



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Doctorado en Mecatrónica

Sistemas Electromecánicos basados en papel para monitoreo de la calidad de la leche.

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

**Doctora en Mecatrónica**

**Presenta:**

M.O. Laura Alejandra Ireta Muñoz

**Dirigida por:**

Dr. Ángel Pérez Cruz

**Co-Director:**

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

San Juan del Río, Qro, México, mayo 2024

**La presente obra está bajo la licencia:**  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



## CC BY-NC-ND 4.0 DEED

### Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

#### **Usted es libre de:**

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

#### **Bajo los siguientes términos:**

 **Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.

 **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).

 **SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

#### **Avisos:**

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Doctorado en Mecatrónica

**Sistemas electromecánicos basados en papel para monitoreo de la calidad en la leche.**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

**Doctora en Mecatrónica**

Presenta:

**M.O. Laura Alejandra Ireta Muñoz**

Dirigida por:

**Dr. Ángel Pérez Cruz**

Co-dirigido por:

**Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos**

**Dr. Ángel Pérez Cruz**

Presidente

**Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos**

Secretario/Co-Director

**Dr. Luis Morales Velázquez**

Vocal

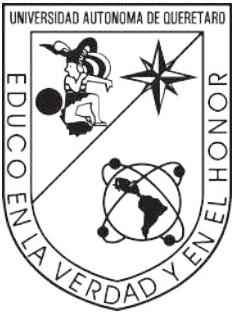
**Dr. David Alejandro Elvira Ortiz**

Suplente

**Dr. Isaías Cueva Pérez**

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro  
Mayo 2024  
México



**Universidad Autónoma de Querétaro**

---

---

**Facultad de Ingeniería**

**Doctorado en Mecatrónica**

Sistemas electromecánicos basados en papel para monitoreo de la calidad de la leche

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**Doctora en Mecatrónica**

**Presenta:**

M.O. Laura Alejandra Ireta Muñoz

**Dirigida por:**

Dr. Ángel Pérez Cruz

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

# Resumen

El acceso a una alimentación salubre y saludable es un aspecto importante para los consumidores, que demandan en gran medida alimentos de la canasta básica como la leche. Las malas prácticas realizadas para adulterar la composición han repercutido en la salud de las personas, por lo que el diseño de dispositivos para verificar la inocuidad de los alimentos ha adquirido importancia. Existen aparatos comerciales que son costosos, además se han empleado reactivos y técnicas específicas para realizar la evaluación, sin embargo, no son accesibles para toda la población. En este trabajo se presenta el nuevo principio de funcionamiento de un dispositivo basado en papel, el cual fue configurado como viga en voladizo con la finalidad de evaluar el comportamiento mecánico, mismo que es inducido por el efecto de higroexpansión al interactuar con soluciones acuosas. Además, se añadió un camino conductor en la superficie del papel para evaluar la respuesta eléctrica midiendo el cambio de voltaje. Dicho principio, permitió evaluar diferentes soluciones acuosas y alimentos bebibles observándose un cambio en la flexión del papel. La novedad de este trabajo radica en la inducción de un movimiento mecánico por medio de microdosis, en lugar de un fenómeno químico, que emplea el papel únicamente como plataforma de sensado. De acuerdo con a los resultados obtenidos es posible emplear el principio de funcionamiento como un evaluador de la leche.

**Palabras clave** dispositivo basado en papel; higroexpansión; viga en voladizo; soluciones acuosas; evaluador de leche.

# Abstract

Access to safe and healthy diet is an important aspect for consumers, who largely demand food from the basic basket such as milk. Practices implemented to adulterate milk composition have had an impact on people's health, for this reason devices design to verify food safety has gained importance. There are expensive commercial devices, likewise specific reagents and techniques have been used to carry out the evaluation; however, they are not accessible to the entire population. In this paper a new operating principle is introduced using paper-based cantilever beam devices, which is evaluated through mechanical response induced by the effect of hygroexpansion when interacting with aqueous solution as well as electrical through voltage response. This principle allowed the evaluation of binary solutions and different drinkable foods through paper flexural response. The novelty of this work relies in mechanical movement induced by microdoses of liquid instead of a chemical reagent that uses paper as sensing platform. According to the results in this work it is possible to use the working principle as milk tester.

**Key words:** Paper-based device; hygroexpansion; cantilever beam; aqueous solution, milk tester.

# Dedicatoria

## **Oración de San Anselmo (siglo XI)**

*Dame un alma pura, recta, fiel,  
un conocimiento verdadero y práctico,  
con el amor de tus mandamientos  
y la facilidad para cumplirlos,  
de tal manera, Señor,  
que pueda progresar  
sin cesar con humildad  
en el camino de lo mejor  
y no fallar jamás.  
No me abandones, Señor,  
a mi sola voluntad,  
ni a la ignorancia  
o a la debilidad humana,  
ni a mis méritos,  
ni a nada que no sea  
tu cuidadosa Providencia.  
Que por mí y en mí  
se cumpla siempre solamente  
tu santa voluntad.*

# Agradecimientos

**A mi Amado**, agradezco su presencia y compañía durante toda mi trayectoria académica, él dispuso todos los medios para lograr mis metas y colocó a las personas correctas en mi camino para alcanzarlas. Quiero agradecerle Amado mío por todo el amor y cariño que recibo, que me impulsaron y animaron a concluir esta etapa.

Gracias a mis abuelitos, **Papá Simón †**, **Mamá Chole †** y **Mamá Lola †**, recibí en ellos palabras de aliento y ánimo para darme fortaleza. Siempre fueron un pilar muy importante en mi formación, incentivando mi vocación científica y compartiendo conmigo sus experiencias de vida. Ellos son un ejemplo vivo de la confianza en mi Amado, tengo la certeza de que sus oraciones me acompañan, que interceden por mí y mi familia, por eso dedico este trabajo de tesis a su memoria.

Agradezco infinitamente a mis papás **Fernando** e **Hilaria**, es una bendición poder contar con ellos ya que son ejemplo y guía de mis pasos. Me han demostrado que se puede salir adelante siendo honesto, que no hay imposibles y que los valores no se pierden a pesar de estar rodeado de antivalores. Es un orgullo ser hija suya, ellos me apoyaron, compartieron todo mi camino, me orientaron y padecieron junto a mí las decepciones burocráticas del sistema. Me dieron las herramientas para poder llevar a cabo mis metas, siendo mi apoyo incondicional y un refugio donde siempre encuentro amor y comprensión. Toda mi trayectoria es un reflejo de sus enseñanzas y un homenaje por todo lo que han hecho por mí.

Gracias a mis hermanos, **Lore**, **Isra** y **Rosy**, ellos son mis compañeros y cómplices de toda la vida, son mi ejemplo a seguir me mostraron el camino recorrido por ellos, orientándome con paciencia. Son un apoyo excepcional y

me alentaron a no rendirme jamás ante la adversidad de la incertidumbre. Lore me mostró como se debe estudiar (dejando un agujero en el piso), Isra mi hermano científico, quién me donó el material, Rosy la oveja de colores y la alegría de la casa (quien hace mis tareas de artes). Gracias DIOS por darme tan buenos hermanos, con los que comparto mi día a día, de quienes recibo palabras que incentivan mi formación científica y humana, nuestra hermandad perdurará a través del tiempo.

Gracias por mis tíos **Rosita** y **Maguito**, por mi primo y hermano en la fe **Juan Simón**, ellos son parte importante en todo este camino, admiro en ellos su espíritu de lucha y su paciencia. Son ejemplo de vida, parte fundamental de mi familia, han sido testigos de todo este proceso, de mi formación académica y espiritual. Ellos han formado parte esencial de toda mi trayectoria, apoyándome y alentándome a seguir adelante. Gracias porque en ellos veo el reflejo de mis abuelitos.

Te agradezco por mis sobrinos, **Fernanda, Mateo** y **Carol**, ellos enriquecen mi vida y me contagian de su alegría. Son mis mejores profesores, me animan a seguir adelante para inspirar y demostrar que tenemos la certeza de que todo es posible cuando crecemos rodeados de amor. Agradezco por mi cuñado **Beto**, quien forma parte de nuestra gran familia y nos anima a seguir adelante, compartiendo con nosotros las alegrías y logros. Agradezco a **Papá Gelasio** y a **Lidia**, por siempre estar presentes en cada una de mis etapas académicas. Doy gracias a toda mi familia, que es tan grande y maravillosa, sé que tengo un gran apoyo en ellos.

Gracias a mis amigos y compañeros, chicos del F5, Ángel, Alejandro, Agustín, Vivi, David, Sr. Alejandro, Isaías y Leo, quienes hicieron de esta etapa un camino divertido por recorrer, agradezco mucho todo el apoyo técnico y académico que me dieron. Doy gracias por todos los rostros amables con los que me encontré en mi paso por la UAQ, al Dr. Irineo, Lupita Centeno y Dr. Roque quienes me recibieron y alentaron a continuar con mis estudios de Doctorado. A todo el personal de intendencia, vigilancia, jardinería, laboratorios y a las secretarías que me atendieron. A mis profesores, asesores y sinodales, por todo el apoyo recibido y su paciencia. Agradezco por aquellos que directa o indirectamente participaron en todo este proceso para poder alcanzar esta meta.

También quiero agradecer el ministerio de la catequesis y la música, a la casa de oración, silencio y paz de los hermanos servidores de la palabra. A todas las personas que he encontrado en este camino, quienes me han felicitado y animado a seguir adelante. Espero poder seguir en el camino de lo mejor y cumplir la misión que me ha sido encomendada.

Finalmente, agradezco a todas las personas trabajadoras que aportaron para la Beca que obtuve del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), y finalmente al personal de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), facultad de Ingeniería Campus San Juan del Río.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>III</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>X</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	3
1.1.1. Métodos de detección de adulteración . . . . .	6
1.1.2. Sensores basados en papel . . . . .	11
1.2. Planteamiento del problema . . . . .	18
1.3. Justificación . . . . .	21
1.4. Hipótesis . . . . .	22
1.5. Objetivos . . . . .	23
1.5.1. Objetivo general . . . . .	23
1.5.2. Objetivos particulares . . . . .	23
1.6. Planteamiento general . . . . .	24
<b>2. Fundamentación teórica</b>	<b>27</b>
2.1. Características de la leche . . . . .	27
2.2. Sensores basados en papel . . . . .	29
2.2.1. Capilaridad . . . . .	30
2.2.2. Higromovimiento . . . . .	31

2.2.3. Técnica kNN (k-Nearest Neighbors) . . . . .	32
<b>3. Metodología y materiales</b>	<b>34</b>
3.1. Modelo . . . . .	35
3.2. Diseño . . . . .	39
3.2.1. Vigas de papel . . . . .	39
3.2.2. Sistema de adquisición . . . . .	40
3.2.2.1. Hardware . . . . .	41
3.2.2.2. Software . . . . .	43
3.3. Objeto de estudio . . . . .	45
3.3.1. Soluciones binarias . . . . .	45
3.3.2. Leche UHT y otros alimentos bebibles . . . . .	46
3.3.3. Leche UHT adulterada . . . . .	47
3.4. Pruebas experimentales . . . . .	48
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>55</b>
4.1. Análisis de Resultados . . . . .	55
4.2. Principio de funcionamiento . . . . .	58
4.3. Leche UHT y alimentos bebibles . . . . .	61
4.4. Leche UHT adulterada . . . . .	66
<b>5. Conclusiones y prospectivas</b>	<b>75</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	75
5.2. Prospectivas . . . . .	77
<b>Bibliografía</b>	<b>78</b>
<b>Apéndices</b>	<b>87</b>
<b>A. Artículo publicado en Actuators</b>	<b>87</b>
<b>B. Artículo publicado en Micromachines</b>	<b>89</b>
<b>C. Artículo publicado en Biosensors</b>	<b>91</b>
<b>D. Registro de Software ADS-SisteMI</b>	<b>93</b>
<b>E. Artículo difusión publicado en Superación Académica SUPAUAQ</b>	<b>96</b>

ÍNDICE GENERAL

IX

**F. Diagrama Esquemático Circuito**

**100**

# Índice de figuras

1.1.	Estrategia de la granja a la mesa (Arabska, 2021) . . . . .	4
1.2.	Consumo per cápita de productos lácteos frescos y procesados (OECD-FAO, 2023) . . . . .	5
1.3.	Descripción de los principales adulterantes de la leche indicando las técnicas mayormente utilizadas para determinación y complejidad del pretratamiento de la muestra (Nascimento et al., 2017) . . . . .	8
1.4.	Métodos detección (Ionescu et al., 2023) . . . . .	9
1.5.	Guía básica para tecnologías de detección de microorganismos (Mortari & Lorenzelli, 2014) . . . . .	10
1.6.	Línea del tiempo de los sensores basados en papel. <i>µPad- Microfluidic Paper-based Analytical Device; e-PAD Electrochemical Paper-based Analytical Device; LFA - Lateral Flow Assay; POC - Point of care</i> (Mazur et al., 2023) . . . . .	12
1.7.	Métodos de detección fundamentales, materiales y técnicas de fabricación para LOC (Mitrogiannopoulou et al., 2023) . . . .	14
1.8.	Métodos de detección en sensores basados en papel para monitoreo alimentos (Okutan Arslan & Trabzon, 2023) . . . . .	15
1.9.	Esquema de detección simultanea para 7 adulterantes (Patari et al., 2022) . . . . .	16
1.10.	Planteamiento general (Autoría propia) . . . . .	25
3.1.	Metodología (Autoría propia) . . . . .	35
3.2.	Variables seleccionadas para modelar el circuito de calefacción (Autoría propia) . . . . .	36
3.3.	Geometría modelo de Comsol; a) Deformación mecánica; b) Distribución de calor . . . . .	37

3.4.	Gráfica de la respuesta de desplazamiento en diferente grosor de papel para un barrido de valores del coeficiente de expansión térmica $\alpha$ . . . . .	38
3.5.	Geometría de la viga basada en papel (Autoría propia). . . . .	39
3.6.	Esquema de sistema de adquisición (Autoría propia). . . . .	40
3.7.	Ensamble de circuito para control de corriente y adquisición de datos vía bluetooth . . . . .	41
3.8.	Fabricación de circuito impreso . . . . .	42
3.9.	Sistema aislado para realización pruebas. A) Humidificador; B) Base para colocación viga; C) Fuente de alimentación; D) Control de corriente; E) Microscopio manual. . . . .	43
3.10.	Interfaz de Usuario UI. . . . .	45
3.11.	Esquema de Activación/desactivación en la viga de papel (Autoría propia). . . . .	49
3.12.	Comportamiento del desplazamiento Activación/desactivación viga de papel. . . . .	50
3.13.	Puesta experimento. . . . .	51
4.1.	Esquema medición de desplazamiento bajo la viga. . . . .	56
4.2.	Mapa de colores por experimento. . . . .	57
4.3.	Valor promedio, máximo y voltaje RMS por experimento. . . .	58
4.4.	Desplazamiento agua destilada con corriente y sin corriente. .	59
4.5.	Desplazamiento soluciones binarias para un volumen por activación de 20, 15 y 10 $\mu\text{L}$ . . . . .	60
4.6.	Mapa de colores por marcas de leche (M1, M2, M3) en tres repeticiones (E1, E2, E3). . . . .	62
4.7.	Análisis estadístico marcas de leche (M1, M2, M3). . . . .	63
4.8.	Mapa de colores alimentos bebibles (S1, S2, S3) en tres repeticiones (E1, E2, E3). . . . .	65
4.9.	Análisis estadístico alimentos bebibles (S1, S2, S3). . . . .	66
4.10.	Matriz de dispersión para leche UHT adulterada. . . . .	67
4.11.	Clasificación del nuevo conjunto de datos. . . . .	68
4.12.	Separación de clúster de datos por cada deposición de líquido a) - e) Activación 1-5. . . . .	72
4.13.	Separación de clúster de datos por cada deposición de líquido a) - e) Activación 1-5. . . . .	74

# Índice de tablas

1.1.	Consideraciones del diseño para la viga de papel . . . . .	21
2.1.	Composición leche de vaca (Guetouache et al., 2014) . . . . .	28
3.1.	Características del agua destilada y alcohol etílico absoluto .	46
3.2.	Información Nutrimental marcas de leche y alimentos bebibles.	47
3.3.	Características del agua oxigenada. . . . .	48
3.4.	Matriz de experimentos soluciones binarias. . . . .	52
3.5.	Matriz de experimentos marcas de leche UHT y otros alimentos bebibles. . . . .	53
3.6.	Matriz de experimentos leche UHT adulterada. . . . .	54
4.1.	Dato a clasificar voltaje RMS vs valor máximo . . . . .	70

# **Capítulo 1**

## **Introducción**

El diseño de dispositivos para la evaluación de alimentos ha adquirido importancia en los últimos años debido a la gran demanda de los consumidores. Parte de los materiales que se emplean para realizar las pruebas a estos alimentos no son biodegradables y utilizan grandes cantidades de volumen, lo cual implica un desperdicio. Esto ha llevado a buscar nuevas metodologías para reducir el impacto ambiental que podrían generar las pruebas a los alimentos en nivel global. De igual manera se ha buscado integrar dispositivos en la cadena de producción que sean amigables con el medio ambiente, desde la elaboración del alimento hasta la evaluación de calidad. Por tal motivo, el estudio de nuevos materiales que cumplan con la característica de ser biodegradables y sustentables ha sido de interés para integrarlos dicha cadena de producción.

El papel ha sido considerado como una alternativa para la elaboración de sistemas de detección de sustancias ya que posee propiedades ecológicas,

además es de fácil deposición y acceso. Asimismo, cuenta con propiedades que permiten emplearlo como plataforma de sensado debido a que posee la capacidad de trasportar líquidos a través de las fibras que lo componen sin necesidad de una bomba externa. Por otra parte, el volumen empleado para realizar las pruebas de evaluación debe tomarse en consideración, ya que el uso de grandes cantidades implica un desperdicio considerable. Por lo que se destaca la importancia de contar con sistemas, que permitan evaluar la calidad de los alimentos por medio de micro dosis y que cumplan con la característica de ser sustentables. Adicionalmente, la portabilidad es un aspecto importante para el diseño de dispositivos ya que se busca que la evaluación se realice *in situ*. Además, la reducción de costos para el proceso de fabricación y la evaluación de fenómenos que no implique el uso de reactivos es otra característica que potencialmente ayudará a que los sistemas sean accesibles al usuario final.

En este trabajo se presenta un sistema de detección basado en papel que permite detectar la presencia de aditamentos en la leche por medio de la respuesta higromecánica de este en conjunto con su comportamiento eléctrico. Para tal fin se empleó una viga de papel en voladizo, a la que se le agregaron micro dosis de soluciones acuosas para provocar un movimiento mecánico, que es inducido por higroexpansión debido a la hinchazón en las fibras de papel al transportar el líquido. Además, se integró un camino conductivo con la finalidad de generar calor para acelerar el proceso de evaporación de la muestra y evaluar la respuesta eléctrica. El principio de funcionamiento fue modelado mediante análisis por elemento finito para comprobar los pará-

metros que influyen en el movimiento de la viga. La novedad de este trabajo radica en el hecho de que no se requiere el uso de reactivos químicos para evaluar la respuesta, sino que se basa en un fenómeno físico generado por la higroexpansión del papel. Además, este sistema se alimenta con poca energía lo que hace posible su portabilidad. La tesis está conformada en cinco capítulos, para el primer capítulo se presenta parte de los antecedentes para este trabajo de investigación, así como los planteamientos y consideraciones para la realización de este proyecto. En el capítulo dos, se da la fundamentación teórica y en el capítulo tres se detalla la metodología seguida y los materiales empleados. Los resultados y la discusión se presentan en el capítulo cuatro y finalmente las conclusiones y prospectivas en el cinco.

## 1.1. Antecedentes

Análisis realizados sobre seguridad alimentaria, en los que destacan el aspecto de sustentabilidad de los métodos de producción y consumo han sido de interés para reducir la huella ecológica (Godfray *et al.*, 2010). Estudios realizados en México han considerado los aspectos socioeconómicos, culturales y ecológicos de la región (Ibarrola-Rivas & Galicia, 2017). Además, la directiva hacia métodos sustentables ha sido parte del acuerdo verde europeo (EGD por sus siglas en inglés *European Green Deal*) donde se ha propuesto la estrategia “*From farm to Fork*” en la que se plantea el uso de técnicas que permitan obtener los alimentos de una manera equitativa, saludable y respetuosa con el medio ambiente (Arabska, 2021). En la figura 1.1 se muestran las principales estrategias de este acuerdo, que incluye la producción,

procesamiento y distribución de alimento de manera sustentable, así como el consumo de alimentos, adicionalmente, se busca prevenir también la pérdida y desperdicio de alimentos. De acuerdo con las directivas planteadas, se considera la evaluación de un alimento cuyo consumo representa un elemento de la canasta básica de los consumidores: la leche.



Figura 1.1: Estrategia de la granja a la mesa (Arabska, 2021).

