



# UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

---

---

CAMPUS IRAPUATO – SALAMANCA  
División de Ingenierías

*“PRUEBAS ULTRASÓNICAS DE INMERSIÓN EN UHMWPE  
PARA CARACTERIZACIÓN DEL DESGASTE EN PRÓTESIS  
ARTICULARES”*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

*ING. WILLIAM ANDRES URQUIJO LUENGAS*

DIRECTORES:

*DR. ANTONIO DE JESÚS BALVANTÍN GARCÍA*

*DR. AGUSTIN VIDAL LESSO*

SALAMANCA, GUANAJUATO

OCTUBRE, 2018

Salamanca, Gto., a 22 de Octubre del 2018.

M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTÍN  
JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
PRESENTE.-

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) William Andres Urquijo Luengas del *Programa de Maestría en* Ingeniería Mecánica y cuyo número de *NUA* es: 145780 del cual soy director. El título de la tesis es: PRUEBAS ULTRASÓNICAS DE INMERSIÓN EN UHMWPE PARA CARACTERIZACIÓN DEL DESGASTE EN PRÓTESIS ARTICULARES.

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

**ATENTAMENTE**

  
Antonio Balvanti  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS  
SECRETARIO

\_\_\_\_\_  
NOMBRE Y FIRMA  
DIRECTOR DE TESIS

  
Jose Angel Rosales de la Peña  
NOMBRE Y FIRMA  
PRESIDENTE

  
Eric Noel Hernández Rodríguez  
NOMBRE Y FIRMA  
VOCAL

## **Resumen**

El desgaste en componentes de UHMWPE de prótesis articulares, ha promovido el aumento en el número de intervenciones quirúrgicas de revisión en pacientes con este tipo de implantes. Actualmente, no se conoce de una técnica específica para el diagnóstico del desgaste en estos componentes, de forma no invasiva. Por lo cual, es necesario desarrollar las bases preliminares para generar una metodología no invasiva basada en propagación de ondas ultrasónicas que permita identificar el desgaste en estos componentes protésicos. Este trabajo presenta la evaluación no destructiva de probetas de UHMWPE mediante inspección ultrasónica. Inicialmente, se identifican los cambios de profundidad en la superficie del material, y en una segunda etapa, el cambio por desgaste controlado. Este último se aplica mediante la prueba de desgaste (Pin on Disk). Los resultados de la inspección son analizados para determinar la capacidad de la técnica para detectar variaciones en la superficie del material a causa de un proceso de desgaste por fricción. Finalmente, se determina la factibilidad de la implementación de una metodología no invasiva de este tipo, orientada al diagnóstico del desgaste en componentes de prótesis articulares en personas con esta clase de implantes.

## **Abstract**

The wear in UHMWPE components of joint prostheses has promoted an increase in the number of revision surgeries in patients with this type of implants. Currently there is no specific technique known for the diagnosis of wear in these components in a non-invasive form, therefore it is necessary to develop the preliminary bases to generate a non-invasive methodology based on ultrasonic wave propagation to identify the wear in these prosthetic components. This thesis presents the non-destructive evaluation of UHMWPE specimens by ultrasonic inspection. Initially the changes of depth in the surface of the material are identified and in a second stage the change by controlled wear. The latter is applied by means of the wear test (Pin on Disk). Inspection results are analyzed to determine the ability of the technique to detect variations in the surface of the material due to a friction wear process. Finally to determine the feasibility of implementing a non-invasive methodology of this type oriented to the diagnosis of wear in joint prosthesis components in people with this type of implants.

*A mis padres...por su apoyo  
incondicional para lograr esta nueva meta.*

*A mis hermanos... por su afecto  
fraternal.*

*A mi demás familia...por apoyarme en la  
culminación de esta etapa de mi vida.*

*“Hay una fuerza motriz más poderosa  
que el vapor, la electricidad y la energía  
atómica: la voluntad.”*

***Albert Einstein***

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido durante los estudios de maestría a través de la beca No. 791798.

A la Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, por brindarme la oportunidad de ingresar a la Maestría en Ingeniería Mecánica y contribuir en mi desarrollo profesional.

Al Dr. Antonio de J. Balvantín G., por su constante orientación, recomendaciones y consejos en el desarrollo de la tesis, además de reconocer su amplio conocimiento en el tema de inspección ultrasónica.

