conmutación suave (ZVS) constituido por un inversor de medio puente y un circuito resonante en paralelo como carga, este circuito entrega en su salida una potencia de 216

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 7 de 12</b>

W y opera a una frecuencia de 10 kHz, frecuencia necesaria para lograr una profundidad de penetración de las corrientes parásitas de 2.7 mm en el material a calentar. Del mismo modo en este documento se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones y pruebas experimentales de las formas de onda de tensión y corriente del circuito y la carga. Para finalizar, se muestran los resultados de calentamiento obtenidos en el alimento a pasteurizar, tanto por el método de calentamiento por inducción, que operó a una potencia de 216 W alcanzando una temperatura de 60°C en 79" y, por el de resistencia eléctrica, que operó a 330 W llegando a la misma temperatura en un tiempo de 45".

#### **Abstract**

Pasteurization of liquid foods consists of raising the temperature of a food for a certain time and temperature, in order to inactivate microorganisms that may affect the integrity of the product and the health of the consumer. Pasteurization is a process frequently used in the processed food industry where high quantities of fossil fuels are used to raise the temperature of large volumes of food.

Taking into account the pasteurization principle, a pasteurization prototype based on induction heating was designed and implemented in this project. For this purpose, an extensive research on the principle of pasteurization in liquid foods and inductive heating in order to know the time and temperature ranges at which the different types of pasteurization operate.

Thus, the pasteurization method used was VAT pasteurization, which requires a temperature of 60°C. Similarly, a soft-switched inductive circuit (ZVS) consisting of a half-bridge inverter and a parallel resonant circuit as load is obtained. This circuit delivers an output power of 216 W and operates at a frequency of 10 kHz, the frequency necessary to achieve an eddy current penetration depth of 2.7 mm in the material to be heated.

In the same way, the results obtained through simulations and experimental tests of the voltage and current waveforms of the circuit and the load are presented in this document. Finally, the heating results obtained in the food to be pasteurized are shown, both by the induction heating method, which operated at a power of 216 W reaching a temperature of 60°C in 79" and by the electrical resistance method, which operated at 330 W reaching the same temperature in a time of 45".

### **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

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca  
 Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414  
[www.ucundinamarca.edu.co](http://www.ucundinamarca.edu.co) E-mail: [info@ucundinamarca.edu.co](mailto: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*

 <b>UDECA</b> UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 8 de 12</b>

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":

<b>AUTORIZO (AUTORIZAMOS)</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>
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; 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.

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 9 de 12</b>

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 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

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

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 10 de 12</b>

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.



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

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca

Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414

[www.ucundinamarca.edu.co](http://www.ucundinamarca.edu.co) E-mail: [info@ucundinamarca.edu.co](mailto:info@ucundinamarca.edu.co)

NIT: 890.680.062-2

	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 11 de 12</b>

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).

<b>Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. Nombre completo del proyecto.pdf)</b>	<b>Tipo de documento (ej. Texto, imagen, vídeo, etc.)</b>
1.Sistema de calentamiento por inducción para biodigestores anaeróbicos a escala.pdf	Texto
2.Proceso de registro de Sistema piloto de calentamiento por inducción	Texto (en proceso)

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

<b>APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS</b>	<b>FIRMA (autógrafa)</b>
Martínez Sabogal Niyiret Dayanna	
Pérez Hincapié Santiago	

21.1-51-20.

 <b>UDEC</b> UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA	<b>MACROPROCESO DE APOYO</b>	<b>CÓDIGO: AAAR113</b>
	<b>PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO</b>	<b>VERSIÓN: 6</b>
	<b>DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>VIGENCIA: 2021-09-14</b>
		<b>PAGINA: 12 de 12</b>

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca  
 Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414  
[www.ucundinamarca.edu.co](http://www.ucundinamarca.edu.co) E-mail: [info@ucundinamarca.edu.co](mailto: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*

# **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE PASTEURIZACIÓN DE ALIMENTOS LÍQUIDOS BASADO EN CALEFACCIÓN POR INDUCCIÓN**

**Autor (es)**

**Niyiret Dayanna Martínez Sabogal  
Santiago Pérez Hincapié**

**Universidad de Cundinamarca**

Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Electrónica  
Fusagasugá, Colombia  
2022

# **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE PASTEURIZACIÓN DE ALIMENTOS LÍQUIDOS BASADO EN CALEFACCIÓN POR INDUCCIÓN**

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

**Autor (es)**

**Niyiret Dayanna Martínez Sabogal  
Santiago Pérez Hincapié**

Director:

Andrés Felipe Guerrero Guerrero

Co-director:

Edwin Palacios Yepes

Asesores:

Arley Fernando Fernández Benavides

Línea de investigación:

Diseño, instrumentación y control

**Universidad de Cundinamarca**

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Fusagasugá, Colombia

2022

# Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a Dios, por darnos salud y vida.

A nuestras familias que siempre nos han brindado su apoyo para poder cumplir todos nuestros objetivos e impulsarnos a perseguir nuestros sueños pese a las adversidades.

Le agradecemos a nuestro director, Ing. Andrés Felipe Guerrero por su conocimiento, dedicación y paciencia para corregir este documento y guiarnos en el desarrollo de este proyecto.

A los ingenieros Edwin Palacios y Arley Fernando Fernández, por brindarnos sus conocimientos necesarios en el desarrollo de esta monografía y a todos los profesores que nos ayudaron durante este proceso.

Agradecemos a todos nuestros amigos y compañeros de la universidad, por brindarnos su apoyo moral y estar presentes cuando requerimos de su ayuda.

Gracias a los señores de servicios de la universidad, personas muy amables y serviciales, que nos ayudaron con sus herramientas cuando las requerimos. Y a todas las personas externas a la universidad que nos dieron consejos para este proyecto.

A todos, muchas gracias.

# Resumen

La pasteurización de alimentos líquidos consiste en elevar la temperatura de un alimento durante un tiempo y temperatura determinada, con el fin de inactivar los microorganismos que puedan afectar la integridad del producto y la salud del consumidor. La pasteurización es un proceso que se emplea frecuentemente en la industria de alimentos procesados donde se emplean elevadas cantidades de combustibles fósiles con el fin aumentar la temperatura de grandes volúmenes de alimento.

Teniendo en cuenta el principio de pasteurización, en el presente proyecto se diseñó e implementó un prototipo de pasteurización basado en calentamiento por inducción. Para ello se realizó una extensa investigación sobre el principio de pasteurización en alimentos líquidos y calentamiento inductivo esto con el objetivo de conocer los rangos de tiempo y temperatura al que operan los distintos tipos de pasteurización.

De esta manera el método de pasteurización utilizado fue la pasteurización tipo VAT que requiere de una temperatura de 60°C. De igual forma se obtiene un circuito inductivo de conmutación suave (ZVS) constituido por un inversor de medio puente y un circuito resonante en paralelo como carga, este circuito entrega en su salida una potencia de 216 W y opera a una frecuencia de 10 kHz, frecuencia necesaria para lograr una profundidad de penetración de las corrientes parásitas de 2.7 mm en el material a calentar.

Del mismo modo en este documento se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones y pruebas experimentales de las formas de onda de tensión y corriente del circuito y la carga. Para finalizar, se muestran los resultados de calentamiento obtenidos en el alimento a pasteurizar, tanto por el método de calentamiento por inducción, que operó a una potencia de 216 W alcanzando una temperatura de 60°C en 79" y, por el de resistencia eléctrica, que operó a 330 W llegando a la misma temperatura en un tiempo de 45".

Palabras clave: calentamiento por inducción electromagnética; calentamiento por resistencia eléctrica; pasteurización.

# Abstract

Pasteurization of liquid foods consists of raising the temperature of a food for a certain time and temperature, in order to inactivate microorganisms that may affect the integrity of the product and the health of the consumer. Pasteurization is a process frequently used in the processed food industry where high quantities of fossil fuels are used to raise the temperature of large volumes of food.

Taking into account the pasteurization principle, a pasteurization prototype based on induction heating was designed and implemented in this project. For this purpose, an extensive research on the principle of pasteurization in liquid foods and inductive heating in order to know the time and temperature ranges at which the different types of pasteurization operate.

Thus, the pasteurization method used was VAT type pasteurization, which requires a temperature of 60°C. Similarly, a soft-switched inductive circuit (ZVS) consisting of a half-bridge inverter and a parallel resonant circuit as load is obtained. This circuit delivers an output power of 216 W and operates at a frequency of 10 kHz, the frequency necessary to achieve an eddy current penetration depth of 2.7 mm in the material to be heated.

In the same way, the results obtained through simulations and experimental tests of the voltage and current waveforms of the circuit and the load are presented in this document. Finally, the heating results obtained in the food to be pasteurized are shown, both by the induction heating method, which operated at a power of 216 W reaching a temperature of 60°C in 79'' and by the electrical resistance method, which operated at 330 W reaching the same temperature in a time of 45''.

Keywords: electromagnetic induction heating; electrical resistance heating; pasteurization.

# Contenido

Resumen .....	4
Abstract.....	5
INTRODUCCIÓN .....	10
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	11
<b>OBJETIVOS DEL ESTUDIO</b> .....	14
Objetivo general .....	14
Objetivos específicos .....	14
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	15
<b>ALCANCES Y LIMITACIONES</b> .....	17
Alcances .....	17
Limitaciones .....	17
1. <b>MARCO REFERENCIAL</b> .....	18
1.1. <b>ESTADO DEL ARTE</b> .....	18
1.2. <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	22
2. <b>DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	30
2.1. <b>METODOLOGÍA</b> .....	30
3. <b>DESARROLLO DEL PROTOTIPO A ESCALA DE PASTEURIZACIÓN BASADO EN CALEFACCIÓN POR INDUCCIÓN</b> .....	32
3.1. <b>ANÁLISIS</b> .....	32
3.2. <b>DISEÑO</b> .....	38
3.3. <b>IMPLEMENTACIÓN</b> .....	50
3.4. <b>PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y/O DESEMPEÑO</b> .....	56
4. <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	62
5. <b>CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....	64
5.1. <b>CONCLUSIONES</b> .....	64
5.2. <b>PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO</b> .....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	66

# Índice de figuras

Figura 1. Consumo de GLP en sectores [5].	11
Figura 2. Niveles de emisiones de CO <sub>2</sub> [5].	12
Figura 3. Niveles de CO <sub>2</sub> en Colombia [5].	13
Figura 4. Eficiencia de los sistemas de calentamiento [6].	15
Figura 5. (a) Ilustración esquemática del proceso, (b) montaje experimental del sistema CPI, (c) imagen TEM de microperlas magnéticas, (d) ilustración esquemática del calentamiento por convección y del calentamiento por inducción magnética [2].	19
Figura 6. Prototipo del pasteurizador por inducción de 1500 W [15].	20
Figura 7. Placa de cocción de inducción integrada debajo de la encimera [17].	21
Figura 8. Topología del convertidor resonante serie-paralelo [20].	22
Figura 9. Circuito resonante en serie de medio puente [21].	22
Figura 10. Profundidad de penetración de los metales [26].	24
Figura 11. Magnetización de los metales [28].	25
Figura 12. Etapas de un sistema de calentamiento por inducción [29].	26
Figura 13. Topología inversor medio puente [30].	27
Figura 14. Inversor puente completo [30].	28
Figura 15. Funcionamiento inversor medio puente.	28
Figura 16. Circuito integrado IR2110 [32].	29
Figura 17. Representación gráfica de la puesta en marcha del proyecto. Elaboración propia.	30
Figura 18. Diagrama de la pasteurización de la leche [35].	33
Figura 19. Reactor encamisado [41].	35
Figura 20. Procesamiento continuo [41].	36
Figura 21. Pérdidas de energía en un sistema de calentamiento por inducción. Elaboración propia.	37
Figura 22. Prototipo de calefacción por inducción. Elaboración propia.	38
Figura 23. Representación entre los diámetros y distancia entre las poleas. Elaboración propia.	42
Figura 24. Topología circuito inversor ZVS. Elaboración propia.	43
Figura 25. (a) Representación funcionamiento de conmutación dura y (b) conmutación suave. Elaboración propia.	43
Figura 26. a) Tubo galvanizado, b) aislante eléctrico y c) bobina de inducción. Elaboración propia.	45
Figura 27. Bobina de inducción. Elaboración propia.	46
Figura 28. Ubicación de la termocupla tipo K. Elaboración propia.	47
Figura 29. Diseño de la placa de inducción PCB.	48
Figura 30. Circuito térmico equivalente.	49
Figura 31. Circuito convertidor ZVS.	50
Figura 32. Conmutación de los MOSFET Q1 y Q2.	50
Figura 33. Frecuencia de conmutación de los MOSFET.	51
Figura 34. Formas de onda de tensión y corriente en la carga.	51
Figura 35. Formas de onda de tensión y corriente en la salida del inversor.	52
Figura 36. Placa del circuito convertidor ZVS.	52

Figura 37. Placa del sistema de calentamiento por inducción.	53
Figura 38. Bomba centrífuga de aceite NPR.	54
Figura 39. Diseño, impresión y ensamble del acople para la polea conducida.	54
Figura 40. Ensamble de poleas y correa en el motor monofásico y bomba.	55
Figura 41. A) Intercambiador de calor de serpentín, b) vista superior del recipiente de almacenamiento.	55
Figura 42. Tubería DN16 [47].	56
Figura 43. Prototipo de calefacción por inducción para pasteurización.	56
Figura 44. Formas de onda de tensión y corriente del convertidor ZVS implementado.	57
Figura 45. Resultados temperatura agua y aceite, inducción electromagnética.	58
Figura 46. Resultados temperatura agua sin aislamiento térmico.	59
Figura 47. Recipiente de almacenamiento con aislamiento térmico.	59
Figura 48. Ubicación de la resistencia eléctrica.	60
Figura 49. Resultados temperatura agua y aceite, resistencia eléctrica.	60
Figura 50. Resultados temperatura aceite en reposo, inducción electromagnética.	61

# Índice de tablas

Tabla 1. Ventajas del sistema de calentamiento por inducción electromagnética. _____	18
Tabla 2. Relación de temperatura y tiempo de los procesos de pasteurización VAT, HTST y UHT [27]. _____	33
Tabla 3. Características térmicas de seis diferentes alimentos. _____	34
Tabla 4. Calor específico de los metales. _____	35
Tabla 5. Energía requerida por los elementos del prototipo. _____	39
Tabla 6. Pérdidas por superficie. _____	40
Tabla 7. Propiedades de la pieza a calentar. _____	44
Tabla 8. Características de la bobina de inducción. _____	46
Tabla 9. Características de la termocupla tipo K. _____	47

# INTRODUCCIÓN

El calor ha jugado un papel muy importante en la evolución del ser humano. La primera fuente de calor que el hombre aprendió a manipular fue el fuego que, a través de las propiedades inflamables de la madera, le permitió avivar las llamas, que se usaban principalmente para generar calor y cocinar algunos alimentos. Desde entonces el hombre ha estado buscando y utilizando otros elementos más eficientes para la generación de calor, llegando así, al descubrimiento de las propiedades inflamables de los combustibles fósiles como los derivados del petróleo y el carbón [1].

En la actualidad se han estado implementado nuevos métodos de calentamiento como lo es el calentamiento por inducción electromagnética. Este tipo de calentamiento es empleado principalmente en el forjado de metales, estufas y calentadores de agua, teniendo una gran acogida por su eficiencia y desempeño en el momento de incrementar la temperatura de la masa a calentar.

En las últimas décadas se ha percibido un incremento de la temperatura del planeta a nivel global, alarmando a la comunidad científica por la posible superación de los 1,2°C que es el límite que la Organización de las Naciones Unidas (ONU) indica que puede soportar el planeta antes de una catástrofe ambiental. Este incremento de temperatura es consecuencia de la quema excesiva de combustibles fósiles utilizados por los distintos sectores económicos. Por ejemplo, el sector terciario es responsable de transformar las materias primas en productos de consumo, y para dicha tarea emplea grandes cantidades de energía como gas licuado de petróleo (GLP) y gas Natural, que se utilizan para incrementar la temperatura de distintos materiales como los alimentos que pasan por diversas etapas en su producción.

Las normas sanitarias exigen que los alimentos deben pasar por un proceso de pasteurización que consiste en incrementar la temperatura del alimento por un rango de tiempo, con el fin de inactivar los microorganismos dañinos para el producto y el ser humano. Las técnicas de pasteurización térmica se han utilizado ampliamente en la industria alimentaria para prolongar la vida útil de los alimentos [2].

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La población mundial ha estado incrementando rápidamente, y con ellas sus distintas necesidades. Según las Naciones Unidas, se estima que para el 2050 existirá una población de 9.700 millones de personas a nivel mundial y posiblemente alcanzando un pico de cerca de 11.000 millones para 2100 [3], elevándose con ella el consumo de combustibles fósiles como el petróleo y sus derivados.

Actualmente el 90% de los derivados del petróleo se utiliza para satisfacer las necesidades energéticas del mundo [4]. Algunos y más importantes derivados del petróleo son: gasolinas, gasóleos, fuelóleos, aceites, asfaltos, aditivos y gas licuado de petróleo (GLP). Este último derivado es usado principalmente en el sector residencial, petroquímico, industrial y otros sectores económicos como se muestra en la Figura 1.

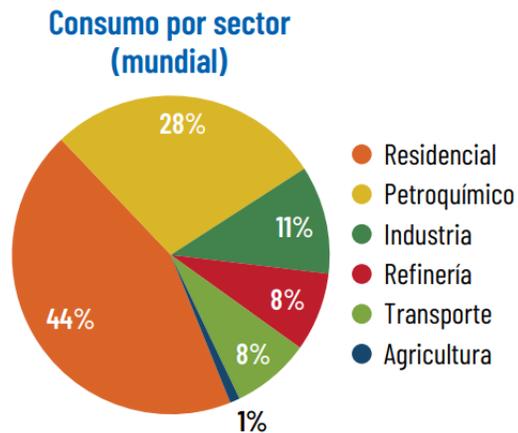


Figura 1. Consumo de GLP en sectores [5].

En la actualidad se presentan altas emisiones de gases de efecto invernadero debido a la quema excesiva de los combustibles fósiles antes mencionados, situación que ha llevado al aumento de la temperatura a nivel mundial a 1,2°C alcanzando el punto de no retorno. En la Figura 2 se comparan los niveles de emisiones de diferentes combustibles, como bagazo y leña, que hacen parte del grupo de las biomazas, también se comparan las emisiones de combustibles fósiles como el carbón, Diesel, keroseno, gasolina, GLP y gas natural.

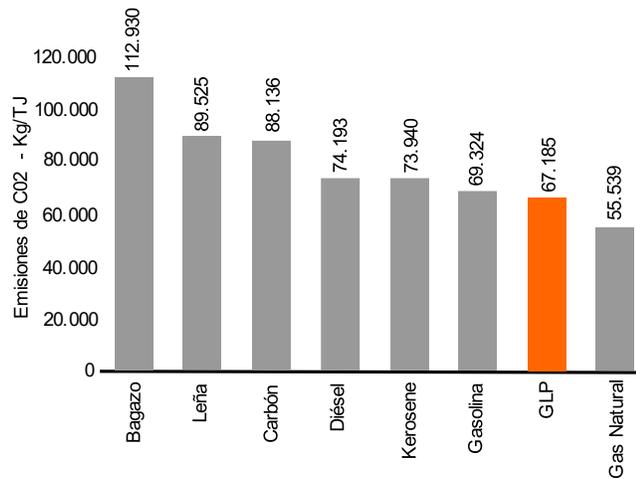


Figura 2. Niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> [5].