Este alimento es demandado en gran proporción a nivel mundial, haciéndolo vulnerable a procesos de adulteración y descomposición (Moore *et al.*, 2012). Estudios realizados por la organización de cooperación y desarrollo económicos (OECD por sus siglas en inglés *Organisation for economic co-operation and Development*) proyecta que el consumo *per cápita* incremente 0.8 %, equivalente a 15.7 kg para el año 2032, tal como se muestra en la figura 1.2. Los efectos producidos por alteración en la composición de la leche, han sido de interés para analizar la manera en que los adulterantes influyen

en la calidad, así como los efectos en la salud de los consumidores (Techane, 2023). Por lo que la manera de obtener la leche de tal forma que no contenga aditamentos dañinos o mala calidad por composición (i.e. grasa), desde su método de producción hasta el producto final, ha dado pauta para considerar la obtención de estos productos de forma orgánica (Bouttes *et al.*, 2019). Se han realizado estudios sobre los contaminantes relacionados con la producción de leche orgánica y convencional (Welsh *et al.*, 2019), en los que concluyen que existen diferencias notables para cada tipo de leche, lo cual sugiere que el consumo de leche orgánica podría minimizar el riesgo y exposición del consumidor. La detección oportuna de aditivos (evaluación) en este alimento a través de la cadena de producción permite tomar medidas correctivas o preventivas antes de que el producto llegue al consumidor final; lo que lleva a considerar el hecho de contar con sistemas de detección que formen parte del proceso de producción sustentable, ya que la tendencia de investigación en alimentos ha destacado esta característica con la finalidad de reducir el impacto ambiental (Yuan & Lo, 2020).

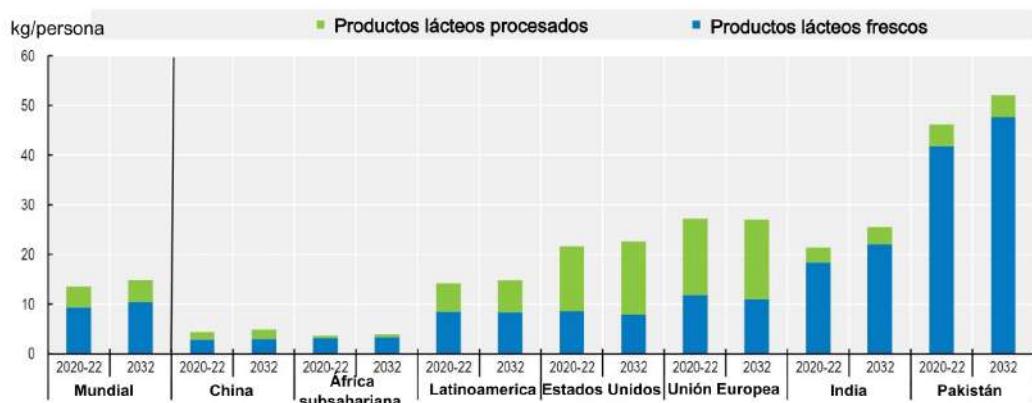


Figura 1.2: Consumo per cápita de productos lácteos frescos y procesados (OECD-FAO, 2023)

### 1.1.1. Métodos de detección de adulteración

Existen estándares que regulan el contenido y propiedades de los alimentos para que sean aptos para el consumo humano. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés *Food and Agriculture Organization*), proporciona información acerca de las características de la leche, así como manuales orientados a pequeños productores en los que se detalla el proceso a seguir para evaluar la calidad (Draaiyer *et al.*, 2009), así también la Norma Oficial Mexicana NOM-155-SCFI-2012 proporciona las medidas de composición para la leche. Los parámetros que evalúan, acorde a la información proporcionada por FAO se clasifican acorde a las características: i) organolépticas (aspecto, sabor y olor), ii) composición (especialmente contenido de materia grasa, de materia sólida y de proteínas), iii) higiénicas, iv) adulteración y v) residuos químicos (antibióticos, detergentes) (*Dairy production and products: Quality and testing, s. f.*)(FAO 2019). Diferentes pruebas son aplicadas para medir estos parámetros, algunas de las cuales están listadas en el *Codex Alimentarius* (FAO/OMS, 1999). Sin embargo, para llevarlas a cabo se requiere del uso de laboratorios especiales o instrumentos de medición sofisticados, lo cual representa una desventaja ya que el tiempo de evaluación se incrementa, así como el costo del producto final por la solicitud de estas pruebas; razón que lleva a los productores a considerar la rentabilidad de la producción de leche de manera sustentable (Bennett *et al.*, 1997; Hanrahan *et al.*, 2018).

Los factores que afectan la calidad de la leche, como la adulteración o

el deterioro, han sido estudiados para obtener dispositivos que resuelvan en parte los detalles de contar con equipo especializado, así también se busca una disminución de los costos para realizar las pruebas. Existen diferentes aditivos que se agregan a la leche con la finalidad de incrementar el contenido de grasa, o proteína, así como para diluir el producto. En la figura 1.3 se muestra un esquema de las técnicas analíticas empleadas para medir indicadores de adulterantes, asociados a la complejidad en la preparación de las muestras (Nascimento *et al.*, 2017). El equipo especializado es una constante en la detección de adulteración, y el análisis directo en la muestra no es aplicable para todos los indicadores. Así también, los métodos para detectar olor, color y consistencia de la leche han sido empleados con la finalidad de detectar la adulteración (Nawaz *et al.*, 2022). Estos estudios consideran la importancia de la investigación para evaluar la composición de la leche, lo que permite continuar buscando nuevas técnicas que ayuden a indicar de manera sencilla y directa los aditamentos en la leche.

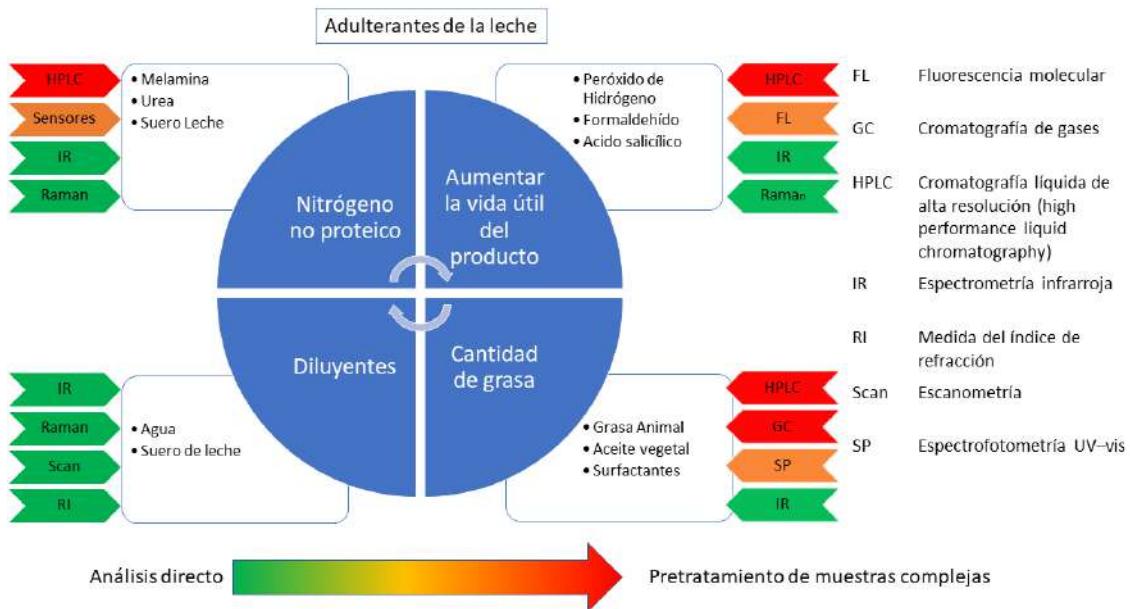


Figura 1.3: Descripción de los principales adulterantes de la leche indicando las técnicas mayormente utilizadas para determinación y complejidad del pretratamiento de la muestra (Nascimento et al., 2017).

Con respecto a los métodos de detección de adulteración se cuenta con técnicas cualitativas y cuantitativas, tal como se muestra en la figura 1.4(Ionescu *et al.*, 2023). Los métodos cualitativos comúnmente utilizados se refieren a aquellos en los que se tiene una respuesta físico-química observable, tal como los cambios de color al añadir un reactivo. Los métodos cuantitativos abarcan diferentes técnicas que suelen ser sofisticadas y complejas, tal como los métodos analíticos en los que se tiene el uso de biosensores (Nagraik *et al.*, 2021), dispositivos microfluídicos (Ng *et al.*, 2021) y el uso de espectrometría (Vlasiou, 2023). También se cuenta con técnicas instrumentales por medio de aparatos especializados. Asimismo, se tienen los métodos químicos, combinados con otras técnicas para cuantificar la respuesta obtenida por detección

colorimétrica (Costa *et al.*, 2020) o quimiometría (Grassi *et al.*, 2023). Dichos métodos presentan la desventaja de que los precios son elevados, además utilizan reacciones químicas para llevar a cabo la detección y requieren de personal especializado para la interpretación de los datos.

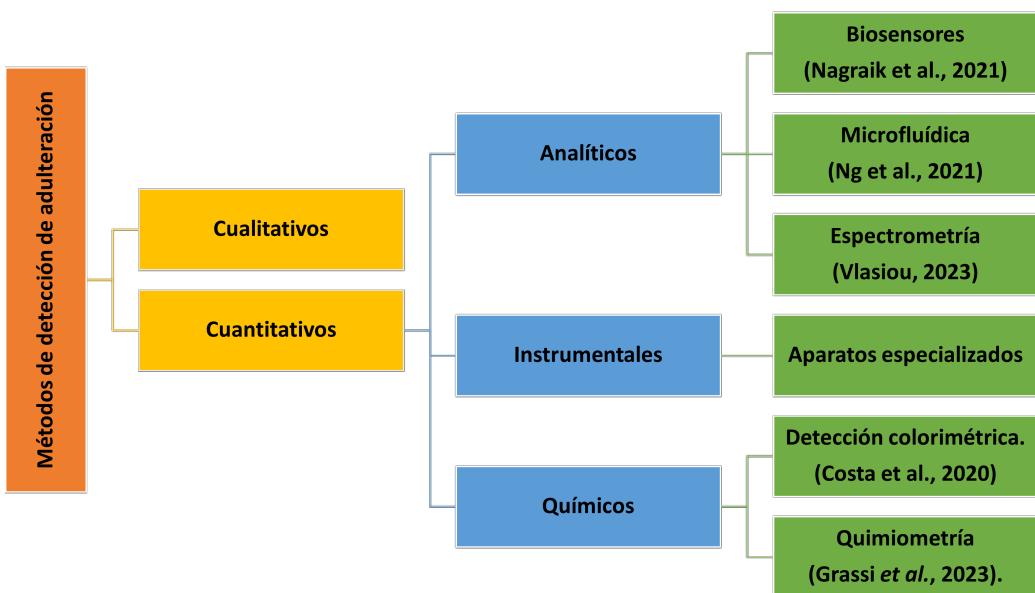


Figura 1.4: Métodos detección (Ionescu *et al.*, 2023)

Los métodos que se han desarrollado abarcan diferentes técnicas y parámetros, en los cuales se busca que la detección se realice de forma rápida y confiable, una de las características que se evalúa es el crecimiento de microorganismos, ya que la leche es un medio idóneo para su crecimiento (Poghossian *et al.*, 2019). En la figura 1.5 se muestra un gráfico de la proyección de tecnologías para detección de microorganismos, las cuales parten del uso de laboratorios, en el año 2000 hacia sistemas automáticos en línea para el año 2030. Los autores toman en consideración el tiempo de respuesta, la

sensibilidad y la complejidad en la preparación de las muestras (Mortari & Lorenzelli, 2014). De acuerdo con esta proyección se puede observar que la tendencia va hacia el desarrollo de sistemas que sean portables, compactos y que no representen un alto costo, por tanto, la perspectiva a futuro motiva a la mejora de metodologías para evaluar la calidad de la leche.

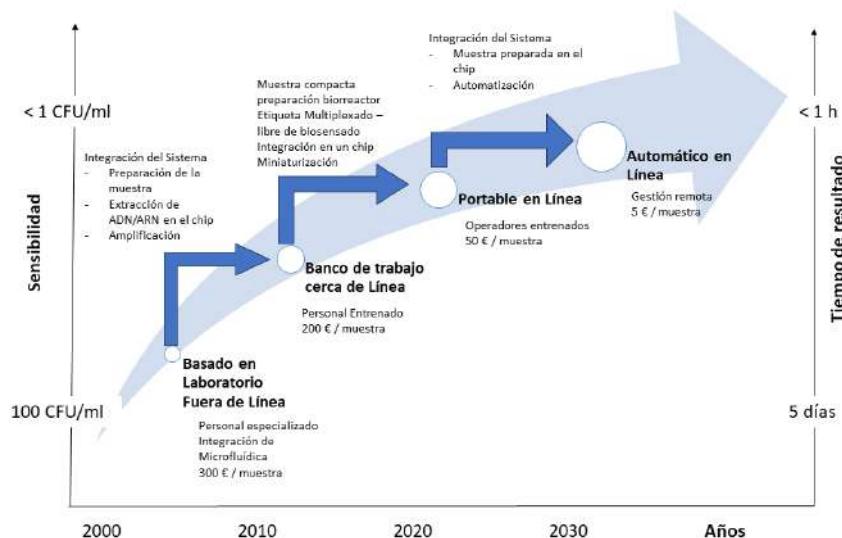


Figura 1.5: Guía básica para tecnologías de detección de microorganismos (Mortari & Lorenzelli, 2014)

Elementos asociados a la adulteración de la leche han sido detectados por medio de técnicas ópticas, como por ejemplo el uso de espectroscopía fotoacústica para detectar urea, peróxido de hidrogeno, almidón, hipoclorito de sodio y polvo de detergente (Sharifi *et al.*, 2023). Así también se han empleado sensores basados en fibra óptica para la detección de grasas (Gowri *et al.*, 2019) y urea (Jyoti *et al.*, 2022). El uso de nanosensores ha incursionado de igual forma en la detección de adulterantes por medio de técnicas electroquí-

micas y ópticas como fluorescencia, colorimetría, etc. (Himshweta & Singh, 2023). Asimismo, se han desarrollado técnicas de quimiometría que permiten combinar el uso de reacciones químicas con diferentes métodos para detectar la adulteración en la leche (Grassi *et al.*, 2023).

Por otra parte, el uso de propiedades eléctricas, tal como el cambio de impedancia ha sido empleado para detectar cambios en la leche procesada, marcando diferencias entre leche pasteurizada, UHT y en polvo (Huang *et al.*, 2023). Parte de los indicadores de la calidad de la leche es la medida del PH a través de espectroscopia de impedancia eléctrica, con la cual se puede determinar el deterioro de la leche o productos derivados como el yogurt (Meira *et al.*, Si 2023). De igual manera los adulterantes pueden ser detectados por medio de una lengua electrónica basada en medición de voltaje (Feltes *et al.*, 2023). Asimismo, el comportamiento dieléctrico (Zhao *et al.*, 2019) y capacitivo (Salmaz *et al.*, 2023) es evaluado para determinar la calidad de la leche. Aunque estas técnicas se usan por la sensibilidad de las pruebas y los parámetros que repiten el comportamiento, aún hay complicaciones en la adquisición de los instrumentos necesarios por ser de costos elevados, además para interpretar los resultados requiere conocimiento y personal entrenado.

### **1.1.2. Sensores basados en papel**

Actualmente se han diseñado plataformas de medición basadas en papel, que son amigables con el medio ambiente, ya que el material con el que está elaborado es celulosa o derivados del carbón. Además, estos sensores tienen una ventaja con respecto a otros fabricados con materiales convencionales ya

que el papel es un material que presenta una mayor elasticidad mecánica y estabilidad, además de que el proceso de manufactura es de bajo costo (Liu *et al.*, 2017). Este material ha sido utilizado para el diagnóstico en el cuidado de la salud (Mahato *et al.*, 2017), en el que destacan las características de los biosensores de papel como ASSURED (*Affordable, Sensitive, Specific, User-friendly, Rapid and Robust, Equipment free, Deliverable to all end-users*) [Accesible, sensible, específico, fácil de usar, rápido y robusto, libre de equipo, entregable a los usuarios finales], las cuales forman parte del desarrollo de las nuevas tecnologías basadas en este material. En la figura 1.6 se muestra una línea del tiempo que muestra el desarrollo de los sensores basados en papel, desde las pruebas de pH y de orina, pasando por el desarrollo de microPADs hasta el uso de machine learning para la detección de patógenos. En esta figura se puede observar que a medida que pasa el tiempo los dispositivos se van miniaturizando y emplean técnicas para realizar las mediciones en el sitio de la prueba (Mazur *et al.*, 2023).



Figura 1.6: Línea del tiempo de los sensores basados en papel. *μPad- Microfluidic Paper-based Analytical Device; e-PAD Electrochemical Paper-based Analytical Device; LFA - Lateral Flow Assay; POC - Point of care* (Mazur *et al.*, 2023).

La tendencia de miniaturizar los dispositivos ha llevado el desarrollo de

laboratorios en un chip (LOC por sus siglas en inglés *Lab-On-Chip*), en los cuales se considera el tipo de muestra a analizar, así como el proceso de fabricación, el esquema de detección y el material (sustrato) a emplear (Mitrogiannopoulou *et al.*, 2023). Tal como se muestra en la figura 1.7 a), el papel aparece como sustrato para fabricar este tipo de dispositivos, además se muestra un gráfico de las publicaciones realizadas desde el año 2014 hasta el 2022 (figura 1.7 b) en la que se puede observar el incremento en el desarrollo de dispositivos, por lo cual se puede concluir que el uso del papel es una buena alternativa para el desarrollo de sistemas de detección.

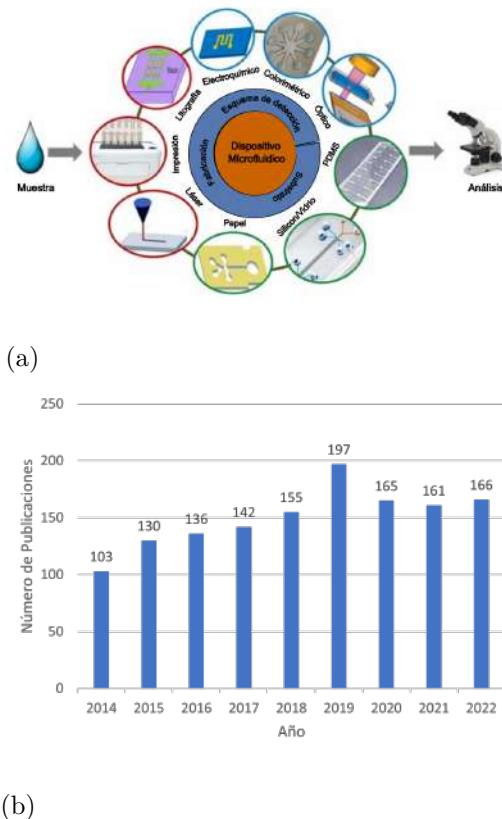


Figura 1.7: Métodos de detección fundamentales, materiales y técnicas de fabricación para LOC (Mitrogiannopoulou *et al.*, 2023).

En los últimos años el papel ha sido considerado como plataforma de sensado, por lo que se han reportado diversas técnicas para evaluar la respuesta química como método de detección. El tema de interés para este trabajo de tesis se orienta hacia los alimentos, en la figura 1.8 se muestran las técnicas comúnmente utilizadas para los sensores basados en papel, las cuales consisten en detección colorimétrica, en sensores basados en la distancia recorrida por el líquido analizado, electroquímica, espectrometría Raman de superficie mejorada (SERS por sus siglas en inglés *Surface – Enhanced Raman Scattering*)

ring) o detección híbrida en la que se utiliza una combinación de las técnicas mencionadas. Dichas técnicas emplean el uso de sustancias químicas, que son perecederas, lo cual representa una desventaja, además el proceso de fabricación para los canales de los sensores basados en distancia requiere de instrumentos específicos para la impresión y la técnica de espectrometría presenta la ventaja de que los resultados obtenidos poseen alta especificidad y sensibilidad, sin embargo, posee la desventaja de una baja repetibilidad (Okutan Arslan & Trabzon, 2023).



Figura 1.8: Métodos de detección en sensores basados en papel para monitoreo alimentos (Okutan Arslan & Trabzon, 2023).

Los sensores basados en papel han sido utilizados para la detección de parámetros de calidad de la leche, tal como el uso de papel celulosa para la detección de almidón (Govindarajalu *et al.*, 2019), de peróxido de hidrógeno

(Lima et al., 2020), o para la detección de adulteración (Tripathy *et al.*, 2019); para esto se requieren del uso de reacciones químicas para realizar pruebas de colorimetría las cuales son analizadas por medio del tratamiento de imágenes (Costa *et al.*, 2020). Las desventajas que presenta esta técnica es la ausencia de estudios que determinen el comportamiento del papel con las sustancias a medir asociadas a la calidad de la leche. Recientemente se ha desarrollado un sensor basado en papel para realizar la detección simultánea de 7 adulterantes en la leche por medio del diseño que se muestra en la figura 1.9, para este diseño emplean la propiedad del papel para transportar líquidos y el uso de reacciones químicas para realizar la detección (Patari *et al.*, 2022).

