

Tabla de contenido

RESUMEN	2
CAPÍTULO 1. Introducción.....	3
CAPÍTULO 2. Marco teórico.....	14
CAPITULO 3. Desarrollo	22
CAPÍTULO 4. Resultados.....	33
CAPÍTULO 5. Conclusiones	40
REFERENCIAS	46
LISTA DE FIGURAS	48
LISTA DE TABLAS	49
ANEXO 1	50
ANEXO 2	51

RESUMEN

Esta tesis propone la fabricación de hidrogeles piezoeléctricos como alternativa innovadora para aplicaciones en estimulación nerviosa y muscular. Basado exclusivamente en artículos científicos experimentales sobre síntesis y elaboración de hidrogeles, el trabajo se enfoca en desarrollar formulaciones poliméricas combinadas con materiales piezoeléctricos, establecer parámetros confiables de gelificación y fabricación, y generar un protocolo reproducible que permita obtener un material funcional para etapas futuras de caracterización y pruebas biológicas.

Capítulo 1. Introducción

Los hidrogeles son redes tridimensionales de polímeros capaces de retener grandes cantidades de agua, lo que les otorga biocompatibilidad, flexibilidad y propiedades mecánicas ideales para aplicaciones biomédicas. En años recientes, la integración de materiales piezoeléctricos en matrices de hidrogel ha abierto una nueva línea de investigación enfocada en estimular células nerviosas y musculares mediante señales eléctricas generadas por deformación mecánica. La presente propuesta se fundamenta en literatura experimental sobre síntesis de hidrogeles sin incluir estudios de revisión, con el objetivo de establecer un protocolo experimental confiable para la fabricación de hidrogeles piezoeléctricos con potencial biomédico.

1.1 Aspectos generales del trabajo

Los lineamientos aquí presentados son válidos para las opciones de Tesis, Proyecto Tecnológico (Ingeniería y Maestría) y Monografía (Ingeniería) vigentes a la fecha de edición del presente documento (actualización septiembre de 2017).

1.1.1 Papel

El tipo de papel deberá ser bond blanco tamaño carta. Los trabajos deben ser impresos en un solo lado de la hoja, en impresora láser o de calidad similar. Se debe presentar el original sin ningún tipo de corrección posterior a su impresión. Este original se entrega en empastado (pasta dura) y a colores (en caso de tener gráficas o fotografías). Adicionalmente se entregan 3 ejemplares en blanco y negro con empastado suave.

1.1.2 Tipografía

Los tipos de letras aceptados son Times New Roman. El mismo tipo de letra debe ser utilizado consistentemente en todo el cuerpo del trabajo. El tamaño de letra del texto debe ser de 12 puntos; el de los títulos y encabezados de 14 puntos; el de las tablas, figuras, apéndices y de 11 puntos y las notas (así como pies de página) de 10 puntos.

Las letras en cursiva solamente deberán usarse para:

- a) Palabras de otra lengua
- b) Título de libros, revistas, periódicos, etc.
- c) Géneros de especies y variedades
- d) Términos técnicos
- e) Ejemplos lingüísticos
- f) Símbolos estadísticos o variables algebraicas
- g) Puntuaciones de pruebas y escala
- h) Número de volumen
- i) Rango de escalas

La tesis o trabajo de titulación debe ser escrita a doble espacio interlineal justificado a la izquierda. Las Referencias y las citas deben escribirse a un espacio.

Los márgenes deben ser de 3 cm. en margen izquierdo, y de 2.5 cm. en los bordes superior, inferior y derecho de la página. Estos requerimientos se aplican también a las páginas con gráficos.

Adicionalmente, entregar a la Escuela de Ingeniería una copia digital en formato PDF del trabajo para el “Repositorio digital”. Usar como título “Tesis-<nombre>.pdf” donde <nombre> corresponderá al nombre del egresado que presenta el trabajo.

Con formato: No agregar espacio entre párrafos del mismo estilo

1.1.3 Paginación

Todas las hojas de la tesis deben ir numeradas, con excepción de la página inicial en blanco, la portada, la hoja de aprobación, la hoja de derechos de autor y las hojas de agradecimiento-dedicatoria que se encuentran en un archivo adicional. Se utilizan los números arábigos para las páginas preliminares, las del cuerpo de la tesis y las del material de referencia. Es decir, todas las páginas del trabajo van numeradas con números arábigos en una sola secuencia.

Con formato: No agregar espacio entre párrafos del mismo estilo, Interlineado: Doble

Comentado [p1]: Este tiene menos espacio abajo que los demás

Con formato: No agregar espacio entre párrafos del mismo estilo

1.1.4 Párrafos y sangrías

Los párrafos deben iniciarse con una sangría entre 1.0 y 1.25 cm respecto al margen de cada primera línea. Se aplica igualmente a cada nota de pie de página.