De acuerdo con la Figura 2, el GLP es el segundo gas menos contaminante con 67.185 kg/TJ de emisiones de CO<sub>2</sub>, por encima del gas natural que emite 55.539 kg/TJ de CO<sub>2</sub>. El GLP en Colombia representa el 2% de la canasta energética nacional según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). El informe anual del GLP 2020 realizado por la Asociación Colombiana del GLP muestra el consumo por sectores registrado en el año 2020, siendo el sector residencial el mayor consumidor con el 73% de las ventas del sector GLP, luego por el sector industrial con un 13%, comercial con el 7% y otros, que hace referencia a ventas a hospitales, escuelas, centros asistenciales y entidades del gobierno con un 6% [5].

En el sector de la industria de los alimentos procesados, el GLP es un combustible muy utilizado por sus diferentes beneficios, como lo es el control preciso de temperatura, fácil manejo por sus quemadores pequeños y su bajo contenido en azufre que permite que los productos cumplan con las normas sanitarias. El GLP se utiliza para todas las posibles aplicaciones de acabado de alimentos, desde freír, hervir, guisar, pasteurizar, cocinar a fuego lento, asar, estofar, secar la leche y hornear.

La pasteurización en la industria requiere de grandes cantidades de energía para elevar las temperaturas de los alimentos, algo que en la actualidad se consigue con tecnologías convencionales de generación de energía térmica, mediante la quema de combustibles fósiles, GLP y calentamiento de resistencias eléctricas.

En los últimos años se ha registrado en Colombia un aumento en el consumo del GLP y de igual manera un crecimiento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En la Figura 3 se exponen los niveles CO<sub>2</sub> de los últimos años donde se evidencia un incremento de 17,6 millones de toneladas entre el 2013 y 2019 simbolizando un crecimiento anual del 3.5% lo que conlleva un aumento al calentamiento global.

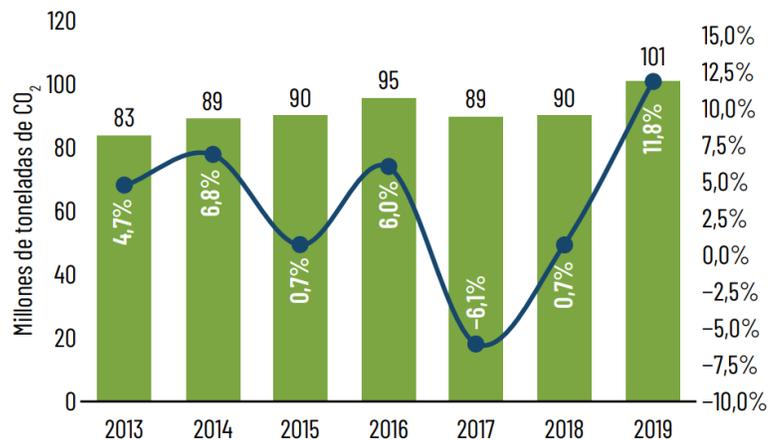


Figura 3. Niveles de CO<sub>2</sub> en Colombia [5].

Lo anterior crea la necesidad de aplicar nuevos métodos de calentamiento con el fin de disminuir el consumo de combustibles fósiles y así mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para el proceso de pasteurización de alimentos líquidos mediante calentamiento por inducción son muy pocas las investigaciones previas que se encuentran, lo que conlleva a tener ciertas limitaciones tecnológicas como de parámetros de diseño. Estas limitaciones pueden influir en los resultados arrojados por el sistema de pasteurización que se lleve a cabo con este tipo de calentamiento, obteniendo un rendimiento del sistema menor al esperado.

Por lo mencionado anteriormente surge el siguiente interrogante: ¿Cómo implementar un sistema de calefacción por inducción que mejore la eficiencia y permita el ahorro de energía en un proceso de pasteurización de alimentos líquidos?

# **OBJETIVOS DEL ESTUDIO**

## **Objetivo general**

Desarrollar un prototipo a escala de pasteurización de alimentos líquidos basado en calefacción por inducción, que mejore la eficiencia respecto a sistemas actuales basados en calefacción por conducción y radiación (resistencia eléctrica).

## **Objetivos específicos**

- Identificar las condiciones y rangos de operación de un sistema de calefacción por inducción en procesos de pasteurización de alimentos líquidos.
- Diseñar un sistema de calefacción por inducción para procesos de pasteurización de alimentos líquidos.
- Implementar un sistema de calefacción por inducción prototipo en un equipo de volumen conocido escalable.
- Verificar el comportamiento de las pruebas experimentales a partir del modelo del prototipo.

## JUSTIFICACIÓN

En la actualidad en los sectores residenciales e industriales es necesario utilizar sistemas de calentamiento eficientes, fiables y con baja emisión de GEI, debido a que el planeta en las últimas décadas ha presentado un aumento en su temperatura, alcanzando el límite de no retorno a causa de las GEI. Lo anterior crea la necesidad de buscar nuevos sistemas de calentamiento con mayor eficiencia y menores emisiones; como las microondas, el calentamiento por inducción y halógeno que presentan una eficiencia superior al 70% como se muestra en la comparación de la Figura 4.

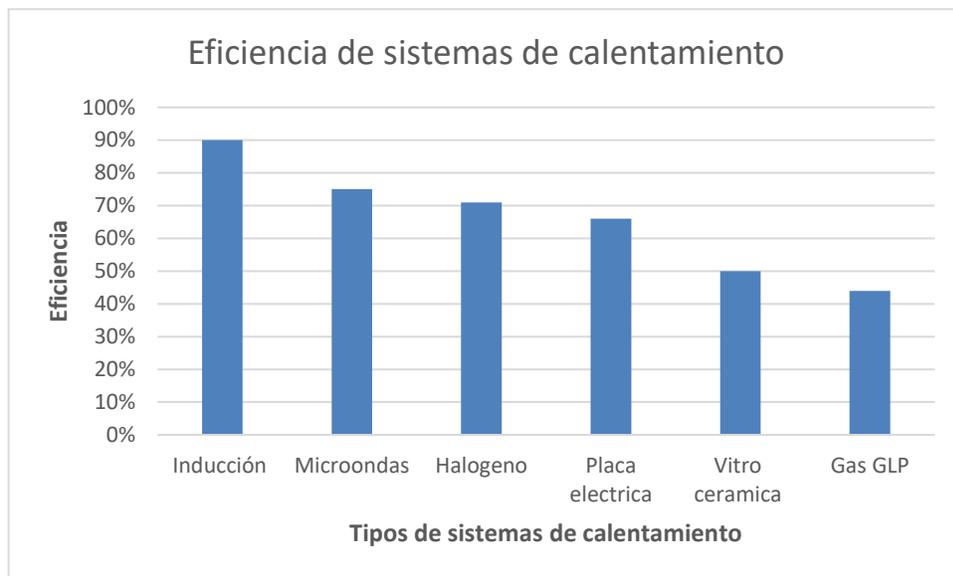


Figura 4. Eficiencia de los sistemas de calentamiento [6].

Colombia al igual que otros países se ha comprometido ante la ONU a disminuir sus emisiones de GEI. El Ministerio de Minas y Energía busca acelerar la transición energética para que los sectores como el residencial e industrial minimicen sus emisiones considerablemente para el 2030 mediante el uso de sistemas de calentamiento más limpios y eficientes [7].

Los modernos sistemas de calentamiento por inducción electromagnética (CPI) son rápidos eficientes y generan cero emisiones debido a que funcionan mediante energía eléctrica, esto los convierte en una de las opciones de calentamiento más eficientes en el mercado. Colombia al ser un país con un gran potencial de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, se convierte en una nación con las condiciones óptimas para la implementación de este tipo de sistema. Según el Plan Energético de Colombia la distribución de generación eléctrica en el país cuenta con una capacidad instalada de 14.4 GW, de los cuales un 69.9% es

generación hidráulica, 24.8% térmica a gas, 4.9% térmicas a carbón, 0.4% cogeneradores y 0.1% eólicos [8].

En el presente proyecto se busca implementar un prototipo de sistema basado en calentamiento por inducción electromagnética (CPI), con el fin de crear una alternativa de calentamiento limpia y eficiente para procesos de pasteurización. En los procesos de pasteurización de alimentos líquidos mediante CPI son muy pocas las investigaciones previas que se encuentran en las bases de datos, de esta manera mediante el desarrollo de este proyecto se fortalecerá la información académica sobre este tipo de calentamiento, contribuyendo así a futuras investigaciones.

# ALCANCES Y LIMITACIONES

## Alcances

Actualmente existen diferentes técnicas de pasteurización que se adaptan a distintas necesidades de la industria de alimentos procesados, alguno de los tipos de pasteurización existentes son: procesamiento discontinuo, continuo y semicontinuo los cuales se basan en aumentar la temperatura del producto en un periodo de retención o reacción [9] con el fin de destruir microorganismos que puedan poner en peligro la salud pública y la integridad del producto en condiciones normales de almacenamiento y distribución [10].

En este proyecto se implementa un sistema de pasteurización discontinuo a escala basado en calentamiento por inducción electromagnética mediante la técnica de serpentín o intercambiador de calor sumergido. Este sistema de calentamiento por inducción se basa en calentar el intercambiador de calor mediante la recirculación de aceite mineral.

## Limitaciones

Una de las limitantes son los recipientes y componentes con los que se cuentan para la implementación del prototipo de la planta. Las tuberías que se utilizaron tienen una longitud larga, por consiguiente, generan pérdidas de calentamiento por radiación. Adicional a esto, se presentan pérdidas por radiación de calor, puesto que los componentes como los recipientes no estarán aislados de las altas temperaturas debidas al calentamiento que tendrá el aceite recirculante. La temperatura máxima en este proyecto es de 60 °C, dado a que en el prototipo se presentan pérdidas y el método de calentamiento por inducción requiere de más tiempo para alcanzar esta temperatura, además el motor utilizado en este proyecto se calienta debido al tiempo de funcionamiento. En este proyecto no se garantizan pruebas continuas superiores a dos horas.

La soldadura entre diferentes metales se convierte en una limitante, porque al ensamblar el recipiente de almacenamiento y el intercambiador de calor se presentan fugas de aceite en sus uniones. Esto se debe a que, al ser el recipiente de acero inoxidable y el intercambiador de calor de cobre, no es posible unirlos mediante métodos de soldadura convencional, ambos metales presentan diferentes valores de fusión. Por esta razón, se utiliza pegamento epóxico para unir estos dos metales, con la limitante de que este tipo de pegamento permite fugas de aceite al alcanzar temperaturas superiores a los 50°C a causa de las altas presiones del aceite.

# 1.MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se dará a conocer el estado del arte en donde se encuentran artículos sobre algunos prototipos implementados en procesos de pasteurización fabricación de bobinas de inducción y circuitos convertidores. Además, se describen algunos fundamentos teóricos que servirán en el desarrollo de este proyecto y, por último, se explicarán las etapas que conforman un sistema CPI.

## 1.1. ESTADO DEL ARTE

Hace 30 años apareció en el mercado el calentamiento por inducción para la cocción y desde entonces se han desarrollado mejoras y diversos lanzamientos de productos con esta técnica. Hoy en día esta tecnología ha ido creciendo y se ha popularizado, debido a que presenta ventajas en comparación con las tecnologías estándar (estufas de gas y eléctricas) no sólo por tener una mayor eficiencia sino también en los procesos de calentamiento rápido, local y directo, alta densidad de potencia y fiabilidad [11].

El Departamento de Energía de EE. UU. atestigua que las cocinas de inducción residenciales tienen una eficiencia de transferencia de energía de 84% en comparación con 74% de la tecnología eléctrica, lo que supone un ahorro energético del 10% [12].

Larco Víctor et al., realizan un análisis sobre las ventajas que posee el sistema de CPI sobre las técnicas de calentamiento convencionales, las cuales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Ventajas del sistema de calentamiento por inducción electromagnética [11].

Energía limpia	No consume combustibles fósiles, evitando la contaminación y ayuda a proteger el medio ambiente.
Eficiencia energética	Convierte un alto porcentaje de energía consumida en energía útil.
Control sobre procesos automatizados	Cuando el sistema esté en marcha y calibrado, el calentamiento será constante respecto a las llamas, sopletes u otros métodos.
Productividad máxima	El calor es instantáneo y se genera directamente sobre la pieza a calentar con pérdidas menores.

A continuación, se dará a conocer información relevante encontrada en artículos publicados en bases de datos reconocidas como la IEEE, sobre los sistemas de calefacción por inducción en usos domésticos e industriales.

### 1.1.1. Calentamiento por inducción para procesos de pasteurización.

Gaoshang Wang et al. realizaron una aplicación del calentamiento por inducción como un nuevo método de calefacción uniforme para el proceso de pasteurización en huevos, mediante dos tipos de microesferas magnéticas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$  y  $\text{GFe}_3\text{O}_4@\text{agarosa}$  de  $5\ \mu\text{m}$  y  $50\ \mu\text{m}$ , respectivamente, con una magnetización de saturación de  $42.13\ \text{emu/g}$ , con el fin de evaluar la eficiencia del calentamiento por inducción [2]. En la Figura 5, se representa todo el proceso que llevaron a cabo para los resultados obtenidos. Implementaron un equipo de corriente alterna AC a frecuencia máxima de  $512\ \text{kHz}$  y una bobina de 6 vueltas, una sonda de temperatura de fibra óptica con un diámetro de  $0.22\ \text{cm}$  y un computador para registrar la temperatura-tiempo [2]. Los parámetros de pasteurización fueron fijados en  $60^\circ\text{C}$  durante  $210\ \text{s}$  y  $68^\circ\text{C}$  en  $60\ \text{s}$ , teniendo en cuenta las sugerencias de la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (USFDA) [13]. Demostraron que con este método no se afectan las propiedades nutricionales y funcionales de los ovoproductos [14] y que el sistema CPI es una alternativa potencial al calentamiento convencional para la pasteurización.

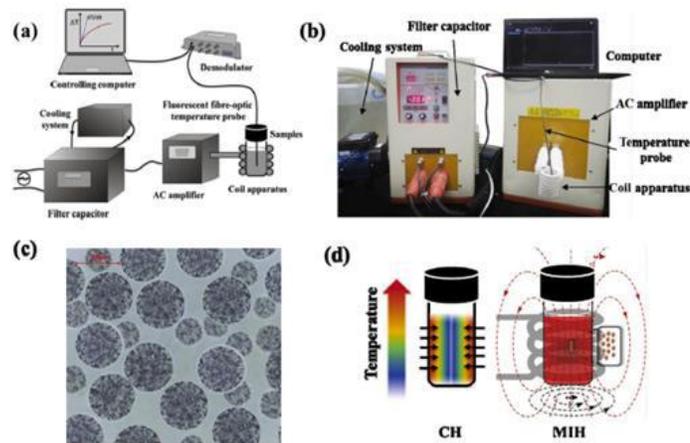


Figura 5. (a) Ilustración esquemática del proceso, (b) montaje experimental del sistema CPI, (c) imagen TEM de microperlas magnéticas, (d) ilustración esquemática del calentamiento por convección y del calentamiento por inducción magnética [2].

Changchuk Lamo et al. estudiaron y analizaron estadísticamente los efectos de las variables de temperatura y tiempo de pasteurización en frutas como la guayaba (proporciona una gran variedad de productos procesados), con respecto a la respuesta de pH, sólidos solubles totales (SST), acidez, ácido ascórbico, diferencia de color (DCT) y el recuento microbiano. Este análisis lo desarrollaron con un sistema CPI (Figura 6) con una temperatura de pasteurización de  $95^\circ\text{C}$  y una

potencia de 1500 W. Para obtener una respuesta estadística sobre las variables que midieron y del prototipo, implementaron un modelo cuadrático de segundo orden, para así constatar que los parámetros de calidad analizados se conservaron durante el proceso [15].



Figura 6. Prototipo del pasteurizador por inducción de 1500 W [15].

Anil Basaran et al. investigaron y compararon las eficiencias energéticas y eficiencias exergéticas de los sistemas de inducción y tratamiento térmico asistido por vapor en la etapa de pasteurización de la pasta de tomate en el procesamiento aséptico de la pasta [16]. Registraron que el sistema de pasteurización por inducción tiene un 46.56% de eficiencia energética, en tanto que el sistema de calentador eléctrico obtuvo una eficiencia energética del 16.63%, por esta razón concluyen que los sistemas CPI son eficientes, versátiles, rentables e higiénicos para los tratamientos térmicos de los alimentos [16].

### 1.1.2. Inductores.

Según Plumed Emilio et al. para diseñar con éxito un inductor se debe cumplir con cuatro criterios: alto rendimiento, flujo magnético acotado de acuerdo con normativa, el inversor en resonancia debe alcanzar la potencia nominal y, por último, que el calor disipado por la bobina se mantenga sobre un límite de 4 y 6 W/cm<sup>3</sup> para evitar el daño en los cables y demás componentes [17].

Plumed Emilio et al. realizaron un estudio de distintos diseños de bobinas planares y hallaron que el espacio entre el inductor y la carga no debe superar distancias de 4 mm (Figura 7), debido a que la dispersión del campo magnético compromete a la transferencia de potencia y por consiguiente a la eficiencia. Con la ayuda del software COMSOL crearon un modelo de elementos finitos para conocer los parámetros del sistema como las variaciones de la frecuencia, la distancia y

diámetro de los inductores, obteniendo resultados del rendimiento, la potencia de salida, densidad volumétrica de las pérdidas de potencia y predicciones de las mediciones del campo cercano [17]. Los prototipos de los inductores realizados tienen las siguientes características: a) alambre de litz con 180 hebras, 180 mm de diámetro, potencia de 3000 W a 40 kHz con 19 vueltas y 5 barras de ferrita y, b) 210 mm de diámetro, para trabajar a una distancia de 34 mm a 3100 W con 29 vueltas.



Figura 7. Placa de cocción de inducción integrada debajo de la encimera [17].

H. W. E. Koertzen et al. presentan un modelo analítico para el diseño de un inductor de calor para las cocinas de inducción, mediante una simulación de elementos finitos, utilizando el software Maxwell Eddy Axisymetrix Solver de Ansoft, con el fin de visualizar la integración del disco de ferrita, la pieza de trabajo, la periodicidad sobre la inductancia y la resistencia de AC de la bobina a diferentes medidas. La frecuencia de conmutación a la cual trabajaron varía entre 20 kHz y 50 kHz. Para la construcción de la bobina utilizaron alambre de litz de cobre [18].

Hernández et al. exponen los problemas que presentan los inductores a altas temperaturas cuando estos se calientan y proponen implementar un inductor de lámina de cobre con las dimensiones apropiadas para que la corriente se distribuya por todo el inductor y disminuir pérdidas de potencia. El inductor construido posee 40 vueltas, con un radio de 110 mm, el área transversal de la lámina es de 6 mm de alto por 0.6 mm de ancho. Utilizaron unas láminas de ferrita debajo de la bobina para proteger el campo magnético y disminuir la reluctancia del inductor. Con un simulador de elementos finitos observaron el comportamiento de las pérdidas de potencia generadas por la bobina e hicieron pruebas aumentando la altura de la lámina [19].