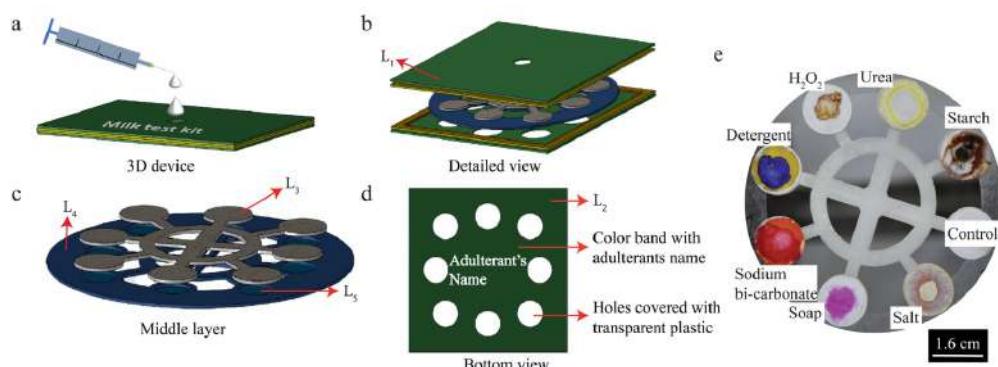


Figura 1.9: Esquema de detección simultánea para 7 adulterantes (Patari *et al.*, 2022)

La estructura interna del papel provee un excelente medio para transportar líquidos sin requerir un trabajo externo, esta propiedad ha sido estudiada para utilizarla en dispositivos micro - fluido basados en papel (Carrell *et al.*, 2019). Se han realizado estudios de los cambios en las propiedades mecánicas del papel causadas por la interacción con líquidos, tal como el modelado pa-

ramétrico para estudiar el rizado del papel, en el que determinan el módulo de Young para papel seco y saturado (Douezan *et al.*, 2011). Así también se ha estudiado la respuesta mecánica del papel debido a fenómenos de la interacción con agua como expansión y transporte de líquidos (Reyssat y Mahadevan, 2011). Recientemente se han realizado estudios que combinan modelos que describen el transporte de líquido con la respuesta mecánica (Cueva-Perez *et al.*, 2020) en plataformas miniaturizadas basadas en papel.

El uso de papel presenta diversas ventajas al emplearse como plataforma de sensado, posee propiedades que lo hacen adecuado para contener los químicos y permite visualizar el efecto de las reacciones de manera sencilla. El transporte de líquidos sin fuentes externas de bombeo, es otra ventaja que es explotada para reducir la complejidad en el diseño de dispositivos y disminuir los costos de fabricación e implementación. Los estudios realizados sobre la estructura del papel y las propiedades mecánicas presentan una ventaja ya que el desarrollo de sensores presenta una tendencia orientada a la miniaturización y a la reducción en la complejidad de preparación de las muestras a analizar, además de que es un material sustentable. En este proyecto de tesis se plantea el diseño de una viga basada en papel para evaluar la respuesta mecánica y eléctrica, las cuales son utilizadas para detectar diferencias en los líquidos evaluados, así como en las muestras de leche. La novedad de este trabajo radica en la medición de un fenómeno mecánico inducido por higroexpansión en lugar de uno químico, además de que no requiere instrumentación compleja o personal entrenado para poder realizar la evaluación del líquido.

## 1.2. Planteamiento del problema

La evaluación de la calidad de los alimentos ha ganado importancia debido a la necesidad de informar al consumidor si un producto es inocuo para la salud, de tal forma que esta evaluación de calidad no solo se enfoque en el producto final, sino desde su origen y los procesos de producción. Asimismo, se plantea que los métodos de evaluación sean sustentables para reducir el impacto ambiental. Por tal motivo, se ha incursionado en la búsqueda de métodos de detección que cumplan con esta característica. Una de las posibles soluciones a esta problemática es el uso de sistemas basados en papel, ya que estos sistemas cumplen con la característica de ser biodegradables, de fácil acceso y de bajo costo.

El diseño de dispositivos basados en papel, tal como los dispositivos microfluídicos, emplea diversas técnicas en las que se requiere el uso de equipo especializado, además del uso de reactivos o nanopartículas que representan una inversión considerable. Asimismo, el principio utilizado para la evaluación es químico, o bien requiere el uso de fuentes externas para energizar el sistema o trasportar líquido.

Los equipos para detectar adulteración varían en cuanto a costo y componentes que miden, los precios pueden variar desde \$550 hasta \$1800 USD. Los cuales no son accesibles para toda la población, además requieren de grandes cantidades de volumen para realizar las muestras. Por lo que se busca contar con sistemas de detección que cumplan con el acrónimo ASSURED, así también

se considera el uso de dosis pequeñas y que la adquisición a la materia prima sea accesible.

Los sistemas basados en papel que han sido reportados para la evaluación de la leche, emplean técnicas en las que requieren el uso de reacciones químicas con lo que se obtiene una respuesta colorimétrica, la cual ha sido analizada mediante procesamiento de imágenes. Así también, este material ha sido empleado como plataforma para la creación de dispositivos microfluídicos en los que se busca el uso de pequeñas dosis de líquidos. Sin embargo, los procesos de fabricación de estos dispositivos requieren el uso de equipo de laboratorio especializado o agentes químicos que no son accesibles para la mayoría de la población, además tienen la desventaja de ser perecederos.

Adicionalmente, se destaca la importancia de contar con sistemas que permitan detectar variables de interés en la leche, las cuales pueden ser físicas y no químicas como en los trabajos antes mencionados, ya que es posible que una adulteración de la leche influya en la respuesta física del dispositivo y se pueda determinar la viabilidad para detectar diferencias en el objeto de estudio. Por tanto, el análisis del papel como material propuesto es considerado para la evaluación de la respuesta esperada en el dispositivo. Esto lleva a considerar las propiedades mecánicas del papel, las cuales han sido previamente estudiadas en otros trabajos los cuales se mencionan en la introducción. En la tabla 1.1, se presentan las variables de entrada y salida que han sido estudiadas para sistemas basados en papel. La solución acuosa agregada a la viga es considerada como variable de entrada y, como parte

de las propiedades asociadas al papel, está el fenómeno de higroexpansión el cual provoca hinchezón en las fibras lo que induce una flexión, misma que es considerada la variable de salida. Diversos estudios se han llevado a cabo analizando esta característica por medio de soluciones acuosas binarias, sin embargo, no se ha aplicado este principio de funcionamiento con líquidos como la leche. Por esta razón, se plantea utilizar esta solución para evaluar el comportamiento en cuanto a su respuesta mecánica.

Parte de las ventajas de este mecanismo es el fenómeno de higroexpansión por el cual se hinchan las fibras de papel e induce el movimiento, además debido a la capilaridad no se requiere de un trabajo externo para mover el fluido , la desventaja radica en que es un proceso lento. Por esta razón, se integrará la respuesta eléctrica para evaluar el comportamiento del papel con la finalidad de obtener un sistema electromecánico para realizar el sensado. Por medio de la adición de un electrodo se tiene como variable de entrada un valor de corriente, que a su vez entrega cambio de voltaje como variable de salida. Esto representa la ventaja de que ayuda a acelerar la evaporación del líquido y como desventaja se tiene la expansión térmica del material, así como el cambio en el valor de resistencia.

Tabla 1.1: Consideraciones del diseño para la viga de papel

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Ventaja</b>	<b>Desventaja</b>
<b>Viga</b>	Agua	Flexión	Higroexpansión	Fenómeno lento
			Relajación fibras	Bicapa
<b>Electrodo</b>	Corriente	Voltaje	Aceleración en el tiempo de evaporación	Expansión térmica
			Señal eléctrica de salida	Resistencia

### 1.3. Justificación

El monitoreo en la calidad de los alimentos ha sido de gran impacto para asegurar las características adecuadas para el consumo, por lo que el uso de nuevos dispositivos que sean accesibles, de bajo costo, ecológicos y de fácil manejo, son necesarios para que propicien una lectura adecuada de los parámetros de interés que se medirán. La leche al ser un alimento de la canasta básica de los consumidores ha sido elegida materia de estudio, ya que presenta vulnerabilidad de ser adulterada por el hecho de ser un alimento muy demandado. De acuerdo con los estudios realizados sobre seguridad alimentaria en los que destacan la importancia de contar con métodos de producción sustentables, se considera que el monitoreo debe cumplir con esta característica que implica un bajo impacto ambiental, lo cual se pretende lograr por medio del uso de sistemas basados en papel.

El uso del papel ha sido ampliamente estudiado desde su proceso de fabricación hasta su aplicación como plataforma de medición. Actualmente, se han buscado métodos con la finalidad de reducir la huella ecológica que antiguamente se tenía al elaborarlo, así como la manera de reciclarlo. Además, las propiedades que posee permiten que la disposición final no cause gran impacto ambiental. Por lo que se considera como una alternativa ecológicamente factible, en comparación con los dispositivos elaborados con materiales no biodegradables.

Acorde a los antecedentes reportados es posible caracterizar líquidos mediante el uso de estos sistemas, en los cuales evalúan la respuesta mecánica del papel, así como el transporte de líquidos en este material. La implementación de este tipo de técnicas permitirá determinar si la detección que se realice con la leche pueda estar asociada a alguno de los parámetros relacionados con la calidad. Se buscará complementar las características del papel, tal como imbibición y transporte de líquidos, con el estudio de la respuesta eléctrica de este a fin de que describan la interacción del papel con otros líquidos.

## **1.4. Hipótesis**

Si se modelan, diseñan y caracterizan los sistemas electromecánicos basados en papel, es posible desarrollar plataformas que cumplan en parte con las características ASSURED para monitoreo de la calidad de la leche.

## 1.5. Objetivos

### 1.5.1. Objetivo general

Desarrollar una plataforma basada en papel mediante el modelado, diseño y caracterización de los sistemas electromecánicos para la evaluación de la composición de la leche.

### 1.5.2. Objetivos particulares

1. Caracterizar la respuesta eléctrica de los sistemas basados en papel mediante la integración del camino conductivo para predecir el comportamiento de su interacción con soluciones binarias.
2. Desarrollar un modelo multi-físico por medio de características como capilaridad e higromorfismo asociadas a la respuesta mecánica del papel para integrar el modelo eléctrico con los modelos existentes en la revisión de la literatura.
3. Diseñar la plataforma ASSURED mediante el uso del modelo multi-físico para determinar la geometría y materiales a utilizar.
4. Fabricar la plataforma por medio de la integración de la geometría y materiales a emplear para realizar los ensayos experimentales.
5. Caracterizar la respuesta de la plataforma por medio de ensayos con la leche con la finalidad de determinar el comportamiento de la estructura basada en papel a los parámetros seleccionados.

6. Validar los resultados obtenidos de la plataforma por medio de la realización pruebas con leche adulterada para comparar los parámetros seleccionados.

## 1.6. Planteamiento general

La metodología inicial propuesta se muestra en el diagrama de la Figura 1.10 la cual consiste en cuatro etapas para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto. Iniciando la caracterización del sistema evaluando soluciones binarias, siguiendo con la plataforma basada en papel en la que se considera el diseño y la fabricación. Posteriormente, se incluye la realización de pruebas experimentales y finalmente la validación de estas mediante un análisis comparativo. La descripción de cada etapa se presenta a continuación.

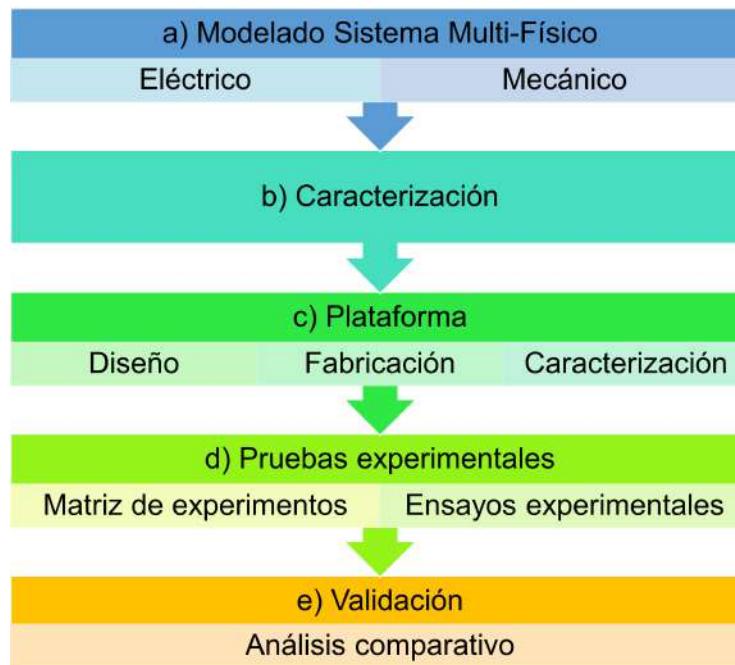


Figura 1.10: Planteamiento general (Autoría propia).

**a) Modelo del sistema**. Se realizará el modelo del sistema de tal manera que sea flexible a los cambios de geometría de la plataforma.

- **Modelado eléctrico.** Considerar las variables a medir como resistencia, capacitancia, impedancia.
- **Modelo multi físico.** En este modelo se integrarán las variables eléctricas y mecánicas.

**b) Caracterización.** Se realizará la caracterización de los modelos por medio de las mediciones experimentales en soluciones binarias, integrándolo con la parte eléctrica, las actividades a realizar se listan a continuación.

- Preparación muestras.
- Realización de mediciones.
- Determinación de variables a medir.

- c) **Plataforma.** Para la plataforma basada en papel se tiene la etapa de diseño para seleccionar la geometría de la misma y de la parte eléctrica (placas o electrodos). Así también se realizará la fabricación de esta, acorde a las dimensiones y la selección del material, con el uso del instrumental disponible en el laboratorio. Y de esta forma realizar la caracterización por medio de las mediciones con leche.
- d) **Pruebas Experimentales.** Una vez caracterizada la plataforma basada en papel se generará una matriz de experimentos que describa el comportamiento del modelo y de esta forma asociarlo a los parámetros que se esperan medir de la leche. Para los ensayos experimentales se realizarán las consideraciones de la cantidad en volumen para las muestras a analizar, así como la cantidad de veces que se realizarán las mediciones.
- e) **Validación.** La validación de los resultados obtenidos se realizará mediante el uso de marcas comerciales con relación al comportamiento que presenten al interactuar con el sistema.

# **Capítulo 2**

## **Fundamentación teórica**

Para llevar a cabo el desarrollo del proyecto de investigación, es necesario el conocimiento de las características asociadas a la materia de estudio que es la leche, así como las propiedades estudiadas del papel y la técnica de clasificación empleada para determinar la presencia de adulterantes en la leche.

### **2.1. Características de la leche**

Como materia de estudio para este proyecto se utilizará leche, la cual es definida en el Codex Alimentarius (CODEX STAN 206-1999) como la secreción mamaria normal de animales lecheros obtenida mediante uno o más ordeños sin ningún tipo de adición o extracción, destinada al consumo en forma de leche líquida o a elaboración ulterior (De, 2011). El valor nutricional de la leche está asociado a los componentes que la constituyen, los cuales varían dependiendo del animal de procedencia, para el caso de leche cruda de

vaca se muestran los principales componentes en la tabla 2.1. En la que podemos observar que el mayor componente corresponde al agua, además cuenta con elementos como carbohidratos en forma de azúcar de leche (lactosa), así como nitrógeno en forma de proteína (caseína), grasas y sales minerales, estos componentes convierten a la leche en un buen alimento, además son los principales elementos a evaluar en la calidad de la leche, como por ejemplo, las grasas contienen vitaminas esenciales para el cuerpo como la vitamina A y D.

Tabla 2.1: Composición leche de vaca (Guetouache et al., 2014)

Nutrientes	Composición
Grasas	3.7 %
Proteína total	3.5 %
Caseína	2.8 %
Lactosa	4.9 %
Sales Minerales	0.72 %
Agua	87.2 %

La leche puede someterse a pruebas de:

- Cantidad (volumen o peso)
- Organolépticas (aspecto, sabor y olor)
- Composición (contenido de materia grasa, sólidos y proteínas)
- Físicas y químicas (Microorganismos)
- Higiénicas (Limpieza y calidad)

- Adulteración (Agua, conservantes, sólidos añadidos)
- Residuos de medicamentos

En cuanto a la composición de la leche se cuentan con métodos convencionales o de rutina tal como la prueba Gerber (Butirómetro), para calcular la cantidad de grasa; la prueba de sólidos totales (TS), en el que evalúan el porcentaje en masa de las sustancias de la leche como grasa, proteína, lactosa, minerales y vitaminas (Draaiyer et al., 2009).

## 2.2. Sensores basados en papel

Los sensores basados en papel han sido muy demandados debido a que representan ventajas con respecto al costo, peso, son ecológicos, así como mecánicamente deformables. Las principales ventajas en estos tipos de sensores son listados por (Singh et al., 2018) de la siguiente manera: i) alta relación superficie- volumen, ii) propiedades de absorción, iii) acción capilar, iv) compatibilidad con muestras biológicas, v) grupos funcionales químicos para la inmovilización de proteínas y anticuerpos; y vi) esterilización directa. Así también (Gong y Sinton, 2017) listan las características asociadas a los sensores basados en papel de la siguiente manera: i) De bajo costo y ubicuo ,ii) Biocompatible, iii) Absorbe líquidos a través de la acción capilar y no requiere de fuentes externas de bombeo, iv) Puede ser fácilmente modificable (por ejemplo tratamiento químico, corte, plegado, apilado), v) Puede eliminarse de forma segura por incineración y vi) Escalable (por ejemplo apto para impresión y fabricación rollo a rollo) .

Existen estudios aislados de las propiedades del papel, en lo que respecta a la acción capilar se han obtenido modelos que describen el comportamiento del papel al interactuar con líquidos (Perez-Cruz, 2017), a continuación, se describen parte de las propiedades que se asocian al papel y que serán de utilidad para este trabajo de investigación.

### 2.2.1. Capilaridad

La capilaridad es la propiedad en virtud de la cual la superficie libre de un líquido puesto en contacto con un sólido sube o baja en las proximidades de este, según que el líquido lo moje o no. El flujo impulsado por la acción capilar en medios porosos se conoce como imbibición y es el principal mecanismo de transporte en materiales porosos similares al papel (Perez-Cruz et al., 2017). Este tipo de transporte está dominado por las propiedades del líquido y del medio poroso. El modelo no lineal de Richard es utilizado para describir el fluido de líquido en medios porosos, para un medio poroso insaturado en tres dimensiones, la concentración de líquido está dada por la ecuación 2.1.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}(D(\varphi) \nabla \varphi) - \frac{\partial}{\partial y}(D(\varphi) \nabla \varphi) - \frac{\partial}{\partial z}(D(\varphi) \nabla \varphi) = f \quad (2.1)$$

Donde:

$D(\varphi)$  : Difusividad humedad [ $m^2 s^{-1}$ ]

$\varphi(x, y, z, t)$  : Contenido de humedad en la posición  $(x, y, z)$  al instante  $t$   
[ $m^3 m^{-3}$ ]

$f = \frac{sink}{source}$  : Representa la entrada o salida de líquido [1/s].

$D(\varphi)$  representa la difusión de humedad y puede ser descrita en un marco de las ecuaciones de Richard por la ecuación 2.2, que se obtiene del modelo del proceso de transporte de líquido en papel (Perez-Cruz et al., 2017).

$$D(\varphi) = D_0 \varphi^n \quad (2.2)$$

Donde:

$D_0$  : Constante de difusividad equivalente. [ $m^2 s^{-1}$ ]

$n$  : Orden de la distribución del tamaño del poro.

### 2.2.2. Higromovimiento

El higromovimiento o higromorfismo es la propiedad que tiene un material de convertir una variación de humedad en movimiento mecánico. El papel es un material higroscópico que permite la generación de movimiento por higromorfismo. La imbibición en una tira de papel da lugar a una modificación de su contenido inicial de humedad volumétrica, esta redistribución transitoria de la humedad induce dos fenómenos inherentes, que juegan un papel fundamental en la respuesta característica de flexión.

- Las fibras de papel se hinchan a medida que aumenta su contenido de humedad, es decir las fibras de papel se expanden (deformación higroexpansiva). Se ha sugerido que la expansión ocurre cuando las moléculas de agua se rompen y reemplazan los enlaces entre las cadenas de celulosa.
- Se produce una reducción aparente del módulo de Young del papel a

medida que aumenta el contenido de humedad en las fibras. Este efecto se debe a la interacción de cadenas de celulosa y agua, que actúa como plastificante que reduce el módulo de Young.

El módulo de Young ( $E$ ) es dependiente de la concentración del líquido, lo que se basa en la función empírica de los resultados experimentales observados en (Lee et al., 2016), en el cual proponen la caracterización de la naturaleza higro-expansiva del papel debido a la hinchazón por humedad. Esta función está representada por la ecuación 2.3.

$$E(x, y, z, \varphi) = \frac{E_{dry}}{m^{-1} + (1 - m^{-1})e^{\beta\varphi(x,y,z,t)}} \quad (2.3)$$

Donde:

$E_{dry}$  : Módulo de Young para papel seco [ $Nm^{-2}$ ]

$m$  : Proporción entre la saturación módulo de Young y  $E_{dry}$ .

$\beta$  : Constante de relajación que determina la transición dinámica entre seco y húmedo.

### 2.2.3. Técnica kNN (k-Nearest Neighbors)

Este algoritmo es un clasificador que asigna una clase basada en los  $k$  vecinos cercanos (k Nearest Neighbors por sus siglas en inglés), mismos que tienen más parecido al punto que se está analizando (Wildeboer et al., 2020). La proximidad se calcula por medio de la distancia medida dada por la ecuación 2.4.