Al Dr. Agustín Vidal Lesso, por el apoyo logístico y los aportes al trabajo, desde su gran experiencia en el área de biomecánica.

Al Dr. José M. Riesco A. por la colaboración en la etapa inicial de la maestría.

A mis amigos cercanos, por los consejos y los diferentes momentos compartidos.

# Contenido

<b>Resumen</b>	II
<b>Abstract</b>	III
<b>Lista de Figuras</b>	IX
<b>Lista de Tablas</b>	XII
<b>Glosario</b>	XIII
<b>Introducción</b>	1
<b>Capítulo 1. Marco de Referencia</b>	3
1.1 Planteamiento del Problema	3
1.2 Justificación	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Motivación	5
1.5 Contribución	6
1.6 Organización de la tesis	6
1.7 Antecedentes	7
<b>Capítulo 2. Fundamentos Teóricos</b>	11
2.1 Propagación de Ondas Ultrasónicas	11
2.1.1 Propiedades de las ondas ultrasónicas	12
2.1.2 Tipos de ondas ultrasónicas	14
2.1.3 Efecto Piezoeléctrico	16
2.1.4 Método de inspección por ultrasonido	17
2.1.5 C-Scan.	21
2.2 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE).	21
2.2.1 Propiedades mecánicas del UHMWPE.	22
2.2.2 Resinas GUR.	23
<b>Capítulo 3. Desarrollo Experimental</b>	24
3.1 Sistema Experimental.	25
3.1.1 Plataforma Experimental END.	25



3.1.2 Pulsador /Receptor de Pulsos Ultrasónicos.	28
3.1.3 Transductor Olympus® - RB 10 MHz.	29
3.1.4 Robot NACHI® MZ04.	30
3.1.5 Osciloscopio Keysight® DSO1004A.	31
3.2 Caracterización propiedades de propagación del UHMWPE.	32
3.2.1 Propiedades de propagación de ultrasonido en UHMWPE GUR 1050 grado quirúrgico.	32
3.2.2 Propiedades de Propagación UHMWPE comercial.	36
3.3 Determinación de cambios en la profundidad de la superficie de probetas de UHMWPE aplicando la técnica ultrasónica de inmersión Pulso – Eco.	38
3.3.1 Construcción de Probetas.	38
3.3.2 Cambios de espesor en probetas.	40
3.3.3 Inspección Ultrasonido de Inmersión (Pulso-Eco).	41
3.3.4 Procesamiento de señales.	43
3.4 Inspección del desgaste artificial en los especímenes de UHMWPE.	44
3.4.1 Desgaste Artificial.	44
3.4.2 Cuantificación geométrica del desgaste	52
3.4.3 Inspección Ultrasonido (Pulso-Eco).	53
<b>Capítulo 4. Resultados y Discusión</b>	<b>55</b>
4.1 Determinación de cambios en la profundidad de la superficie de probetas de UHMWPE aplicando la técnica de inspección ultrasónica (inmersión) Pulso – Eco.	55
4.2 Inspección del desgaste artificial en los especímenes de UHMWPE.	61
<b>Conclusiones</b>	<b>65</b>
<b>Trabajos Futuros</b>	<b>67</b>
<b>Apéndices</b>	<b>68</b>
<b>Referencias</b>	<b>711</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1 Mercado de reconstrucción de articulaciones, México 2009 [4].	4
Figura 1.2 a) Rodilla natural con osteoartritis, b) Artroplastia de rodilla. [13].	7
Figura 1.3 Edad media para artroplastia total de rodilla [15].	8
Figura 1.4 a) Componente de UHMWPE, b) Imagen Micro CT [9].	9
Figura 2.1 Esquema de propagación ultrasónica de una onda longitudinal.	11
Figura 2.2 Rangos de frecuencia de ultrasonido para diversas aplicaciones [25].	12
Figura 2.3 Propiedades de onda mecánica.	12
Figura 2.4 Compresión y rarefacción de las moléculas en un medio de propagación.	13
Figura 2.5 Ondas Volumétricas: a) Longitudinales y b) Transversales [27].	14
Figura 2.6 Evaluación ultrasónica tradicional con ondas Bulk [25].	14
Figura 2.7 Diagrama de desplazamiento mecánico ondas de Rayleigh [25].	15
Figura 2.8 Evaluación ultrasónica ondas Lamb.	16
Figura 2.9 Efecto piezoeléctrico: a) Efecto directo y b) Efecto indirecto.	17
Figura 2.10 Modo pulso-eco: a) Cambio de material y b) Defecto o discontinuidad.	18
Figura 2.11 Modo pulso-eco en inmersión: a) Cambio de material y b) Defecto o discontinuidad.	19
Figura 2.12 Ecos o rebotes de un pulso ultrasónico.	20
Figura 2.13 Mapeo C-Scan.	21
Figura 2.14 Representación esquemática de un homopolímero lineal [9].	22
Figura 2.15 Esquema de la estructura química a) etileno b) polietileno [9].	22
Figura 2.16 Codificación para UHMWPE grado quirúrgico (Celanese Company).	23
Figura 3.1 Metodología de desarrollo - Etapa I.	24
Figura 3.2 Metodología de desarrollo - Etapa II.	24
Figura 3.3 Plataforma experimental END.	25
Figura 3.4 Diagrama de subsistemas - plataforma experimental END.	26
Figura 3.5 Montaje experimental en plataforma Virtual Robot.	27
Figura 3.6 Pulsador Receptor OLYMPUS 5077PR [44].	28
Figura 3.7 Transductor ultrasónico Olympus – RB 10 MHz [44].	29
Figura 3.8 Robot NACHI® MZ04 [45].	30