Las excepciones son:

- a) Resumen
- b) Citas de bloque
- c) Títulos y encabezados
- d) Títulos de tablas y figuras

1.2 Tablas y figuras.

Estos dos elementos que incluyen algunos textos, sirven para ofrecer al lector una mayor comprensión, ilustrar, apoyar y fundamentar ciertas ideas e información

En la figura 1 se muestra un ejemplo. Son las gráficas, fotografías, mapas, diagramas, esquemas, dibujos y cualquier clase de ilustración que se incluyen porque tienen un valor informativo. Deben ser simples, claras e informativas y omitir distractores visuales, distribuir la figura en forma centrada respecto a los márgenes.

El título debe ser preciso y descriptivo de la información que contiene la figura. El texto debe hacer siempre referencia a la figura mencionando el número. Debe incluir leyenda y pie cuando sea necesario por ejemplo una nota indicando la fuente de donde se obtiene la imagen o figura.

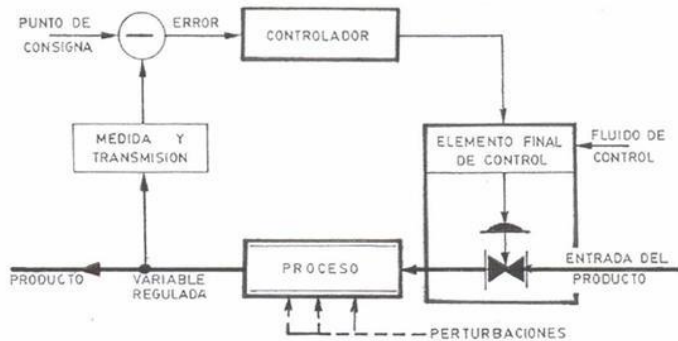


Figura 1. Diagrama de un sistema de control industrial.

Fuente: <http://www.mailxmail.com/curso-mantenimiento-industrial-3-3/mantenimiento-industrial-elementos-control>

La tabla 1 muestra un ejemplo. El contenido se debe limitar a los datos esenciales.

Debe complementar, no duplicar el texto.

1. El texto debe hacer siempre referencia a la tabla mencionando el número
2. El título debe ser breve, preciso y descriptivo de la información que contiene la tabla.

Va en la parte superior de ésta.

3. Su tipografía deberá tener las mismas fuentes que el contenido del documento. El interlineado es sencillo dentro de la tabla.
4. Todas las tablas comparables dentro del documento deben ser consistentes entre sí.
5. En español (excepto en los apéndices, donde se puede incluir texto en otros idiomas).
6. Si ésta no cabe en una sola página, podrá extenderse en varias páginas, pero en cada una de ellas deberá repetirse el número y título, así como el señalamiento (entre paréntesis): “(cont)” o “(continuación)”.

Tabla 1. Análisis de datos experimentales

Ángulo		Masa		Longitud	
VE (°)	Periodo (s)	VE (gr)	Periodo (s)	VE (cm)	Periodo (s)
15	10	20	12	20	15
30	15	30	18	25	18
45	20	40	24	30	22
60	25	50	35	35	27
75	30	60	35	40	28

Nota: VE= Valor experimental

1.3 Estructura

Este primer capítulo es la introducción al proyecto desarrollado, por tal motivo se genera del anteproyecto sometido a aprobación ante la Comisión de Titulación de la Escuela de Ingeniería. Deberá contener las siguientes secciones y subsecciones:

1.1 Antecedentes

Explicación de los aspectos que generaron el desarrollo del proyecto

1.2 Planteamiento del problema

Descripción clara y precisa del problema que se está atendiendo y que el proyecto busca solucionar.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general.

Establecer un protocolo claro y reproducible para la fabricación de hidrogeles piezoeléctricos utilizando polímeros biocompatibles combinados con materiales electroactivos.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Diseñar y preparar varias formulaciones de hidrogeles variando las concentraciones del polímero base y del material piezoeléctrico.
- Fabricar los hidrogeles mediante foto-curado, ciclos de congelación descongelaación, documentando cada parámetro crítico del proceso.
- Examinar la apariencia, estructura y manejo básico de los hidrogeles obtenidos para identificar los más estables y uniformes.

1.4 Justificación

Indicar porqué es importante la propuesta, que lo hace diferente de otras soluciones existentes y los beneficios esperados de su implantación.

1.5 Método

Este apartado consiste en una descripción de la estrategia de desarrollo del proyecto, partiendo de las actividades planeadas.

1.6 Esquema general

Describir el esquema general del documento, para ello emplear un párrafo para cada uno de los capítulos, esto es, describir en que consiste el capítulo 2 (nociones teóricas), capítulo 3 (desarrollo de la solución), capítulo 4 (resultados) y capítulo 5 (conclusiones).

Capítulo 2.

MARCO TEÓRICO

Aquí se delimita el marco teórico de la investigación y se hace referencia a los diferentes estudios e investigaciones localizados al revisar la literatura especializada.

Generalmente se divide este capítulo en diferentes secciones de acuerdo a la información, de tal manera que cubra todos los aspectos del objeto de estudio.