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2.4)$$

# **Capítulo 3**

## **Metodología y materiales**

En esta sección se describe el proceso llevado a cabo para la elaboración del proyecto de tesis, mediante el cual se evaluó la respuesta electromecánica del papel, el diagrama esquemático es mostrado en la figura 3.1. Este consta de cinco partes, en primer lugar, está la etapa de modelado, en la que se evalúo la respuesta mecánica del papel y el calor generado eléctricamente por el camino conductivo. En segundo lugar, está la etapa de diseño, en la que se establece la geometría de la viga, además de la instrumentación requerida para el sistema de adquisición. Posteriormente, la selección del objeto de estudio es realizada, la cual consta de tres opciones: soluciones binarias; leche UHT (Ultra High Temperature = Ultra Alta Temperatura) y otros alimentos bebibles; y leche UHT adulterada. A continuación, se sigue con la etapa de pruebas experimentales en donde las variables a medir, así como la matriz de experimentos son definidas. Finalmente, en la etapa de análisis de resultados se ejecuta el procesamiento de imágenes y se hace el análisis estadístico de los datos obtenidos. Cada una de las etapas se detallan

en las siguientes subsecciones.



Figura 3.1: Metodología (Autoría propia)

### 3.1. Modelo

En esta sección se describe el principio de funcionamiento de la viga de papel con el camino conductivo, para lo cual se probó un circuito de calefacción con diferentes geometrías mediante un análisis numérico. Para poder diseñar el elemento sensor de esta investigación fue necesario evaluar si este calefactor reduce el tiempo de evaporación del agua en la celulosa sin contribuir significativamente en la deformación por expansión térmica del papel. En la figura 3.2 se muestra el esquema de las variables que se midieron para evaluar la respuesta, las cuales fueron de deformación mecánica y el calor generado eléctricamente. Se realizó el cambio del material de base por celulosa

que corresponde a las características del papel, en el que se implementó una variación del coeficiente térmico de expansión ( $\alpha$ ) con la finalidad de observar el efecto en la respuesta mecánica a través de la deflexión.



Figura 3.2: Variables seleccionadas para modelar el circuito de calefacción (Autoría propia)

La geometría propuesta para este análisis se muestra en la figura 3.3. Se realizó un análisis paramétrico, se varió el grosor de 2 a 8 mm en incrementos de 2 mm, 40 mm de altura y 15 mm de ancho . Las gráficas de esfuerzo (A) y el calor generado eléctricamente (B), muestran que la variación en el valor del coeficiente térmico de expansión ( $\alpha$ ) influye en el movimiento generado. Para cada grosor se realizó un barrido desde el valor de  $-17.64\text{e-}5[1/K]$  hasta  $-1.64\text{e-}5 [1/K]$  (Wada et al., 2010).. La distribución de calor no cambió de manera significativa en la evaluación de la respuesta, la que si presentó cambios considerables fue la deformación mecánica, en la que se observó que la dirección del desplazamiento fue negativa.

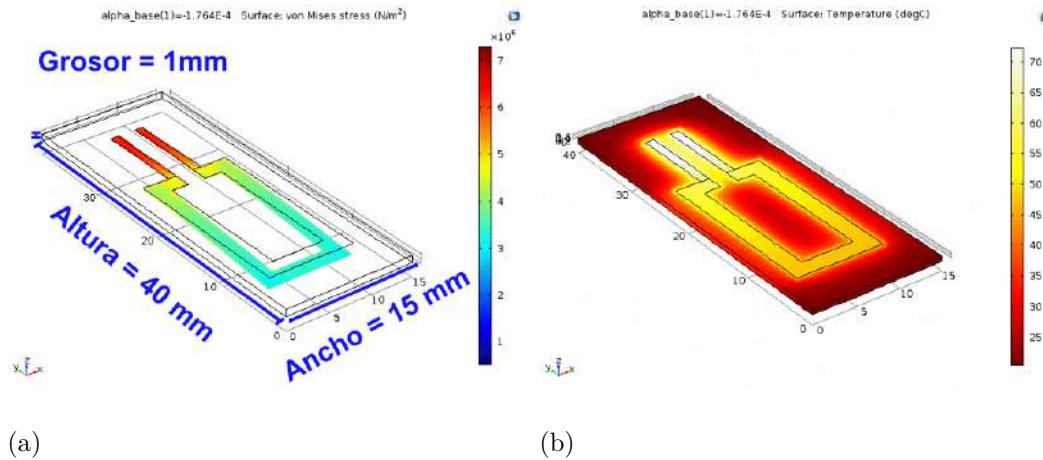


Figura 3.3: Geometría modelo de Comsol; a) Deformación mecánica; b) Distribución de calor.

Se midió el desplazamiento alcanzado por la parte libre de la viga y fue graficado con respecto al barrido del coeficiente  $\alpha$ , para cada caso de grosor de la base de celulosa, tal como se muestra en la figura 3.4. En esta gráfica se puede observar que la tendencia del desplazamiento hacia abajo es más marcada en el papel con grosor de 2 mm (0.002) y va incrementando a medida del cambio en el valor del coeficiente. De igual manera para los otros casos del grosor de papel, el desplazamiento hacia abajo no es tan marcado, tal como puede observarse para el grosor de 8 mm (0.008), en que el desplazamiento es menor comparado con el de 2 mm. La ecuación para cada uno de los casos se muestra en la figura, se puede observar que la respuesta es lineal, por lo que acorde a estos resultados se procedió a realizar la parte experimental.

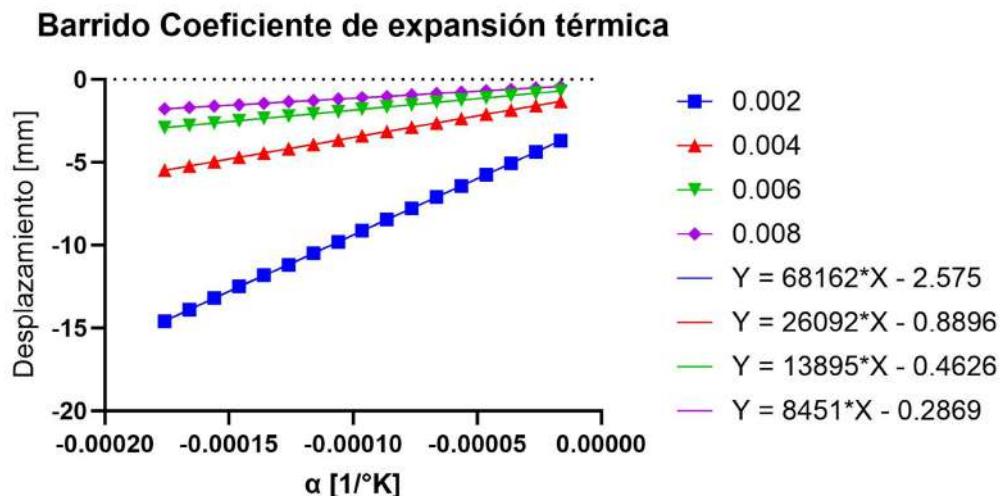


Figura 3.4: Gráfica de la respuesta de desplazamiento en diferente grosor de papel para un barrido de valores del coeficiente de expansión térmica  $\alpha$

Debido a la falta de información sobre el valor del coeficiente térmico de expansión del papel filtro empleado en este proyecto, se procedió a la elaboración de pruebas experimentales para evaluar la deformación por la expansión térmica . Las pruebas consistieron en el empleo de diferentes tintas conductivas, así como una variación de voltaje en las terminales con la finalidad de comprobar si se induce movimiento en la viga de papel. Durante este proceso se comprobó que el desplazamiento es principalmente inducido por la adición de líquido, lo que lleva a un fenómeno de higroexpansión debido a la expansión de las fibras del papel induciendo un movimiento en la parte libre de la viga, cuyo diseño se presenta en la sección 3.2.

## 3.2. Diseño

### 3.2.1. Vigas de papel

En primera instancia se establece la geometría de la viga basada en papel, así como del camino conductivo. Las hojas de papel filtro fueron cortadas con láser mediante la interfaz Mini CNC v0.0 en la que se cargó el código G para obtener la geometría de la viga en 35x5x1mm, correspondiente al largo, ancho y grosor. Una vez cortadas, se procedió a la adición del camino conductivo en la cara superior, tal como se muestra en la figura 3.5 con un ancho de 2 mm y de largo 30 mm. Como comparativa para el tamaño se colocó junto a una moneda de 2 euros.

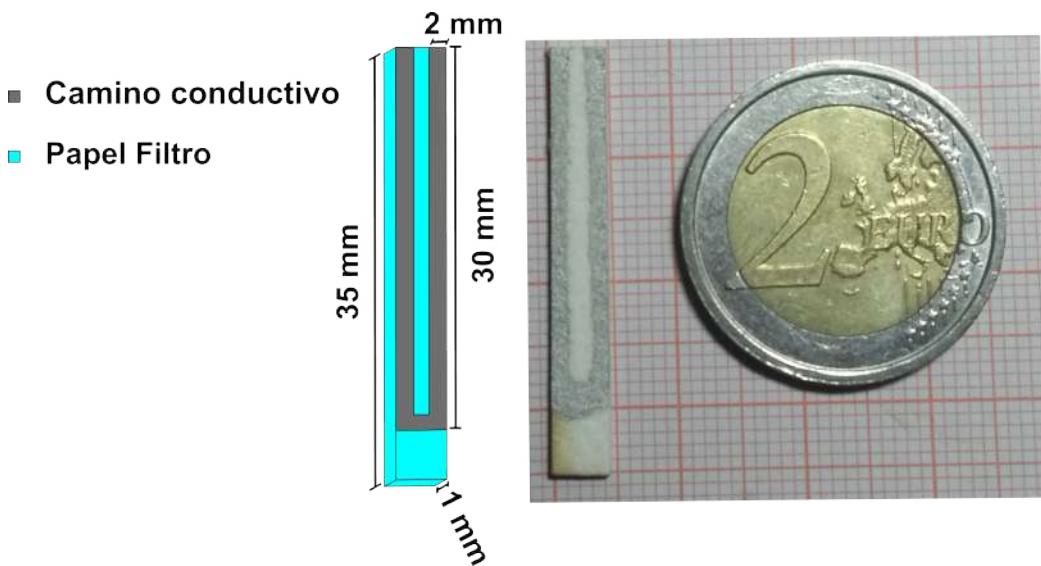


Figura 3.5: Geometría de la viga basada en papel (Autoría propia).

### 3.2.2. Sistema de adquisición

Para evaluar la respuesta electromecánica del papel se implementó una serie de etapas tal como se muestra en el esquema 3.6, las cuales constan de un control de corriente (A) que mantiene un valor de 330 mA. Este es conectado al camino conductivo de la viga en voladizo desde la parte fija, el sistema donde se encuentra aísla la iluminación externa y los factores ambientales (B). De aquí se miden las señales de voltaje  $v(t)$  y corriente  $i(t)$ , mediante el uso de un microcontrolador (C) que envía las señales vía bluetooth. Así también la imagen del perfil de la viga es obtenida con el uso de una cámara (D), que envía los datos vía USB (Universal Serial Bus por sus siglas en inglés) con la finalidad de medir el desplazamiento del papel al interactuar con las muestras líquidas. La imagen de perfil, los valores de voltaje y corriente son enviados hacia la interfaz de usuario UI (User interface por sus siglas en inglés).

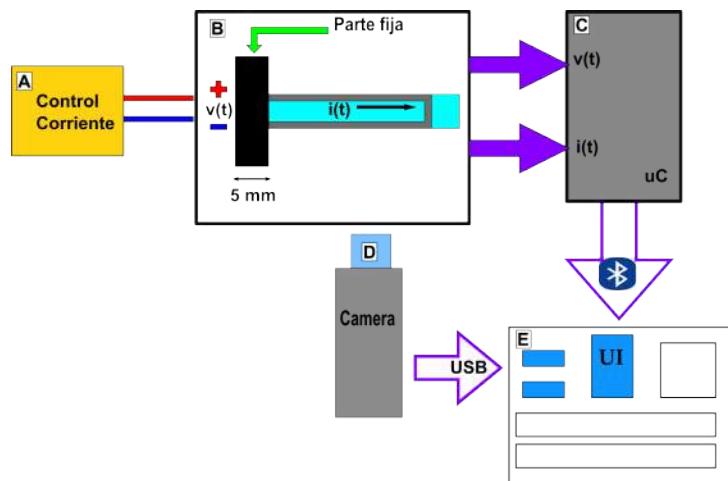


Figura 3.6: Esquema de sistema de adquisición (Autoría propia).

De forma general el sistema de adquisición consta de dos partes, en primer lugar esta el hardware, que se encarga del control de corriente y de suministrar energía al microcontrolador. Además, se tiene un sistema aislado que contiene la parte donde se conecta la viga. En segundo lugar se tiene la parte de software que fue implementada por medio de una interfaz de usuario, con la finalidad de almacenar los datos.

### 3.2.2.1. Hardware

El diseño de la placa de circuito impreso PCB (Printed Circuit Board por sus siglas en inglés) incluye el control de corriente (A), el acondicionamiento de señal (B), la adquisición y envío de datos por medio del microcontrolador y el módulo de bluetooth (C). Tal como se muestra en la figura 3.7. El diagrama esquemático se presenta en el anexo F

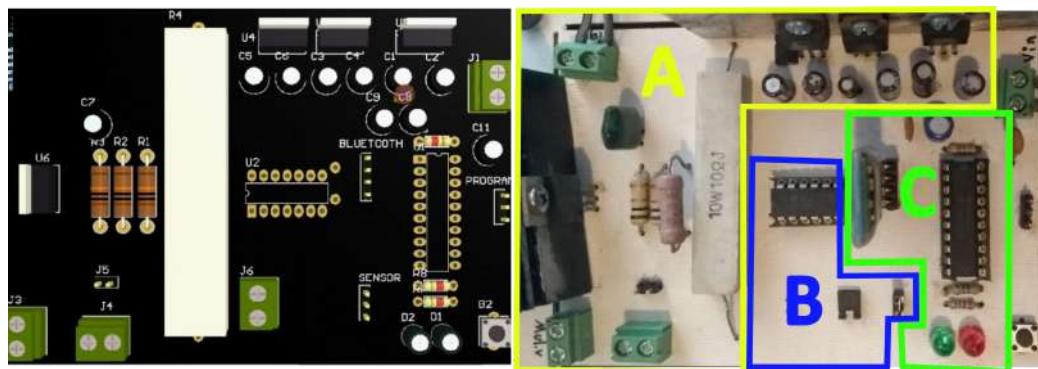


Figura 3.7: Ensamble de circuito para control de corriente y adquisición de datos vía bluetooth

La placa fue elaborada en la máquina LPKF Laser & Electronics (A), con la que se obtiene la placa del circuito impreso para ensamblar los componentes electrónicos tal como se muestra en la figura 3.8 (B).



Figura 3.8: Fabricación de circuito impreso

El sistema aislado que se diseñó para la realización de las pruebas se muestra en la figura 3.9, el cual cuenta con un humidificador para mantener un ambiente constante dentro del sistema (A), además se diseñó una plataforma de tal forma que la viga de papel quedara de manera fija en la parte de las terminales del camino conductivo, así como en la misma posición para realizar la captura de imagen (B). También, se colocó una placa de plexiglas en el fondo del campo de visión de la cámara para colocar papel milimétrico o color blanco, con la finalidad de crear contraste al momento de procesar la imagen. El sistema cuenta con un mecanismo para la colocación de las gotas con la pipeta, el cual se fija a 1 cm de la parte fija de la viga. Adicionalmente, se implementó un sistema de iluminación para uniformar la captura de imagen. Este es alimentado por una fuente de voltaje de DC (Direct Current por sus siglas en inglés), de igual manera se alimenta el circuito de adquisición de datos (C). La placa diseñada para el sistema de adquisición se colocó de tal forma que conectara con la fuente de alimentación y con la viga de papel (D). Finalmente, el sistema cuenta con un microscopio digital (E), con el cual se realiza la captura del perfil de la viga por medio del programa xplovie, en donde se configura el número de imágenes por minuto, así como el tiempo

de captura.

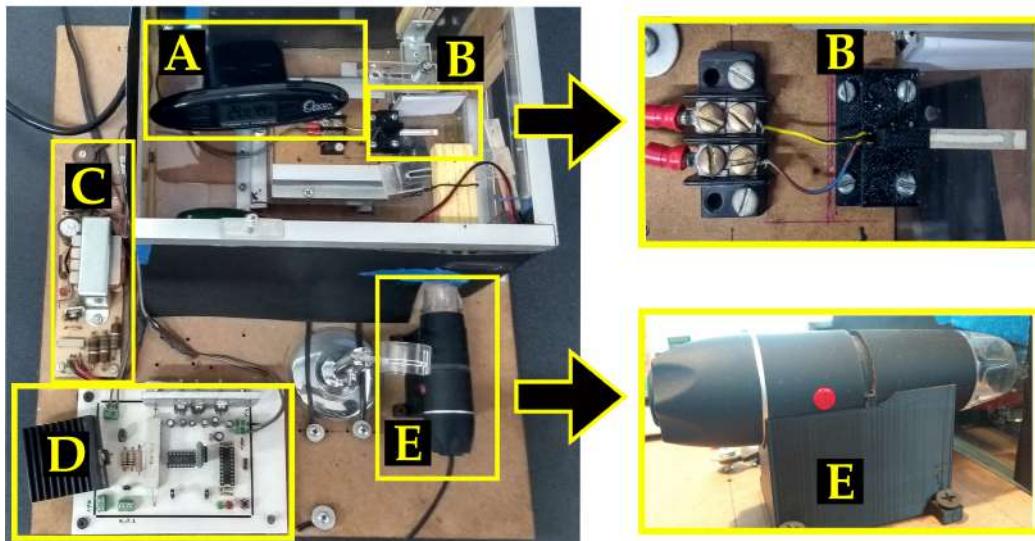


Figura 3.9: Sistema aislado para realización pruebas. A) Humidificador; B) Base para colocación viga; C) Fuente de alimentación; D) Control de corriente; E) Microscopio manual.

### 3.2.2.2. Software

Se desarrolló una interfaz de usuario (UI User Interface por sus siglas en inglés) ADS-SisteMI, la cual se registró ante INDAUTOR con el número de registro 03-2023-050812490700-01 (Anexo D). En la figura 3.10 se muestran los principales componentes de la interfaz. Iniciando con la Conexión de comunicación (A), en esta sección se selecciona el puerto COM en el que se conectó el módulo de bluetooth del sistema de adquisición, también se tiene el botón ‘Connect’ para establecer la comunicación. La ruta de almacenamiento de datos (B), se refiere a la ubicación del archivo. mat que genera la interfaz con los datos de voltaje y corriente, así como el valor RMS (Root Mean

Square). De igual manera la ruta de sincronización de imagen se refiere a la ubicación de la secuencia de imágenes capturadas por el microscopio digital, las cuales se sincronizan con la captura de voltaje del sistema de adquisición. En la sección de despliegue de datos (D) se puede visualizar en tiempo real la señal de voltaje y corriente. La interfaz también despliega el historial de eventos (E) en donde se puede seguir la secuencia de instrucciones que se están llevando a cabo, como la conexión establecida del módulo de comunicación o la espera de captura de imagen. El tiempo de adquisición es establecido por medio de dos ventanas, la primera corresponde al tiempo en segundos y la segunda se refiere al número de ventanas que se capturarán, por ejemplo, si se seleccionan 60 segundos para 35 ventanas, la interfaz capturará datos por 35 min. Esta sección también cuenta con el botón de limpieza ‘clean’ y de ‘stop’. Se puede activar o desactivar la visualización de las señales de voltaje y corriente con la opción ‘plot signals’. Los valores para voltaje y corriente son mostrados de forma numérica en tiempo real, así también se despliega el número de la imagen capturada. Finalmente se tiene el despliegue de imagen (G) en donde se visualiza la imagen del perfil de la viga.

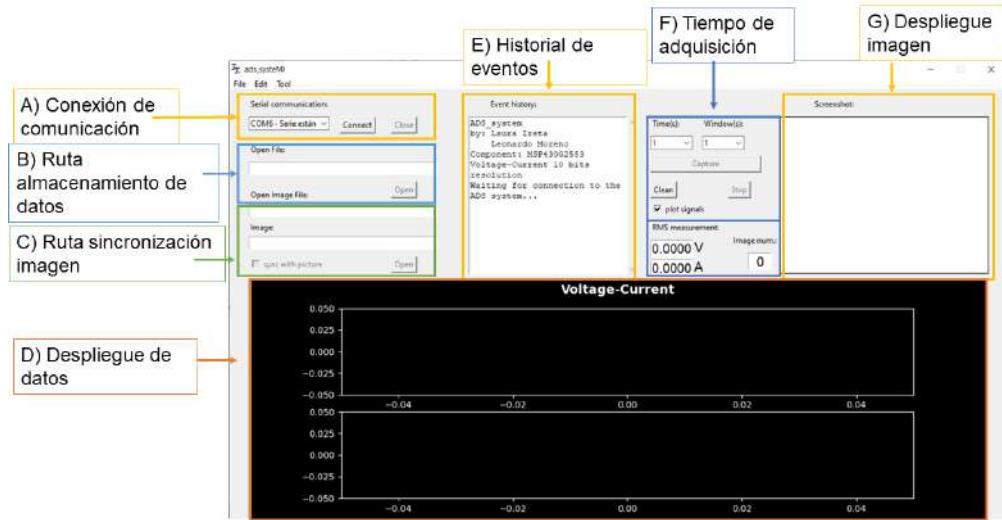


Figura 3.10: Interfaz de Usuario UI.

