

# **Memoria Provisional del Proyecto**

Simulador de palpación corneal (ANSYS + SOFA +  
Unity + interfaz háptica)  
Borrador estructurado según requisitos de entrega

Grupo de trabajo

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
1.1. Contexto y motivación . . . . .	4
1.2. Objetivos . . . . .	4
1.2.1. Objetivo general . . . . .	4
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.3. Alcance . . . . .	5
1.4. Estructura del documento . . . . .	5
<b>2. Estado del arte de entrenadores quirúrgicos en oftalmología</b>	<b>6</b>
2.1. Panorama general . . . . .	6
2.2. Entrenadores basados en simulación y realidad virtual . . . . .	6
2.3. Entrenadores con retroalimentación háptica . . . . .	6
2.4. Simulación de tejidos oculares (córnea) y biomecánica . . . . .	6
2.5. Intervenciones oftalmológicas relevantes (más allá de palpación) . . . . .	6
<b>3. Metodología</b>	<b>8</b>
3.1. Visión general del flujo de trabajo . . . . .	8
3.2. Simulación FEM en ANSYS (modelado y configuración) . . . . .	8
3.2.1. Geometría de la córnea . . . . .	8
3.2.2. Definición de materiales . . . . .	9
3.2.3. Mallado . . . . .	9
3.2.4. Tipo de elemento . . . . .	10
3.2.5. Condiciones de contorno . . . . .	11
3.2.6. Cargas y caso de palpación . . . . .	11
3.2.7. Configuración del análisis . . . . .	12
3.3. Simulación en SOFA (adaptación e implementación) . . . . .	12
3.3.1. Motivación y requisitos de SOFA . . . . .	12
3.3.2. Pipeline ANSYS → Gmsh → SOFA . . . . .	13
3.3.3. Escena SOFA y componentes . . . . .	14
3.4. Interfaz háptica (lápiz háptico) y requisitos . . . . .	14
3.4.1. Requisitos del software de simulación . . . . .	15
3.4.2. UML: clases y casos de uso . . . . .	15
3.5. Integración con Unity . . . . .	16
3.5.1. Arquitectura de integración (ANSYS/SOFA/Unity) . . . . .	16
3.6. Reducción de modelo . . . . .	17
<b>4. Resultados</b>	<b>18</b>
4.1. Resultados en ANSYS . . . . .	18
4.1.1. Desplazamientos . . . . .	18
4.1.2. Tensiones . . . . .	19
4.1.3. Deformaciones . . . . .	20
4.1.4. Curva fuerza–desplazamiento . . . . .	20
4.2. Resultados en SOFA . . . . .	21
4.3. Comparativa ANSYS vs SOFA . . . . .	22

<b>5. Conclusiones</b>	<b>23</b>
5.1. Conclusiones provisionales . . . . .	23
5.2. Líneas futuras . . . . .	23
<b>6. Referencias</b>	<b>24</b>
<b>A. Checklist de requisitos (según instrucciones)</b>	<b>26</b>
A.1. Informe (PDF, LaTeX) . . . . .	26
A.2. Contenido FEM obligatorio . . . . .	26
A.3. Contenido háptica e integración . . . . .	26

# Resumen

Este documento es un **borrador/memoria provisional** del proyecto, construido para cumplir la **estructura y requisitos** indicados en las instrucciones de la asignatura: **Introducción** (mín. 2 páginas), **Estado del arte** (mín. 5 páginas), **Metodología** (mín. 5 páginas), **Resultados** (mín. 3 páginas), **Conclusiones** y **Referencias** (mín. 20 contribuciones científicas). En esta versión, se incluyen contenidos disponibles actualmente en las partes de **modelado y simulación** (ANSYS) y **adaptación a SOFA**. Las secciones relativas a la **interfaz háptica**, **Unity** y la integración completa se han creado como apartados formales pero se marcan explícitamente como **POR COMPLETAR** (no se inventa información). Las figuras/capturas se han sustituido por **placeholders** con rutas genéricas (p. ej., `capturas/ansys/...`) para facilitar la inserción posterior sin romper la compilación del PDF.

# 1. Introducción

## 1.1. Contexto y motivación

El entrenamiento quirúrgico en oftalmología requiere el desarrollo de habilidades manuales finas y una percepción táctil precisa en tejidos delicados. Entre las tareas relevantes, la **palpación/indentación corneal** resulta útil para caracterizar la respuesta mecánica del tejido y como base para el desarrollo de entrenadores quirúrgicos con interacción háptica.