Figura 3.9 Direcciones de desplazamiento robot NACHI® MZ04	31
Figura 3.10 Osciloscopio Keysight® DSO1004A.	31
Figura 3.11 Muestra de UHMWPE GUR1050 grado quirúrgico.	33
Figura 3.12 Mediciones ultrasónicas - UHMWPE GUR 1050.	33
Figura 3.13 Longitudes requeridas – Muestra de UHMWPE GUR 1050.	34
Figura 3.14 Señal capturada Pulso-Eco UHMWPE GUR1050.	34
Figura 3.15 Tiempos de propagación de onda ultrasónica.	35
Figura 3.16 Montaje de material - Torno Convencional.	39
Figura 3.17 Probeta UHMWPE: a) Huellas de mecanizado y b) Acabado final.	40
Figura 3.18 Variación en el espesor de probeta UHMWPE.	40
Figura 3.19 Probeta UHMWPE - escalón de 0.4 mm.	41
Figura 3.20 Plataforma experimental END.	41
Figura 3.21 Probeta de UHMWPE en solución de Hank's.	42
Figura 3.22 Esquema de barrido ultrasónico.	42
Figura 3.23 Trayectoria de transductor.	43
Figura 3.24 Señal típica pulso- eco en UHMWPE.	43
Figura 3.25 Secuencia señal pulso-eco inmersión.	43
Figura 3.26 Esquema de prueba Pin on Disk.	45
Figura 3.27 Esquema del dispositivo de desgaste.	46
Figura 3.28 Dispositivo de desgaste basado en prueba Pin on Disk.	47
Figura 3.29 Vista superior, componente de UHMWPE en ATR [9].	48
Figura 3.30 Instrumentación pin de desgaste con masa de referencia de 1 kg.	49
Figura 3.31 Montaje material UHMWPE en el torno convencional.	50
Figura 3.32 Montaje de dispositivo de desgaste: a) Vista lateral y b) vista superior.	50
Figura 3.33 Ubicación pin de desgaste.	51
Figura 3.34 Huella de desgaste en probeta de UHMWPE.	51
Figura 3.35 Probetas de UHMWPE con desgaste artificial - Pin on Disk (espesor nominal de 12 mm).	52
Figura 3.36 a) Prueba de Rugosidad y b) Esquema de longitud del perfil de rugosidad.	52
Figura 3.37 Perfil de alturas zona de desgaste - Probetas UHMWPE.	53
Figura 3.38 Mediciones ultrasónicas: a) Zona de desgaste y b) Zona libre de desgaste.	54