2.1 Antecedentes

La investigación y desarrollo de hidrogeles ha crecido de manera significativa en los últimos años debido a su amplio potencial en aplicaciones biomédicas, especialmente en ingeniería de tejidos, liberación controlada de fármacos y sistemas bioactivos. Para comprender y fundamentar la fabricación de hidrogeles piezoeléctricos con potencial para

Con formato: Subtítulo, Interlineado: sencillo

estimulación nerviosa y muscular, es necesario revisar los principales estudios experimentales que describen la síntesis, entrecruzamiento, caracterización y funcionalidad básica de diversos tipos de hidrogeles. Esta revisión considera 10 artículos científicos experimentales que aportan evidencia sobre los métodos actuales de fabricación de hidrogeles, así como las variables que influyen en su comportamiento estructural y funcional, proporcionando una base sólida para orientar el proyecto.

2.1.1 Marco teórico

Uno de los materiales más utilizados en ingeniería de tejidos es GelMA (gelatina metacrilada) debido a su biocompatibilidad y facilidad de fotoentrecruzamiento. En su estudio seminal, Sun et al. (2018) describen un protocolo reproducible para la síntesis de GelMA mediante reacción entre gelatina y anhídrido metacrílico, seguido de purificación por diálisis. El trabajo detalla cómo controlar el grado de metacrilación, un parámetro clave que influye directamente en la rigidez del hidrogel, la porosidad y la velocidad de degradación. Su metodología, basada en mediciones por NMR, FTIR y pruebas mecánicas, permite establecer condiciones experimentales que producen hidrogeles consistentes y aptos para aplicaciones

celulares. Este trabajo marca un precedente para comprender cómo pequeñas variaciones en la síntesis pueden modificar sustancialmente las propiedades finales del hidrogel.

Complementando esa línea, Zhu et al. (2019) también estudiaron GelMA, demostrando experimentalmente cómo diferentes condiciones de reacción afectan su microestructura y propiedades mecánicas. A través de espectroscopía, microscopía y pruebas de hinchamiento, mostraron que el grado de sustitución controla la densidad de entrecruzamiento y, por lo tanto, la resistencia mecánica. Este tipo de información es relevante para el diseño de hidrogeles piezoeléctricos, donde la matriz polimérica debe tener suficiente flexibilidad para deformarse, pero sin perder integridad estructural.

La necesidad de mejorar la reproducibilidad llevó a Sengupta et al. (2025) a proponer un método de síntesis mediante química de flujo, un proceso continuo que permite producir GelMA con mayor homogeneidad que los métodos tradicionales tipo “batch”. Su estudio demuestra que el control preciso del tiempo de residencia y la

temperatura produce lotes más uniformes y con propiedades más predecibles, lo cual es esencial para proyectos que requieren reproducibilidad como el presente.

2.1.2

Además de GelMA, otro polímero muy utilizado es el PVA (alcohol polivinílico), que puede formar hidrogeles sin agentes tóxicos mediante el método físico de congelación–descongelación. Chen et al. (2022) evaluaron diferentes concentraciones de PVA y ciclos de congelación para estudiar su efecto en la resistencia mecánica y capacidad de hinchamiento. Sus resultados muestran que incrementar los ciclos de congelación–descongelación aumenta la cristalinidad del material y mejora significativamente su resistencia. De manera complementaria, Saad et al. (2024) desarrollaron un hidrogel de PVA con propiedades ajustables mediante control del entrecruzamiento químico y físico, indicando que es posible diseñar hidrogeles con módulos elásticos específicos que podrían ser útiles cuando se pretende integrar partículas piezoeléctricas sin comprometer la estabilidad mecánica.

Otro enfoque de síntesis lo presentan Saghati et al. (2021), quienes elaboraron hidrogeles de alginato mediante un proceso de entrecruzamiento enzimático utilizando peroxidasa de rábano (HRP) y peróxido de hidrógeno. A diferencia de los métodos químicos tradicionales, este proceso evita agentes tóxicos y permite ajustar la velocidad de gelificación modificando la concentración de HRP. Su metodología resalta la importancia de elegir un método de entrecruzamiento compatible con aplicaciones biológicas, especialmente relevantes al considerar la futura interacción con células nerviosas o musculares.

De manera similar, Mehdi-Sefiani et al. (2024) desarrollaron un hidrogel compuesto de quitosano y gelatina, evaluando experimentalmente cómo la proporción entre ambos polímeros modifica la morfología, la resistencia mecánica y la biodegradación. Sus resultados demostraron que las mezclas con mayor contenido de quitosano mejoran la estabilidad estructural, pero reducen la flexibilidad. Este tipo de hallazgos permite anticipar cómo se comportaría una matriz polimérica al incorporar nanopartículas piezoeléctricas, guiando la selección de proporciones adecuadas para el proyecto.