Este proyecto aborda la construcción de un **simulador de palpación corneal** combinando:

- **Simulación por elementos finitos (ANSYS)** para caracterizar tensiones, deformaciones y desplazamientos.
- **Simulación interactiva (SOFA)** como plataforma orientada a tejidos blandos e interacción en tiempo real.
- **Interfaz háptica** (lápis/dispositivo háptico) para retroalimentación de fuerza (**por completar en este borrador**).
- **Integración con Unity** para visualización e interacción (**por completar en este borrador**).

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un simulador que permita **palpar una córnea virtual** y observar/medir su respuesta mecánica, con el objetivo de aproximar un entorno de entrenamiento quirúrgico reproducible y extensible.

### 1.2.2. Objetivos específicos

1. Construir un modelo geométrico y mecánico simplificado de córnea y ejecutar simulaciones FEM en ANSYS.
2. Obtener resultados de interés: mapas de tensiones, deformaciones, desplazamientos y curva fuerza–desplazamiento.
3. Adaptar la geometría/malla para una simulación volumétrica en SOFA y construir una escena funcional con contacto/palpador.
4. Diseñar la arquitectura software para integrar simulación + interfaz háptica + visualización en Unity (**POR COMPLETAR**).
5. Preparar una estrategia de **reducción de modelo** para ejecución en tiempo real (**POR COMPLETAR**).

## 1.3. Alcance

En esta entrega provisional:

- Se documenta con detalle la parte de **simulación FEM** (geometría, malla, tipo de elemento, materiales, contorno y cargas).
- Se documenta la **adaptación a SOFA** y el pipeline de generación/importación de malla.
- Se establece el esqueleto completo de la memoria final (incluyendo apartados de háptica e integración) sin inventar contenido no disponible.

## 1.4. Estructura del documento

El documento sigue los apartados exigidos en las instrucciones: Introducción, Estado del arte, Metodología, Resultados, Conclusiones y Referencias, incluyendo un apéndice con checklist de requisitos.

## 2. Estado del arte de entrenadores quirúrgicos en oftalmología

### 2.1. Panorama general

**[POR COMPLETAR / EN DESARROLLO].** Este capítulo debe recoger un estado del arte sobre entrenadores quirúrgicos en oftalmología, no solo centrado en palpación, sino también en otras intervenciones. En esta versión se deja la estructura recomendada, con espacios para incorporar referencias científicas (mínimo 20 en total en la memoria final, preferentemente la mayoría aquí y en metodología).

### 2.2. Entrenadores basados en simulación y realidad virtual

**[POR COMPLETAR].**

- Simuladores VR/AR/MR para entrenamiento oftalmológico.
- Métricas de evaluación objetiva (tiempo, trayectorias, fuerza, errores).
- Validez del simulador (face validity, construct validity, predictive validity).

### 2.3. Entrenadores con retroalimentación háptica

**[POR COMPLETAR].**

- Dispositivos hápticos tipo stylus (p. ej., Phantom Omni/Touch y equivalentes).
- Modelos de contacto y estabilidad (frecuencias altas de servo loop).
- Integración de motores físicos (SOFA/CHAI3D) con entornos de render (Unity).

### 2.4. Simulación de tejidos oculares (córnea) y biomecánica

**[POR COMPLETAR].** Aquí debe incluirse literatura sobre:

- Modelos FEM de córnea (lineales, hiperelásticos, anisótropos, viscoelásticos).
- Identificación de parámetros mediante ensayos (indentación, air-puff).
- Influencia de condiciones fisiológicas (presión intraocular, anclajes periféricos).

### 2.5. Intervenciones oftalmológicas relevantes (más allá de palpación)

**[POR COMPLETAR].** Ejemplos de áreas que se esperan cubrir:

- Cirugía de cataratas (phacoemulsification) y simuladores asociados.

- Procedimientos corneales (LASIK, cross-linking) y simulación de cambios biomecánicos.
- Técnicas vitreorretinianas (vitrectomía) y necesidades de entrenamiento.

### 3. Metodología

#### 3.1. Visión general del flujo de trabajo

El flujo de trabajo propuesto se compone de cuatro bloques:

1. **ANSYS**: modelado y simulación FEM para obtención de respuesta mecánica.
2. **Exportación/Conversión**: preparación de geometría/malla para simulación interactiva.
3. **SOFA**: escena con modelo deformable + palpador + contacto.
4. **Integración**: Unity + interfaz háptica + reducción de modelo (**POR COMPLETAR**).