Figura 3.39 Pico de amplitud máximo (Primer rebote de la onda).	54
Figura 4.1 Probeta UHMWPE, trayectoria de barrido ultrasónico.	56
Figura 4.2 Tiempos de viaje de pulso ultrasónico - Probeta con $\Delta=0.1$ mm.	56
Figura 4.3. Perfil de altura de probeta. $\Delta=0.1$ mm.	57
Figura 4.4. Perfil de superficie de probeta. $\Delta=0.2$ mm.	58
Figura 4.5 Altura de superficie promedio - $\Delta=0.2$ mm (Puntos prueba de hipótesis).	59
Figura 4.6 Perfil de superficie de probeta. $\Delta=0.3$ mm.	60
Figura 4.7 Perfil de superficie de probeta. $\Delta=0.4$ mm.	60
Figura 4.8 Altura de superficie promedio - $\Delta=0.3$ mm (Puntos prueba de hipótesis).	61
Figura 4.9 Altura de superficie promedio - $\Delta=0.4$ mm (Puntos prueba de hipótesis).	61
Figura 4.10 Valores de altura de probeta (mm). Probeta 1: 147000 ciclos.	62
Figura 4.11 Valores de altura de probeta (mm). Probeta 2: 294000 ciclos.	63
Figura 4.12 Valores de altura de probeta (mm). Probeta 3: 588000 ciclos.	63

## Lista de Tablas

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas UHMWPE grado quirúrgico.	23
Tabla 3.1 Mediciones Micrómetro UHMWPE GUR1050.	34
Tabla 3.2 Registros de tiempo - UHMWPE comercial.	36
Tabla 3.3 Propiedades fluido hidráulico DOT3 [54].	46
Tabla 3.4 Ciclos de desgaste.	51
Tabla 4.1 Valores obtenidos para la prueba de hipótesis.	58
Tabla 4.2 Tiempos de vuelo de onda en UHMWPE (Pulso-eco) en $\mu$ s.	62

## Glosario

- **Artroplastia:** intervención quirúrgica en la cual se extraen tejido y hueso dañados de la articulación de la rodilla, con objeto de restablecer la movilidad de esta cuando se presenta artritis. Las secciones se reemplazan por un implante sintético, llamado prótesis.
- **Cartílago articular:** es un tejido compuesto por una red de fibras que se interpone entre dos superficies óseas y, por sus propiedades de resistencia a las fuerzas de compresión y de elasticidad, permite el deslizamiento de dichas superficies gracias a un coeficiente de fricción extremadamente bajo.
- **Cóndilo:** eminencia redondeada en la extremidad de un hueso, que forma articulación encajando en el hueco correspondiente de otro hueso.
- **Implante ortopédico:** es un dispositivo médico fabricado para reemplazar una articulación, hueso faltante o para sostener un hueso dañado.
- **Inspección no invasiva:** es un conjunto de técnicas empleadas para detectar discontinuidades o defectos en un material sin afectar su estructura.
- **Onda acústica:** se refiere a la propagación de una vibración en un determinado medio material.
- **Osteoartritis:** enfermedad que causa dolor, inflamación y disminución de los movimientos en las articulaciones principalmente por la degradación del cartílago articular.
- **Ultrasonido de diagnóstico:** es una técnica de diagnóstico no invasiva que se utiliza para producir imágenes dentro del cuerpo mediante propagación de ondas ultrasónicas.

## Nomenclatura

$A$	Amplitud
$A_C$	Área de contacto de la prótesis de rodilla.
$h_e$	Altura de probeta
$f$	Frecuencia
$F_D$	Fuerza del pin de desgaste
$F_W$	Fuerza sobre la prótesis
$n_e$	Número de ecos de onda ultrasónica
$L$	Distancia de recorrido transductor
$P_p$	Presión sobre una prótesis de rodilla
$r_p$	Radio de pin de desgaste
$T$	Periodo de onda
$t$	Espesor de muestra
$t_1$	Tiempo de recorrido de pulso
$t_2$	Tiempo de recorrido de eco
$v$	Velocidad de propagación de la onda ultrasónica
$t_T$	Tiempo de viaje (pulso + eco) de la onda en el material
$v_c$	Velocidad de propagación de ultrasonido en UHMWPE comercial
$v_Q$	Velocidad de propagación de ultrasonido en UHMWPE GUR1050
$\alpha$	Coefficiente de atenuación ultrasónica
$\Delta$	Longitud de escalón
$\lambda$	Longitud de onda