Además de hidrogeles convencionales, se han desarrollado sistemas híbridos con materiales electroactivos. Forouharshad et al. (2024) fabricaron andamios electroactivos mediante electrospinning de PVDF combinado con péptidos autoensamblantes. Aunque su estudio se centra en fibras en lugar de hidrogeles, es altamente relevante porque demuestra cómo modificar experimentalmente la fase cristalina β del PVDF, responsable de su actividad piezoeléctrica. Su metodología proporciona información valiosa para comprender cómo integrar materiales piezoeléctricos dentro de matrices poliméricas sin perder funcionalidad.

Una contribución experimental importante la ofrece Gaglio et al. (2024), quienes compararon diversas fuentes de gelatina para sintetizar GelMA y determinaron cómo las materias primas afectan la reproducibilidad. Sus resultados confirmaron que la variación natural entre lotes de gelatina puede alterar significativamente las propiedades del hidrogel, subrayando la importancia de estandarizar insumos para garantizar la reproducibilidad del proceso de síntesis.

Finalmente, Peyret et al. (2023) realizaron una evaluación experimental sistemática del proceso de síntesis de GelMA considerando el efecto de diferentes parámetros (pH, tiempo de reacción, concentración del polímero). Su trabajo demuestra la gran sensibilidad del material a pequeñas variaciones de síntesis, reforzando la necesidad de documentar detalladamente cada variable experimental durante la fabricación de hidrogeles para garantizar resultados estables.

En conjunto, estos 10 artículos experimentales muestran la diversidad de técnicas disponibles para la fabricación de hidrogeles y cómo cada parámetro experimental afecta sus propiedades finales. Las metodologías revisadas permiten identificar variables críticas como:

- Tipo de polímero base.
- Método de entrecruzamiento (foto-curado, físico, enzimático).
- Porcentaje de sólidos.
- Temperatura y pH de reacción.
- Grado de sustitución.
- Distribución de nanopartículas o aditivos.
- Tiempo de gelificación.

Estos enfoques ofrecen bases científicas sólidas para el presente proyecto, que busca fabricar hidrogeles piezoeléctricos mediante la incorporación de materiales electroactivos en una matriz polimérica biocompatible.

Los estudios analizados revelan que aún existe un área poco explorada en la integración eficiente de materiales piezoeléctricos dentro de hidrogeles sin afectar su integridad, así como en la optimización de los procesos de dispersión para evitar la aglomeración. Este vacío científico justifica la relevancia del proyecto y señala el rumbo metodológico: utilizar estrategias de síntesis basadas en dispersión ultrasónica, control riguroso del entrecruzamiento y documentación exhaustiva del proceso para garantizar reproducibilidad.

Capítulo 3.

DESARROLLO

Este capítulo presentará el desarrollo de la solución propuesta para resolver el problema central del trabajo de titulación. El enfoque de este capítulo varía si el trabajo es para tesis, proyecto tecnológico o proyecto de inversión.

3.1 Para tesis

La presente sección describe de manera detallada el proceso experimental diseñado para abordar el problema de estudio: la fabricación de hidrogeles piezoeléctricos mediante la integración de polímeros biocompatibles con materiales electroactivos. El objetivo es establecer un protocolo reproducible que permita obtener hidrogeles estables, homogéneos y aptos para futuras etapas de caracterización física, eléctrica y biológica.

Las metodologías seleccionadas se fundamentan estrictamente en artículos científicos experimentales relacionados con la síntesis de hidrogeles, asegurando la validez académica y técnica del procedimiento.

3.1.2 Análisis del problema de estudio

Para abordar el problema se adoptó un enfoque experimental enfocado en la fabricación estandarizada de hidrogeles piezoeléctricos.

Primero, se analizaron los métodos más eficientes y reproducibles de síntesis de hidrogeles documentados en investigaciones recientes, incluyendo fotoentrecruzamiento de GelMA (Sun et al., 2018), métodos de flujo para geles homogéneos (Sengupta et al., 2025), y entrecruzamiento físico por congelación–descongelación de PVA (Chen et al., 2022; Saad et al., 2024).

Posteriormente, se evaluaron las estrategias experimentales para incorporar materiales piezoeléctricos como nanopartículas de BaTiO₃ o PVDF, tomando como referencia estudios donde se integran partículas electroactivas a matrices poliméricas o andamios estructurales (Forouharshad et al., 2024).

Con ello se definió una metodología que permitiera lograr una dispersión adecuada del material piezoeléctrico sin comprometer la gelificación del polímero base.