### 1.1.3. Convertidores.

Steigerwald realizó una comparación de las diferentes topologías de convertidores resonantes de medio puente implementadas en las cocinas de inducción. Al poner a prueba estas topologías demostró que el convertidor combinado serie-paralelo,

(Figura 8), funciona en un amplio rango de tensión de entrada y de salida (carga) y se disminuyen las pérdidas por conmutación, manteniendo una alta eficiencia [20].

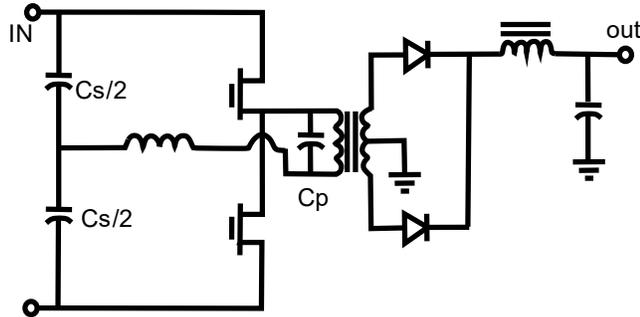


Figura 8. Topología del convertidor resonante serie-paralelo [20].

Koertzen et al. diseñaron un circuito resonante en serie de medio puente, (Figura 8) y mediante un modelo analítico obtuvieron las ecuaciones de diseño, además implementaron un convertidor con conmutación forzada. Para la construcción de la bobina de inducción utilizaron alambre de litz a 24 vueltas y, con diámetros exterior e interior de 180 mm y 40 mm respectivamente. Por último, el recipiente era de material de hierro fundido con un diámetro de 180 mm [21].

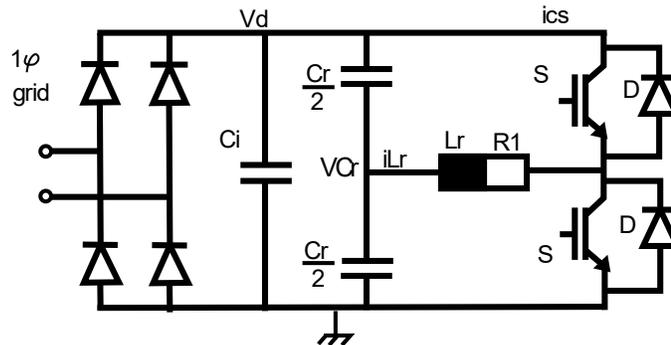


Figura 9. Circuito resonante en serie de medio puente [21].

Forest Francois et al. sugieren un sistema de convertidor de carga múltiple, establecido por un inversor ZVS resonante en serie para varias cargas resonantes, con una fuente de alimentación de 230 V y un rango de potencia de 2.5 kW a 6 kW. En el artículo presentan diversos modelos de inductores eléctricos, describiendo el principio de funcionamiento de carga múltiple, a partir del análisis de un circuito equivalente L-R y una representación que tiene presente los efectos de las corrientes parásitas, mediante simulaciones para obtener una validación experimental. Implementaron bobinas con núcleo de acero inoxidable y hierro fundido con un diámetro de 12 a 22 cm [22].

## 1.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para entender el principio de la generación de calor mediante inducción, hay que tener presente las ecuaciones de Maxwell, que se conforman por el efecto Joule, la ley de Faraday y Ampere, las cuales están basadas en el concepto de Hans Christian Oersted, que consiste en que un flujo de corriente eléctrica a través de un alambre conductor genera un campo electromagnético envolvente [23].

La ley de inducción de Faraday describe que al someter un material ferromagnético a un CEM se induce una FEM en dicho material y por lo tanto también una corriente parásita o corriente de Foucault, que es la responsable del calentamiento por efecto Joule, que se describe como la disipación de energía en forma de calor a causa de un flujo eléctrico a través de un conductor [24]. Esta disipación de energía es consecuencia de la resistividad eléctrica del material que varía según la temperatura, entre mayor sea la temperatura del metal mayor será la resistencia, caso contrario que pasa con los semiconductores en donde este valor decrece [25].

A continuación, se describirán las propiedades eléctricas y principios que son primordiales para la inducción electromagnética y otros conceptos.

### 1.2.1. Efecto piel.

Como se ha mencionado anteriormente, los campos electromagnéticos inducen una corriente sobre la pieza a calentar, esta corriente se distribuye principalmente en el contorno del material de una manera no uniforme. Este fenómeno es conocido como efecto piezoeléctrico o efecto piel, que depende de la frecuencia de operación, de la forma, del tipo del material y la temperatura de la pieza a calentar [9]. Cuanto mayor sea la frecuencia, menor es la profundidad de penetración de las corrientes parásitas inducidas, concentrándose de esta manera en la superficie del material.

Si la frecuencia es menor, la densidad de corriente toma mayor uniformidad, la corriente circula a mayor profundidad y se aprovecha mayor sección transversal del conductor mejorando el tiempo de calentamiento de la pieza a calentar [10].

Esta profundidad de penetración se puede calcular mediante la Ecuación (1).

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * f * u_r * u_o}} \quad (1)$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad eléctrica del material ( $\Omega * m$ ).

$u_o$  = Permeabilidad magnética al vacío  $4\pi * 10^{-7}$ .

$u_r$  = Permeabilidad magnética relativa al material.

$f$  = Frecuencia de operación.

Al igual que la frecuencia de trabajo, el tipo de material es un factor clave para definir la profundidad de penetración. En la Figura 10, se muestra la profundidad de penetración de 6 diferentes metales: Ferroníquel (Fe-Ni), hierro silicio (Fe-si), acero 410 (Steel 410), cobre (Cu), Aluminio (Al), Manganeseo zinc (Mn-Zn). Estos metales fueron expuesto a una frecuencia de trabajo de 60 Hz [26].

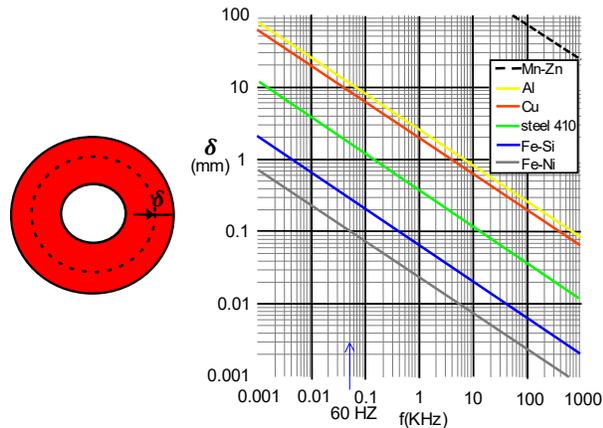


Figura 10. Profundidad de penetración de los metales [26].

### 1.2.2. Resistencia equivalente.

El calentamiento por inducción depende de la disipación de las corrientes parásitas mediante efecto joule, que consiste en la potencia disipada por un material conductor de electricidad, esto a causa de su resistencia eléctrica. Entre mayor sea dicha resistencia mayor será la potencia disipada por el material y en consecuencia la temperatura será mayor.

Los materiales metálicos como el acero y el hierro son materiales que disipan la energía eléctrica, gracias a que cuentan con una alta resistividad eléctrica que incrementa al aumentar su temperatura (dentro de un rango limitado por la temperatura de Curie) [27].

### 1.2.3. Cálculo de potencia de arranque.

Para el diseño de un sistema de calentamiento por inducción se debe conocer la cantidad de energía en kWh, requerida para generar y mantener la temperatura de operación deseada. Para dar cumplimiento a lo anterior, se deben considerar los siguientes factores:

- Tiempo de calentamiento especificado.
- Temperaturas de arranque y funcionamiento.
- Propiedades térmicas del material que se está calentando.
- Peso de los materiales que se están calentando.

- Peso del contenedor y el equipo que contiene el material que se está calentando.
- Peso de la estructura del material (requisitos por hora).
- Calor absorbido debido a cambios de estado.
- Propiedades térmicas y espesor del aislante.
- Pérdidas de calor de la superficie del material y/o el contenedor hacia el ambiente circundante.

Una de las propiedades térmicas más importantes de los materiales es el calor específico que se traduce como la energía requerida para elevar 1 °C la temperatura de un gramo de materia, esta energía se expresa en unidades de calorías (Cal) o kilocalorías (kcal).

#### 1.2.4. Propiedades de los materiales.

Con respecto a la selección del tipo de material a calentar, debe cumplir con algunas propiedades físicas y algunas restricciones en el área de la salud. Como se ha mencionado anteriormente, el material de la pieza a calentar influye en el rendimiento de los CPI; eso se debe, a las propiedades ferromagnéticas de los materiales. Estos tipos de materiales están compuestos por dominios magnéticos que se comportan como pequeños imanes permanentes orientados al azar en todo el material anulándose entre sí, impidiendo que el material produzca un campo magnético propio [28].

Cuando se aplica un campo magnético externo  $H$  en un material ferroso como se aprecia en el eje X de la Figura 11, los dominios magnéticos del material se alinean paralelamente al campo externo sumándose y creando un campo magnético  $B$  que se extiende hacia afuera del material. El eje Y de la Figura 11 muestra el valor en Teslas de dicho fenómeno en diferentes materiales [28].

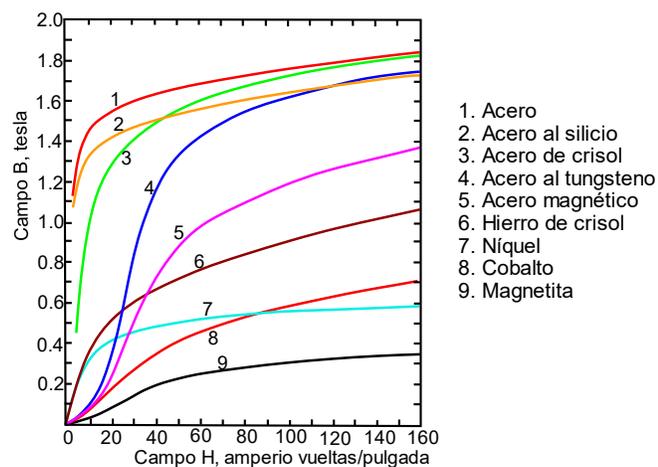


Figura 11. Magnetización de los metales [28].

## 1.3. ETAPAS DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.

Un sistema de calentamiento por inducción está conformado por las etapas que se muestran en la Figura 12.

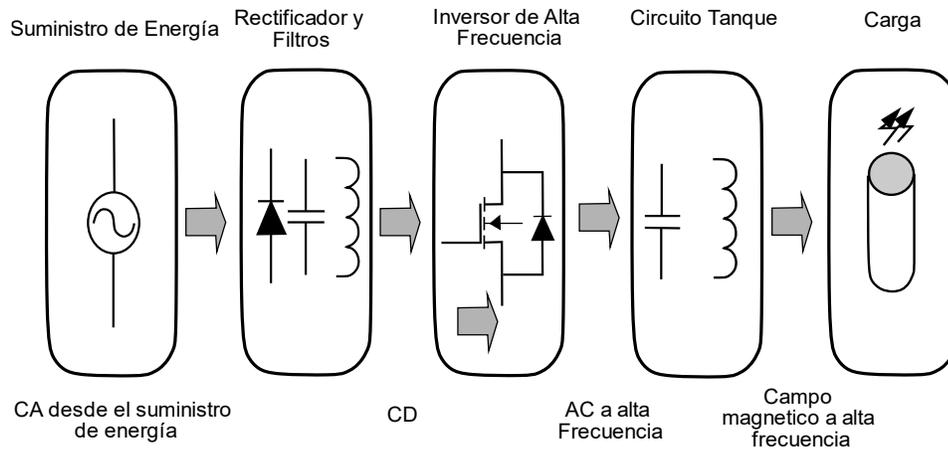


Figura 12. Etapas de un sistema de calentamiento por inducción [29].

En la primera etapa del modelo del circuito inversor se encuentra la fuente de alimentación alterna que posteriormente es rectificada mediante un convertor AC/DC, de esta etapa depende la potencia aplicada a la carga resonante. En la siguiente etapa se encuentra el convertor DC/AC que está compuesto por 2 MOSFET en configuración de medio puente que funciona como una fuente de alimentación de alta frecuencia, encargada de alimentar la carga resonante, la cual está conformada la mayoría de las veces por dos componentes reactivos: un inductor y un capacitor en serie o paralelo [27].

Las cargas resonantes al tener un componente inductivo como en el caso de la bobina de inducción presentan un desfase de  $90^\circ$  entre la tensión y la corriente formando una componente de potencia reactiva, disminuyendo de esta forma la energía transferida a la carga. Este problema se puede solucionar incorporando un capacitor en paralelo o serie, con el fin de que la reactancia capacitiva del capacitor anule a la inductiva obteniendo de esta manera un circuito resonante que a su vez determina la frecuencia de resonancia [30].

### 1.3.1. Topologías.

#### 1.3.1.1. Inversor DC/AC

Los inversores conmutados deben de tener señales de control complementarias con la adición de un tiempo muerto para los transistores que hagan parte de una misma rama, con el fin de prevenir un corto circuito debido al encendido simultáneo de los transistores.

### 1.3.1.2. Inversor medio puente

El inversor de medio puente que se muestra en la Figura 13 se compone solamente de dos transistores, S1 y S2, que se encargan de generar una señal de tensión cuadrada con modulación por ancho de pulso que alimenta el circuito resonante. En este tipo de inversor, los transistores soportan el doble de la amplitud de la onda cuadrada de salida [30][31].

Una desventaja de este tipo de inversor es que el transistor S1 no se encuentra conectado a tierra, por esta razón se debe implementar un circuito de disparo que proporcione una fuente de tensión flotante para su correcto funcionamiento [30].

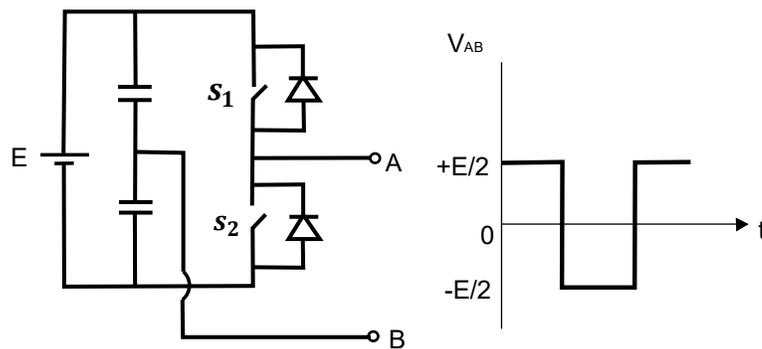


Figura 13. Topología inversor medio puente [30].

### 1.3.1.3. Inversor puente completo.

La Figura 14 muestra un circuito inversor compuesto por cuatro transistores, que al igual que el inversor de medio puente entrega en su salida una señal de tensión cuadrada con la diferencia de que su valor máximo es igual a la tensión de entrada.

Los inversores de puente completo están conformados por dos grupos de transistores ( $S_1, S_4$ ) y ( $S_2, S_3$ ) con el propósito de conmutar de manera sincrónica para que la corriente fluya por el circuito inversor como se ilustra en la Figura 15.

En este tipo de convertidor, dos de sus transistores no se encuentran puestos a tierra requiriendo al igual que el inversor de medio puente un circuito de disparo que les proporcione una fuente de tensión flotante [30].

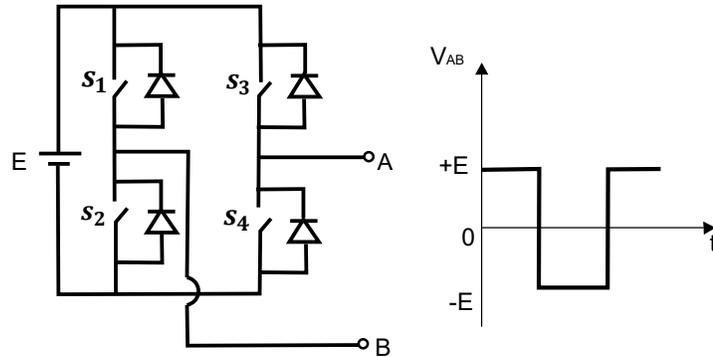


Figura 14. Inversor puente completo [30].

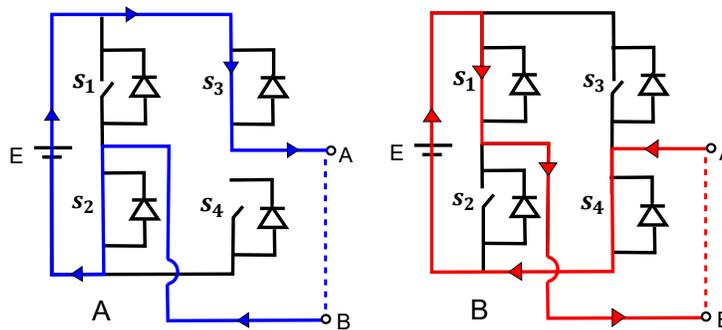


Figura 15. Funcionamiento inversor medio puente [30].

- **Circuito de disparo (Driver)**

El integrado IR2110 es un Driver de potencia de alta frecuencia y tensión, que permite controlar semiconductores de potencia como MOSFET e IGBT'S [32], este circuito integrado permite trabajar con fuentes de alimentación flotantes mediante un capacitor Bootstrap como se ilustra en la Figura 16. El integrado puede conmutar un máximo de dos transistores o una configuración de medio puente, por esta razón, es necesario utilizar dos

integrados IR2110 para la conmutación de un inversor de puente completo [33].

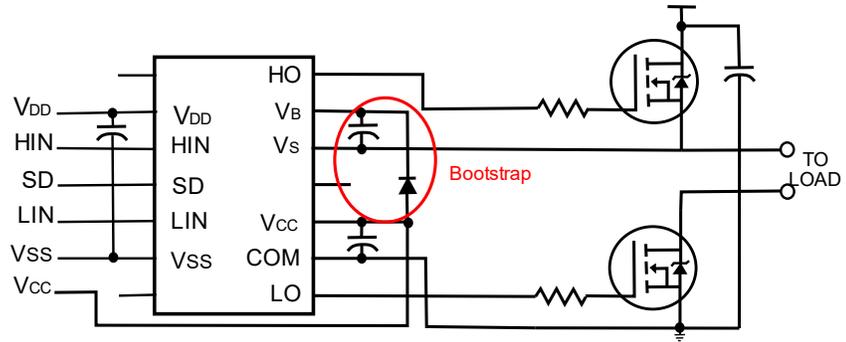


Figura 16. Circuito integrado IR2110 [32].

## 2. DISEÑO METODOLÓGICO

### 2.1. METODOLOGÍA

El modelo que se pone en marcha para la ejecución de este proyecto, se denomina ciclo de vida en cascada, el cual facilita la implementación, esta consta de cuatro fases. En la Figura 17 se muestra una representación gráfica de esta estrategia.