### 3.3. Objeto de estudio

La respuesta del papel al interactuar con líquidos puede ser analizada por medio de la viga en voladizo en conjunto con el camino conductivo. Para tal fin se emplearon tres objetos de estudio: Soluciones binarias, leche UHT vs otros alimentos bebibles, y leche UHT adulterada.

#### 3.3.1. Soluciones binarias

Para iniciar con la evaluación de la respuesta electromecánica del papel se comenzó con la evaluación de soluciones de agua destilada en combinación con alcohol etílico. Se realizó la combinación de ambos en una proporción de volumen 50/50 (v/v) para una cantidad de 100 ml. Las características de

ambas soluciones se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Características del agua destilada y alcohol etílico absoluto

Característica	Agua destilada	Alcohol Etílico absoluto
Fabricante	A.C.S Meyer	J.T. Baker
Peso molecular [g/mol]	18.015	46.07
Formula química	$H_2O$	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH

### 3.3.2. Leche UHT y otros alimentos bebibles

Para el propósito de este proyecto de tesis se evalúo la respuesta del papel con tres marcas diferentes de leche UHT, etiquetadas como M1, M2 y M3. Además, se realizó la comparativa con otros alimentos bebibles como jugo comercial (S1), leche de almendras (S2) y agua (S3). En la tabla 3.2, se presenta la información nutrimental dada por el fabricante, la cual servirá como referencia para la comparativa entre las marcas de leche y los otros alimentos, para el caso del agua no se aplican los ingredientes dados para los demás por esa razón se omite en la tabla de información nutrimental.

Tabla 3.2: Información Nutrimental marcas de leche y alimentos bebibles.

	M1	M2	M3	S1	S2
<b>Cantidades por</b>	<b>100 ml</b>				
<b>Contenido energético</b>	61.4 kcal 257.2 kJ	57 kcal 238kJ	61 kcal 256kJ	212.5 kJ 50 kcal	81.3kJ 19.6 kcal
<b>Hidratos de carbono disponibles</b>	5.6 g	4.8 g	4.8 g	12.5 g	0.6 g
<b>Azúcares</b>	5 g	4.8 g	4.8 g	12.5 g	0.1 g
<b>Azúcares añadidos</b>	0 g	0 g	0 g	12.5 g	0
<b>Fibra dietética</b>	0 g	0 g	0 g	0 g	0.7 g
<b>Proteínas</b>	3 g	3.1 g	3.1 g	0 g	0.7 g
<b>Grasas Totales</b>	3 g	2.8 g	3.3 g	0 g	1.6 g
<b>Grasas Saturadas</b>	1.8 g	1.8 g	2.1 g	0 g	0.1 g
<b>Grasas Trans</b>	0 mg	0,0 mg	0 mg	0 mg	0 mg
<b>Sodio</b>	52 mg	50 mg	46 mg	4 mg	64.6 mg
<b>Calcio</b>	120 mg	110 mg	115.8 mg	NA	NA
<b>Vitamina A*</b>	31 ug	60 ug	66.3 ug	NA	NA
<b>Vitamina D3*</b>	0.5 ug	0,62 ug	0.5 ug	NA	NA

### 3.3.3. Leche UHT adulterada

En la evaluación de calidad de la leche se tiene la parte de detectar adulteración, la cual es llevada a cabo por el aditamento de sustancias. Para este proyecto se consideró agua destilada para combinar con la leche en porcentajes de 0 %, 5 %, 10 %, 20 %, 50 %. Con la finalidad de realizar la comparativa en la respuesta electromecánica también se realizó la adulteración con leche de soya y agua oxigenada en un porcentaje de 10 %. En la tabla 3.3 se muestran las características dadas para el agua oxigenada.

Tabla 3.3: Características del agua oxigenada.

Característica	Agua Oxigenada
Fabricante	ZUUM
Peróxido de Hidrógeno (equivalente a 11 volúmenes de oxígeno)	3.34 g
Acetanilidad (estabilizador)	0.05 g
Agua destilada c.b.p.*	100 ml
Formula química	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>

\* c.b.p. - cuanto baste para

### 3.4. Pruebas experimentales

En esta etapa de la metodología se realiza la selección de las variables a medir, la cual se determinó por la respuesta mecánica del papel al interactuar con líquidos y por el voltaje medido en el camino conductivo añadido a la viga. Por lo tanto, se tienen dos variables de interés a medir que corresponden al desplazamiento y al voltaje en las terminales de la viga. Además, es importante considerar el volumen a emplear de las muestras de cada objeto de estudio, ya que éstas al añadirse a la viga de papel inducen un proceso de activación tal como se muestra en la figura 3.8. El proceso de activación inicia con la viga en el estado inicial (a), en la que circula la corriente constante. La viga permanece conectada por 5 minutos y luego se añade la gota de solución a 1 cm de la parte fija (b), lo que provoca un movimiento en el papel inducido por el fenómeno de higroexpansión hasta alcanzar un des-

plazamiento máximo (c) y finalmente retornar al punto de origen debido al calor generado por el camino conductivo (d).

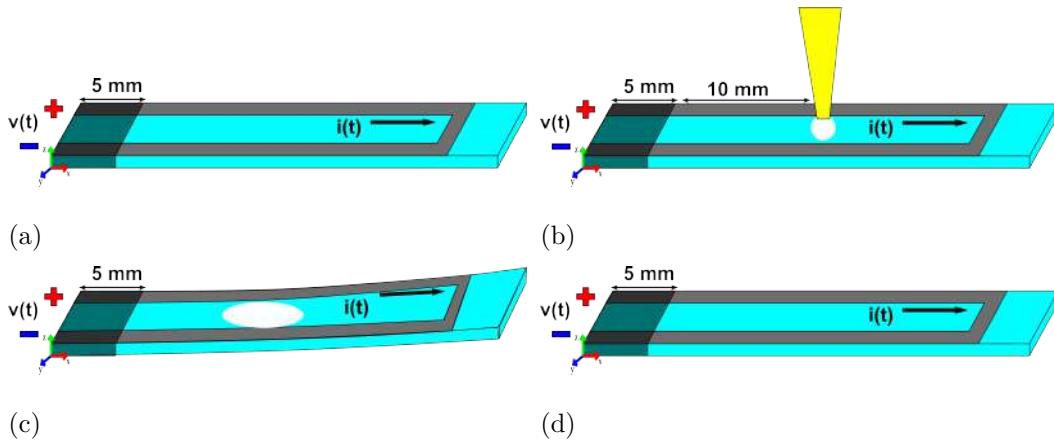


Figura 3.11: Esquema de Activación/desactivación en la viga de papel (Autoría propia).

Siguiendo las etapas mencionadas anteriormente, en la figura 3.12 se muestra el comportamiento de la gráfica de desplazamiento [mm] con respecto al tiempo [min]. Como se puede observar, durante la etapa de precalentado de la viga (A) no se tiene un cambio significativo en el desplazamiento, hasta que se añade a gota de solución (B) donde comienza a incrementar hasta alcanzar el punto máximo (C) y finalmente, debido al calor generado por el camino de plata la viga regresa hacia su posición inicial, sin alcanzarla totalmente (D).

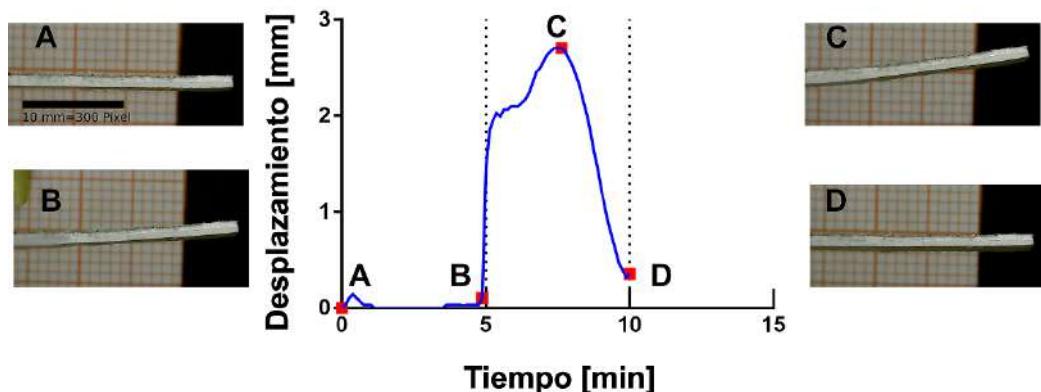


Figura 3.12: Comportamiento del desplazamiento Activación/desactivación viga de papel.

La puesta del experimento se muestra en la figura 3.13 En primer lugar, se realiza la conexión de la viga en el sistema aislado (A), una vez colocada se mide el valor de resistencia del camino conductivo y se procede a inyectar la corriente de 330 mA, cuyo valor es constante durante el tiempo que dura el experimento. En segundo lugar, se procede a configurar los parámetros en la interfaz (B), que se refieren a la conexión vía bluetooth, el tiempo total del experimento, la ruta de almacenamiento de la señal de voltaje y corriente, así como la ruta de la captura de imagen. También se realiza la conexión del microscopio digital, el cual se configura para capturar 8 imágenes por minuto. Posteriormente se procede a la evaluación del objeto de estudio (C), de cada muestra a analizar se extraerá una dosis con el volumen definido en la matriz de experimentos. Una vez iniciado el tiempo de captura de datos, se deja un tiempo de 5 minutos para calentar el camino conductivo, después se procede a realizar la activación del movimiento del papel con la adición de la gota de solución (D), ésta se coloca a 1 cm de la parte fija de la viga, después la siguiente activación se realiza 5 minutos después de la primera activación

y así sucesivamente dependiendo del número de activaciones establecido en la matriz de experimentos. Finalmente, se obtiene la secuencia de imágenes del perfil, así como la señal de voltaje y corriente.

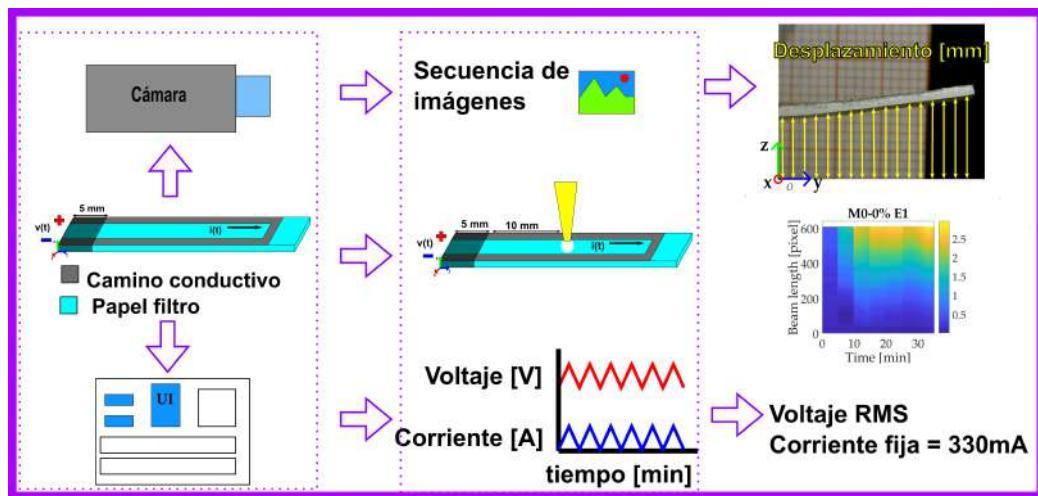


Figura 3.13: Puesta experimento.

Para cada uno de los objetos de estudio se estableció una matriz de experimentos, en la que se toma en consideración el volumen de la dosis, la cantidad de muestras a analizar, el número de experimentos a realizar, la cantidad de activaciones, el tiempo del experimento y las variables a medir. En la tabla 3.4 se muestra la matriz de experimentos para las soluciones binarias, la cual considera una prueba de agua destilada para 10 activaciones de  $20 \mu\text{L}$  de volumen, realizando el experimento por 7 veces. De igual manera, para la solución de agua y alcohol en una proporción de volumen 50/50, se consideran 3 pruebas de 20, 15 y 10  $\mu\text{l}$  de volumen. El tiempo para cada experimento fue de 60 min y las variables que se midieron fueron desplazamiento en un punto fijo en la parte libre de la viga y el voltaje.

Tabla 3.4: Matriz de experimentos soluciones binarias.

Volumen	Solución	Número de Experimentos	Número de Activaciones	Tiempo	Variables Medidas			
20 $\mu\text{l}$	Agua	7	10	60 min	Desplazamiento			
20 $\mu\text{l}$	Agua				Voltaje			
15 $\mu\text{l}$					Corriente			
10 $\mu\text{l}$	-Alcohol							

En el segundo caso de estudio, se emplearon tres marcas de leche UHT, dos alimentos bebibles y agua destilada. La matriz de experimentos se muestra en la tabla 3.5, misma que indica que el volumen de la dosis fue de 20  $\mu\text{l}$ , las soluciones fueron tres marcas de leche UHT etiquetadas como M1, M2 y M3, jugo comercial (S1), leche de almendras (S2) y agua destilada (S3). Se realizaron 5 activaciones para cada experimento de los cuales se evaluaron tres. El tiempo total fue de 35 minutos y las variables medidas fueron el desplazamiento a lo largo de toda la viga, el voltaje y la corriente la cual es fija a 330 mA.

Tabla 3.5: Matriz de experimentos marcas de leche UHT y otros alimentos bebibles.

Volumen	Solución	Número de Experimentos	Número de Activaciones	Tiempo	Variables	Medidas
20 $\mu$ l	Leche UHT 3 Marcas (M1, M2, M3)	3	5	35 min	Desplazamiento	Voltaggio Corriente
	Jugo Comercial (S1)					
	Leche Almendras (S2)					
	Agua destilada (S3)					

Finalmente, en la tabla 3.6 se muestra la matriz de experimentos para el caso de estudio de leche UHT adulterada, en lo que se emplearon porcentajes de 0 %, 5 %, 10 %, 20 % y 50 % para adulterar una cantidad de 10 ml de leche UHT entera. En este caso se llevaron a cabo 7 experimentos, con 5 activaciones de 20  $\mu$ L de solución, el tiempo para cada experimento fue de 35 minutos. De igual manera, se realizó para los adulterantes de leche de soya y agua oxigenada, las cuales fueron añadidas a la leche en una proporción de 10 %. Las variables medidas fueron el desplazamiento a lo largo de toda la viga, el voltaje y la corriente fija. Cabe destacar que las muestras para este experimento fueron almacenadas a una temperatura de 4°C. Para los datos obtenidos de desplazamiento se realizó un análisis estadístico, el cual se detallará en la siguiente sección para cada caso de estudio, así también se

describe la manera en que se realizaron las mediciones de desplazamiento de la viga.

Tabla 3.6: Matriz de experimentos leche UHT adulterada.

Volumen	Solución	Número de Experimentos	Número de Activaciones	Tiempo	Variables Medidas
Agua	0 %	6	5 gotas de 20 $\mu$ l	35 min	Desplazamiento Voltaje Corriente
	5 %				
	10 %				
	20 %				
	50 %				
	Soya				
Agua oxigenada	10 %				

# **Capítulo 4**

## **Resultados y discusión**

En este capítulo se presentan el análisis realizado a los datos obtenidos, así como los resultados para cada caso de estudio, iniciando con las soluciones binarias, las cuales se realizaron para validar el principio de funcionamiento del sensor basado en papel. Siguiendo con la prueba en diferentes marcas de leche y alimentos bebibles, las cuales fueron realizadas para demostrar el comportamiento de la viga para diferentes tipos de alimentos bebibles. Finalmente se muestran los resultados obtenidos para la leche UHT adulterada con lo que se valida la labor del sensor para detectar aditamentos en la leche.

### **4.1. Análisis de Resultados**

Una vez definida la matriz de experimentos para cada caso de estudio, ahora se procede al análisis de los datos obtenidos. Como se mencionó anteriormente los datos que se obtienen con cada experimento es la señal de voltaje y corriente, así como la secuencia de imágenes, las cuales se procesan

mediante el software ImageJ, en donde se realiza la medición del desplazamiento de la viga. Para el primer caso de estudio se seleccionó un punto en la parte libre de la viga para realizar la medición, tal como se reportó en el trabajo (Ireta-Muñoz et al., 2022). Para el caso de las marcas de leche y la adulteración, se realizó la medición del desplazamiento debajo de la viga, realizando un barrido a lo ancho de la imagen que corresponde a 640 píxeles, tal como se muestra en la figura 4.1.

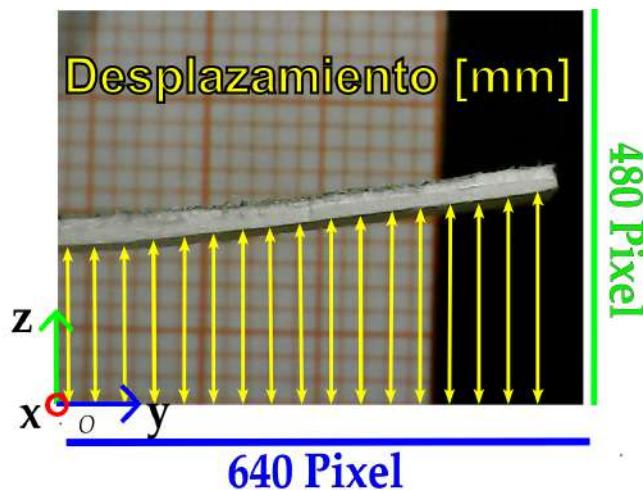


Figura 4.1: Esquema medición de desplazamiento bajo la viga.

Posteriormente, los datos obtenidos para cada imagen son graficados para visualizar el desplazamiento (eje z), a lo largo de toda la viga (eje y) en el tiempo que establece el experimento (eje x). Con estos datos se crea un mapa de colores que permitirá visualizar el movimiento de la viga desde la parte fija hasta el extremo libre, tal como se muestra en la figura 4.2.

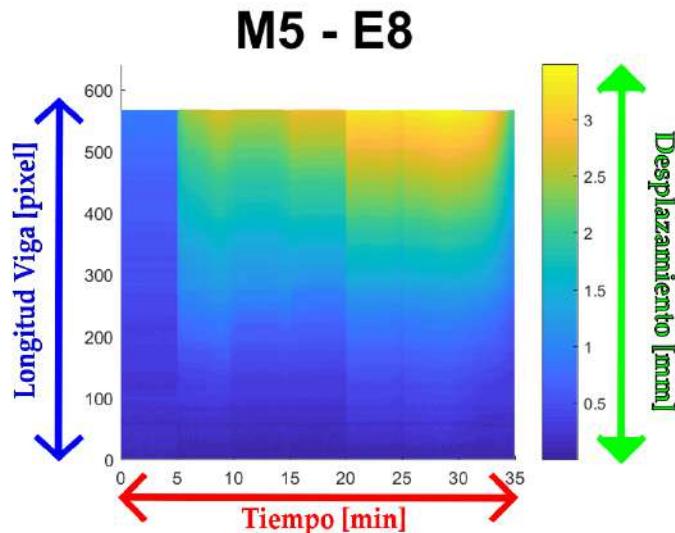


Figura 4.2: Mapa de colores por experimento.

Finalmente, con los datos obtenidos de desplazamiento a lo largo de toda la viga por experimento se obtiene el promedio y valor máximo para cada instante de tiempo, así mismo la interfaz de usuario entrega los datos de voltaje RMS tal como se muestra en la figura 4.3. Con estos datos se procede a realizar el análisis estadístico por caso de estudio, en el que se promedia el valor máximo de todos los experimentos, además se calcula la mediana, moda y el promedio RMS con la finalidad de realizar la comparativa entre casos de estudio. En el caso de leche UHT adulterada, se procedió a realizar la clasificación de los datos por medio de la técnica KNN (k Nearest Neighbors), para la cual se emplean el valor promedio y máximo por experimento con respecto al valor de voltaje RMS. En el capítulo siguiente se detallarán los resultados obtenidos para cada caso de estudio, así como el análisis empleado.

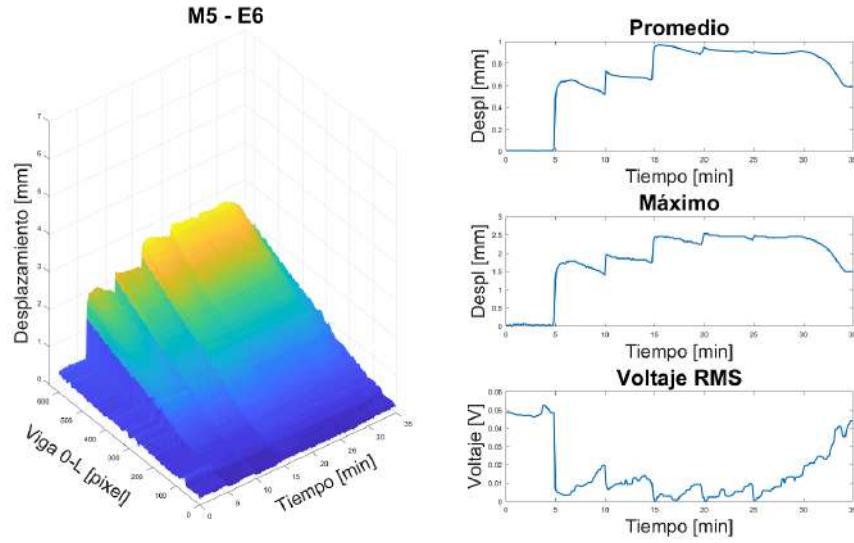


Figura 4.3: Valor promedio, máximo y voltaje RMS por experimento.