# Introducción

El implante de prótesis articulares especialmente en rodilla (Artroplastia Total de Rodilla, ATR), fabricado a partir de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE, por sus siglas en inglés) en conjunto con elementos metálicos en la zona femoral, representan una de las intervenciones quirúrgicas de mayor aplicación en el mundo. Únicamente en Estados Unidos, se proyecta que en el año 2030 se realizarán 2.3 millones de procedimientos de reemplazo de rodilla según la Academia Americana de Operaciones Ortopédicas (AAOS, por sus siglas en inglés) [1]. El procedimiento tiene una alta tasa de éxito y es rápidamente asimilado por el cuerpo en la mayoría de los casos. Sin embargo, la prótesis no tiene una duración infinita y se deteriora a los 15 años de uso aproximadamente. Esto se debe principalmente al desgaste de los componentes, especialmente de UHMWPE. Actualmente, el diagnóstico en un paciente para conocer el estado de su prótesis se realiza mediante cirugía de revisión. Uno de los grandes retos, se centra en determinar el deterioro por desgaste que presentan los componentes de la prótesis sin necesidad de un procedimiento invasivo.

El uso de equipos de diagnóstico en el campo médico amplía la posibilidad de conocer el estado de diferentes órganos del cuerpo humano. Uno de los métodos de diagnóstico más usado es el ultrasonido médico, específicamente en órganos blandos como: riñones, hígado, arterias, pulmones, entre otros. No obstante, para conocer el estado de las prótesis en rodilla no se dispone de un equipo orientado específicamente a este tipo de implantes. Con el desarrollo de una herramienta basada en la propagación de ondas ultrasónicas, se podría visualizar de forma no invasiva los componentes de la rodilla artificial *in vivo*, especialmente el de UHMWPE y de esta forma diagnosticar su grado de desgaste.

El trabajo presentado aquí, aporta las bases para construir una plataforma de diagnóstico no invasivo para prótesis de rodilla, con capacidad de evaluar el componente de polietileno *in vivo*. Principalmente, está orientado en el estudio de probetas cilíndricas planas de UHMWPE, donde se realizan diferentes pruebas para establecer la capacidad de la técnica ultrasónica de detectar cambios geométricos en la superficie de este material como consecuencia de un proceso de desgaste. Para conseguir esto, se aplican diferentes etapas:





caracterización de las propiedades de propagación del material, reducción controlada del espesor, desgaste artificial del material e inspección ultrasónica. Con esta serie de etapas se busca detectar el desgaste que sufre el material a diferentes niveles de reducción de espesor y de ciclos de carga.

Finalmente, los resultados encontrados servirán para determinar la factibilidad técnica de diseñar una plataforma de evaluación no invasiva en prótesis articulares no solo de rodilla, si no de las diferentes articulaciones donde los implantes contengan componentes de UHMWPE.

# Capítulo 1. Marco de Referencia

## 1.1 Planteamiento del Problema

La osteoartritis es una enfermedad asociada al desgaste del cartílago articular comúnmente presente en la articulación de la rodilla, debido al constante movimiento y a las cargas que se somete. Esta enfermedad se cataloga como la enfermedad reumática que más incapacidades genera en todo el mundo [2, 3]. Esta situación ha producido un incremento en el uso de prótesis orientadas al alivio del dolor y la recuperación del movimiento de la rodilla. En México, el implante de prótesis articulares de rodilla y cadera, corresponden a la mayor cantidad de implantes para la reconstrucción de articulaciones. Según el estudio realizado por Global Data en 2009, donde se evidencia que aproximadamente el 80% del mercado de las prótesis se enfocaron en este tipo de articulaciones [4]. El uso de polímeros es común en este tipo de prótesis articulares, especialmente el polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE, por sus siglas en inglés), debido a sus buenas prestaciones mecánicas, estabilidad química y resistencia al desgaste.

Las prótesis de UHMWPE insertadas en las zonas articulares, no obstante, presentan un desgaste progresivo generalmente acompañado de un desprendimiento de partículas y finalmente, un desajuste de la prótesis. Dichas partículas producen inflamación y, en casos severos, una reacción biológica que conduce a la pérdida del hueso. Actualmente, para detectar el desgaste en este tipo de insertos, es necesario realizar pruebas invasivas, donde se requiere una intervención quirúrgica para apreciar el estado en que se encuentra la prótesis [5].