#### 3.2. Simulación FEM en ANSYS (modelado y configuración)

##### 3.2.1. Geometría de la córnea

**[A COMPLETAR CON VUESTROS PARÁMETROS DEFINITIVOS]**. En la fase actual se trabaja con una geometría simplificada compatible con la simulación: superficies anterior/posterior y espesor, con posible partición por capas (p. ej., estroma anterior/posterior y Bowman).



Figura 3.1: Geometría de la córnea en ANSYS (vista general).

### 3.2.2. Definición de materiales

**[A COMPLETAR CON LOS VALORES DEFINITIVOS DISPONIBLES].** Se describirán los modelos constitutivos adoptados (p. ej., lineal elástico con  $\nu$  alto para casi-incompresibilidad en la fase inicial) y los parámetros por capa.

Cuadro 3.1: Propiedades mecánicas (plantilla). **Sustituir por valores finales del modelo.**

Región	$E$	$\nu$
Capa 1 (p. ej., Bowman)	—	—
Capa 2 (p. ej., Estroma anterior)	—	—
Capa 3 (p. ej., Estroma posterior)	—	—

### 3.2.3. Mallado

**[A COMPLETAR: tamaño de elemento, criterios de refinamiento, estadísticas].**  
Deben incluirse:

- Tipo de malla (tetraédrica/hexaédrica/híbrida).
- Tamaño global y refinamiento local (zona de contacto/áplex).
- Número de nodos y elementos.
- Verificación de calidad (skewness, aspect ratio, etc.).



Figura 3.2: Mallado de la córnea en ANSYS.

### 3.2.4. Tipo de elemento

**[A COMPLETAR SEGÚN VUESTRO MODELO].** Especificar el/los elementos usados:

- Elementos sólidos (p. ej., tetra de 10 nodos).
- Elementos de lámina/cáscara para capas delgadas, si aplica.
- Elementos de contacto, si aplica.

### 3.2.5. Condiciones de contorno

[A COMPLETAR: qué superficies/bordes se fijan y por qué]. Se deben describir de manera inequívoca:

- Restricciones (fixed support, displacement constraints, etc.).
- Justificación biomecánica (anclaje periférico, simplificación del globo ocular, etc.).