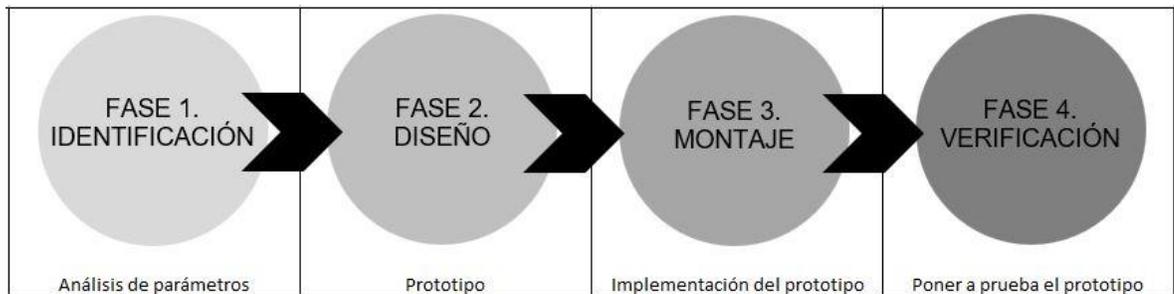


Figura 17. Representación gráfica de la puesta en marcha del proyecto. Elaboración propia.

Las actividades que se realizaron para la ejecución de este proyecto se describen a continuación:

1. Se llevó a cabo un análisis de las condiciones de los sistemas de calefacción por inducción y los parámetros de diseño de bobinas de inducción, mediante una revisión bibliográfica sobre el estado del arte y de las técnicas existentes a nivel regional, nacional e internacional. Además, se realizó una investigación de los tipos de alimentos que se exponen a procesos de pasteurización, a fin de identificar las propiedades térmicas y características requeridas para el desarrollo y la implementación del prototipo.
2. En cuanto al diseño del prototipo se tuvieron en cuenta las condiciones de los métodos de pasteurización existentes y el desarrollo de las pruebas para diseñar una planta piloto. En caso del circuito de potencia se hicieron pruebas experimentales en simulación con diferentes topologías, para así elegir el indicado de acuerdo con los parámetros de conmutación. Para la bobina de inducción se tuvo en cuenta el material en que se fabricó debido a que de esto depende la profundidad de penetración y por ende la frecuencia a la cual funcionará el circuito de potencia.
3. Implementación de la planta piloto con el circuito convertidor ZVS (DC/AC) y la bobina de inducción en donde se realizaron las pruebas experimentales calentando agua como muestra para llevar a cabo el proceso de pasteurización tipo VAT. Para la planta piloto se construye un intercambiador de calor de serpiente que estuvo sumergido en la muestra a pasteurizar.

4. Análisis y verificación de los resultados del comportamiento del sistema de inducción y el circuito convertidor, con el fin de comparar en conjunto el funcionamiento del prototipo propuesto en este proyecto con los métodos de calentamiento por inducción electromagnética y resistencia eléctrica. Mediante la recopilación, tablas de resultados y gráficas, anexando los resultados en un documento.

## **3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO A ESCALA DE PASTEURIZACIÓN BASADO EN CALEFACCIÓN POR INDUCCIÓN**

---

En este capítulo se describen los procesos realizados en el desarrollo de este proyecto, esto con el fin de conocer los rangos de operación de las variables como la temperatura (cantidad de energía) y el tiempo al que se debe someter un alimento para que cumpla con los estándares de pasteurización. Por otra parte, se dará a conocer el diseño de la planta con sus elementos electromecánicos y del circuito convertidor DC/AC y finalmente se mostrarán los resultados experimentales.

### **3.1. ANÁLISIS**

En el diseño de un sistema de pasteurización de alimentos se deben tener presente diferentes factores como el tiempo, la temperatura y las características térmicas tanto de los materiales empleados para la construcción del sistema como la de los alimentos a pasteurizar. Por esta razón en el presente proyecto se realiza un estudio de materiales, tiempos y normas para una pasteurización eficiente.

Los sistemas de pasteurización térmica tienen como propósito disminuir la presencia de agentes patógenos como bacterias, levaduras, protozoos, mohos y otros microorganismos que se puedan encontrar en los alimentos. Lo anterior se considera una esterilización parcial que se basa en la manipulación de la temperatura del alimento, alterando lo menos posible su estructura física y aprovechando al máximo la energía aplicada para dicha tarea; por esta razón es importante conocer en los procesos de pasteurización los mecanismos de transferencia de calor a los alimentos [34].

Por ejemplo, en la Figura 18 la línea punteada representa los valores recomendables de tiempo y temperatura para la pasteurización de la leche y de la misma manera los valores en los que la leche presenta una alteración en su estructura física, debido a exposiciones excesivas de tiempo y temperatura.

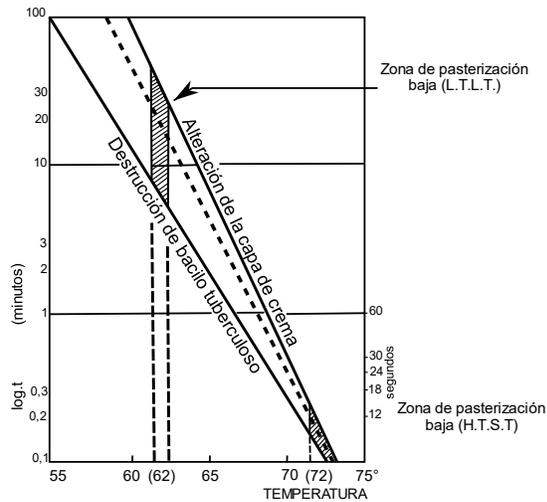


Figura 18. Diagrama de la pasteurización de la leche [35].

En la actualidad es importante que los distintos tipos de pasteurización térmica como la pasteurización tipo VAT, HTST y UHT sean rápidos, eficientes y amigables con el medio ambiente. En todos los procesos térmicos se busca minimizar las pérdidas de transferencia de calor con el fin de tener un proceso con un consumo de energía mínimo. Esto se logra mediante el estudio de las propiedades geométricas de los equipos y las características térmicas de sus materiales y de igual manera, las características térmicas de los alimentos a pasteurizar, obteniendo así tiempos de calentamiento y consumos de energía mínimos en los procesos de pasteurización.

### 3.1.1. Procesos de pasteurización.

En la industria se conocen tres procesos de pasteurización: el proceso VAT “batch” que tiene una relación temperatura tiempo de 65 °C 30’ utilizado en recipientes estancos, este método es utilizado por pequeños productores, el segundo método es el HTST (72 °C 15”) y por último el UHT (138 °C 1-3”, empleado por los grandes productores). En la Tabla 2 se pueden evidenciar las relaciones de temperatura y tiempo de los tres procesos de pasteurización antes mencionados.

Tabla 2. Relación de temperatura y tiempo de los procesos de pasteurización VAT, HTST y UHT [27].

Procesos	Temperatura (°C)	Tiempo
Pasteurización VAT	63	30 minutos
High temperature short time Pasteurization (HTST)	72	15 segundos
Higher-Heat Shorter Time (HHST)	89	1,0 segundos
Higher-Heat Shorter Time (HHST)	90	0,5 segundos
Higher-Heat Shorter Time (HHST)	94	0,1 segundos

Higher-Heat Shorter Time (HHST)	96	0,05 segundos
Higher-Heat Shorter Time (HHST)	100	0,01 segundos
Ultra Pasteurización (UP)	138°C	2,0 segundos

### 3.1.2. Propiedades térmicas.

Un factor para tener en cuenta en la pasteurización son las propiedades térmicas de los alimentos, debido a que esto afecta directamente el rendimiento final del sistema de calentamiento. Las propiedades térmicas para tener en cuenta son: la capacidad calorífica o calor específico, la conductividad y la inercia térmica [36][37].

El tiempo y la energía requerida para incrementar la temperatura de un alimento depende de su cantidad y del calor específico ( $C_p$ ) que se define como la energía calorífica necesaria para que una cierta masa, que inicialmente se encuentra a una temperatura inicial, aumente su temperatura [38]. Por esta razón, en Tabla 3 se muestra el valor de humedad y el calor específico de seis diferentes alimentos, antes y después de congelar para posteriormente realizar los cálculos de potencia requerida por el sistema.

Tabla 3. Características térmicas de seis diferentes alimentos [39].

<b>Alimento</b>	<b>Humedad</b>	<b>Calor esp. antes cong. kcal / kg / °C</b>	<b>Calor esp. después cong. kcal / kg / °C</b>
Limón	85/90	0.91	0.47
Mandarinas	90/95	0.92	0.49
Mango	85/90	0.85	0.44
Naranjas	85/90	0.90	0.46
Uvas	85/90	0.86	0.44
Leche fresca	85/90	0.93	0.49
Agua	100	1	

Los alimentos de la Tabla 3 presentan un calor específico similar al del agua, por esta razón se propone realizar pruebas con 2 litros de agua para facilidad del experimento.

De igual manera se debe conocer el calor específico de los materiales empleados para la fabricación de los equipos, porque si se utiliza un metal con una baja conductividad térmica se presentarían pérdidas considerables de energía y, por consiguiente, se necesitará más tiempo y energía para elevar la temperatura. En la Tabla 4 se puede apreciar el  $C_p$  de cinco metales diferentes, siendo el cobre el material con el valor de calor específico más bajo.

Tabla 4. Calor específico de los metales [40].

<b>Metal</b>	$\rho$ <i>kg / m<sup>3</sup></i>	$C_p$ <i>J / Kg* k</i>	$K$ <i>W / m* k</i>
Aluminio	2702	903	237
Cobre	8933	385	401
Hierro	7870	447	80.2
Bronce	8800	420	52
Acero	7850	434	60.5

### 3.1.3. Equipos de pasteurización.

En la actualidad se emplean principalmente dos procesos de pasteurización: el proceso discontinuo, cíclico o temple que se hace generalmente en contenedores con encamisados como se muestra en la Figura 19 y el procesamiento continuo que se muestra en la Figura 20 que son aquellos que emplean un recorrido en tuberías que consta de una entrada de vapor o agua caliente que elevan la temperatura de varios intercambiadores de calor que están en contacto con el alimento a pasteurizar, incrementando rápidamente su temperatura [41].

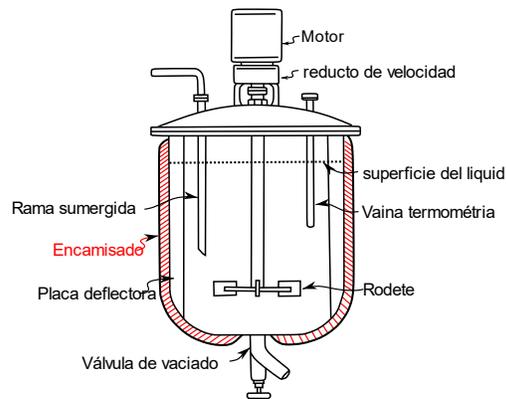


Figura 19. Reactor encamisado [41][41].

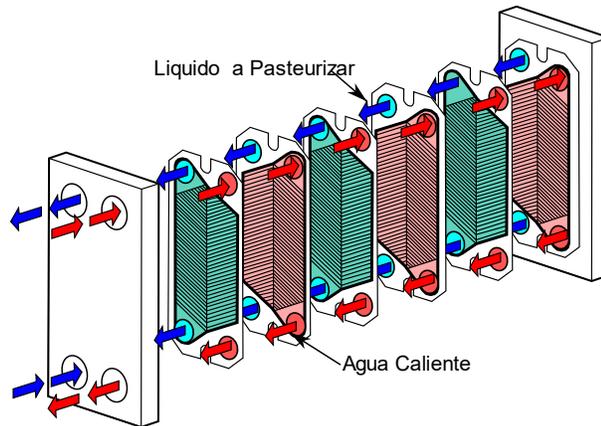


Figura 20. Procesamiento continuo [41] [41].

En los procesos discontinuos se emplean distintos métodos para elevar la temperatura de los alimentos. Algunos de estos métodos son:

- Doble pared, camiseta, marmita, enchaquetado
- De serpentín sumergido
- De inyección directa de vapor
- De resistencia eléctrica

Los métodos mencionados previamente son calentados generalmente por agua o vapor de agua que, al circular a altas temperaturas por las cavidades del sistema, calientan las superficies que están en contacto directo con el alimento, por esta razón el tipo de líquido empleado debe tener un  $CP$  lo más bajo posible.

En el mercado se encuentran líquidos con propiedades térmicas mejores que el agua, como es el caso del aceite mineral que posee un calor específico de  $1.68 J / kg^{\circ}C$ , siendo un excelente medio para transportar altas temperaturas.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, este proyecto implementa un proceso de pasteurización tipo VAT para una muestra de 2 litros calentados mediante la técnica de serpentín sumergido. Este proyecto se basa en la transferencia de energía calórica a través de tuberías alimentadas por aceite térmico recirculado por una bomba hidráulica. Cabe mencionar que teniendo en cuenta la temperatura promedio de trabajo del proceso de pasteurización VAT, tanto las tuberías como la bomba hidráulica o cualquier componente utilizado deben soportar temperaturas de hasta  $90^{\circ}C$ .

En los sistemas convencionales de pasteurización, se utiliza como fuente energía calorífica combustibles fósiles que emiten gases de efecto invernadero y pueden alterar la composición de los alimentos procesados. Para evitar esto, se aprovecha el circuito cerrado de tuberías para hacer uso del calentamiento por inducción

electromagnética, que calentará un tramo de tubería de material ferroso y a su vez dicho material transferirá la energía calórica generada al aceite térmico.

Para el diseño de un circuito de calentamiento por inducción, se debe tener presente la energía necesaria para calentar cada uno de los elementos, como la pieza de trabajo, el medio que transporta la energía calórica, el intercambiador de calor y la masa del alimento a pasteurizar. De igual manera, es necesario conocer las pérdidas de energía eléctrica y energía calórica, con el fin de dimensionar adecuadamente los componentes del circuito de potencia teniendo en cuenta los factores de seguridad y considerando los peores casos de funcionamiento [35]. A continuación, se describen las pérdidas que se relacionan con este proyecto:

- **Pérdidas eléctricas:** en los circuitos inversores las principales pérdidas eléctricas son por conmutación debido al apagado y encendido de los transistores, lo que conlleva a que sean superiores a las pérdidas de los otros componentes como diodos y resistencias que disipan pequeños valores de potencia.
- **Pérdidas de energía calórica:** en un sistema de calentamiento se pueden considerar tres principales pérdidas de energía calorífica. Primero, el calor disipado al aire por convección para el área en contacto con el producto, segundo, calor disipado por radiación por la superficie del recipiente y tercero, el calor disipado al aire por convección para el área que no esté en contacto con el producto dentro del recipiente, como tuberías, accesorios y componentes eléctricos [27].

En la Figura 21 se evidencian las diferentes pérdidas eléctricas y de energía calórica posibles en un sistema de calentamiento por inducción electromagnética.

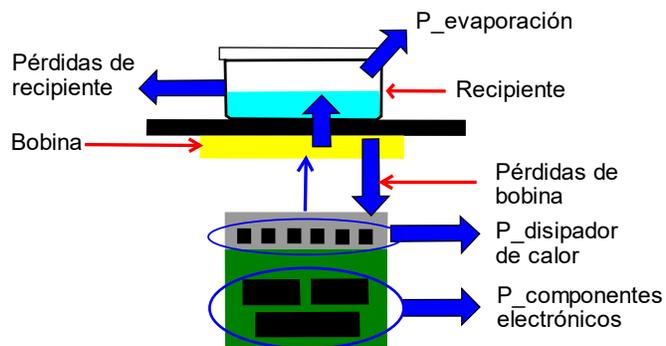


Figura 21. Pérdidas de energía en un sistema de calentamiento por inducción. Elaboración propia.

## 3.2. DISEÑO

El prototipo de pasteurización mediante calentamiento por inducción electromagnética propuesto para este proyecto se encuentra en la Figura 22, la cual enumera las tres diferentes etapas que lo componen.

La primera etapa está conformada por un inversor resonante DC/AC, que se comporta como una fuente de corriente de alta frecuencia, responsable de generar campos electromagnéticos mediante el elemento (G) que inducirá corrientes de Foucault en el tubo de acero galvanizado, produciendo de esta manera mediante efecto Joule la elevación de la temperatura del aceite. La segunda etapa está compuesta por el elemento (E) y (D) que se encargan de recircular el aceite por medio de un circuito cerrado de tuberías. Dicho aceite se comportará como medio para transportar la temperatura generada en el tubo hasta la tercera etapa, la cual está conformada por el objeto (H) que funcionará como radiador calentando todo alimento que este en el interior del objeto (B), que contará con una capacidad de almacenamiento de 2 litros de alimento líquido.

Uno de los accesorios más importantes del prototipo propuesto es el reservorio, el cual permite la medición del nivel de aceite en el sistema y de igual manera, permite la liberación de la presión generada por la expansión del aceite en el interior de las tuberías como efecto del incremento de su temperatura.

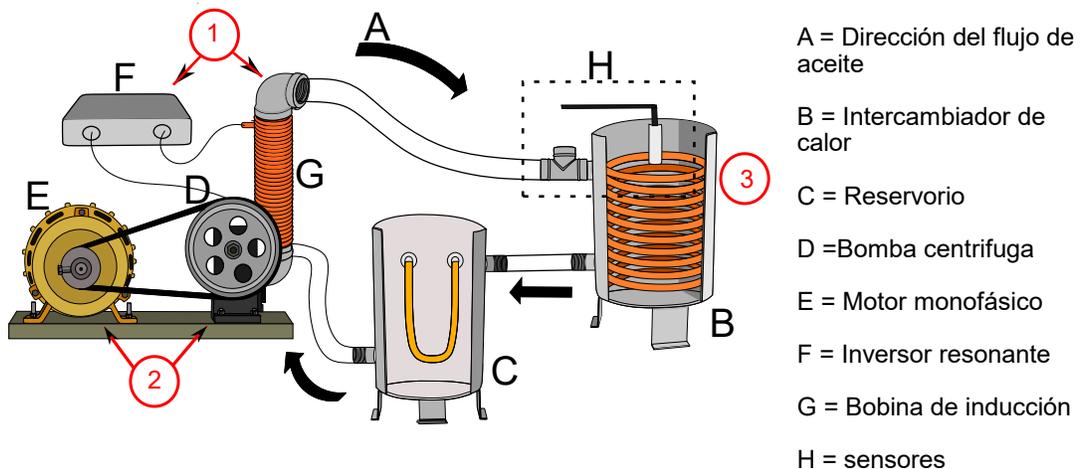


Figura 22. Prototipo de calefacción por inducción. Elaboración propia.

### 3.2.1. CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA.

Para el diseño de un sistema de calentamiento es indispensable calcular la energía necesaria para calentar las distintas partes del sistema, como las tuberías de

recirculación, recipientes, aceite y agua. de la misma forma se deben conocer las pérdidas de energía que puedan presentar dichos objetos.

El cálculo de la energía requerida para calentar una masa se realiza con la Ecuación (2).

$$Q = mc(T_f - T_{in}) \quad (2)$$

Donde:

$Q_c$  = energía total necesaria en kWh

$m$  = masa

$c$  = calor específico

$T_f$  = temperatura final

$T_{in}$  = temperatura inicial

En la Tabla 5 se muestra el valor de energía necesaria para calentar cada uno de los elementos involucrados en el prototipo de pasteurización propuesto.