## 4.2. Principio de funcionamiento

Para la validación del principio de funcionamiento del sensor propuesto, se realizaron pruebas con soluciones binarias tal como se estableció en la tabla 3.4. El desplazamiento fue medido en un punto de la parte libre del sensor, todos los experimentos se llevaron a cabo por 60 minutos con 10 activaciones. Se inició con la prueba de agua destilada con un volumen de 20  $\mu\text{L}$ , las gotas fueron depositadas cada 5 minutos, cabe destacar que la viga permanece conectada a la fuente de corriente durante el experimento. En la figura 4.4 se muestra el comportamiento del desplazamiento de la viga con cada activación, así mismo se muestra el comportamiento de una gota de 20  $\mu\text{L}$  sin aplicar corriente en el camino conductivo. Como puede observarse, al inicio de la deposición de las gotas la viga comienza a flexionarse hacia

arriba en ambos casos. Para la prueba conectada a corriente se visualiza que, con cada aplicación, el desplazamiento va en incremento con una tendencia acumulativa para cada gota, esta alcanza un punto máximo y después comienza a decrementar hacia el punto de referencia hasta que la siguiente gota es aplicada, donde el desplazamiento vuelve a dirigirse hacia arriba. En cambio, para la viga sin aplicación de corriente se observa que el retorno al punto de referencia para una sola gota es más lento que la muestra que permanece conectada.

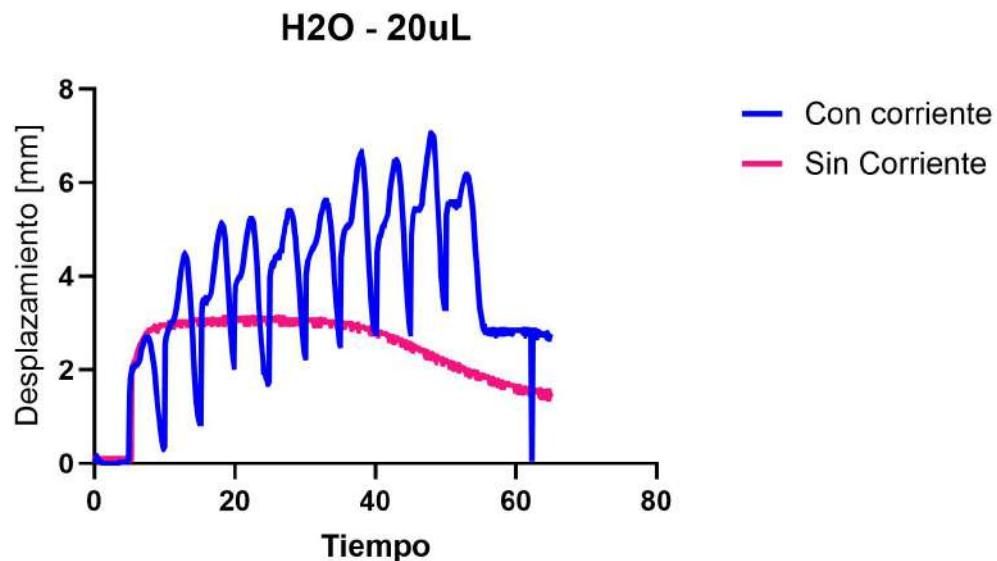


Figura 4.4: Desplazamiento agua destilada con corriente y sin corriente.

De la misma manera, se realizaron experimentos de agua destilada combinada con alcohol combinadas en proporción de volumen de 50/50 v/v. En este caso se utilizaron diferentes dosis para determinar si el desplazamiento alcanzado por la viga puede diferenciarse. Así también, se observa la influen-

cia del camino conductor de la viga de papel al interactuar con las soluciones binarias. En la figura 4.5 se puede observar el comportamiento de las soluciones binarias ( $\text{OH}$ ) con diferente volumen, comparadas con el agua destilada ( $\text{H}_2\text{O}$ ). El desplazamiento máximo alcanzado por las soluciones binarias es menor al obtenido con agua destilada, de igual manera se puede visualizar que la flexión máxima decrece de acuerdo con el volumen de solución empleado. Además, se puede inferir que, con la aplicación de corriente en el camino conductor, se tiene un tiempo de evaporación de la solución binaria más rápido que la de agua destilada. Debido a que la volatilidad depende de la fuerza intramolecular del líquido, el agua posee una fuerza mayor en comparación con el alcohol, por lo tanto, es más sencillo para el alcohol romper los enlaces para pasar del estado líquido al gaseoso cuando se añade energía cinética a al líquido (Nagy et al., 2020).

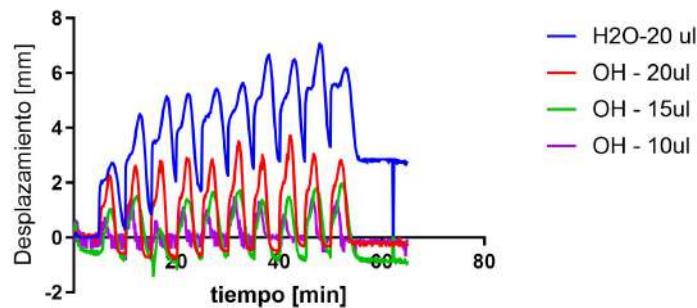


Figura 4.5: Desplazamiento soluciones binarias para un volumen por activación de 20, 15 y 10  $\mu\text{L}$ .

### **4.3. Leche UHT y alimentos bebibles**

Una vez demostrado el principio de actuación con las soluciones binarias, se procede a evaluar el comportamiento de las vigas de papel con otros alimentos. Tal como se mencionó anteriormente se utilizaron 3 marcas de leche UHT comercial entera, jugo comercial, leche de almendras y agua destilada. Esto con la finalidad de evaluar si existe diferencia en el desplazamiento para cada tipo de líquido y de esta forma determinar si medirá de forma significativa el objeto de estudio seleccionado para este proyecto de tesis. En la figura 4.6 se muestran los mapas de colores obtenidos para las muestras de leche UHT, a lo largo del eje y se visualiza la longitud de la viga en unidades de píxel, así también en el eje x se coloca el tiempo del experimento en minutos. El cambio de colores de azul a amarillo en el eje z indica el desplazamiento mínimo al máximo respectivamente, medido a lo largo de toda la viga. Se puede observar en las figuras que el desplazamiento máximo se concentra en la parte libre de la viga y el desplazamiento minino en la parte fija. Para el caso de las marcas de leche, se puede observar que a medida que se van agregando las gotas cada 5 minutos, se provoca la flexión de la viga hasta alcanzar un punto máximo a lo largo del tiempo.

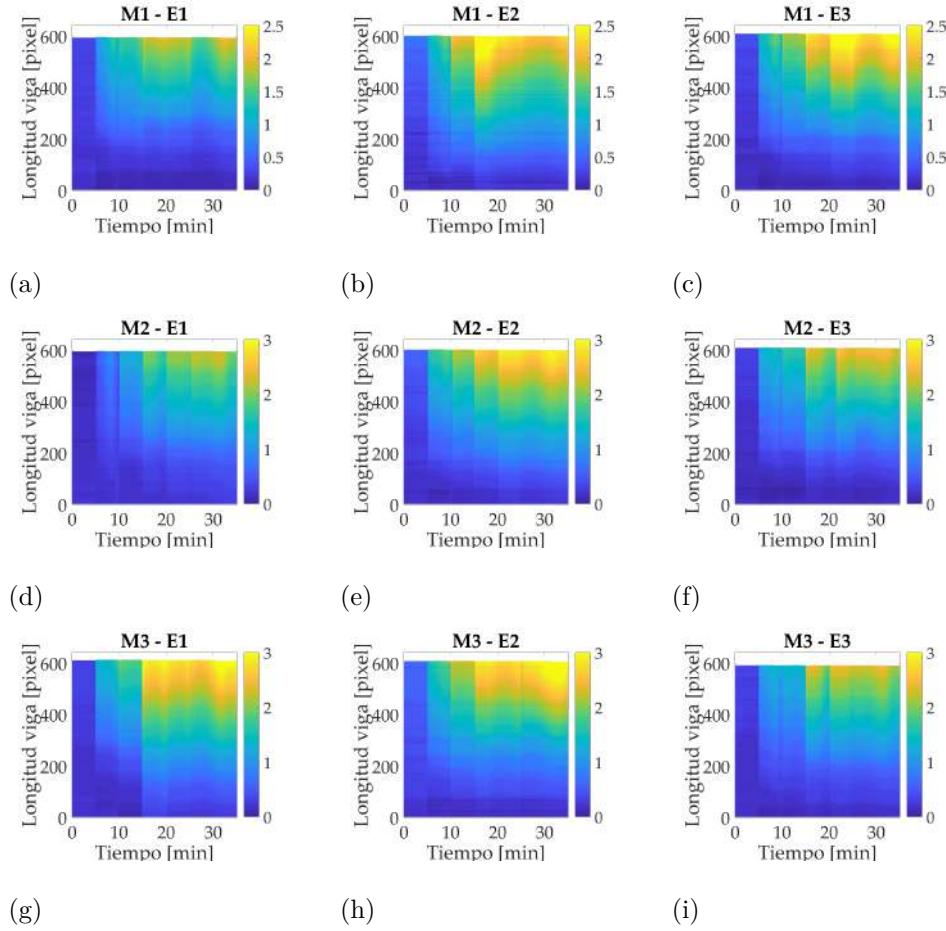


Figura 4.6: Mapa de colores por marcas de leche (M1, M2, M3) en tres repeticiones (E1, E2, E3).

Los cálculos estadísticos realizados para determinar si existe diferencia entre marcas de leche se muestran en la figura 4.7. El promedio de los tres experimentos fue calculado para cada marca de leche (a), en donde se puede observar que existe diferencia entre marcas de leche etiquetadas como leche entera. Durante las primeras activaciones la tendencia parece ser semejante hasta el momento de la activación tres, donde se observa que una separación

en las gráficas para cada tipo de leche. Esto es explicado acorde a los cambios que existen en la información nutrimental dada por los fabricantes (tabla 3.2), en la que los componentes como el azúcar, carbohidratos, proteínas y contenido energético tal como se reportó en el trabajo (Ireta-Muñoz et al., 2023). De igual manera se presentan los resultados obtenidos para la mediana, moda y promedio RMS (root mean square), para el caso de la moda (c), se observan diversas variaciones debido a que las deposiciones son realizadas de manera manual. Asimismo, para el caso de la mediana (b) y el promedio RMS (e) se puede observar un comportamiento similar al promedio de los valores máximos (a).

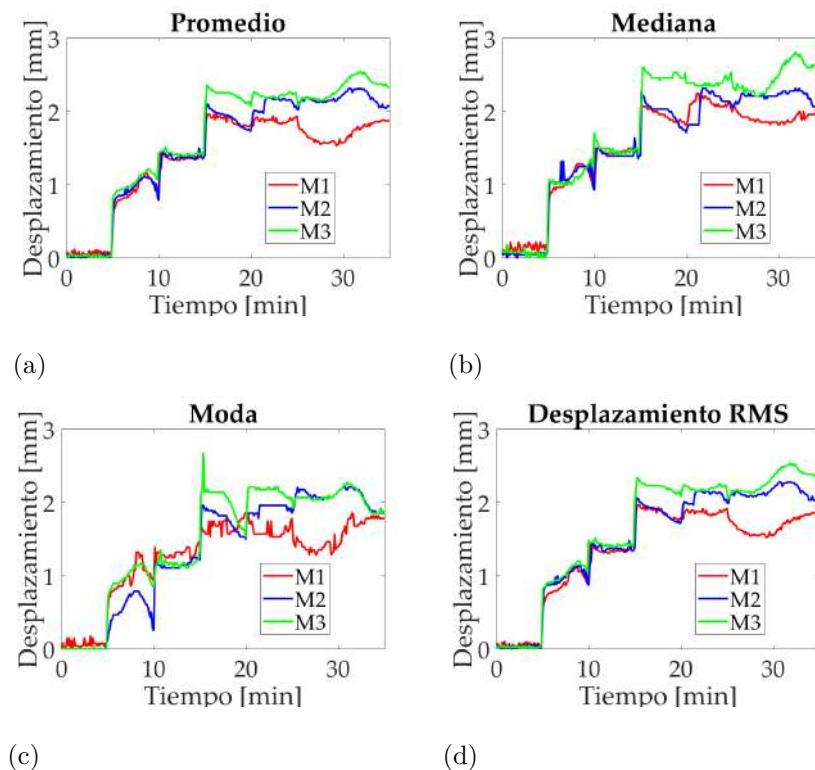


Figura 4.7: Análisis estadístico marcas de leche (M1, M2, M3).

Los resultados obtenidos para el caso de los alimentos bebibles muestran una notable diferencia en el comportamiento del desplazamiento, tal como se muestra en la figura 4.8. Para el caso del jugo comercial (S1), puede observarse que el desplazamiento máximo se da en la primera activación, después de eso no vuelve a producirse la flexión de la viga en las siguientes deposiciones. La leche de almendras presenta un resultado similar (S3), solo que en este caso puede observarse el efecto en la deflexión para las dos primeras activaciones y finalmente con el agua destilada se observa el mismo comportamiento reportado en el caso de estudio anterior de soluciones binarias, en las que es visible el efecto del movimiento inducido, así como la evaporación del líquido debido al camino conductivo.

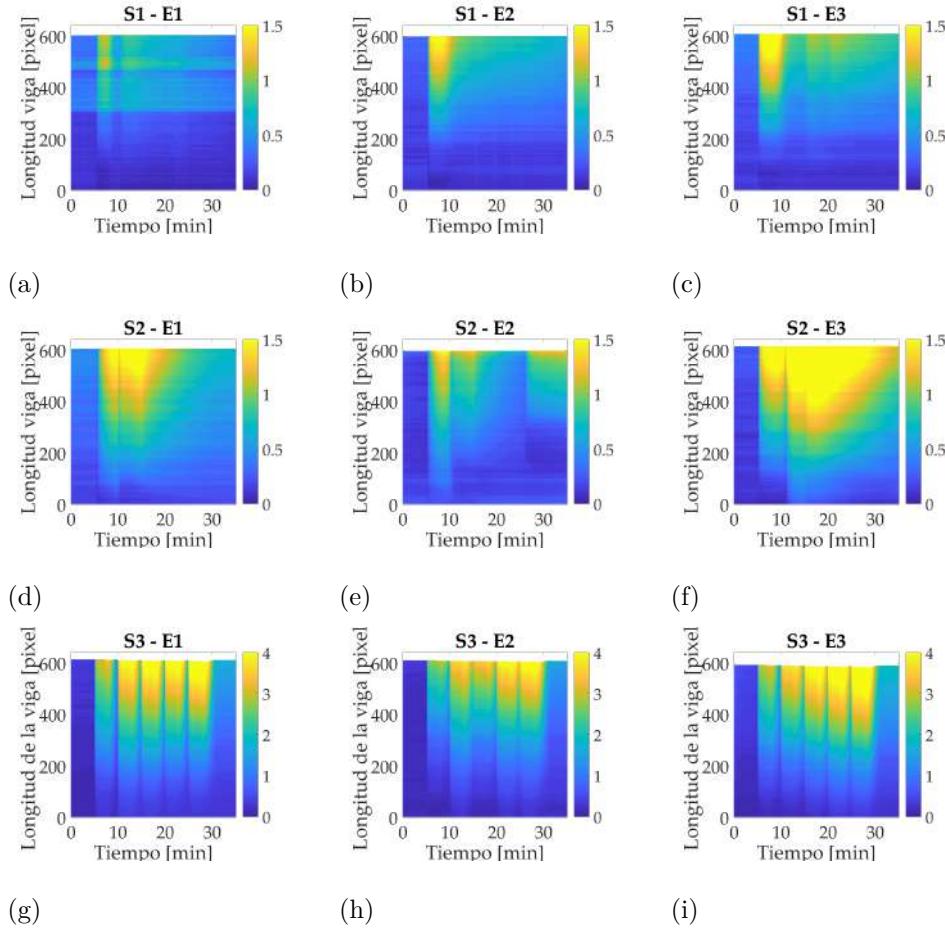


Figura 4.8: Mapa de colores alimentos bebibles (S1, S2, S3) en tres repeticiones (E1, E2, E3).

De igual manera se llevó a cabo el análisis estadístico para los alimentos bebibles, mostrados en la figura 4.9 la diferencia con respecto a las marcas de leche es notable. La saturación de las fibras de papel debido a la presencia de azúcar en el jugo comercial es la razón por la que en las gráficas solo se observa el desplazamiento máximo en la primera activación. La leche de almendras posee un nivel más bajo de azúcar, por lo que alcanza a notarse

el efecto en desplazamiento para dos deposiciones. El agua destilada al no contener ningún tipo de aditamento provoca que el efecto en la flexión sea más visible debido al fenómeno de higroexpansión.

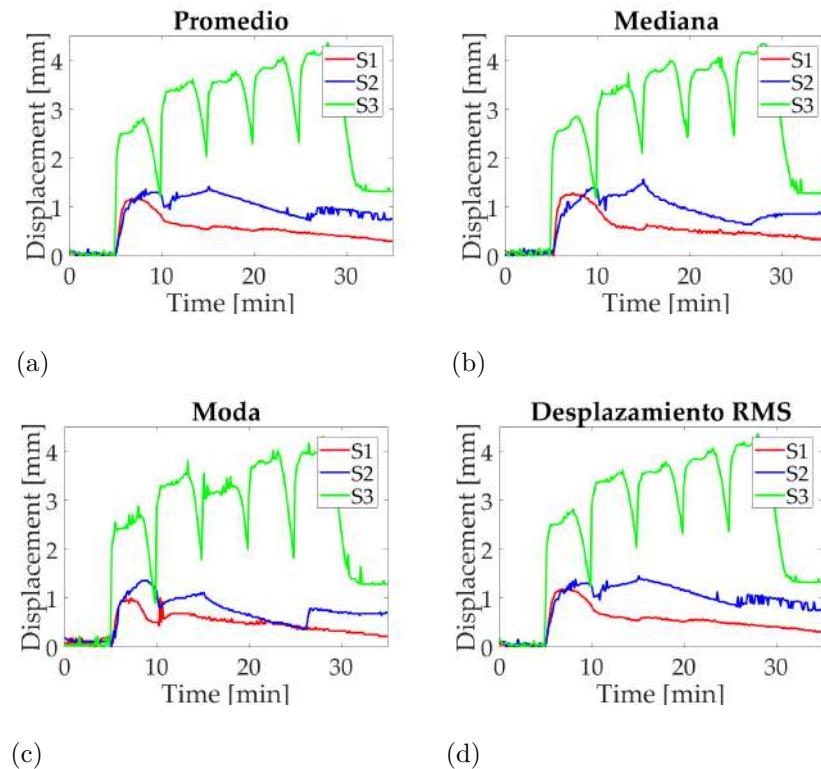


Figura 4.9: Análisis estadístico alimentos bebibles (S1, S2, S3).

## 4.4. Leche UHT adulterada

Finalmente, las pruebas que permitieron la validación del sensor basado en papel fueron hechas para leche UHT adulterada con 0 %, 5 %, 10 %, 20 %, y 50 %, de agua destilada ( $H_2O$ ), así como 10 % de leche de soya (SM) y agua oxigenada ( $H_2O_2$ ). Los datos de desplazamiento de la viga (eje y) y el

voltaje RMS (eje x) fueron graficados tal como se muestra en la figura 4.10. Cada clúster de datos indica los porcentajes de adulteración empleados, cada uno contiene 1441 datos que corresponden a los 6 experimentos realizados sin los primeros cinco minutos de pre-calentamiento. Para el caso de 0 % de adulteración y 5 % se encuentra en la misma zona de 0.5 a 1 V, los demás casos se concentran en la zona de 1 a 1.5 V. Se puede visualizar una diferencia en cuanto a la posición de cada clúster, por lo que es posible inferir que el mecanismo de actuación propuesto permitirá realizar la clasificación de un nuevo conjunto de datos.

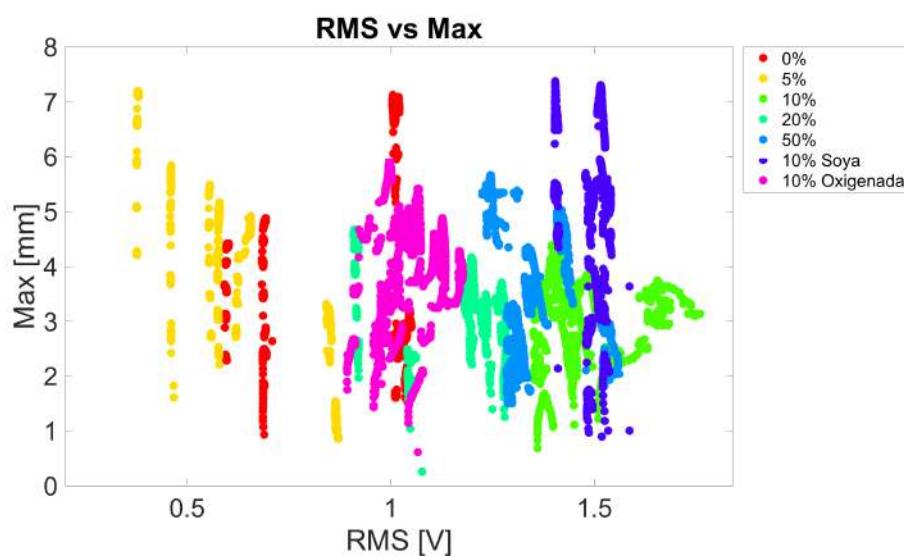


Figura 4.10: Matriz de dispersión para leche UHT adulterada.