Las pruebas invasivas aportan resultados cualitativos, que dependen del criterio del profesional de la salud que realiza la intervención; quién finalmente, emite recomendaciones para el cambio de la prótesis [1]. Por otro lado, se han estudiado diversas técnicas de mínima invasión como el análisis de imágenes diagnósticas (Imagenología tradicional), para la caracterización cuantitativa del desgaste de las prótesis [6]. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta el momento no han alcanzado una confiabilidad aceptable.

Por lo anterior, en este trabajo se propone aplicar inspección ultrasónica sobre probetas de UHMWPE, la cual permitirá detectar el desgaste en las superficies planas de estos especímenes a diferentes ciclos de carga y de esta forma establecer las bases preliminares para examinar el desgaste en prótesis articulares.

## 1.2 Justificación

El uso de insertos protésicos constituidos por UHMWPE en México, ocupa un gran porcentaje (aproximadamente 80%) del mercado de prótesis [4] (Ver Figura 1.1). Normalmente una prótesis de rodilla puede durar hasta 15 años [6]. Una de las causas principales de la pérdida de funcionalidad de este tipo de prótesis es el desgaste progresivo. Actualmente, se dispone de tecnologías como la microtomografía de rayos X, que permite obtener una reconstrucción completa de la prótesis y conocer su estado (desgaste) *in vivo* con niveles de precisión muy altos, aunque este método presenta una desventaja significativa en cuanto a su elevado costo (200.000 – 400.000 USD [7]).

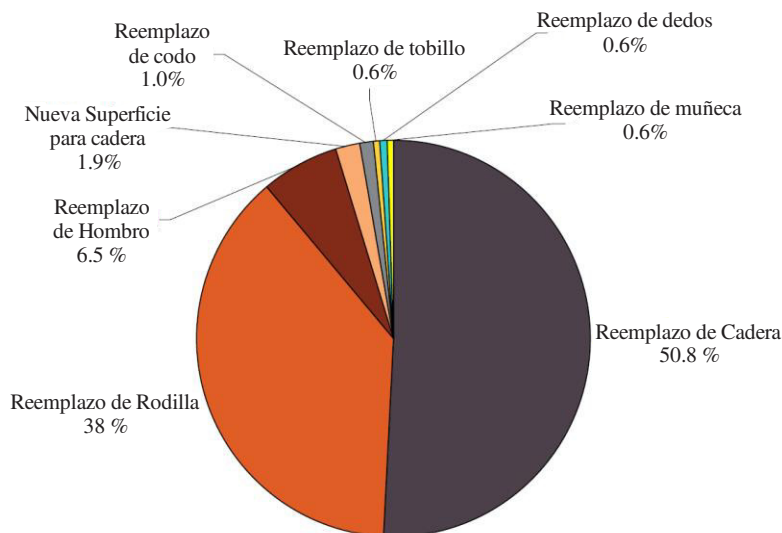


Figura 1.1 Mercado de reconstrucción de articulaciones, México 2009 [4].

En este trabajo, se propone una metodología para caracterizar y cuantificar el desgaste de una probeta de material UHMWPE a través de la técnica C-Scan, implementando propagación de ondas ultrasónicas [8]. A partir de esta técnica de ultrasonido, se plantea la generación de mapas visuales de fácil interpretación del perfil de espesor de la probeta en



base a las señales generadas. De esta manera, se pretende establecer las bases para la generación de una plataforma experimental que permita el monitoreo no invasivo del desgaste de especímenes de UHMWPE; por medio de la cual el paciente no tenga que ser intervenido quirúrgicamente para la inspección de su prótesis articular.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Desarrollar una metodología de caracterización no invasiva para determinar el desgaste en un espécimen plano de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE), destinado a prótesis articulares, usando inspección ultrasónica.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Generar cambios en probetas de UHMWPE mediante reducción controlada de su espesor y desgaste artificial (Pin on Disk).
- Determinar experimentalmente los cambios geométricos por desgaste en probetas de UHMWPE mediante inspección ultrasónica.
- Establecer una metodología para el desarrollo de pruebas experimentales de desgaste sobre especímenes de UHMWPE.

## **1.4 Motivación**

Una de las razones fundamentales bajo la cual se plantea este trabajo, es la reducción en el número de cirugías de revisión en las personas con implantes de articulación construidos a partir de UHMWPE. Generalmente, las personas con este tipo de implantes deben ser intervenidos quirúrgicamente para evaluar el estado de sus prótesis, generando incapacidades de tiempos considerables. Esta investigación, donde se aplican conceptos de Ingeniería Mecánica, específicamente la propagación de ondas, tiene como objetivo converger en un futuro a una solución eficiente para evaluar el desgaste presentado en una prótesis de forma cuantificable y así brindar una herramienta confiable para apoyar los conceptos emitidos por un profesional en cirugía ortopédica para el cambio del inserto protésico.