Tabla 5. Energía requerida por los elementos del prototipo. Elaboración propia.

Elemento	Masa (kg)	$T_{in}$ (°C)	$T_f$ (°C)	Energía (kWh)
Agua	2	23	60	0.085
Aceite	0.810	23	60	0.020
Tubo de acero	0.297	23	60	0.0033
Intercambiador de calor	0.413	23	60	0.00163
Recipiente de almacenamiento	1.578	23	60	0.0059
Reservorio	1.152	23	60	0.0089
T	0.211	23	60	0.001
codos	0.218	23	60	0.001
Bomba	0.500	23	60	0.0045
Total				0.131

### Cálculo de las pérdidas por superficie.

Las pérdidas de energía por superficie son una variable importante en el cálculo de la energía requerida en un sistema de calefacción, debido a que de este valor depende en gran medida el rendimiento del sistema. Este tipo de pérdidas se presentan principalmente por radiación y convección. La Ecuación (3) permite realizar dicho cálculo.

$$Q_{LC} = \left( 2\pi hr \left( cpc (T_f - T_{in}) \right) \right) \quad (3)$$

Donde:

$Q_{LC}$  = pérdidas del acero

$h$  = altura

$r$  = radio

$cpc$  = coeficientes de pérdidas del acero

En la Tabla 6 se representan las dimensiones y las pérdidas por superficie de los componentes que se encuentran en el prototipo.

Tabla 6. Pérdidas por superficie. Elaboración propia.

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	$T_{in}$ (°C)	$T_f$ (°C)	$C_p$	Energía kWh
Recipiente de almacenamiento	0.116	23	60	0.0064	0.027
Reservorio	0.100	23	60	0.0064	0.023
Tubo de acero	0.009	23	60	0.0064	0.002
Total					0.052

### Energía total requerida

Para conocer la energía total requerida se deben tener presente las pérdidas, la energía necesaria para calentar cada una de las partes del sistema y el tiempo que tardará el sistema en alcanzar la temperatura de referencia, este tiempo se le conoce como tiempo de arranque. Con ayuda de la Ecuación (4) se obtiene la energía total necesaria en el sistema de pasteurización.

$$Q_s = \left( \frac{Q_a + Q_c}{t} + \frac{Q_{LS}}{2} \right) * 1 + sf \quad (4)$$

Donde:

$Q_s$  = Energía total necesaria en kWh

$Q_a$  = kWh necesarios para elevar la temperatura del agua

$Q_c$  = kWh necesarios para elevar la temperatura del tanque de acero

$sf$  = Factor de protección

$t$  = Duración del arranque en horas

La potencia necesaria para elevar la temperatura de 2 L de agua a 60° C mediante el prototipo propuesto es de 0.128 kW.

### 3.2.2. CÁLCULO DE LA RELACIÓN DE POLEAS DEL MOTOR Y LA BOMBA.

Como se explicó en la Figura 22, es necesario utilizar una bomba centrífuga y un motor para recircular el aceite por el circuito cerrado de tuberías. Para ello es necesario calcular las dimensiones de las poleas con el fin de controlar la velocidad de la bomba, debido a que, si las revoluciones son muy altas se elevaría la presión en el circuito de tuberías afectando la integridad del sistema mecánico.

Debido a que se cuenta con un motor monofásico de 2000 RPM nominal se partirá de este valor para realizar los cálculos de la relación de las poleas para una velocidad lineal de 500 RPM en la bomba. Este motor incluye en el eje una polea de 11 cm de diámetro. Teniendo la velocidad lineal nominal del motor y el diámetro de esta polea, se procede a realizar el cálculo de la polea conducida, con la Ecuación (5).

$$D_{conducida} = \frac{D_{motriz}}{V_g} * V_m \quad (5)$$

Donde:

$D_{conducida}$  = Diámetro de polea conducida

$D_{motriz}$  = Diámetro de la polea motriz

$V_g$  = Velocidad de giro de la polea conducida

$V_m$  = Velocidad lineal del motor (RPM)

Según el resultado arrojado por la Ecuación (5) el diámetro de la polea conducida debe ser de 41 cm de diámetro para reducir la velocidad angular del motor a 500 RPM, velocidad lineal que se transferirá a la bomba mediante la polea calculada.

Para transferir el movimiento de la polea motriz a la polea conducida es necesario utilizar una correa. Esta correa debe ser exacta con el fin de generar la mayor fricción posible entre la correa y las poleas. Con la ayuda de la Ecuación (6) se puede calcular el tamaño de la correa para la relación de las poleas previamente calculadas, con base en la Figura 23.

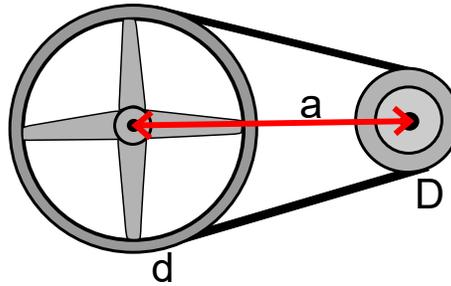


Figura 23. Representación entre los diámetros y distancia entre las poleas. Elaboración propia.

$$L_c = 2a + \frac{\pi}{2}(D+d) + \frac{(D-d)^2}{4a} \quad (6)$$

Donde:

$L_c$  = longitud de la correa

$a$  = distancia entre centros, 29 cm.

$d$  = diámetro polea menor, 11 cm.

$D$  = diámetro polea mayor, 41 cm.

Reemplazando los valores en la Ecuación (6), la longitud de la correa es de 147.4 cm y, teniendo en cuenta la tabla de medidas de correas trapezoidales [42] de “perfil A” es una correa N° 56.

### 3.2.6.2. Sistema de calentamiento por inducción.

Los convertidores utilizados en los sistemas de calentamiento por inducción alimentados por tensión están conformados por semiconductores que requieren ser bidireccionales en corriente y unidireccionales en tensión. En la actualidad se utilizan transistores de efecto de campo (MOSFET) de potencia y transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT). Los MOSFET se utilizan en aplicaciones con frecuencias de operación de hasta 150 kHz a bajas potencias y los IGBT cuentan con una capacidad de conmutación de 100 kHz a mediana potencia [41].

Debido a las altas exigencias de operación manejadas en los sistemas de calentamiento por inducción, se deben tener en cuenta los procesos de conmutación, manejo de potencia y tiempos de respuesta de los componentes, con la finalidad de minimizar pérdidas de energía, daños en los componentes y garantizar el correcto funcionamiento del sistema [41].

Por esta razón, para el circuito convertidor DC/AC se implementó un convertidor resonante por conmutación de voltaje cero (ZVS) (Figura 24) debido a que trabaja

con conmutación suave, permitiendo de esta manera disminuir las pérdidas por conmutación y limitaciones de la frecuencia por conmutación en los circuitos [43].

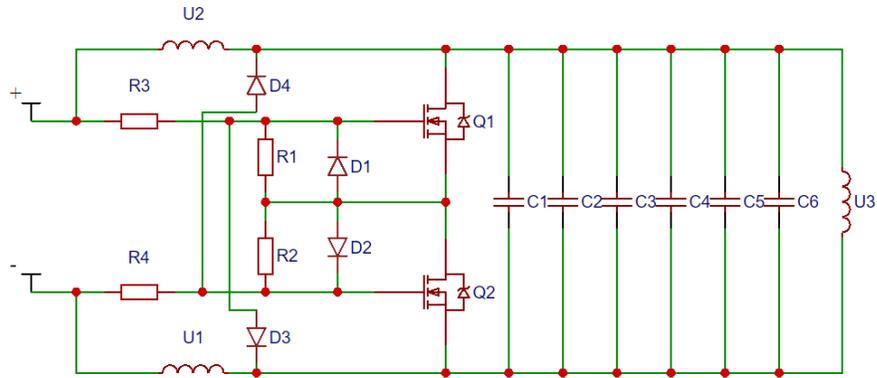


Figura 24. Topología circuito inversor ZVS. Elaboración propia.

### Funcionamiento.

Los circuitos inversores resonantes de conmutación suave ZVS se caracterizan por las bajas pérdidas por conmutación en los transistores, esto se debe a su conmutación en cero voltios que evita la intersección de la corriente y la tensión, caso opuesto a lo que sucede con los convertidores de conmutación dura. En la Figura 25 (a) se muestran las formas de onda de corriente y tensión en un convertidor de potencia con conmutación forzada, se puede observar que la tensión y la corriente se interceptan presentando en este punto pérdidas considerables de potencia. La Figura 25 (b) ilustra las formas de onda de tensión y corriente en un convertidor con conmutación suave, aquí se puede observar que la conmutación al bloqueo se alcanza manteniendo tensión nula, evitando el cruce de la tensión y la corriente. De esta manera las pérdidas por conmutación se disminuyen considerablemente.

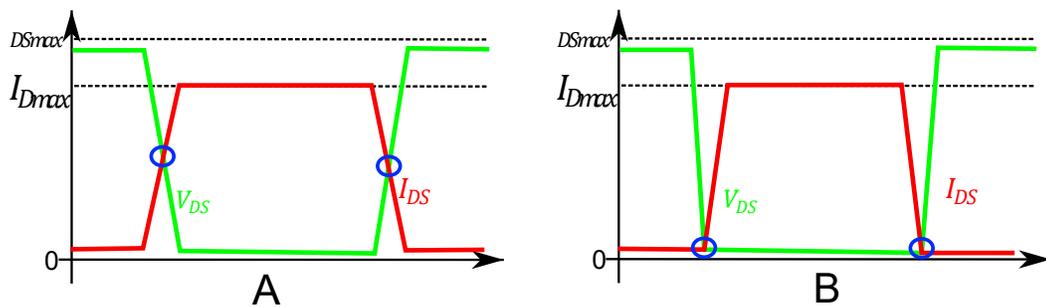


Figura 25. (a) Representación funcionamiento de conmutación dura y (b) conmutación suave. Elaboración propia.

### 3.2.3. PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN.

La profundidad de penetración en este caso fue tomada como el espesor del tubo a calentar, cuya medida es de 0.27 cm. En la Tabla 7 se encuentran las características del tubo a calentar.

Tabla 7. Propiedades de la pieza a calentar.

<b>Propiedades de la pieza a calentar</b>	
Longitud	25 cm
Material	Acero
Resistividad del material $\rho$	$20^{-8} (\Omega m)$
Permeabilidad magnética $\mu_r$	$0.7 (H/m)$
Espesor	2.7 mm

### 3.2.4. CÁLCULO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA.

Como se mencionó en la sección 1.2 la profundidad de penetración de las corrientes parásitas en el material depende de la frecuencia de resonancia. Al conocer la profundidad de penetración requerida se utiliza la Ecuación (7) para hallar la frecuencia de resonancia necesaria para una profundidad de penetración de 2.7 mm.

$$f = \frac{\rho}{\pi\mu_0\mu_r\delta^2} \quad (7)$$

Donde:

$f$  = frecuencia de resonancia

$\rho$  = resistividad eléctrica del material

$\mu_0$  = permeabilidad magnética del vacío  $4\pi * 10^{-7}$

$\mu_r$  = permeabilidad magnética relativa del material

$\delta$  = profundidad de penetración

De acuerdo con la Ecuación (7) la frecuencia de resonancia necesaria para una profundidad de penetración de 2.7 mm es de 10 kHz.

### Bobina de inducción.

La bobina de inducción es la parte primordial del sistema, se debe tener en cuenta su geometría y el valor de la inductancia con el fin de determinar la frecuencia de resonancia a la cual funciona el circuito convertidor.

En relación con lo expuesto anteriormente y teniendo en cuenta el cálculo de la profundidad de penetración, se decide realizar el diseño de la bobina sobre un tubo galvanizado de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y 25 cm de longitud. Para aislar eléctricamente el tubo y el alambre de la bobina, se utilizó teflón 100% PTFE con densidad de  $0.30 \text{ g/cm}^3$ . La Figura 26 representa a) el tubo galvanizado, b) el aislamiento eléctrico y c) bobina de inducción. Los codos galvanizados que se ven en la figura se utilizan para realizar los acoples con las tuberías.

La bobina de inducción que se muestra en la Figura 26 (c), está fabricada con alambre de cobre esmaltado calibre 17 con capacidad de corriente de 4,1 A y consta de una bobina de 200 vueltas.

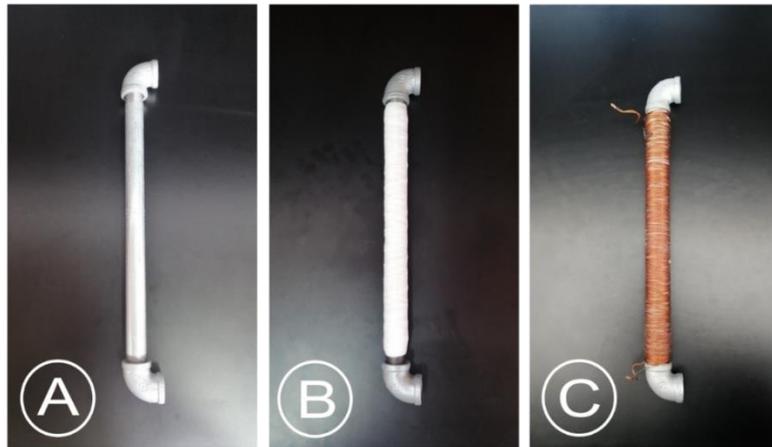


Figura 26. a) Tubo galvanizado, b) aislante eléctrico y c) bobina de inducción. Elaboración propia.

El bobinado que genera la inducción electromagnética envuelve la tubería galvanizada de  $\frac{1}{2}$ " en la que circula el aceite, de este modo al inducir una temperatura a este tramo de tubería, el aceite que circula por su interior se verá sometido a altas temperaturas.

La Figura 27, muestra el sentido por el que circulará el aceite mineral.

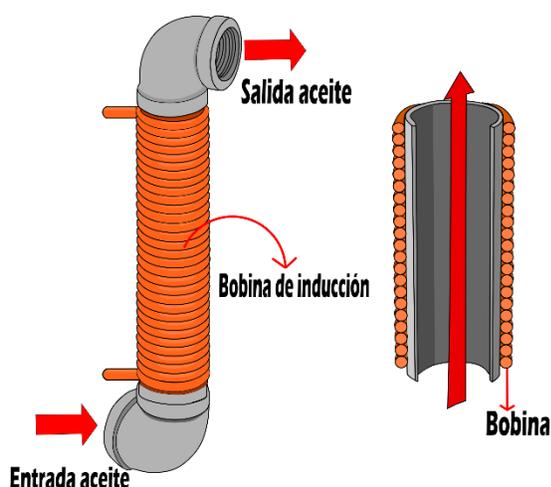


Figura 27. Bobina de inducción. Elaboración propia.

En la Tabla 8 se resumen las características de la bobina de inducción.

Tabla 8. Características de la bobina de inducción. Elaboración propia.

Variable	Valor
Longitud de la bobina	25 cm
# espiras	200
Inductancia	370 $\mu$ H
Resistencia eléctrica de la bobina	0.5 $\Omega$

### Cálculo de la capacitancia del circuito tanque

Como se mencionó en la sección 1.3, los inversores resonantes requieren de un circuito resonante compuesto por lo menos de una bobina y uno o varios capacitores en paralelo. Al diseñar la bobina de inducción mediante las especificaciones del tubo a calentar se obtuvo un inductor con las características descritas en la Tabla 8. Teniendo dicho valor de inductancia, resistencia eléctrica y frecuencia de resonancia, se calcula la capacitancia requerida en el circuito resonante mediante la Ecuación (8).

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 l} \quad (8)$$

La capacitancia necesaria para un circuito resonante con inductancia de 370  $\mu$ H y frecuencia de operación de 10 kHz es de 1.3  $\mu$ F.

### Selección de sensores.

Las magnitudes que se desean monitorear en el sistema implementado son la temperatura y el tiempo que requiere el sistema de inducción para elevar la

temperatura de las muestras a pasteurizar. Para llevar a cabo dicha medición de magnitudes se utiliza un conjunto de sensores que permiten realizar esta medición. La variación de las magnitudes se puede observar mediante la comparación del tiempo y la temperatura con la ayuda de la interfaz gráfica de Matlab usando un microcontrolador ATMEGA328P.

- **Sensor térmico.**

En el presente proyecto fue necesario medir la temperatura de dos distintas sustancias (agua y aceite), por esta razón se utilizan dos sensores con el fin de realizar las mediciones simultáneamente. El sensor de temperatura seleccionado para estas mediciones fue la termocupla tipo K debido a su pequeño encapsulado de acero inoxidable resistente a ambientes hostiles y corrosivos, como lo son las sustancias por medir.

En este proyecto la resistencia y el tamaño del encapsulado de los sensores es de suma importancia, debido a que la termocupla que medirá la temperatura del aceite estará sometida a alta presión, un caudal constante y un espacio reducido como se muestra en la Figura 28. La segunda termocupla estará sumergida en el alimento a pasteurizar el cual puede ser corrosivo como en el caso de los cítricos debido a su alta acidez.

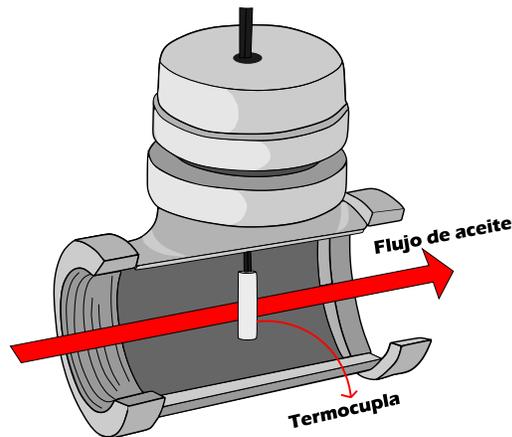


Figura 28. Ubicación de la termocupla tipo K. Elaboración propia.

En la Tabla 9 se muestran las características de la termocupla tipo K.

Tabla 9. Características de la termocupla tipo K [44].

<b>Datos de fabricante de termocupla tipo K</b>	
Longitud de sonda	Termocupla de tornillo (sonda 3mm)
Diámetro de la sonda	4.5mm
Rango de medición	0 a 400°C

Material de fabricación	cable +: Aleación Nickel/Cromo cable -: Aleación Nickel/Aluminio
Aislamiento interno	Fibra de vidrio
Aislamiento externo	Blindaje metálico
Precisión de medición	0.7°C aproximadamente

### Diseño PCB del circuito inductor resonante

Para diseñar la placa de inducción se utilizó la herramienta EasyEDA, en la cual se realizaron los puntos de conexión y la distribución de los dispositivos que componen el convertidor ZVS para luego imprimir sobre una baquelita. El diseño de la placa de inducción se puede apreciar en la Figura 29, las líneas más gruesas de conexión son de 10 mm debido a las altas corrientes que se manejan, asimismo, se tuvieron en cuenta todos los requisitos que deben cumplir los circuitos impresos.