La técnica de clasificación kNN (k Nearest Neighbor) es empleada para identificar la clase a la que pertenece un nuevo conjunto de datos por medio de la distancia medida hacia 10 vecinos cercanos. Para cada porcentaje de adulteración se tiene un nuevo experimento, el cual contiene 241 datos y es

introducido al programa realizado en Matlab<sup>®</sup> para obtener la clase a la que pertenece cada dato. La figura 4.11 muestra los puntos del experimento a clasificar en color negro y los vecinos cercanos son indicados con círculos de color gris. Posteriormente, se procede a medir la distancia a cada uno de los vecinos con la finalidad de asignar una etiqueta dependiendo de la clase que se repita más. Una vez realizada la clasificación de cada punto, se procede a separar los datos de acuerdo con las activaciones realizadas. Se cuenta con un total de cinco deposiciones, cada set contiene 41 datos los cuales son listados de acuerdo con la activación correspondiente con la finalidad de determinar la clase a la que pertenecen.

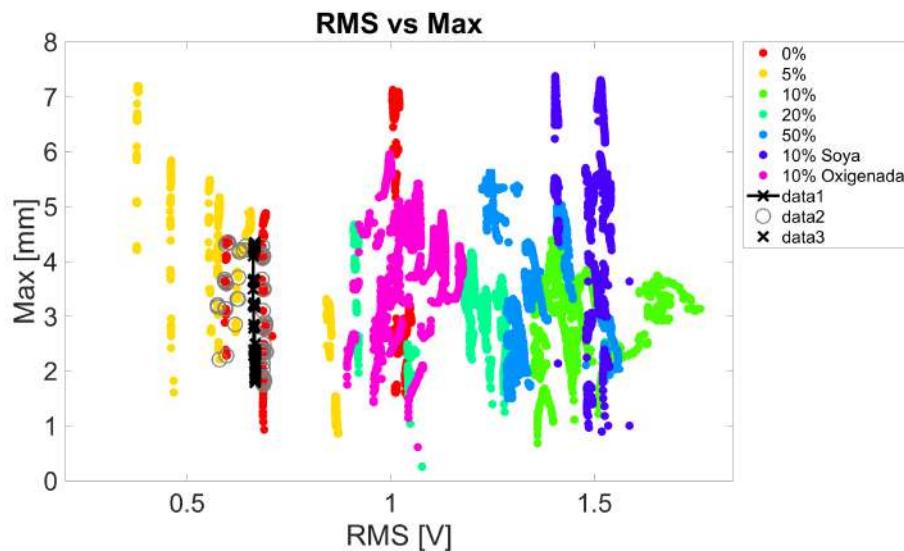


Figura 4.11: Clasificación del nuevo conjunto de datos.

En la tabla 4.1, se puede observar el listado de los puntos clasificados (# datos) por la técnica kNN, separados por activación en cada uno de los porcentajes de adulteración. En la primera activación (Act 1) se puede observar

que todos los puntos son clasificados en 5 %, la cual no corresponde a la clase evaluada de 0 %. En el caso de 5 %, la clasificación es hecha correctamente, con 39 puntos etiquetados. Para los datos de 10 % Y 20 % no se tiene la clasificación correcta. Para los siguientes casos, la clase asignada a la mayoría de los puntos corresponde al porcentaje evaluado. Los datos que son correctamente clasificados se resaltan en negrita. En las siguientes activaciones (Act 2 y Act 3) se puede observar que la clasificación es bien asignada para 5 %, 50 %, 10 % soya y 10 % de agua destilada y soya. En la activación 4 (Act 4), la clase es correctamente asignada para 5 %, 20 %, 50 %, 10 % agua destilada y soya. Finalmente en la activación 5 (Act 5) los datos son bien clasificados para cada caso de estudio, a excepción del caso de 10 % de adulteración. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede inferir que la deposición de gotas cada cinco minutos a la viga basada en papel, va saturando las fibras hasta obtener un comportamiento más marcado en las últimas activaciones, razón por la cual se tiene una correcta clasificación de los datos analizados.

Tabla 4.1: Dato a clasificar voltaje RMS vs valor máximo

Clasificación	0 %		5 %		10 %		20 %		50 %		10 % Soya		10 % H2O2	
	Clase	# datos	Clase	# datos	Clase	# datos	Clase	# datos	Clase	# datos	Clase	# datos	Clase	# datos
Act 1	5 %	41	0 %	2	10 %	14	10 % H2O2	38	10 %	3	10 % Soya	41	0 %	1
			5 %	39	20 %	6	20 %	3	50 %	38			10 % H2O2	40
			'50 %'	21	41	10 % H2O2	40		41	10 % Soya	41	10 % H2O2	40	
Act 2	5 %	41	0 %	9	20 %	41	10 % H2O2	40	50 %	41	10 % Soya	41	10 % H2O2	40
			5 %	32			20 %	1					20 %	1
Act 3	5 %	41	5 %	41	20 %	41	10 % H2O2	33	50 %	41	10 % Soya	41	10 % H2O2	41
							20 %	8						
Act 4	5 %	41	5 %	41	20 %	41	10 % H2O2	2	50 %	41	10 % Soya	41	10 % H2O2	41
							20 %	39						
Act 5	0 %	38	5 %	41	20 %	41	10 % H2O2	1	10 %	6	10 % Soya	41	10 % H2O2	41
	5 %	3					20 %	40	50 %	35				

Tal como se mencionó anteriormente, debido a la saturación de las fibras de papel al añadir gotas de solución es posible observar una diferencia en el comportamiento de la flexión, así como del voltaje RMS lo que se ve reflejado en cada una de las activaciones realizadas. En la figura 4.12, se puede observar la separación por activación para las clases analizadas de leche UHT adulterada donde es posible visualizar la manera en que los clústeres de datos se van separando. Para el caso de la activación 1 a) hasta la activación 4 d), los datos están empalmados en determinadas zonas, tal es el caso de la muestra de adulteración con 10 % soya, 10 %, 20 % y 50 % de agua destilada. En la activación 5 e), se visualiza que la aglomeración de los datos disminuye, lo que permite identificar cada caso de estudio ya que el empalme es menor. De igual manera para las clases de 0 % y 5 %, se puede observar el traslape en

cada activación, hasta la activación 5 donde se separan. Para el caso de 10 % de adulteración con agua oxigenada ( $H_2O_2$ ), se puede observar que el traslape es menor, lo que se ve reflejado en los resultados al realizar la clasificación correctamente en cada activación.

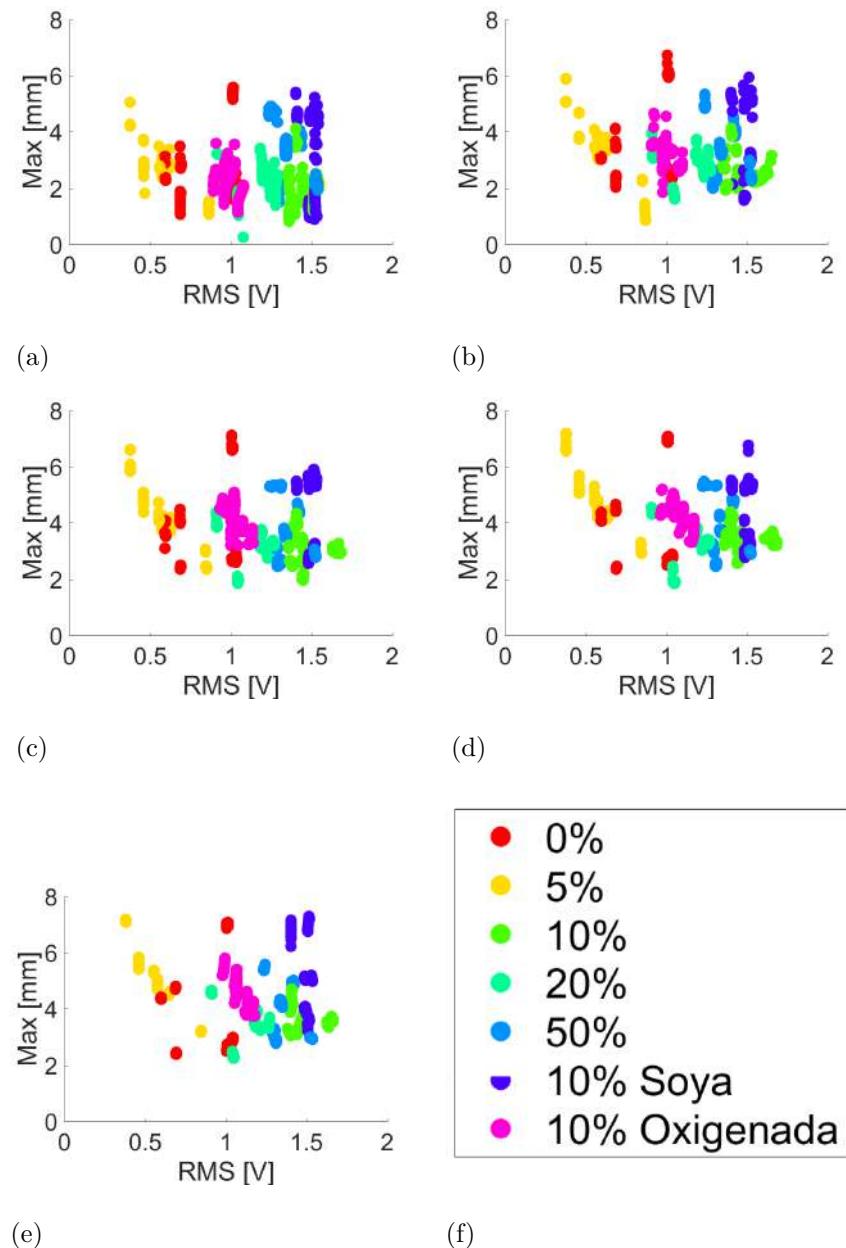


Figura 4.12: Separación de clúster de datos por cada deposición de líquido  
a) - e) Activación 1-5.

A continuación, se presenta la separación de los datos para el caso de 10 %

de adulteración con agua destilada, soya y agua oxigenada, comparadas la referencia de 0 % de adulteración, en la que se observa de manera más clara la separación de cada conjunto de datos, tal como se muestra en la figura 4.13. De igual manera que el análisis anterior, los datos se van separando conforme las activaciones con las gotas de muestra. Cabe destacar el comportamiento mostrado con agua destilada y soya, el cual permitió identificar la clase correctamente en cada una de las activaciones, por lo que es posible inferir que con este método de actuación del papel es posible identificar entre sustancias presentes en la leche. Sin embargo, no ocurrió lo mismo para el caso de 10 % de agua destilada, esto puede ser explicado debido a la cercanía de los datos con el caso de 20 %, lo que permite deducir que es más improbable realizar detección en casos donde la diferencia en el porcentaje de adulteración es menor. Por lo tanto, con los resultados obtenidos es posible identificar porcentajes de adulteración en diferentes tipos de aditamentos, lo que pauta para la mejora y estudio de la configuración de viga en voladizo basada en papel, integrada con el camino conductivo.

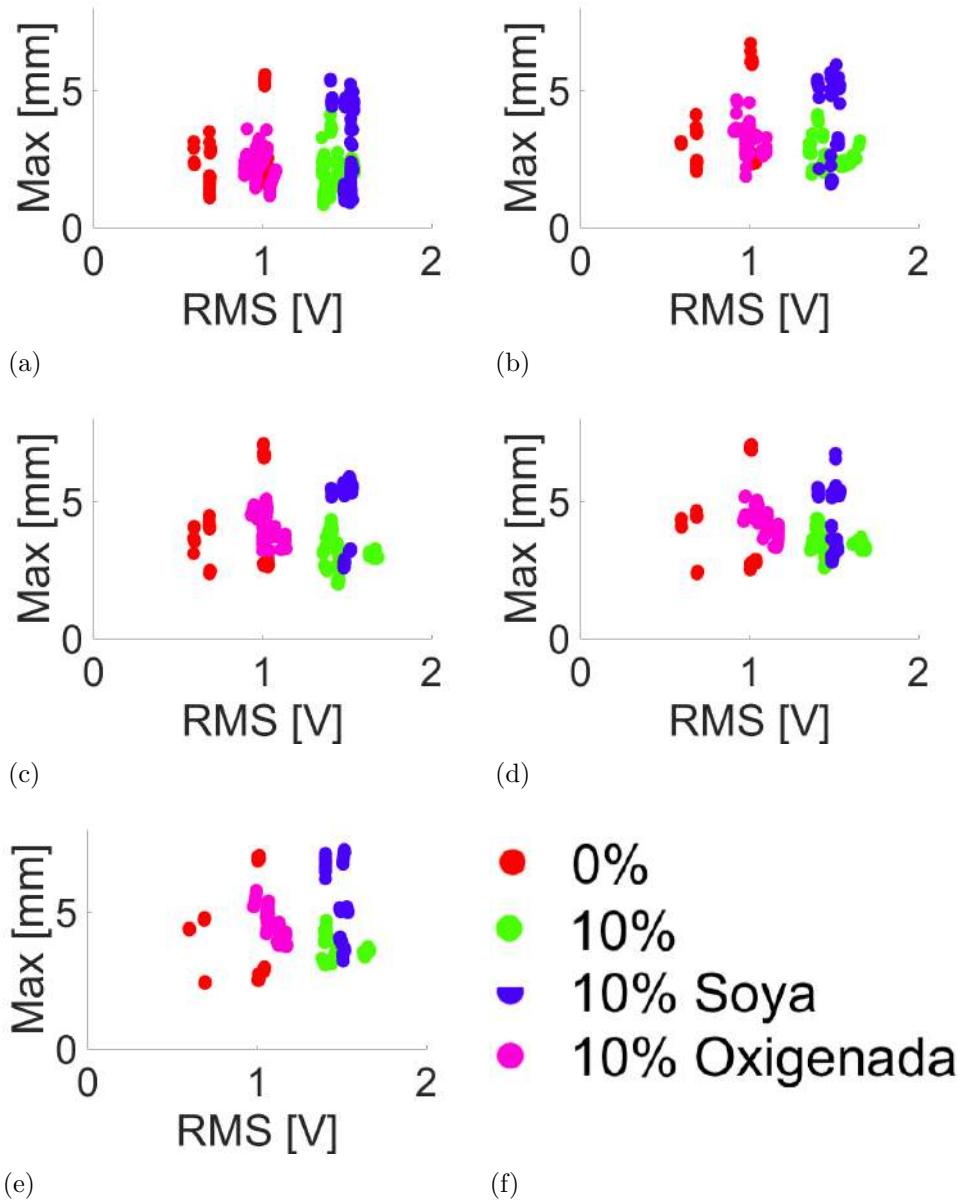


Figura 4.13: Separación de clúster de datos por cada deposición de líquido  
a) - e) Activación 1-5.

# **Capítulo 5**

## **Conclusiones y prospectivas**

En esta sección se presentan las conclusiones de los casos de estudio analizados a las que se llegaron, de acuerdo con a los resultados obtenidos y los objetivos planteados en este proyecto de tesis. Así también, se presentan las prospectivas planteadas para la mejora del proyecto.

### **5.1. Conclusiones**

Para el caso de estudio de las soluciones binarias, fue posible validar el principio de funcionamiento de la viga en voladizo basada en papel al obtener una respuesta mecánica (flexión) en la parte libre. La cual fue inducida por la adición de gotas de solución debido al fenómeno de higroexpansión. Además, se demostró que la respuesta eléctrica por medio del camino conductivo en la parte superior de la viga influye en la evaporación de la solución binaria, ya que el desplazamiento inducido tiende a volver al punto de referencia. Este comportamiento proporcionó la pauta para continuar con la evaluación de

leche y alimentos bebibles.

Una vez demostrado el principio de funcionamiento, se procede a evaluar la respuesta de la leche para tres marcas diferentes. Acorde a los resultados obtenidos se concluye que existe diferencia en el desplazamiento inducido en cada una de las marcas de leche debido a las diferencias existentes en el contenido nutrimental dado por el fabricante. Adicionalmente, con las pruebas realizadas para alimentos bebibles se concluye que la respuesta de la leche, en cuanto al desplazamiento, es diferente a los líquidos evaluados.

Finalmente, la leche adulterada con diferentes aditamentos y porcentajes obtuvo una buena respuesta en los datos obtenidos ya que fue posible clasificar datos nuevos por medio de la técnica kNN, por lo que se concluye que el principio de funcionamiento planteado en este proyecto de tesis por medio de las activaciones influye en la medición del desplazamiento alcanzado debido a la saturación del papel. Asimismo, se concluye que es posible emplear este dispositivo para la detección de adulteración en la leche, ya que fue posible obtener la clasificación adecuada para los porcentajes de agua añadida. Lo que representa resultados prometedores para aplicarlo en la detección del porcentaje de aditivos en la leche, con la prospectiva de mejorar el límite de detección.

## 5.2. Prospectivas

El principio de funcionamiento demostrado en este proyecto de tesis puede ser empleado como prueba portable para evaluar la calidad de la leche, ya que presenta la ventaja de ser accesible y no requiere personal entrenado para la interpretación de los datos. Como parte de las mejoras para este proyecto, se tiene la automatización del proceso para la deposición de gotas de la muestra, con la finalidad de evitar el error humano asociado a la sincronización de los experimentos. Además, es posible implementar un método para que el trazado del camino conductivo no presente grandes variaciones en la medición de resistencia. También es posible aplicar este método de detección para otro tipo de soluciones acuosas, así como la detección de adulteración con leche de soya que acorde a los resultados obtenidos puede detectarse por medio de la deflexión de la viga. Adicionalmente, por medio de los datos medidos de desplazamiento y voltaje, puede crearse una matriz de dispersión con la finalidad de procesarla por medio de técnicas de clasificación y redes neuronales. Finalmente, puede aplicarse este principio de funcionamiento para detectar adulteración de la leche al añadirse agua, parte de los trabajos a futuro plantean la posibilidad de mejorar la detección, para determinar el porcentaje de volumen añadido, así como una mayor sensibilidad a cantidades menores de adulterantes.

# Bibliografía

- Arabska, E. (2021). From farm to fork: Human health and well-being through sustainable agri-food systems. *Journal of Life Economics*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.15637/jlecon.8.1.02>
- Bennett, A., Lhoste, F., Crook, J., & Phelan, J. (1997). Futuro de la producción lechera en pequeña escala. <http://www.indianmilkproducts.com/>
- Bouttes, M., Darnhofer, I., & Martin, G. (2019). Converting to organic farming as a way to enhance adaptive capacity. *Organic Agriculture*, 9(2), 235-247. <https://doi.org/10.1007/s13165-018-0225-y>
- Carrell, C., Kava, A., Nguyen, M., Menger, R., Munshi, Z., Call, Z., Nussbaum, M., & Henry, C. (2019). Beyond the lateral flow assay: A review of paper-based microfluidics. *Microelectronic Engineering*, 206, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.12.002>
- Costa, R. A., Morais, C. L. M., Rosa, T. R., Filgueiras, P. R., Mendonça, M. S., Pereira, I. E. S., Vittorazzi, B. V., Lyra, M. B., Lima, K. M. G., & Romão, W. (2020). Quantification of milk adulterants (starch, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, and NaClO) using colorimetric assays coupled to smartphone image analysis. *Microchemical Journal*, 156, 104968. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104968>
- Cueva-Perez, I., Perez-Cruz, A., Stiharu, I., Dominguez-Gonzalez, A.,

Trejo-Hernandez, M., & Osornio-Rios, R. A. (2020). A parametric study on the nonlinear dynamic response of paper-based mechanical systems due to liquid transport. International Journal of Non-Linear Mechanics, 118, 103280. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2019.103280>

Dairy production and products: Quality and testing. (s. f.). Recuperado 5 de septiembre de 2023, de <https://www.fao.org/dairy-production-products/products/quality-and-testing/en/>

De, O. (2011). Codex Alimentarius—Leche y Productos Lácteos Segunda edición. <http://www.codexalimentarius.org>

Douezan, S., Wyart, M., Brochard-Wyart, F., & Cuvelier, D. (2011). Curling instability induced by swelling. Soft Matter, 7(4), 1506-1511. <https://doi.org/10.1039/c0sm00189a>

Draaiyer, J., Dugdill, B., Bennett, A., & Mounsey, J. (2009). Milk Testing and Payment Systems Resource Book a practical guide to assist milk producer groups.