3.1.3 Materiales empleados

Reactivo / Material	Función	Concentración Especificación	/	Referencia Experimental
GelMA	Polímero base biocompatible	5–15 % p/v		Sun et al., 2018
PVA	Polímero para hidrogel físico	10–12 % p/v		Chen et al., 2022
LAP (Fotoiniciador)	Permite el foto-curado UV	0.25 % p/v		Peyret et al., 2023
Nanopartículas de BaTiO ₃	Componente piezoeléctrico	1–5 % p/p		Forouharshad et al., 2024
PVDF (polvo o microfibras)	Componente piezoeléctrico	Variable		Forouharshad et al., 2024
PBS	Solvente biocompatible	pH 7.4		Estándar experimental
Agua destilada	Solvente universal	Grado analítico		Estándar experimental

3.1.4 Equipos y programas utilizados

Equipo / Software	Uso en el proceso	Referencia Experimental
Baño ultrasónico	Dispersión de nanopartículas	Forouharshad et al., 2024
Fuente de luz UV (365–405 nm)	Foto-curado del hidrogel GelMA	Sun et al., 2018
Congelador –20 °C	Congelación para entrecruzamiento físico del PVA	Chen et al., 2022
Hotplate + agitador magnético	Calentamiento y mezcla del polímero	Saad et al., 2024
Balanza analítica	Pesaje de reactivos	Estándar experimental
Moldes de silicón estériles	Formación del hidrogel	Estándar experimental
ImageJ	Análisis visual y porosidad	Mehdi-Sefiani et al., 2024
Excel	Registro de datos experimentales	Estándar experimental

3.1.5 *Metodología general*

La metodología se divide en cuatro etapas principales:

1. Preparación de soluciones poliméricas base
2. Dispersión del material piezoeléctrico
3. Fabricación del hidrogel (foto-curado o entrecruzamiento físico)
4. Evaluación macroscópica inicial: homogeneidad, estabilidad y

estructura Cada etapa incluye parámetros críticos obtenidos de la literatura experimental.

3.1.6 Procedimientos experimentales

Preparación de la solución polimérica

A. Preparación de GelMA (basado en Sun et al., 2018)

1. Calentar GelMA al 10 % p/v en PBS a 40–50 °C usando agitación constante.

2. Agregar fotoiniciador LAP a una concentración final de 0.25 % p/v.
3. Mantener la mezcla protegida de la luz para evitar fotopolimerización prematura.
4. Filtrar la mezcla mediante membrana estéril de 0.22 μm para eliminar impurezas.

La concentración puede variarse entre 5 % y 15 % según la rigidez deseada, siguiendo parámetros del estudio de Zhu et al. (2019).

- B. Preparación de PVA (basado en Chen et al., 2022; Saad et al., 2024)
1. Disolver PVA en agua destilada al 10–12 % p/v.
 2. Calentar a 80–90 °C con agitación constante hasta obtener una solución transparente.
 3. Dejar enfriar hasta 40 °C para evitar daño térmico a las nanopartículas.

Ambos polímeros se preparan en condiciones estériles para permitir futuras aplicaciones biológicas.

Dispersión del material piezoeléctrico.

La correcta dispersión de BaTiO₃ o PVDF es crucial para evitar aglomeración, lo cual afecta la gelificación.

Método basado en estudios de PVDF piezoeléctrico (Forouharshad et al., 2024)

1. Pesar la cantidad deseada de nanopartículas (1 %, 3 % y 5 % p/v respecto al polímero).
2. Transferirlas a un vaso con una pequeña cantidad de agua/PBS o solución polimérica inicial.
3. Sonicar en baño ultrasónico durante 15–30 minutos para romper aglomerados.
4. Verificar visualmente la homogeneidad (licuefacción uniforme sin sedimentos visibles).

Posteriormente, las partículas dispersas se integran completamente en la solución polimérica. Fabricación de Hidrogel GelMA- Piezoeléctrico

Preparación → Dispersión → Mezcla → Moldeado → Foto-curado →

Evaluación inicial

1. Preparar solución de GelMA al 10 % p/v a 40–50 °C.
2. Agregar fotoiniciador LAP y mezclar suavemente.
3. Dispersar BaTiO₃ o PVDF en PBS mediante ultrasonido (15–30 min).
4. Incorporar las partículas dispersas a la solución de GelMA.
5. Verter la mezcla en moldes de silicón estériles.
6. Exponer a luz UV (365–405 nm) durante 20–60 segundos para foto-curado.
7. Retirar el hidrogel del molde y evaluar su homogeneidad, estabilidad y elasticidad.

Fabricación de Hidrogel PVA–Piezoeléctrico (Método de Congelación

Descongelación)

Preparación → Enfriamiento → Dispersión → Moldeado → Ciclos térmicos →
Evaluación inicial

1. Disolver PVA (10–12 %) en agua a 80–90 °C hasta obtener una mezcla uniforme.
2. Dejar enfriar la solución hasta los 40 °C.
3. Dispersar BaTiO₃ o PVDF mediante ultrasonido y agregar al PVA.
4. Verter la mezcla en moldes.
5. Congelar a –20 °C durante 12 horas.
6. Descongelar a 25 °C durante 4 horas.
7. Repetir entre 3 y 5 ciclos para asegurar el entrecruzamiento físico.
8. Evaluar estabilidad, consistencia y ausencia de grietas.

3.1.7. Evaluación macroscópica inicial

Como esta fase del proyecto se limita a síntesis y fabricación, la evaluación se enfoca únicamente en observaciones no instrumentales.