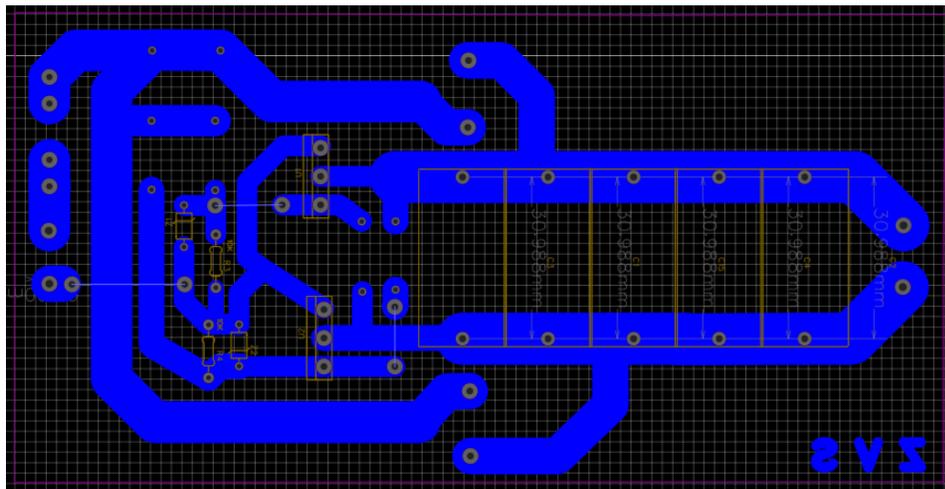


Figura 29. Diseño de la placa de inducción PCB. Elaboración propia.

### Cálculo del disipador de calor.

Es el encargado de la evacuación de calor desde un componente con temperatura elevada hacia un medio con temperatura menor. El tipo de material empleados en los disipadores de calor son cobre o aleaciones en aluminio y para las uniones se estima utilizar materiales de baja resistencia térmica, con el fin de que no se comprometan las propiedades del componente debido a la diferencia de coeficientes de expansión térmica [45].

Para llevar a cabo el cálculo del disipador de calor requerido en el circuito convertidor DC/AC se tuvo en cuenta el circuito térmico de la Figura 30 y la hoja de datos de los MOSFET IRFP250N [46].

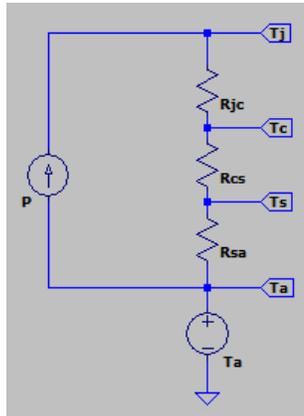


Figura 30. Circuito térmico equivalente. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la potencia que disipa el transistor en la simulación es de 1.2 W, se procede a hacer el análisis del disipador de calor. Como primera medida se realiza el análisis sin disipador y, se calcula la temperatura del chip  $R_{\theta JA} * P = 40 * 1.2 = 48^{\circ}C$ , si se deja el MOSFET sin disipador se pone en riesgo la integridad del semiconductor. Por esta razón, se procede a hacer el cálculo del disipador que corresponde con la Ecuación (9).

$$T_J = (R_{\theta JC} + R_{\theta CH} + R_{\theta HA}) * P + T_A \quad (9)$$

Teniendo la hoja de datos del MOSFET  $R_{\theta JC} = 0.7^{\circ}C/W$  y  $T_J = 120^{\circ}C$  y la temperatura ambiente  $T_A = 25^{\circ}C$ .

$R_{\theta CH}$  en la práctica se toma entre 0.5 y 3, por lo tanto  $R_{\theta CH} = 2^{\circ}C/W$ .

Se debe encontrar el valor de  $R_{\theta HA}$  con la Ecuación (10) y, por último, reemplazar los valores en la Ecuación (9).

$$R_{\theta HA} = \frac{\frac{T_J - T_A}{P} - R_{\theta JC} - R_{\theta CH}}{1.3} = 58.82 \quad (10)$$

$$T_J = 98.8^{\circ}C$$

Para mejorar la condición de temperatura de los MOSFET's se agrega un ventilador. El ventilador y el disipador de calor formarán la etapa de refrigeración de los transistores MOSFET y de los demás componentes, debido a la conmutación y al tiempo en que estará en funcionamiento el circuito convertidor ZVS.

### 3.3. IMPLEMENTACIÓN

En esta sección se muestran las señales obtenidas en la simulación del circuito ZVS, de igual forma se muestra el montaje eléctrico y mecánico del prototipo.

#### 3.3.1. Simulación ZVS.

Teniendo en cuenta la Figura 24, se procede a hacer la implementación del circuito inversor ZVS (Figura 31) mediante simulación. Para dicha tarea se hace uso del software de simulación LTSPICE XVII [47] a fin de comprobar su funcionamiento y posteriormente llevar a cabo la implementación en físico.

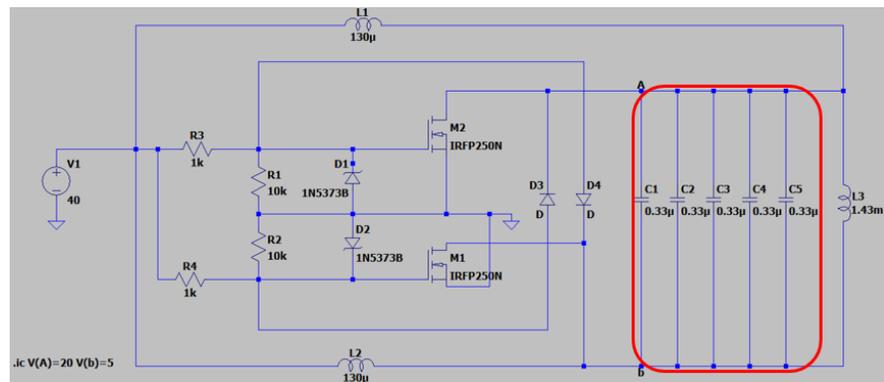


Figura 31. Circuito convertidor ZVS. Elaboración propia.

En la Figura 32 se puede ver la correcta conmutación de los dos transistores.

Se puede observar que mientras el transistor de la señal roja este encendido el otro este apagado operando de manera sincrónica evitando de esta manera el encendido simultáneo de los transistores.

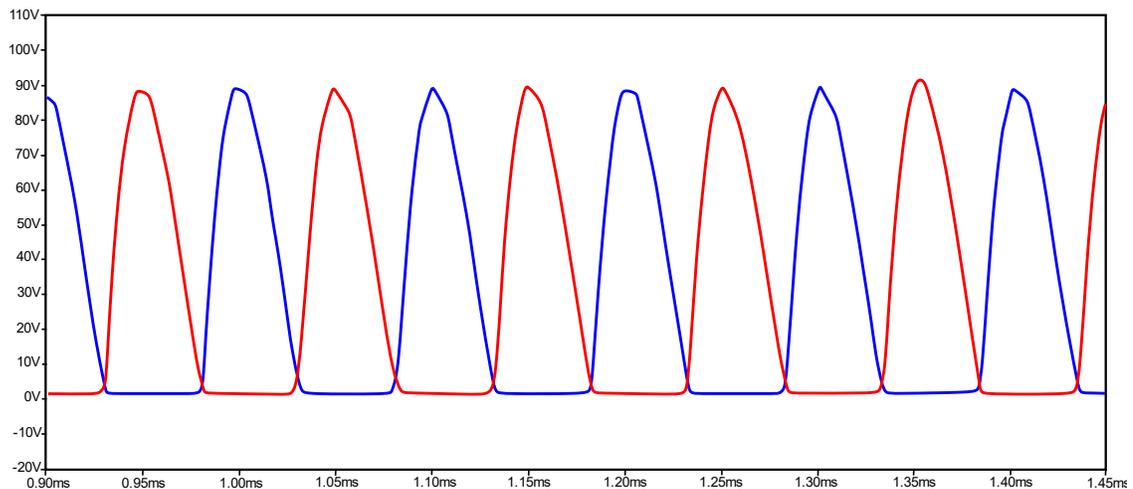


Figura 32. Conmutación de los MOSFET Q1 y Q2. Elaboración propia.

En la Figura 33 se puede ver la frecuencia de conmutación de los transistores la cual es de 9.66 kHz, una frecuencia muy cercana al valor calculado para una profundidad de penetración de 2.7 mm.

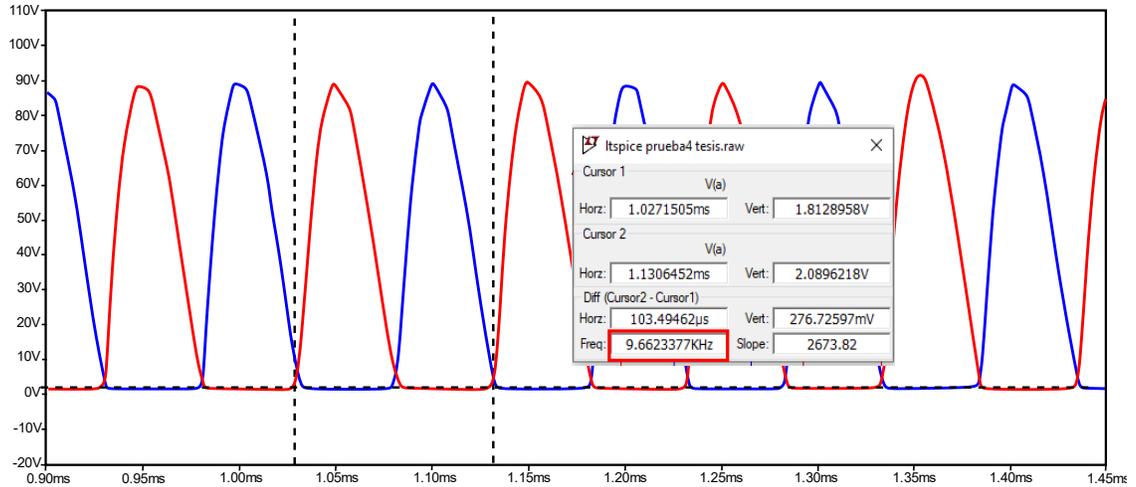


Figura 33. Frecuencia de conmutación de los MOSFET. Elaboración propia.

En la Figura 34 se puede evidenciar el principio del inversor resonante ZVS mencionado en la Figura 31. Se observa que mientras el transistor está en cero voltios la corriente de este crece a su pico máximo hasta el siguiente ciclo de trabajo del transistor.

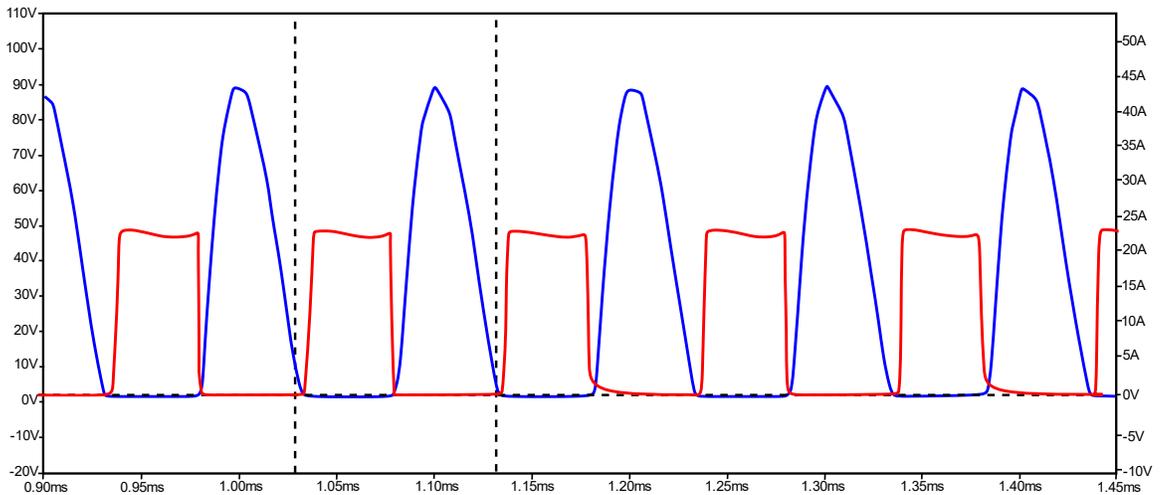


Figura 34. Formas de onda de tensión y corriente en la carga. Elaboración propia.

En la Figura 35 se muestran los valores de corriente y tensión en la salida del inversor, se puede observar que tanto la corriente como la tensión presentan un comportamiento sinusoidal y un desfase de  $90^\circ$  entre las señales, esto debido a la

bobina de inducción que se encuentra sometida a una corriente alterna generando así un atraso de la corriente con respecto a la tensión.

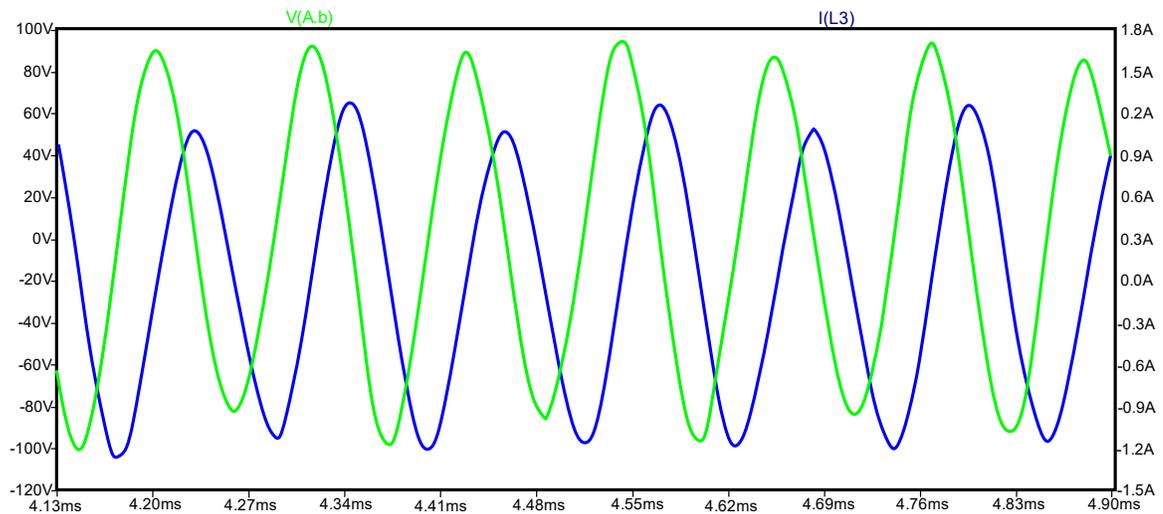


Figura 35. Formas de onda de tensión y corriente en la salida del inversor. Elaboración propia.

### 3.3.2. Montaje.

En la Figura 36, se observa el montaje del circuito convertidor ZVS con todos los componentes de simulación de la Figura 24, en la Figura 37 se aprecia la placa del sistema de calefacción por inducción con el acople de la carga o bobina de inducción.

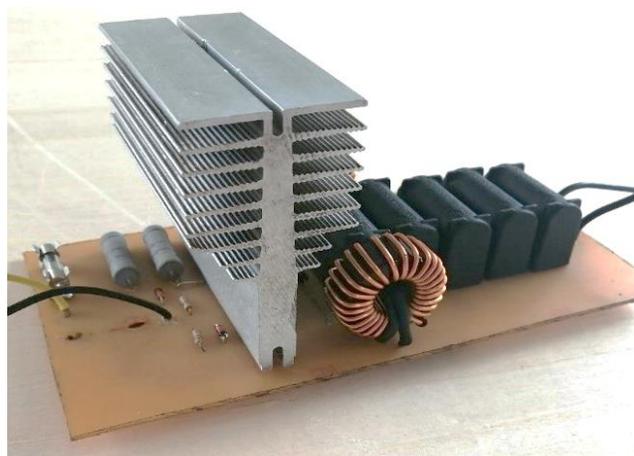


Figura 36. Placa del circuito convertidor ZVS. Elaboración propia.



Figura 37. Placa del sistema de calentamiento por inducción. Elaboración propia.

A continuación, se describen de manera breve los componentes que conforman el circuito convertidor ZVS.

- **Fuente de alimentación DC BK PRECISION 1761.** Para suministrar la energía que requiere el circuito inversor resonante se utiliza una fuente de alimentación DC regulable que suministra 350 W. Para cumplir con los requerimientos de corriente que requiere el circuito se utilizan dos fuentes conectadas en paralelo, con el fin de proporcionar una tensión de salida de 30 V a una corriente pico de 9 A.
- **MOSFET IRFP250N.** Estimando que el circuito resonante tendrá una frecuencia aproximada de 10 kHz se requieren de transistores con la capacidad de conmutar a dicha frecuencia, para ello se utilizan transistores MOSFET de la referencia IRFP250N que conmutan a la frecuencia establecida anteriormente.
- **Diodo FR207.** Es un diodo de potencia con un tiempo de recuperación de 500 ns, una capacidad de sobre corriente máxima de 70 A y una oposición de tensión inversa de 1000 V. Presenta una baja caída de tensión.
- **Diodo Zener 1N4742A.** Este diodo posee características de inversión aguda y bajo nivel de corriente inversa. Tiene una tensión de 12 V y una capacidad de disipación de potencia de 1 W.
- **Bobina toroidal.** En los circuitos inversores resonantes es muy importante suprimir los picos de corriente generados por la conmutación de los transistores, para ello se requieren dos bobinas toroidales conectadas en serie con la fuente de alimentación DC, con el fin de filtrar los picos de corriente y así evitar la ruptura de los componentes. Considerando que el circuito se verá sometido a una corriente de hasta 8 A se utilizan inductores con capacidad de soportar hasta 10 A de corriente.
- **Capacitor MKPH 0.33  $\mu$ F.** Es un capacitor utilizado en circuitos de alta tensión y frecuencia. Presenta bajas pérdidas y una buena resistencia de

aislamiento. Este capacitor soporta frecuencias de hasta 50 kHz y tensión nominal de 600 V.

### 3.3.3. ENSAMBLE DE LA PARTE MECÁNICA DEL PROTOTIPO.

Como se observa en la Figura 22 es necesario utilizar un mecanismo que se encargue de recircular el aceite por el circuito cerrado de tuberías. Para ello se utilizó la bomba centrífuga de aceite modelo NPR 4BD1 (Figura 38), elemento (D) de la Figura 22, a la cual se le hicieron adaptaciones de estructura tales como el aumento del diámetro de la rosca en su entrada y salida con el fin de acoplar tuberías de  $\frac{1}{2}$ ".

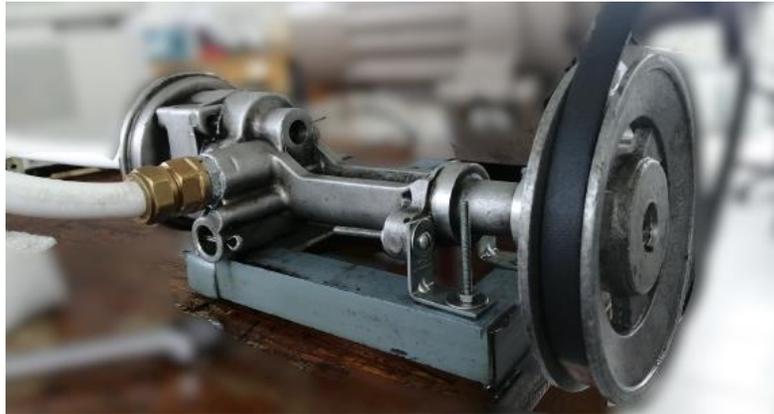


Figura 38. Bomba centrífuga de aceite NPR. Elaboración propia.