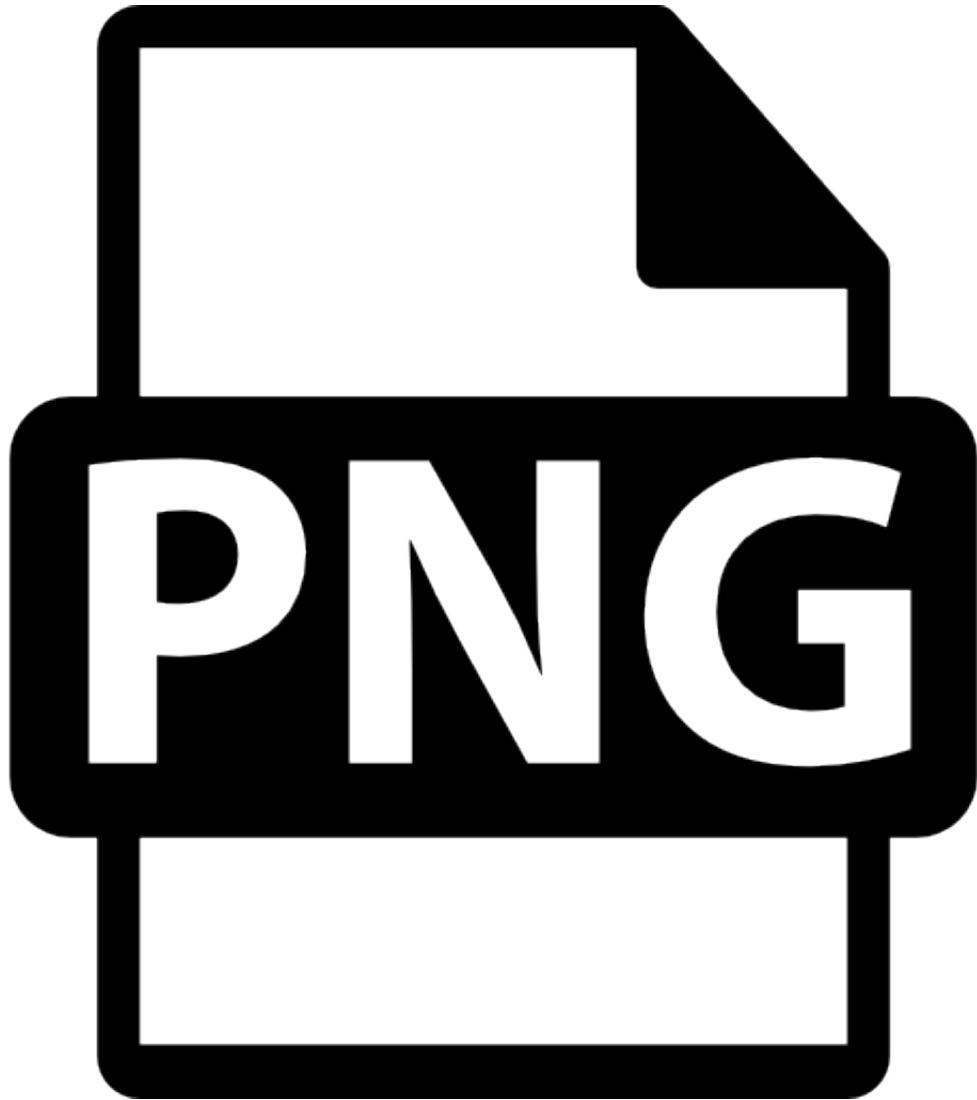


Figura 3.3: Condiciones de contorno (fijaciones/apoyos) en ANSYS.

### 3.2.6. Cargas y caso de palpación

[A COMPLETAR: magnitud, dirección, región de aplicación, tipo de carga]. Ejemplos a documentar:

- Fuerza remota aplicada sobre una superficie (remote force).
- O bien indentador rígido con contacto explícito.
- Definición de la rampa de carga si se usan subpasos.



Figura 3.4: Aplicación de carga de palpación (remote force o equivalente).

### 3.2.7. Configuración del análisis

[A COMPLETAR: tipo de análisis, linealidad, solver].

- Tipo: Static Structural / Transient (si aplica).
- Activación de no linealidad geométrica/material.
- Solver y criterios de convergencia.

## 3.3. Simulación en SOFA (adaptación e implementación)

### 3.3.1. Motivación y requisitos de SOFA

SOFA es un framework para simulación física biomédica orientado a interacción. Para simular un tejido deformable requiere:

- Malla volumétrica (tetraedros) con conectividad.

- Modelo mecánico (FEM, fuerzas internas).
- Definición de colisiones y contacto con palpador.

### 3.3.2. Pipeline ANSYS → Gmsh → SOFA

**[A COMPLETAR CON DETALLES CONCRETOS DE VUESTRO PIPELINE].** Descripción esperada:

1. Exportación desde ANSYS (superficie: .obj/.stl).
2. Importación en Gmsh y generación de volumen cerrado.
3. Mallado 3D tetraédrico.
4. Exportación a .msh2.
5. Carga en SOFA y verificación de topología.



Figura 3.5: Pipeline de conversión de malla para SOFA.

### 3.3.3. Escena SOFA y componentes

[A COMPLETAR CON LA ESTRUCTURA REAL DE LA ESCENA]. Debe incluir:

- Nodo del modelo deformable (MechanicalObject, Topology, FEM).
- Material/parámetros y damping.
- Palpador (rigid body o rígido aproximado).
- Contacto y colisiones.



Figura 3.6: Escena en SOFA: córnea deformable y palpador.

### 3.4. Interfaz háptica (lápis háptico) y requisitos

[POR COMPLETAR — NO HAY INFORMACIÓN SUFFICIENTE EN ESTA FASE].

### 3.4.1. Requisitos del software de simulación

[POR COMPLETAR]. Aquí deben incluirse:

- Frecuencia de bucle háptico (típicamente alta, p. ej., 500–1000 Hz).
- Separación entre render loop (Unity) y servo loop (háptica).
- Estabilidad numérica del contacto y filtrado de fuerza.

### 3.4.2. UML: clases y casos de uso

[POR COMPLETAR]. Se debe incluir:

- Diagramas UML de clases si se implementa software específico.
- Casos de uso: palpación, calibración, selección de modo, replay, etc.



Figura 3.7: Diagrama UML de clases (placeholder).



Figura 3.8: Diagrama UML de casos de uso (placeholder).