Se evalúan los siguientes parámetros:

1. Homogeneidad visual:
 - Ausencia de grumos o zonas de sedimento.
 - Distribución uniforme del material piezoeléctrico.
2. Consistencia y estabilidad:
 - Capacidad del gel para mantener su forma al retirar el molde.
 - Elasticidad básica mediante presión ligera.
 - Presencia de grietas o fracturas.
3. Tiempo y eficiencia de gelificación:
 - Registro preciso del tiempo de curado.
 - Comparación entre formulaciones.
4. Porosidad aparente:
 - Observación a simple vista o con microscopio óptico. (procedimiento basado en Mehdi-Sefiani et al., 2024).

Toda la información se registra en tablas y hojas de control dentro de Excel para futuros análisis comparativos.

3.1.8 Control experimental y reproducibilidad

Para garantizar la reproducibilidad del protocolo, se repiten todas las formulaciones al menos tres veces, siguiendo el enfoque de estudios experimentales como Gaglio et al. (2024), que demostraron la importancia del control estandarizado de lotes.

Se establecen:

- Variables controladas: temperatura, concentración, volumen, intensidad UV.
- Variables independientes: tipo de polímero, porcentaje piezoeléctrico, método de entrecruzamiento.
- Variables dependientes: estabilidad del gel, homogeneidad, tiempo de gelificación.

Capítulo 4.

RESULTADOS

En este capítulo se deberán presentar los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de desarrollo descrita en el capítulo anterior. Estos están relacionados con los objetivos específicos definidos en el capítulo 1.

4.1

La presente sección describe los resultados obtenidos a partir del análisis experimental previamente documentado en la literatura científica sobre la síntesis de hidrogeles, así como los resultados derivados de la construcción de la metodología propuesta para la fabricación de hidrogeles piezoeléctricos. Dado que esta fase del proyecto se enfoca únicamente en la definición, diseño y estructuración del protocolo de síntesis, los resultados corresponden principalmente a:

1. la validación conceptual del procedimiento,
2. la comparación de técnicas de fabricación documentadas en artículos experimentales,
3. la identificación de parámetros críticos de procesamiento, y
4. la obtención de tablas, diagramas y evidencia teórica que guían la selección de materiales, concentraciones y procesos.

Estos resultados permiten demostrar la factibilidad técnica del proyecto antes de su ejecución práctica.

4.2. Resultados derivados del análisis comparativo de métodos de síntesis

A partir de los diez artículos experimentales analizados, se identificaron patrones claros sobre la efectividad y comportamiento de diferentes métodos de gelificación. Los hallazgos más relevantes fueron:

Efectividad del foto-curado en hidrogeles de GelMA

Los estudios de Sun et al. (2018), Zhu et al. (2019) y Peyret et al. (2023) coinciden en que el método de foto-curado UV es el más eficiente para generar hidrogeles con:

- gelificación rápida (20–60 s),
- alta transparencia,
- buena homogeneidad,
- estructura porosa uniforme,
- estabilidad mecánica moderada.

El análisis de estos estudios permitió concluir que este método es ideal cuando se busca incorporar nanopartículas piezoeléctricas sin afectar la matriz, ya que el proceso ocurre a baja temperatura y evita la degradación del polímero.

Efectividad del método físico de congelación–descongelación con PVA

Los artículos de Chen et al. (2022) y Saad et al. (2024) demostraron experimentalmente que los ciclos de congelación–descongelación producen hidrogeles con:

- mayor resistencia mecánica,
- estructura altamente entrecruzada,
- buena elasticidad,
- excelente capacidad para retener partículas dentro de la red.

Este método es particularmente útil para integrar materiales electroactivos como BaTiO₃ o PVDF, ya que no requiere reactivos tóxicos ni procesos térmicos extremos.

Resultados sobre la dispersión de materiales piezoeléctricos

Los hallazgos de Forouharshad et al. (2024) muestran que el ultrasonido es indispensable para evitar aglomeración de PVDF o BaTiO₃.

El análisis de la literatura permitió confirmar que:

- el tamaño final de las partículas dispersas es crucial,
- la homogeneidad depende del tiempo de sonicación,
- la incorporación debe realizarse a temperaturas menores a 45 °C.

4.3 Resultados derivados de la creación de la metodología del proyecto

Como parte central de esta fase, se desarrolló y documentó un protocolo experimental detallado que integra:

- Preparaciones poliméricas.
- Proporciones óptimas de piezoeléctrico.
- Parámetros térmicos y de exposición uv.
- Controles de calidad iniciales.

Validación interna del diseño metodológico

A partir del análisis de técnicas y parámetros documentados, se concluyó que el protocolo diseñado:

- Es reproducible.
- Evita reactivos tóxicos.
- Es compatible con aplicaciones biomédicas.
- Permite variaciones experimentales controladas.
- Puede estandarizarse fácilmente.