Para acoplar la polea adquirida con el eje de la bomba centrífuga se realizó un diseño en 3D de un acople por cuñero, debido a que las dimensiones del eje de la polea son mucho mayores que las del eje de la bomba. En la Figura 39 se puede observar el diseño, impresión y ensamble de este acople.



Figura 39. Diseño, impresión y ensamble del acople para la polea conducida. Elaboración propia.

En la Figura 40 se muestra el ensamble del motor, la bomba y las poleas con su respectiva correa.



Figura 40. Ensamble de poleas y correa en el motor monofásico y bomba. Elaboración propia.

En la Figura 41 se muestra el intercambiador de calor de serpentín que se construyó para el ensamble de la etapa 3 del prototipo de pasteurización propuesto. Este serpentín fue construido con tubo y codos de cobre de 3/8", debido a que este material transfiere el calor de manera uniforme hasta cinco veces mejor que el acero inoxidable y es muy utilizado en la fabricación de ollas y cocción de alimentos [48]. Para realizar el acople del tubo de cobre con los codos y con el recipiente (Figura 41) se utilizó soldadura en frío.

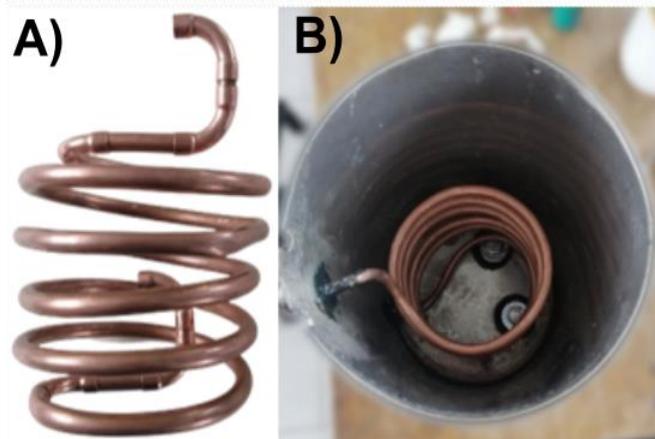


Figura 41. A) Intercambiador de calor de serpentín, b) vista superior del recipiente de almacenamiento. Elaboración propia.

### **Tuberías.**

Las tuberías por las cuales se recircula el aceite son de polipropileno aleatorio (Figura 42) marca DN16. Soportan temperaturas sostenidas de 70 °C y temperaturas transitorias máximas de 95 °C. Son resistentes a la corrosión y a altas presiones debido a que las paredes interiores son lisas y por ello existen menores pérdidas por presión [49].



Figura 42. Tubería DN16 [49].

En la Figura 43 se muestra el montaje final del prototipo de pasteurización de alimentos líquidos basado en calefacción por inducción.



Figura 43. Prototipo de calefacción por inducción para pasteurización. Elaboración propia.

### 3.4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y/O DESEMPEÑO

En este capítulo se mostrará el funcionamiento y el desempeño del circuito convertidor ZVS y los resultados de las pruebas que se realizaron con los sistemas de calentamiento por inducción electromagnética. La eficiencia del sistema será comparada con la eficiencia de un sistema de calentamiento por resistencia eléctrica.

#### 3.4.1. Pruebas de funcionamiento del circuito convertidor ZVS.

El circuito ZVS implementado, arrojó las señales de tensión y corriente esperadas. En la Figura 44 señal C, se puede apreciar la señal de salida del circuito inversor, esta señal presenta un comportamiento sinusoidal que cumple con las expectativas de diseño. Esta señal cuenta con una amplitud de 71.6 V RMS como se puede observar en el recuadro color violeta a la derecha de la Figura 44. La señal D, corresponde a la corriente en la salida del inversor resonante. Esta señal presenta un comportamiento sinusoidal con una corriente de 3.03 A RMS como se evidencia en el recuadro amarillo.

La señal A y B de la Figura 44 representan las conmutaciones de los transistores que operan a una frecuencia de 11.02 kHz valor que se observa en el recuadro rojo a la derecha de la imagen. Por ende, la señal de salida tanto de la corriente como la de tensión presentan una frecuencia de 11.02 kHz, valor muy similar a la frecuencia calculada para una profundidad de penetración 2.7 mm en el tubo a calentar.

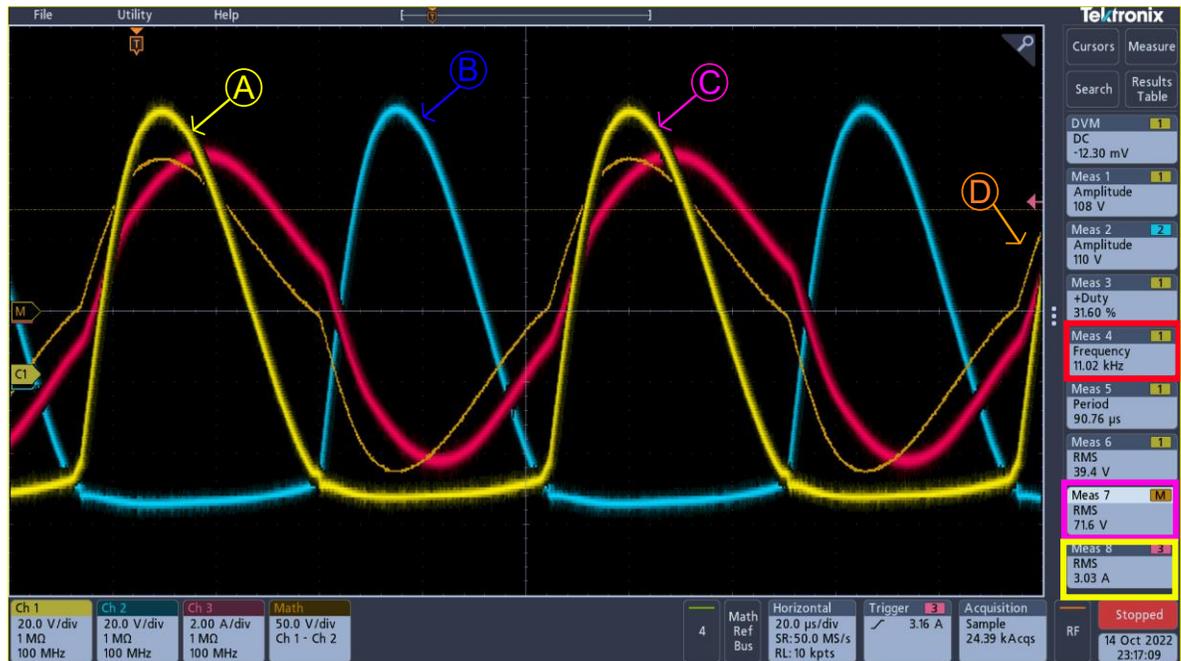


Figura 44. Formas de onda de tensión y corriente del convertidor ZVS implementado. Elaboración propia.

Con los valores de salida de corriente RMS y tensión RMS se puede calcular que el circuito inversor resonante entrega a la carga una potencia de 216 W.

### 3.4.2. Desempeño de las pruebas de calentamiento.

En cuanto a las pruebas de calentamiento realizados con los métodos de inducción electromagnética y resistencia eléctrica se establecieron algunos parámetros, el primero es el líquido a pasteurizar, que se propone en este proyecto utilizar 2 litros de agua como muestra. El siguiente parámetro es la temperatura y tiempo inicial en que se van a empezar las pruebas de medición, los cuales son 22 °C y 0", respectivamente. Estos parámetros se establecieron con el fin de prevalecer las mismas condiciones entre las distintas pruebas. No se establece un tiempo final debido a que cada uno de los sistemas de calentamiento tomaron tiempos diferentes, esto como consecuencia del diseño de la planta.

Además, se realizaron cuatro pruebas diferentes por cada sistema de calentamiento con el fin de realizar un promedio de estas mediciones y así obtener una medida de tendencia central entre cada una.

### 3.4.2.1. Desempeño sistema de calentamiento por inducción electromagnética.

En la Figura 45 se puede observar la gráfica de los datos obtenidos en la medición de la temperatura del recipiente de almacenamiento. En esta gráfica se puede evidenciar que la prueba se realizó en un periodo de tiempo de 79" y alcanzando una temperatura final de 60 °C en el agua y una temperatura 63°C en el aceite.

El comportamiento de la gráfica de la Figura 45 indica que la temperatura en el interior del recipiente (línea de color azul) habría podido seguir aumentando, debido a que aún no se ha estabilizado en este periodo de tiempo.

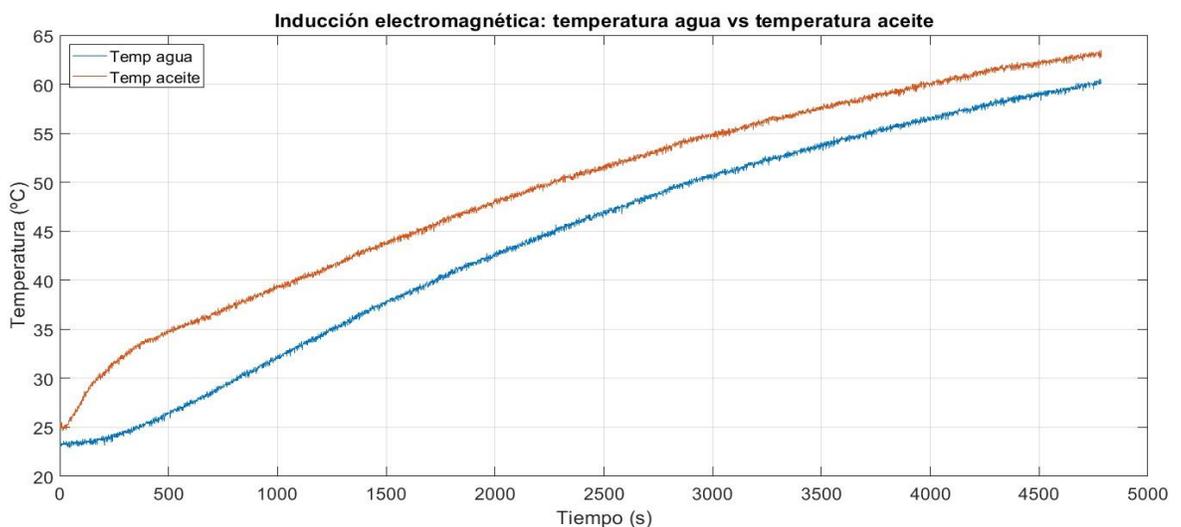


Figura 45. Resultados temperatura agua y aceite, inducción electromagnética. Elaboración propia.

Los datos de la Figura 45 fueron tomados con el recipiente de almacenamiento aislado térmicamente como se muestra en la Figura 47, esto se hizo con el fin de aumentar la temperatura en un menor periodo de tiempo. Debido a que previamente se habían realizado pruebas sin ningún tipo de aislamiento, presentando una temperatura de 52 °C en el mismo periodo de tiempo de la Figura 45. En la Figura 46 se puede apreciar el comportamiento de la temperatura sin utilizar ningún tipo de aislamiento.

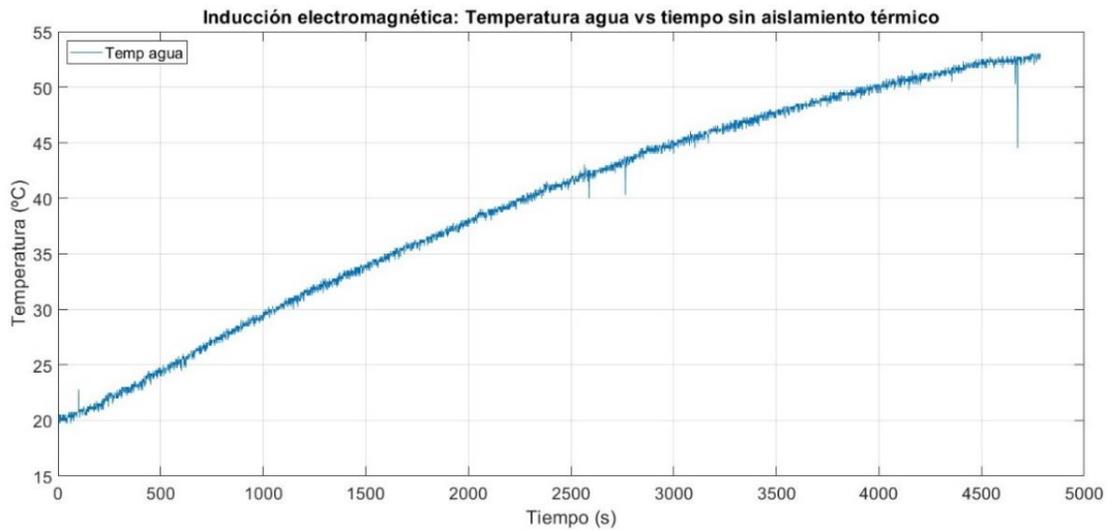


Figura 46. Resultados temperatura agua sin aislamiento térmico. Elaboración propia.



Figura 47. Recipiente de almacenamiento con aislamiento térmico. Elaboración propia.

### 3.4.2.2. Sistema de calentamiento por resistencia eléctrica.

La resistencia térmica que se utilizó para realizar las mediciones se situó en el interior del reservorio quedando sumergida en el aceite y en contacto directo con este, como se aprecia en la Figura 48.

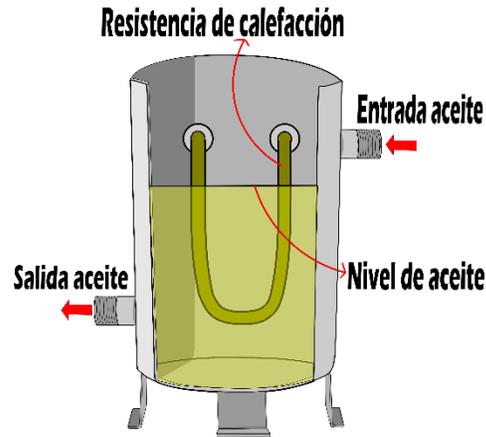


Figura 48. Ubicación de la resistencia eléctrica. Elaboración propia.

En las pruebas mediante calentamiento por resistencia eléctrica se hicieron mediciones hasta alcanzar los 60 °C, con el objetivo de comparar el tiempo y la potencia eléctrica en comparación con los datos recopilados en el sistema de calentamiento por inducción. Los resultados obtenidos de la medición de la temperatura se encuentran en la Figura 49. En esta prueba el tiempo requerido para alcanzar los 60°C en el agua fue de 45'', un tiempo menor con respecto al sistema por inducción.

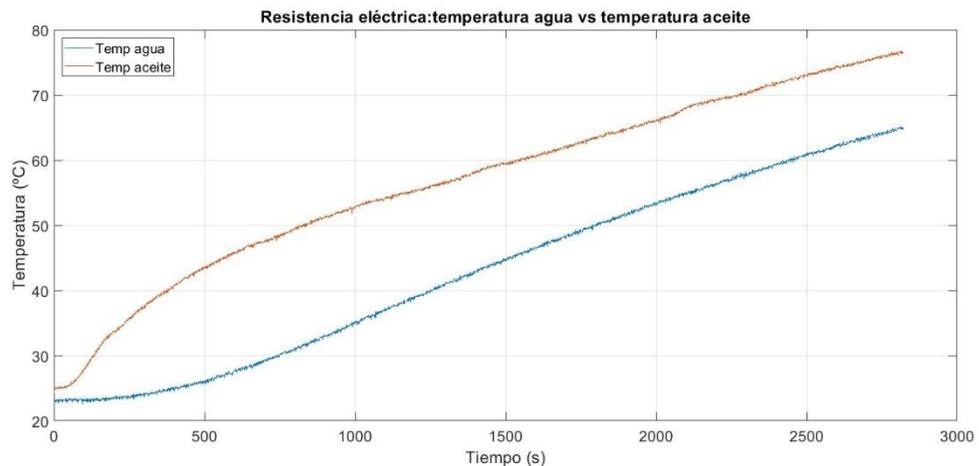


Figura 49. Resultados temperatura agua y aceite, resistencia eléctrica. Elaboración propia.

En la Figura 49 se puede observar que la tendencia de las temperaturas medidas presentan un comportamiento proporcional a la diferencia de temperaturas entre el aceite y el agua. Este comportamiento se puede observar en los primeros 1000 segundos, un incremento considerable en la temperatura del aceite mientras que en este mismo periodo de tiempo el agua presenta un calentamiento mucho más lento. A partir de los 1000 segundos, las dos mediciones presentan un incremento lineal cumpliéndose la proporcionalidad de la transferencia de temperatura.

### 3.4.2.3. Prueba del sistema de calentamiento por inducción en reposo.

Para conocer la capacidad de calentamiento del inversor resonante ZVS, se realizó una prueba de calentamiento en reposo, con el fin de conocer la temperatura máxima a la que se puede llegar. En la Figura 50 se puede apreciar que se alcanzó una temperatura de 170 °C en un tiempo de 15". La prueba se detuvo al alcanzar dicha temperatura, debido a que el aceite que se encontraba en el interior del tubo de acero galvanizado alcanzó su temperatura de evaporación.

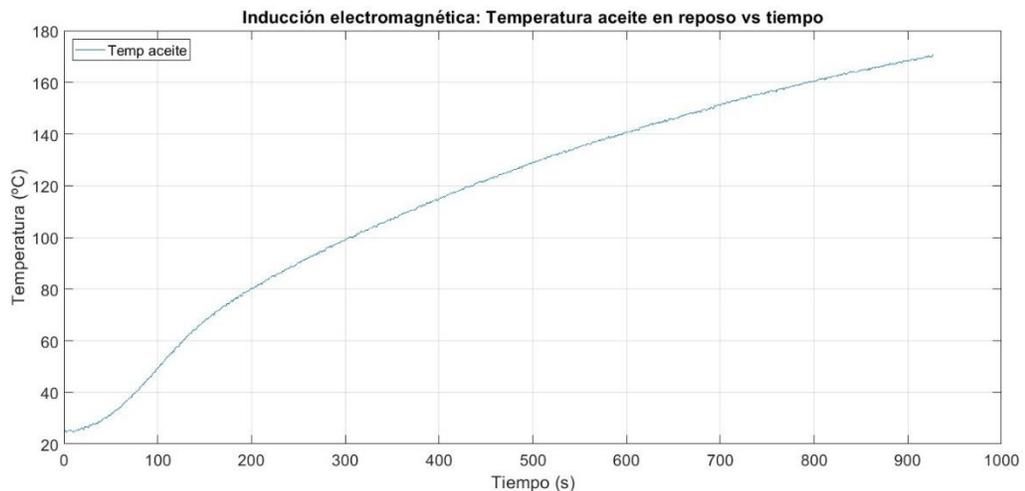


Figura 50. Resultados temperatura aceite en reposo, inducción electromagnética. Elaboración propia.