## 1.5 Contribución

Con la generación de una metodología no invasiva para la evaluación del desgaste en UHMWPE usado en prótesis articulares, se establecen las bases preliminares para la creación de una herramienta que permita estudiar y cuantificar el desgaste sufrido en los componentes protésicos de UHMWPE en un paciente. Con estos resultados, se justificará un estudio de factibilidad para generar un sistema no invasivo que en un futuro permita diagnosticar el estado de una prótesis articular.

## 1.6 Organización de la tesis

Inicialmente se presenta la introducción del trabajo desarrollado. En el Capítulo 1, se muestra la información referente al marco de referencia, donde se describe principalmente el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos planteados. Complementando esta información, se explican los antecedentes que se tienen en relación con estudios de prótesis articulares, diagnóstico de ultrasonido médico y aplicaciones ultrasónicas a nivel industrial.

En el Capítulo 2 se describen algunos fundamentos teóricos aplicados durante el desarrollo de la investigación, entre estos: propagación de ondas ultrasónicas, inspección no destructiva y algunas características importantes del material investigado.

El desarrollo experimental se presenta en el Capítulo 3. En esta sección, se explican los detalles y la secuencia en que se desarrollaron las diferentes pruebas de desgaste y las inspecciones ultrasónicas.

En el Capítulo 4 se exponen los resultados obtenidos de la parte experimental con sus respectivos análisis y discusiones.

Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas en este proyecto y algunos trabajos futuros que se pueden desarrollar a partir de la investigación realizada.

## 1.7 Antecedentes

En el siglo XX, las aleaciones de acero inoxidable y cobalto-cromo se utilizaron con éxito en aplicaciones ortopédicas, sin embargo, sus propiedades fisicoquímicas no fueron suficientes para mitigar la degradación debido a picaduras, grietas y fatiga por corrosión. Dichos problemas se deben principalmente a la relativamente baja resistencia al desgaste que presenta el acero inoxidable. El uso de prótesis articulares con el polímero UHMWPE fue propuesto por Sir John Charnley en 1962 [9]. Este material se convirtió en el estándar para la operación de reemplazo total de articulación de cadera (THR, por sus siglas en inglés). Posteriormente, el polímero UHMWPE fue también adaptado para articulaciones de rodilla [10] y se conoce como artroplastia total de rodilla (ATR). Dentro de las ventajas de este polímero están: la biocompatibilidad con el cuerpo humano, coeficiente de fricción bajo, auto lubricación y alta resistencia al impacto [11].

Actualmente, la artroplastia de rodilla es una de las intervenciones más eficientes en el ámbito de la cirugía ortopédica, ya que reduce el dolor y mejora la capacidad funcional. El constante avance tecnológico ha permitido el aumento progresivo de la longevidad de las prótesis y un rango de aplicación para distintas edades [12]. La artroplastia es una cirugía para reemplazar una articulación de la rodilla por una articulación artificial en la que el cartílago y el hueso dañados, se retiran de la articulación. Finalmente, se colocan piezas artificiales en la rodilla. En la Figura 1.2 se muestra un implante típico de rodilla (componente tibial) construido a partir de UHMWPE, el cual está fijado mecánicamente al soporte tibial (metálico).

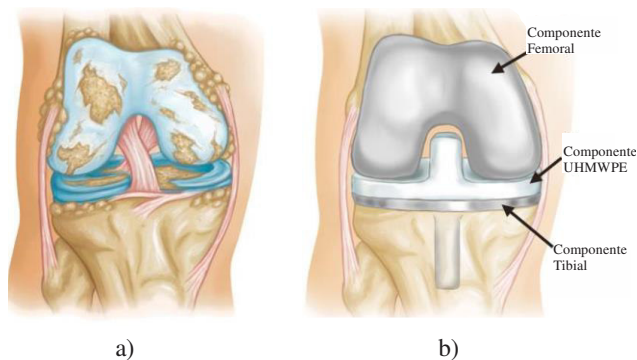


Figura 1.2 a) Rodilla natural con osteoartritis, b) Artroplastia de rodilla. [13].