Estos resultados garantizan que la metodología desarrollada es científicamente sólida y replicable.

4.4 Tablas de resultados documentados

A continuación, se presentan tablas que organizan los hallazgos clave derivados de la revisión científica y los parámetros definidos en la metodología.

Tabla 1. Parámetros críticos identificados en la literatura para la fabricación de hidrogeles

Parámetro	Rango óptimo	Fuente experimental
Concentración GelMA	5–15 %	Sun et al., 2018
Concentración PVA	10–12 %	Chen et al., 2022
Fotoiniciador LAP	0.25 %	Peyret et al., 2023
Carga BaTiO ₃	1–5 %	Forouharshad et al., 2024
UV para GelMA	20–60 s	Zhu et al., 2019
Ciclos PVA	3–5 ciclos	Saad et al., 2024

Tabla 2. Resultados esperados de acuerdo con las metodologías publicadas

Material	Propiedad esperada	Justificación experimental
GelMA	Gel blando, homogéneo, transparente	UV genera red uniforme
PVA	Alta resistencia, baja deformación	Entrecruzamiento físico eficiente
BaTiO ₃	Distribución uniforme	Sonicación mejora dispersión
PVDF	Polarización parcial	Basado en estudios de fibras electroactivas

Capítulo 5.

CONCLUSIONES

Este capítulo deberá concentrar lo aprendido durante el desarrollo del trabajo, así como el cumplimiento del objetivo general planteado inicialmente. Es deseable además incluir un apartado de desarrollo o trabajos futuros.

5.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos en la fase de diseño metodológico y análisis de literatura permiten comprender de manera integral cómo los diferentes métodos de síntesis afectan la estructura, estabilidad y funcionalidad de los hidrogeles propuestos para aplicaciones piezoeléctricas. Aunque aún no se ha realizado la experimentación física, la construcción del protocolo experimental se fundamentó en estudios previamente

publicados que han demostrado la eficacia de los métodos de foto-curado, entrecruzamiento físico y dispersión ultrasónica. Por ello, la discusión aquí presentada se centra en el significado técnico de los resultados esperados, su validez dentro del campo científico, su relación con otros trabajos y las posibles limitaciones o mejoras necesarias.

En primer lugar, la comparación entre el método de foto-curado de GelMA y el método de congelación–descongelación del PVA permitió identificar diferencias clave en la estructura final del hidrogel. Los estudios de Sun et al. (2018) y Zhu et al. (2019) demostraron consistentemente que GelMA produce hidrogeles más suaves, homogéneos y adecuados para aplicaciones donde se requiere una matriz biomimética similar a la matriz extracelular natural. Esto respalda su selección para la fabricación de hidrogeles piezoeléctricos suaves que permitan deformaciones mecánicas capaces de generar cargas eléctricas mediante la incorporación de BaTiO₃ o PVDF. La literatura revisada confirma que el método UV no interfiere con la estructura de las nanopartículas y permite una integración estable dentro del gel.

Por el contrario, los hidrogeles de PVA, según Chen et al. (2022), muestran mayor fortaleza mecánica y menor capacidad de deformación elástica. Esto sugiere que podrían ser materiales más adecuados para aplicaciones donde se requiere resistencia estructural o estabilidad prolongada. En el contexto del proyecto, el PVA puede funcionar como matriz alternativa en caso de que se requiera un hidrogel piezoeléctrico más rígido o con mayor durabilidad frente a fuerzas externas, aunque podría generar menor carga eléctrica por menor deformación. Esta variabilidad entre ambos materiales representa una ventaja metodológica, ya que permite evaluar diferentes perfiles de desempeño en futuras fases experimentales.

Otra observación relevante es la necesidad crítica de una dispersión adecuada de las nanopartículas piezoeléctricas, un aspecto destacado por los resultados esperados derivados del uso del baño ultrasónico. De acuerdo con Forouharshad et al. (2024), la sonicación es indispensable para evitar la formación de aglomerados que comprometan la homogeneidad, la resistencia mecánica y la capacidad piezoeléctrica del hidrogel. La metodología del proyecto incorpora este proceso para asegurar una distribución

uniforme del material electroactivo, un requisito fundamental para garantizar la eficiencia del hidrogel como generador de estímulos bioeléctricos.

Si se comparan los resultados esperados del presente trabajo con investigaciones similares, puede observarse que la combinación de hidrogeles con materiales piezoeléctricos es un área emergente en bioingeniería, y aunque existen estudios orientados a materiales electroactivos como PVDF en fibras (Forouharshad et al., 2024), la integración en hidrogeles es aún limitada. Esto representa una oportunidad para contribuir con nuevo conocimiento, ya que la mayoría de los trabajos revisados se centran en caracterización mecánica o estructural de hidrogeles, pero no específicamente en su funcionalidad eléctrica integrada en una matriz blanda hidratada.