## **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

En este capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo de cada uno de los objetivos, con el fin de comparar los valores teóricos y prácticos. Es necesario mencionar que los resultados obtenidos se pueden mejorar mediante la corrección de algunos factores como las pérdidas de energía calórica que afectan el rendimiento del calentamiento por inducción.

### **4.1. Análisis de resultados pasteurización.**

En la pasteurización de alimentos líquidos mediante calentamiento por inducción se encuentran una cantidad reducida de información, por lo que los resultados obtenidos en este proyecto se pueden mejorar, corrigiendo los problemas y las falencias encontradas como lo fueron las pérdidas de temperatura por convección y radiación. En los sistemas de calentamiento comerciales estas inconsistencias son controladas mediante el uso de aislantes térmicos como la cerámica y la fibra de vidrio, que impiden la disipación de energía al ambiente mejorando el rendimiento del tipo de calentamiento utilizado.

De la misma manera es necesario mencionar las ventajas que trae el calentamiento por inducción en el sistema de pasteurización propuesto. La principal ventaja es la emisión mínima de gases debido a la evaporación del aceite, que al estar sometido un corto periodo de tiempo en el tubo de acero calentado no presenta sobrecalentamiento.

### **4.2. Análisis circuito convertidor DC/AC.**

Las principales pérdidas presentadas en el prototipo son de tipo calórica, debido a que en la parte electrónica las pérdidas de potencia son por conmutación, pero al utilizar un inversor resonante de conmutación suave se reducen estas pérdidas en un 92% en comparación con las pérdidas por conmutación forzada.

Otra ventaja para destacar son las pérdidas mínimas por conmutación que presentó el circuito inversor resonante utilizado para alimentar la bobina de inducción. Este inversor presentó un 92% menos de pérdidas en comparación con el inversor resonante por conmutación forzada.

En los resultados obtenidos de la Figura 50 se muestra la capacidad de calentamiento producido por el inversor resonante ZVS y la bobina de inducción. En 1' 36" de prueba la temperatura en el aceite fue de 49.5 °C, más rápido respecto a la recirculación del aceite que fue de 27.75 °C (Figura 45), es decir que el proceso

de calentamiento de aceite en reposo fue 56% más eficiente en este intervalo de tiempo.

### **4.3. Análisis pruebas de calentamiento.**

Teniendo en cuenta el tiempo requerido entre las gráficas de la Figura 45 y la Figura 49, de 79" y 45", respectivamente, el sistema por resistencia eléctrica requirió de 34" menos que el sistema de calentamiento por inducción para llegar a una temperatura de 60 °C en el recipiente de almacenamiento. Esto se debe a que el calentamiento por resistencia eléctrica está operando a una potencia de 330 W, es decir, 116 W más comparado con el calentamiento por inducción. De igual forma la resistencia se encuentra sumergida en el aceite (Figura 48) evitando así las posibles pérdidas por radiación.

En las pruebas de calentamiento mediante inducción se registró un tiempo de 79" para alcanzar los 60°C temperatura necesaria para realizar una pasteurización tipo VAT, este tiempo con relación a la potencia utilizada indica que este sistema es deficiente, con respecto a otros tipos de calentamiento. Sin embargo, vale recalcar la posible mejora del rendimiento, mediante la reducción de la longitud de las tuberías, el control del caudal del aceite y el aislamiento térmico de todas las superficies que presentan pérdidas de temperatura por radiación, debido a que, según los datos medidos y cálculos indican que se están presentando pérdidas de energía alrededor de 0.125 kWh.

Al no existir registros de este tipo de calentamiento, los resultados de este proyecto promoverán futuras investigaciones sobre este método de calentamiento tanto para pasteurizar como para posibles aplicaciones en biodigestores anaeróbicos [50] y cualquier otro sistema que utilice intercambiadores de calor sumergidos.

Como resultado de esta investigación se generaron tres productos: los dos primeros son artículos publicados en ACOFI, sobre una evaluación comparativa de tecnologías de calefacción en aplicaciones industriales [51] y una aplicación del sistema descrito en este proyecto para biodigestores anaeróbicos [50]. Por último, una publicación de la planta piloto en Minciencias.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

### 5.1. CONCLUSIONES

En este proyecto se presentó el diseño y construcción de un sistema de pasteurización de alimentos líquidos a escala mediante calefacción por inducción y con base en los datos obtenidos y las dificultades presentadas en el desarrollo del proyecto, se concluyó lo siguiente:

- Mediante el análisis realizado en la sección 3.1 se pudo evidenciar que en los sistemas de pasteurización de alimentos líquidos se debe tener presente el tiempo y la temperatura a la que se someterán los alimentos, debido a que si se hace una mala combinación de estas dos magnitudes no se daría cumplimiento con los estándares de pasteurización colocando en riesgo la vida útil del producto en condiciones normales de almacenamiento.
- Al implementar intercambiadores de calor sumergidos para el tratamiento térmico de alimentos líquidos es importante tener presente el material con el que es construido. Al investigar el comportamiento térmico de los metales y los alimentos, se evidenció que el calor específico de las masas a calentar determina la cantidad de energía aplicada para calentarlos hasta una temperatura de referencia, afectando de esta manera el tiempo de calentamiento. De la misma manera se debe tener presente la superficie que entrará en contacto con el alimento a calentar, esto sin afectar la circulación del alimento en el interior del recipiente de almacenamiento, debido a que, si el espacio entre espiras es muy reducido, el alimento no se podrá desplazar con libertad en el interior del recipiente de almacenamiento.
- Se realizaron pruebas con diferentes topologías de convertidores, como el de medio puente y puente completo, pero se encontraron inconvenientes en la implementación debido a que existían pérdidas por conmutación en los transistores MOSFET en el transcurso de las transiciones de encendido y apagado. La conmutación forzada en los circuitos inversores resonantes son un factor importante para tener en cuenta. Debido a que el encendido forzado de los diodos y transistores, generan una intercepción entre la corriente y la tensión que puede provocar pérdidas de potencia y el desgaste de los semiconductores.
- En el desarrollo experimental, a partir de las pruebas de funcionamiento se evidenció un cambio de la frecuencia de resonancia respecto a los resultados

de simulación, debido a variaciones de la conductividad eléctrica y permeabilidad magnética, esto como consecuencia del sobrecalentamiento de la bobina de inducción.

- Para el diseño de un sistema de tratamiento térmico se concluye que es importante tener presente las pérdidas de temperatura que afectan el rendimiento y la eficiencia del prototipo. El efecto de estas pérdidas se puede observar mediante el análisis de los resultados de temperatura obtenidos, donde se encontró que al aislar térmicamente el recipiente de almacenamiento mediante una capa de polietileno se presenta un incremento de 7°C en la temperatura final debido a la reducción de las pérdidas por radiación y convección.

## **5.2. PERSPECTIVAS DE TRABAJO FUTURO**

Entendiendo las necesidades de la pasteurización en alimento líquidos y el principio de calentamiento por inducción, se recomienda mejorar el prototipo a escala desarrollado con el fin de mejorar los tiempos de calentamiento obtenidos en este trabajo.

Con el fin de mejorar la eficiencia del prototipo se recomienda disminuir la longitud de las tuberías utilizadas para el transporte del aceite, esto con la finalidad de reducir el recorrido del aceite y disminuir la cantidad de aceite requerido para llenar las tuberías disminuyendo de esta manera la energía requerida para calentar el aceite.

Utilizar aislantes térmicos en todas las superficies que presenten pérdidas de temperaturas como las tuberías, el recipiente de almacenamiento, el reservorio y la bomba centrífuga.

El diseño y la implementación de un circuito controlador de velocidad para manipular las revoluciones de la bomba centrífuga, con el fin de obtener un caudal de aceite constante en las diferentes pruebas que se realicen.

Aislar térmicamente o refrigerar la bobina de inducción con el objetivo de evitar cambios en su permeabilidad magnética y conductividad eléctrica y así tener una frecuencia de resonancia estable durante toda la prueba.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Ferreira, M. Moreira, and M. A. P. Dinis, “Energías alternativas...,” no. 14, 2009, [Online]. Available: <http://www.cm-lousada.pt/VSD/Lousada/vPT/Publica/Agenda/Eventos/jornadas+do+ambiente.htm>
- [2] G. Wang, Z. Wan, and X. Yang, “Induction heating by magnetic microbeads for pasteurization of liquid whole eggs,” *J Food Eng*, vol. 284, no. April, p. 110079, 2020, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110079.
- [3] Naciones Unidas, “Paz, dignidad e igualdad en un planeta sano | Naciones Unidas.” <https://www.un.org/es/global-issues/population> (accessed Sep. 05, 2021).
- [4] F. Martínez, “El petróleo,” *Hist Vida*, no. 418, pp. 14–17, 2003, [Online]. Available: [https://www.enerclub.es/extfrontenerclub/img/File/nonIndexed/petroleo/secciones/pdf/caps\\_todos/AOP\\_FICHAS\\_DIDACTICAS.pdf](https://www.enerclub.es/extfrontenerclub/img/File/nonIndexed/petroleo/secciones/pdf/caps_todos/AOP_FICHAS_DIDACTICAS.pdf)
- [5] GASNOVA (Asociación Colombiana del GLP), “INFORME ANUAL DEL GLP 2020,” 2020. [Online]. Available: [www.gasnova.co](http://www.gasnova.co)
- [6] G. Molina, “Sistema de calefacción de agua por inducción electromagnética para el uso doméstico,” 2015.
- [7] D. Mesa Puyo, “Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia Iván Duque Márquez Presidente de la República.” [Online]. Available: [www.laimprentaeditores.com](http://www.laimprentaeditores.com)
- [8] A. Rodríguez Hernández *et al.*, “PLAN ENERGETICO NACIONAL COLOMBIA: IDEARIO ENERGÉTICO 2050.”
- [9] C. Bolívar Guerrero and F. Giraldo Ramos, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CALENTADOR POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA EL MONTAJE DE RODAMIENTOS.” [Online]. Available: <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/2839>
- [10] I. H. S. Ambrell, “Acerca de Inducción Calentamiento,” 2018. Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: [https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell\\_PDFs/411-0169-06.pdf](https://www.ambrell.com/hubfs/Ambrell_PDFs/411-0169-06.pdf)
- [11] V. Crisafulli, “New IHR Filed Stop II IGBT technology, the best efficiency for high frequency Induction Cooking Applications.,” no. May, pp. 20–22, 2014.
- [12] D. of Energy, “Energy Conservation Program: Energy Conservation Standards for Residential Conventional Cooking Products”, [Online]. Available: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/Consumer\\_Cooking\\_Products\\_SNOPR.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/08/f33/Consumer_Cooking_Products_SNOPR.pdf)

- [13] G. W. Froning, D. Peters, P. Muriana, K. Eskridge, D. Travnicek, and S. S. Sumner, "International Egg Pasteurization Manual".
- [14] P. M. de Souza and A. Fernández, "Consumer acceptance of UV-C treated liquid egg products and preparations with UV-C treated eggs," *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 14, pp. 107–114, 2012, doi: 10.1016/j.ifset.2011.12.005.
- [15] C. Lamo, N. C. Shahi, A. Singh, and A. K. Singh, "Pasteurization of guava juice using induction pasteurizer and optimization of process parameters," *Lwt*, vol. 112, no. February, p. 108253, 2019, doi: 10.1016/j.lwt.2019.108253.
- [16] "(PDF) Application of inductive forced heating as a new approach to food industry heat exchangers: A case study—Tomato paste pasteurization." [https://www.researchgate.net/publication/324576447\\_Application\\_of\\_inductive\\_forced\\_heating\\_as\\_a\\_new\\_approach\\_to\\_food\\_industry\\_heat\\_exchangers\\_A\\_case\\_study-Tomato\\_paste\\_pasteurization](https://www.researchgate.net/publication/324576447_Application_of_inductive_forced_heating_as_a_new_approach_to_food_industry_heat_exchangers_A_case_study-Tomato_paste_pasteurization) (accessed Sep. 15, 2021).
- [17] E. Plumed, J. Acero, I. Lope, and J. M. Burdío, "Design methodology of high performance domestic induction heating systems under worktop," *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 300–306, 2020, doi: 10.1049/iet-pel.2019.0693.
- [18] H. W. E. Koertzen, J. D. van Wyk, and J. A. Ferreira, "An investigation of the analytical computation of inductance and ac resistance of the heat-coil for induction cookers," *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, vol. 1992-Janua, pp. 1113–1119, 1992, doi: 10.1109/IAS.1992.244423.
- [19] J. R. G. Pablo Hernández, Fernando Monterde, J. M. Burdío, "Power Loss Optimisation of Foil Coils for Induction Cooking," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 6, no. 11, pp. 951–952, 1967.
- [20] R. L. Steigerwald, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies," *APEC 1987 - 2nd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Conference Proceedings*, vol. 3, no. 2, pp. 135–144, 2015, doi: 10.1109/APEC.1987.7067142.
- [21] H. W. Koertzen, J. D. van Wyk, and J. A. Ferreira, "Design of the half-bridge, series resonant converter for induction cooking," *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, vol. 2, pp. 729–735, 1995, doi: 10.1109/pesc.1995.474899.
- [22] F. Forest, E. Labouré, F. Costa, and J. Y. Gaspard, "Principle of a multi-load/single converter system for low power induction heating," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 15, no. 2, pp. 223–230, 2000, doi: 10.1109/63.838094.

- [23] A. Acevedo Picon, J. Barrero Perez, and J. Gelvez Figueredo, "Calentamiento por inducción electromagnética: diseño y construcción de un prototipo," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 6, no. 1, pp. 69–76, 2007.
- [24] W. González, J. M. Aller, S.-B. Lászlo, and J. W. Horvart, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BOBINAS DE CALENTAMIENTO PARA HORNOS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 17, no. 66, pp. 28–37, 2013, [Online]. Available: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-48212013000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212013000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
- [25] H. Young and R. Freedman, "Física universitaria." [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/cuu>
- [26] R. Morales-Caporal, *Aplicación del Calentamiento por Inducción en Baja Potencia: Uso Doméstico, Agrícola y para Laboratorio*. 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/301593999>
- [27] Vicente. Esteve Gómez, *Influencia de los componentes parásitos en el análisis y diseño de inversores resonantes paralelo para aplicaciones de calentamiento por inducción*. Universitat de València, Servei de Publicacions, 2003.
- [28] G. Acosta Rivera, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE CALEFACCIÓN PARA PILETAS DE AGUA MEDIANTE INDUCCIÓN MAGNÉTICA.," Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <http://repositorio.uisrael.edu.ec/bitstream/47000/1777/1/UISRAEL-EC-ELDT-378.242-2019-004.pdf>
- [29] L. Idarraga Ortiz and R. Afanador Muñoz, "Diseño y construcción del sistema de control de un puente inversor resonante.," 2006.
- [30] J. Martínez Ledesma, "DESARROLLO DE UN INVERSOR RESONANTE PARA CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA," 2013. Accessed: Oct. 12, 2022. [Online]. Available: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/16739/Desarrollo%20de%20un%20Inversor%20Resonante%20para%20Calantamiento%20por%20Inducci%C3%B3n%20Electromagn%C3%A9tica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [31] "Convertidores CC-CA: inversores de onda cuadrada."
- [32] International Rectifier, "DATASHEET IRF2110." [Online]. Available: [www.irf.com](http://www.irf.com)
- [33] H. Serrano and C. Alberto, "DISEÑO DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CON TRANSFORMADORES DE BAJO COSTO," 2019.

- [34] L. Valle Espinosa, "Evaluación de un método alternativo de pasteurización por inyección directa de ozono en vino de frutas elaborado a partir de un mosto combinado de manzana (*pyrus malus* L.), pera (*pyrus communis* L.) y uva (*vitis vinifera* L.)," 2016.
- [35] M. Tipán Quise and D. Florez Santos, "Diseño y construcción de un prototipo de pasteurizadora para el procesamiento de 50 litros de leche/hora," 2018.
- [36] B. C. M. Salomão, A. P. Slongo, and G. M. F. Aragão, "Heat resistance of *Neosartorya fischeri* in various juices," *LWT - Food Science and Technology*, vol. 40, no. 4, pp. 676–680, May 2007, doi: 10.1016/J.LWT.2006.03.008.
- [37] S. Vergara Gómez, "Estrategias tecnológicas para optimizar la producción y la vida útil de zumo de granada," 2014.
- [38] A. Alvis, I. Caicedo, and P. Peña, "Determinación de propiedades termofísicas de alimentos en función de la concentración y la temperatura empleando un programa computacional," *Informacion Tecnologica*, vol. 23, no. 1, pp. 111–116, 2012, doi: 10.4067/S0718-07642012000100012.
- [39] J. Benito, "Tablas calores específicos de alimentos."
- [40] "TABLAS Y DIAGRAMAS DE PROPIEDADES (SISTEMA INTERNACIONAL)."
- [41] J. Martínez Ledesma, "Desarrollo de un inversor resonante para calentamiento por inducción electromagnética.," México, 2013.
- [42] "longitudprimitiva.jpg (971×7971)."  
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut121/longitudprimitiva.jpg>  
 (accessed Oct. 13, 2022).
- [43] M. M. Jovanovic, W. A. Tabisz, and F. C. L, "ZERO-VOLTAGE-SWITCHING TECHNIQUE IN HIGH-FREQUENCY OFF-LINE CONVERTERS'."
- [44] "Termocupla Tipo K Con Sonda De 30MM."  
<https://www.vistronica.com/sensores/temperatura/termocupla-tipo-k-con-sonda-de-30mm-detail.html> (accessed Nov. 02, 2022).
- [45] S. Garro Acón *et al.*, "Modelación y simulación de Disipadores de calor para Procesadores de computadora en COMSOL Multiphysics," 2012.
- [46] International Rectifier, "IRFP250N Power MOSFET." [Online]. Available: [www.irf.com](http://www.irf.com)
- [47] "LTspice Simulator | Analog Devices." <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html> (accessed Oct. 28, 2022).

- [48] Food & Wine en español, “Lo que desconocías sobre usar cobre al cocinar,” 2019. <https://foodandwineespanol.com/usarl-cobre-en-la-cocina/> (accessed Oct. 13, 2022).
- [49] Alibaba.com, “Hot Cold Water Pipe Pex Pipe Din 16892/3 Pex Gre.” [https://www.alibaba.com/product-detail/hot-cold-water-pipe-pex-pipe\\_60488705969.html](https://www.alibaba.com/product-detail/hot-cold-water-pipe-pex-pipe_60488705969.html) (accessed Oct. 13, 2022).
- [50] N. D. Martínez Sabogal, S. Pérez Hincapié, A. F. Guerrero Guerrero, and E. Palacios Yepes, “Sistema de calentamiento por inducción para biodigestores anaeróbicos a escala,” Fusagasugá, Cundinamarca. Colombia, Sep. 2022. Accessed: Oct. 13, 2022. [Online]. Available: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/2512/1863>
- [51] N. D. Martínez Sabogal *et al.*, “EVALUACIÓN COMPARATIVA DE TECNOLOGÍAS DE CALEFACCIÓN EN APLICACIONES INDUSTRIALES.”