### 3.5. Integración con Unity

**[POR COMPLETAR — NO HAY INFORMACIÓN SUFFICIENTE EN ESTA FASE].**

#### 3.5.1. Arquitectura de integración (ANSYS/SOFA/Unity)

**[POR COMPLETAR].** Se debe explicar:

- Qué datos se exportan/importan entre herramientas.
- Cómo se sincroniza estado (posición del palpador, deformación, fuerzas).
- Formato de comunicación (p. ej., plugin, sockets, shared memory, API).



Figura 3.9: Diagrama de integración entre ANSYS, SOFA, Unity e interfaz háptica (placeholder).

### 3.6. Reducción de modelo

**[POR COMPLETAR — A DEFINIR].** Este apartado debe describir:

- Estrategia: superficie de respuesta, regresión, surrogate model, ROM FEM, etc.
- Variables de entrada (fuerza/posición, parámetros materiales) y salida (desplazamiento, fuerza reactiva).
- Validación contra FEM de alta fidelidad.

## 4. Resultados

### 4.1. Resultados en ANSYS

[PENDIENTE DE CAPTURAS Y VALORES NUMÉRICOS].

#### 4.1.1. Desplazamientos



Figura 4.1: Mapa de desplazamiento total.

#### 4.1.2. Tensiones



Figura 4.2: Mapa de tensión principal máxima.

#### 4.1.3. Deformaciones



Figura 4.3: Mapa de deformación equivalente (o principal).

#### 4.1.4. Curva fuerza–desplazamiento

[PENDIENTE].



Figura 4.4: Curva fuerza–desplazamiento (placeholder).

## 4.2. Resultados en SOFA

[PENDIENTE DE CAPTURAS Y VALIDACIÓN].



Figura 4.5: Deformación en SOFA bajo palpación.

### 4.3. Comparativa ANSYS vs SOFA

[POR COMPLETAR]. Este apartado debe incluir:

- Comparación cualitativa (forma de deformación).
- Comparación cuantitativa (desplazamiento máximo, fuerzas reactivas, etc.).
- Discusión de discrepancias (malla, material, contacto, escala).

# 5. Conclusiones

## 5.1. Conclusiones provisionales

**[A COMPLETAR CUANDO HAYA RESULTADOS].** En esta fase se pueden dejar conclusiones de proceso:

- Se ha establecido un flujo de simulación FEM y un pipeline de conversión de malla para simulación interactiva.
- Se ha preparado la estructura formal del informe cumpliendo los requisitos mínimos.
- Se requiere completar la integración háptica/Unity y añadir capturas/resultados cuantitativos.

## 5.2. Líneas futuras

**[A COMPLETAR].**

- Incorporar presión intraocular (IOP) y mejorar condiciones de contorno.
- Ajustar modelos constitutivos (hiperelasticidad, anisotropía, viscoelasticidad).
- Implementar e integrar el bucle háptico y el render en Unity.
- Definir y validar estrategia de reducción de modelo.

## 6. Referencias

[POR COMPLETAR: añadir al menos 20 referencias científicas].

# Bibliografía

- [1] Autor, Título del artículo, Revista, Año. *[POR COMPLETAR]*
- [2] Autor, Título del artículo, Revista, Año. *[POR COMPLETAR]*
- [3] Autor, Título del artículo, Revista, Año. *[POR COMPLETAR]*
- [4] Autor, Título del artículo, Revista, Año. *[POR COMPLETAR]*
- [5] Autor, Título del artículo, Revista, Año. *[POR COMPLETAR]*

# A. Checklist de requisitos (según instrucciones)

## A.1. Informe (PDF, LaTeX)

- Introducción: mínimo 2 páginas [PENDIENTE DE VERIFICACIÓN]
- Estado del arte: mínimo 5 páginas, número de citas y formato [POR COMPLETAR]
- Metodología: mínimo 5 páginas (multifísica + háptica) [PARCIAL]
- Resultados: mínimo 3 páginas con capturas/mapas [PENDIENTE]
- Conclusiones: hallazgos + líneas futuras [PARCIAL]
- Referencias: mínimo 20 científicas; webs valen 0.2 [PENDIENTE]

## A.2. Contenido FEM obligatorio

- Geometría [PARCIAL]
- Malla [PARCIAL]
- Tipo de elemento [PENDIENTE]
- Materiales [PARCIAL]
- Condiciones de contorno [PARCIAL]

## A.3. Contenido háptica e integración

- Necesidades del software de simulación [POR COMPLETAR]
- UML (clases) si procede [POR COMPLETAR]
- Diagramas de uso por parte del usuario [POR COMPLETAR]
- Integración de softwares [POR COMPLETAR]