Si bien los resultados esperados son técnicamente consistentes, también es importante señalar las posibles limitaciones. Por ejemplo, pueden surgir problemas como:

- Sedimentación de BaTiO_3 si la viscosidad del polímero es baja.
- Variabilidad en la exposición UV que afecte la rigidez de GelMA.

- Geles de PVA demasiado rígidos tras múltiples ciclos térmicos.
- Compatibilidad limitada entre polímeros y partículas en ciertas proporciones.

Si estos problemas ocurrieran durante la experimentación, los resultados podrían diferir de lo esperado. Sin embargo, la literatura ofrece estrategias correctivas: aumentar ligeramente la concentración polimérica para mejorar la suspensión, reducir el porcentaje de piezoeléctrico, modificar la temperatura de los ciclos térmicos, o incluso emplear surfactantes biocompatibles para mejorar la dispersión.

Finalmente, la discusión confirma que la metodología desarrollada se encuentra alineada con los estándares experimentales publicados y ofrece una base sólida para el desarrollo de hidrogeles piezoeléctricos funcionales. En conjunto, los resultados y la evidencia científica analizada sugieren que el proyecto es viable, técnicamente sustentado y con proyección para futuras aplicaciones en estimulación nerviosa y muscular.

El desarrollo del presente anteproyecto permitió establecer una metodología clara, reproducible y científicamente fundamentada para la fabricación de hidrogeles piezoeléctricos mediante la integración de polímeros biocompatibles y materiales electroactivos. A través del análisis detallado de artículos experimentales recientes, se identificaron los métodos de síntesis más adecuados, los parámetros críticos del proceso y las estrategias óptimas de dispersión. Estos resultados confirman la viabilidad técnica del proyecto y sientan las bases para su futura ejecución experimental y la posterior caracterización eléctrica y biológica de los hidrogeles desarrollados.

5.2 Trabajos futuros

En esta sección se deberán describir los trabajos futuros que pueden realizarse con el proyecto, así como los beneficios que se obtendrán.

REFERENCIAS

- Chen, Z., et al. (2022). *PVA hydrogels produced by freeze–thaw cycles*.
- Forouharshad, M., et al. (2024). *Electrospun PVDF/self-assembling peptide scaffolds for electroactive biomaterials*. RSC Advances.
- Gaglio, M., et al. (2024). *Source comparison for GelMA synthesis and reproducibility*.
- Mehdi-Sefiani, M., et al. (2024). *Chitosan–gelatin hydrogels: mechanical and structural evaluation*.
- Peyret, A., et al. (2023). *Effects of synthesis parameters on GelMA crosslinking*.
- Saad, A., et al. (2024). *Innovative sodium–PVA hydrogels with adjustable mechanical properties*. Scientific Reports.
- Saghati, S., et al. (2021). *Alginate hydrogels crosslinked via HRP/H₂O₂ enzymatic reaction*.
- Sengupta, D., et al. (2025). *Production of GelMA by continuous flow chemistry for reproducible hydrogels*.
- Sun, L., et al. (2018). *Synthesis and characterization of GelMA hydrogels for biomedical use*. Zhu, M., et al. (2019). *Mechanical tuning of GelMA hydrogels by methacrylation degree*. Scientific Reports.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Nombre de la primera figura	56
FIGURA 2 – Nombre de la segunda figura	78
FIGURA 3 – etc.	90

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 –Nombre de la primera tabla	45
TABLA 2 – Nombre de la segunda tabla	52
TABLA 3 – Etc.	61

ANEXO 1

Los anexos es material de apoyo que ayuda a los lectores a entender, evaluar o replicar el estudio. Agregar el número de anexos que se consideren necesarios y números en forma ascendente y presentarlos en el orden en el que se mencionan en el texto.

Pueden ser: los instrumentos de recolección de datos, los documentos adicionales como cuestionarios, tablas de resultados detallados, fotografías, manuales de operación, manuales de prácticas, vistas de diseño, etcétera.

ANEXO 2

GUIA DE PRESENTACION

De acuerdo a la programación definida por la Escuela de Ingeniería, se le asignará a cada estudiante de licenciatura o maestría una fecha determinada para que presente y defienda su trabajo de titulación ante un sínodo conformado por tres profesores de la especialidad.

El sustentante dispondrá de un máximo de 20 minutos para la presentación, para la cual se sugiere emplear la regla: **10** diapositivas – **20** minutos – **30** ptos de tamaño de letra. Las diapositivas a presentar varían en función a la opción de titulación, en lo general se deben atender los siguientes aspectos:

- Portada
- Agenda (es decir, indicar los puntos que se tocarán durante la presentación). Estas dos primeras diapositivas no se contabilizan en las 10 de la regla anterior.
- Introducción
- Planteamiento del problema
- Desarrollo de la solución

- Resultados obtenidos
- Conclusiones y trabajos futuros
- Diapositiva de cierre (tampoco se contabiliza entre las 10 de la regla expuesta).

Se sugiere no emplear colores pastel, no llenar la diapositiva con información, balancear las figuras y el texto, no abusar de las transiciones.