Feltes, G., Steffens, J., Paroul, N., & Steffens, C. (2023). Chapter 13—Organic electronic nose applied to food traceability, adulteration, and authenticity. En R. K. Gupta, T. A. Nguyen, M. Bilal, & M. Ahmadi (Eds.), Nanotechnology-Based E-noses (pp. 299-328). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91157-3.00020-9>

Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. Science, 327(5967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>

Gong, M. M., & Sinton, D. (2017). Turning the Page: Advancing Paper-

Based Microfluidics for Broad Diagnostic Application. *Chemical Reviews*, 117(12), 8447-8480. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00024>

Govindarajalu, A. K., Ponnuchamy, M., Sivasamy, B., Prabhu, M. V., & Kapoor, A. (2019). A cellulosic paper-based sensor for detection of starch contamination in milk. *Bulletin of Materials Science*, 42(6), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s12034-019-1958-2>

Gowri, A., Rajamani, A. S., Ramakrishna, B., & Sai, V. V. R. (2019). U-bent plastic optical fiber probes as refractive index based fat sensor for milk quality monitoring. *Optical Fiber Technology*, 47, 15-20. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2018.11.019>

Grassi, S., Tarapoulouzi, M., D'Alessandro, A., Agriopoulou, S., Strani, L., & Varzakas, T. (2023). How Chemometrics Can Fight Milk Adulteration. *Foods*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/foods12010139>

Hanrahan, L., McHugh, N., Hennessy, T., Moran, B., Kearney, R., Wallace, M., & Shalloo, L. (2018). Factors associated with profitability in pasture-based systems of milk production. *Journal of Dairy Science*, 101(6), 5474-5485. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13223>

Himshweta, & Singh, M. (2023). Nanosensor platforms for detection of milk adulterants. *Sensors and Actuators Reports*, 5, 100159. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2023.100159>

Huang, Z., Xiao, Y., Xiao, Y., Cai, H., & Ni, H. (2023). Rapid recognition of processed milk type using electrical impedance spectroscopy and machine learning. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(6), 3121-3134. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16440>

Ibarrola-Rivas, M. J., & Galicia, L. (2017). Rethinking food security in

Mexico: Discussing the need for sustainable transversal policies linking food production and food consumption. *Investigaciones Geograficas*, 2017(94), 106-121. <https://doi.org/10.14350/rig.57538>

Ionescu, A.-D., Cîrîc, A. I., & Begea, M. (2023). A Review of Milk Frauds and Adulterations from a Technological Perspective. *Applied Sciences*, 13(17), Article 17. <https://doi.org/10.3390/app13179821>

Ireta-Muñoz, L. A., Cueva-Pérez, I., Elvira-Ortiz, D. A., Moreno-Suárez, L. E., & Pérez-Cruz, Á. (2023). Study of Mechanical Response of Paper-Based Microfluidic System as a Potential Milk Tester. *Micromachines*, 14(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/mi14071380>

Ireta-Muñoz, L. A., Cueva-Perez, I., Saucedo-Dorantes, J. J., & Pérez-Cruz, A. (2022). A Paper-Based Cantilever Beam Mini Actuator Using Hygro-Thermal Response. *Actuators*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/act11030094>

Jyoti, Kavita, & Verma, R. K. (2022). Selective detection of urea as milk adulterant using LMR based Fiber Optic Probe. *Journal of Food Composition and Analysis*, 114, 104825. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104825>

Lee, M., Kim, S., Kim, H. Y., & Mahadevan, L. (2016). Bending and buckling of wet paper. *Physics of Fluids*, 28(4), 042101. <https://doi.org/10.1063/1.4944659>

Lima, L. S., Rossini, E. L., Pezza, L., & Pezza, H. R. (2020). Bioactive paper platform for detection of hydrogen peroxide in milk. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 227, 117774. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.117774>

Liu, H., Qing, H., Li, Z., Han, Y. L., Lin, M., Yang, H., Li, A., Lu, T. J., Li, F., & Xu, F. (2017). Paper: A promising material for human-

- friendly functional wearable electronics. Materials Science and Engineering R: Reports, 112, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2017.01.001>
- Mahato, K., Srivastava, A., & Chandra, P. (2017). Paper based diagnostics for personalized health care: Emerging technologies and commercial aspects. Biosensors and Bioelectronics, 96, 246-259. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.05.001>
- Mazur, F., Tjandra, A. D., Zhou, Y., Gao, Y., & Chandrawati, R. (2023). Paper-based sensors for bacteria detection. Nature Reviews Bioengineering, 1(3), Article 3. <https://doi.org/10.1038/s44222-023-00024-w>
- Meira, A. C. F. de O., Morais, L. C. de, Paula, M. M. de O., Pinto, S. M., & Resende, J. V. de. (2023). Application of electrical impedance spectroscopy for the characterisation of yoghurts. International Dairy Journal, 141, 105625. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105625>
- Mitrogiannopoulou, A.-M., Tselepi, V., & Ellinas, K. (2023). Polymeric and Paper-Based Lab-on-a-Chip Devices in Food Safety: A Review. Micro-machines, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/mi14050986>
- Moore, J. C., Spink, J., & Lipp, M. (2012). Development and Application of a Database of Food Ingredient Fraud and Economically Motivated Adulteration from 1980 to 2010. Journal of Food Science, 77(4), R118-R126. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2012.02657.x>
- Mortari, A., & Lorenzelli, L. (2014). Recent sensing technologies for pathogen detection in milk: A review. Biosensors and Bioelectronics, 60, 8-21. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2014.03.063>
- Nagraik, R., Sharma, A., Kumar, D., Chawla, P., & Kumar, A. P. (2021). Milk adulterant detection: Conventional and biosensor based approaches: A

review. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 33, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100433>

Nagy, K. A., Tóth, I. Y., Ballai, G., Varga, Á. T., Szenti, I., Sebők, D., Kopniczky, J., Hopp, B., & Kukovecz, Á. (2020). Wetting and evaporation on a carbon cloth type gas diffusion layer for passive direct alcohol fuel cells. *Journal of Molecular Liquids*, 304, 112698. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112698>

Nascimento, C. F., Santos, P. M., Pereira-Filho, E. R., & Rocha, F. R. P. (2017). Recent advances on determination of milk adulterants. *Food Chemistry*, 221, 1232-1244. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.034>

Nawaz, T., Ur Rehman, Z., Ullah, R., Ahmed, N., & Mahmoud Sayed, S. (2022). Physicochemical and adulteration study of fresh milk collected from different locations in Pakistan. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(12), 103449. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103449>

Ng, H.-Y., Lee, W.-C., Kung, C.-T., Li, L.-C., Lee, C.-T., & Fu, L.-M. (2021). Recent Advances in Microfluidic Devices for Contamination Detection and Quality Inspection of Milk. *Micromachines*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/mi12050558>

OECD-FAO. (2023). OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/08801ab7-en>.

Okutan Arslan, N., & Trabzon, L. (2023). Evaluation of food PADs with the new tech perspectives and future prospects. *eFood*, 4(6), e116. <https://doi.org/10.1002/efd2.116>

Patari, S., Datta, P., & Mahapatra, P. S. (2022). 3D Paper-based milk adulteration detection device. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09322-w>

doi.org/10.1038/s41598-022-17851-3

Perez-Cruz, A. (2017). Development of paper-based hygro-mechanical systems for liquid characterization (Número March).

Perez-Cruz, A., Stiharu, I., & Dominguez-Gonzalez, A. (2017a). Nonlinear imbibition influence on the hygro-mechanical bending response of paper due to its interaction with water. International Journal of Non-Linear Mechanics, 97, 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2017.09.002>

Perez-Cruz, A., Stiharu, I., & Dominguez-Gonzalez, A. (2017b). Two-dimensional model of imbibition into paper-based networks using Richards' equation. Microfluidics and Nanofluidics, 21(5), 98. <https://doi.org/10.1007/s10404-017-1937-0>

Poghossian, A., Geissler, H., & Schöning, M. J. (2019). Rapid methods and sensors for milk quality monitoring and spoilage detection. Biosensors and Bioelectronics, 140. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.04.040>

Reyssat, E., & Mahadevan, L. (2011). How wet paper curls. EPL, 93(5), 54001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/93/54001>

Salmaz, U., Islam, T., & Ibrahim, S. (2023). Capacitive Droplet Sensing for Milk Quality Analysis. 2023 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 01-05. <https://doi.org/10.1109/I2MTC53148.2023.10176055>

Sharifi, F., Naderi-Boldaji, M., Ghasemi-Varnamkhasti, M., Kheirali-pour, K., Ghasemi, M., & Maleki, A. (2023). Feasibility study of detecting some milk adulterations using a LED-based Vis-SWNIR photoacoustic spectroscopy system. Food Chemistry, 424, 136411.<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136411>

- Singh, A. T., Lantigua, D., Meka, A., Taing, S., Pandher, M., & Camci-Unal, G. (2018). Paper-based sensors: Emerging themes and applications. *Sensors (Switzerland)*, 18(9), 2838. <https://doi.org/10.3390/s18092838>
- Techane, T. (2023). Effect of Adulterants on Quality and Safety of Cow Milk: A Review. *Int J Diabetes MetabDisord*, 8(1), 277-287.
- Tripathy, S., Reddy, M. S., Vanjari, S. R. K., Jana, S., & Singh, S. G. (2019). A Step Towards Miniaturized Milk Adulteration Detection System: Smartphone-Based Accurate pH Sensing Using Electrospun Halochromic Nanofibers. *Food Analytical Methods*, 12(2), 612-624. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1391-y>
- Vlasiou, M. C. (2023). Cheese and Milk Adulteration: Detection with Spectroscopic Techniques and HPLC: Advantages and Disadvantages. *Dairy*, 4(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/dairy4030034>
- Wada, M., Hori, R., Kim, U. J., & Sasaki, S. (2010). X-ray diffraction study on the thermal expansion behavior of cellulose I $\beta$  and its high-temperature phase. *Polymer Degradation and Stability*, 95(8), 1330-1334. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.01.034>
- Welsh, J. A., Braun, H., Brown, N., Um, C., Ehret, K., Figueroa, J., & Barr, D. B. (2019). Production-related contaminants (pesticides, antibiotics and hormones) in organic and conventionally produced milk samples sold in the USA. *Public Health Nutrition*, 22(16), 2972-2980. <https://doi.org/10.1017/S136898001900106X>
- Wildeboer, R. R., van Sloun, R. J. G., Wijkstra, H., & Mischi, M. (2020). Artificial intelligence in multiparametric prostate cancer imaging with focus on deep-learning methods. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*,

189, 105316. <https://doi.org/10.1016/j cmpb.2020.105316>

Yuan, M.-H., & Lo, S.-L. (2020). Developing indicators for the monitoring of the sustainability of food, energy, and water. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109565. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109565>

Zhao, K., Liu, Y., & Zhang, Q. (2019). Dielectric behavior of adulterated milk with urea and water. *Journal of Molecular Liquids*, 273, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.09.133>

## **Apéndice A**

### **Artículo publicado en Actuators**



*actuators*

an Open Access Journal by MDPI



# CERTIFICATE OF PUBLICATION



The certificate of publication for the article titled:

A Paper-Based Cantilever Beam Mini Actuator Using Hygro-Thermal Response

Authored by:

Laura Alejandra Ireta-Muñoz; Isaias Cueva-Perez; Juan Jose Saucedo-Dorantes; Angel Pérez-Cruz

Published in:

*Actuators* 2022, Volume 11, Issue 3, 94



Academic Open Access Publishing  
since 1996

Basel, February 2024

*Kenji Uchino*

Prof. Dr. Kenji Uchino  
Editor-in-Chief

## **Apéndice B**

**Artículo publicado en  
Micromachines**



***micromachines***

an Open Access Journal by MDPI



# CERTIFICATE OF PUBLICATION



The certificate of publication for the article titled:

Study of Mechanical Response of Paper-Based Microfluidic System as a Potential Milk Tester

Authored by:

Laura Alejandra Ireta-Muñoz; Isaías Cueva-Pérez; David Alejandro Elvira-Ortiz; Leonardo Esteban Moreno-Suárez; Ángel Pérez-Cruz

Published in:

*Micromachines* 2023, Volume 14, Issue 7, 1380



Basel, April 2024

*Shu-Kun Lin*

Dr. Shu-Kun Lin  
Publisher & President

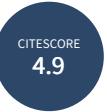
## **Apéndice C**

### **Artículo publicado en Biosensors**



***biosensors***

an Open Access Journal by MDPI



# CERTIFICATE OF PUBLICATION



The certificate of publication for the article titled:

Smartphone and Paper-Based Fluorescence Reader: A Do It Yourself Approach

Authored by:

Laura Alejandra Ireta-Muñoz; Eden Morales-Narváez

Published in:

*Biosensors* 2020, Volume 10, Issue 6, 60



Academic Open Access Publishing  
since 1996

Basel, April 2024

Prof. Dr. Giovanna Marrazza  
Editor-in-Chief

## **Apéndice D**

### **Registro de Software ADS-SisteMI**

# CERTIFICADO

## Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

<b>AUTORES:</b>	IRETA MUÑOZ LAURA ALEJANDRA MORALES VELÁZQUEZ LUIS MORENO SUÁREZ LEONARDO OSORNIO RÍOS ROQUE ALFREDO
<b>TÍTULO:</b>	ADS-SYSTEMI
<b>RAMA:</b>	PROGRAMAS DE COMPUTACION
<b>TITULAR:</b>	UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO (CON FUND. EN EL ART 83 DE LA L.F.D.A.)

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

El presente certificado se expide con fundamento en el Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, así como de otras leyes para crear la Secretaría de Cultura, publicado el 17 de diciembre de 2015 en el Diario Oficial de la Federación; artículos 26 y 41 Bis, fracción XVIII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; artículos 2, 208, 209 fracción III de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículo 69-C de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo, de aplicación supletoria de acuerdo con lo establecido por la Ley Federal del Derecho de Autor en su artículo 10; artículo 84 de la Ley General de Mejora Regulatoria; artículos 2, apartado B, fracción IV, 26 y 27 del Reglamento Interior de la Secretaría de Cultura; artículos 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I, 9, 16 y 17 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor; ACUERDO por el que se establecen los Lineamientos para el uso de la Firma Electrónica Avanzada en los actos y actuaciones de los servidores públicos del Instituto Nacional del Derecho de Autor, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de mayo del año dos mil veintiuno; y Acuerdo por el que se establecen las reglas para la presentación, substanciación y resolución de las solicitudes de registro de obras, fonogramas, videogramas y edición de libros en línea ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor, publicado el 8 de diciembre de 2021 en el Diario Oficial de la Federación.



# CERTIFICADO

## Registro Público del Derecho de Autor

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9, fracción I, de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento.

Número de Registro: 03-2023-050812490700-01

Ciudad de México, a 08 de mayo de 2023

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESÚS PARETS GÓMEZ



Zfuh+LuzoejYlhG63DOKPLVZlr1w0bRLlcQaclxwWIUN8iNqJoZwzGUqweOE+DCIGNun2c7oFnnQ98ve0SyuF  
4HPwW0Jmki9zKB5sZEUg7pTw0C0t5Wd0pgmHA6v+es1oOmqu1l9e9vvv4V4wxGVo9QI5xHFuKSY1dVdbN3  
ly/u1g56d8StMSMUlnpQx3cQLT0EWiFOR8Smjue4/gSWlfYYvbL+l2uom46iBaq4NIMrhtmzZKRJ9Fuur0YU62  
DTTdHh9jDFj0V3Gh/UxFYUF8GetDRpomOyHnmpaTo4kG2gwOFu9ymuoOftlFKZekTaF/MiJtRkAuXcj7EP2  
A==

2/2



**CULTURA**  
SECRETARÍA DE CULTURA



**INDAUTOR**  
INSTITUTO NACIONAL DEL DERECHO DE AUTOR

## **Apéndice E**

**Artículo difusión publicado en  
Superación Académica SUPAUAQ**



Querétaro, Qro. 29 de junio de 2023.

**Laura Alejandra Ireta Muñoz, Isaías Cueva Pérez, Roque Alfredo Osornio Ríos,  
Ángel Pérez Cruz,  
Facultad de Ingeniería, campus S.J.R., UAQ.  
P R E S E N T E**

Sirva este medio para enviarles un cordial saludo e informarles que, después de haber sometido al escrutinio de diversos dictaminadores el artículo de su autoría titulado **“Monitoreo de alimentos bebibles a través de la respuesta mecánica del papel”** ha sido **ACEPTADO** para su publicación en el número 64 de la revista Superación Académica.

Consideramos que la temática de su artículo está en consonancia con la definición de nuestra Revista, la cual acepta para su publicación colaboraciones sobre el quehacer académico de nuestros agremiados, así como resultados del análisis de las investigaciones docentes, académicas o científicas originales e inéditas, en todas las áreas del conocimiento.

Sin otro particular, y a nombre del Comité Editorial, les reiteramos nuestro agradecimiento y les invitamos a que continúen remitiendo sus valiosas colaboraciones a la Revista Superación Académica de nuestra organización sindical.

**A t e n t a m e n t e**

**“Por una Auténtica Comunidad Universitaria”**



**Mtra. Ruth Aurelia Soto Fuentes  
Secretaría de Prensa y Propaganda  
Directora de la Revista Superación Académica**

# SUPERACIÓN ACADEMICA

Sindicato Único del Personal Académico  
de la Universidad Autónoma de Querétaro

# SUPAUAQ



Igualdad, equidad, paridad

Inspirada en el cartel *We Can Do It!*, diseñado por J. Howard Miller (1943). (Imagen de dominio público).

## Monitoreo de alimentos bebibles a través de la respuesta mecánica del papel

**Laura Alejandra Ireta-Muñoz.** Facultad de Ingeniería, SJR, UAQ.

**Isaías Cueva-Pérez.** Facultad de Ingeniería, SJR, UAQ.

**Roque Alfredo Osornio-Ríos.** Facultad de Ingeniería, SJR, UAQ.

**Ángel Pérez-Cruz.** Facultad de Ingeniería, SJR, UAQ.



## **Apéndice F**

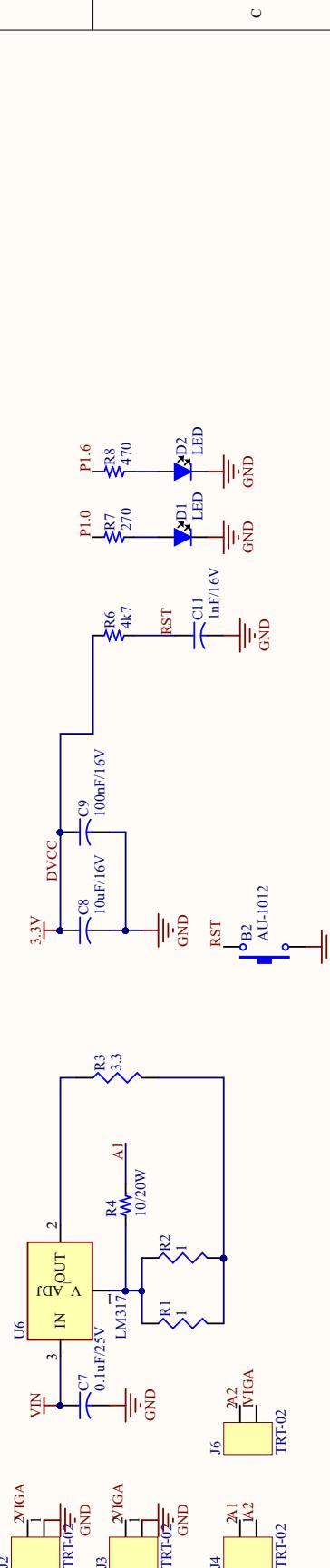
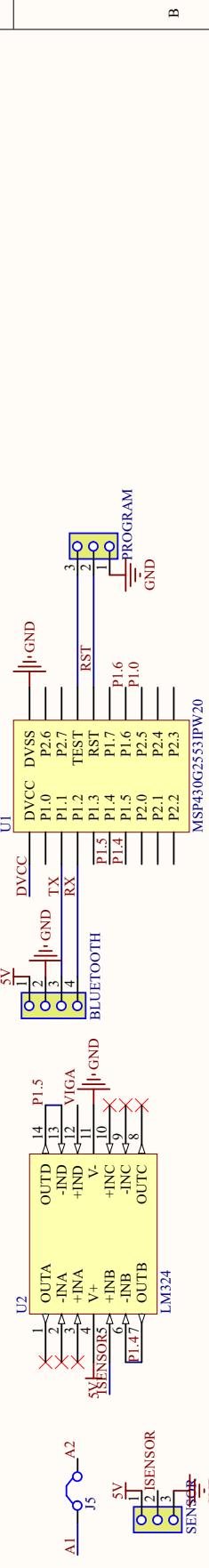
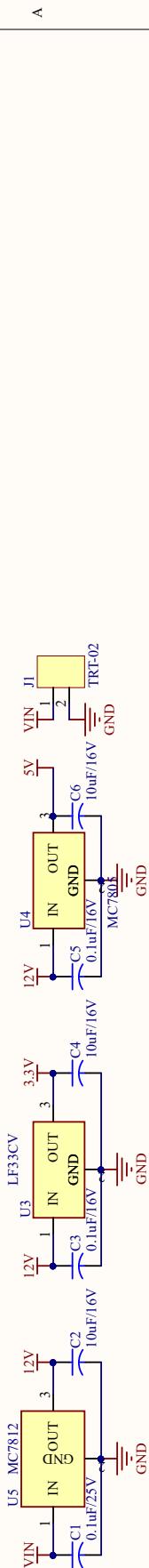
### **Diagrama Esquemático Circuito**

1

2

3

4



D

Title Sistema de Adquisición. Diseñado por: Leonardo Moreno Suárez

Size	Number	Revision
A4		

Date: 24/11/2022  
File: D:\Documents\ADS SYSTEMS\schDoc  
Sheet of 4