El tiempo de vida de una prótesis de rodilla dentro del cuerpo humano está entre los 15 y 20 años, dependiendo de diferentes factores como: estilos de vida, salud y nivel de actividad física desarrollado por el paciente. Por esta razón, al paciente se le realiza una cirugía de revisión con el objetivo de identificar posibles problemas internos (Aflojamiento de partes, infección, desgaste, fractura de implante, dolor, inflamación, entre otras). Este tipo de intervención es de carácter quirúrgico y realizarla de manera temprana, luego del implante de prótesis, puede generar demoras en la rehabilitación del paciente [14]. En la Figura 1.3 se observa una disminución en la edad media para aplicar el procedimiento de artroplastia en un estudio realizado en Suiza [15]. En México, esta tendencia se mantiene e inclusive puede ser mayor debido a que ocupa el segundo lugar a nivel mundial en obesidad según la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) [16], una de las principales causas de lesiones en rodilla [14].

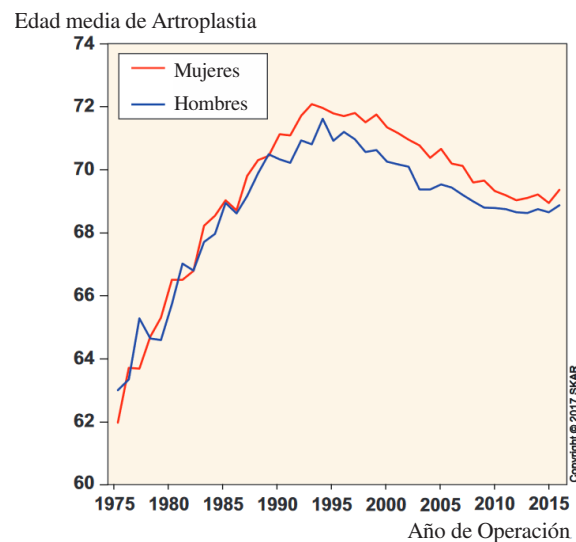


Figura 1.3 Edad media para artroplastia total de rodilla [15].

Sin embargo, a pesar de sus numerosas ventajas, los insertos protésicos de UHMWPE presentan desprendimiento de partículas debido al desgaste, lo que produce desajuste en la prótesis, inflamación, dolor y en algunos casos fractura [6]. Actualmente, el monitoreo del desgaste de prótesis articulares se realiza mediante cirugía de revisión, que puede ser un procedimiento incluso más largo y complejo que el reemplazo total de la articulación de rodilla [17]. La imagenología tradicional, también se usa para el diagnóstico del desgaste, aunque en algunos casos puede subestimar el verdadero desgaste sufrido en la prótesis [18].

Una de las opciones para evaluar el estado de una prótesis de UHMWPE, es la Microtomografía Computarizada de rayos X (Micro CT). Esta tecnología utiliza rayos X para generar geometrías tridimensionales de forma no destructiva y proporcionar características precisas de la geometría de un objeto. Específicamente, la tomografía se refiere a una técnica matemática que reconstruye imágenes transversales de un sólido a partir de las lecturas captadas por las señales de los rayos X que se originan en muchas direcciones diferentes. Con una cantidad suficiente de imágenes, el volumen de un objeto puede ser digitalmente descrito tanto interna como externamente en 3D [9]. Una desventaja de este tipo de técnicas es su elevado costo (aprox. 400.000 USD [7]). En la Figura 1.4 se observa el resultado de un análisis Micro CT.



Figura 1.4 a) Componente de UHMWPE, b) Imagen Micro CT [9].

Recientemente, diferentes alternativas para la caracterización del desgaste en prótesis articulares han sido estudiadas [19-21]. Entre las pruebas más factibles de implementar se encuentra la generación de tomografías ultrasónicas. En ingeniería, las pruebas con principios ultrasónicos se presentan en varios campos, especialmente en inspección y mantenimiento. Una de las aplicaciones más comunes es la medición de espesores de forma no destructiva; dichas pruebas se han llevado a cabo en plantas nucleares, donde la principal causa de accidentes es el adelgazamiento de la pared local de la tubería. Adicionalmente, implementando un método de evaluación no destructiva (END) con ultrasonido, se mantiene un monitoreo continuo y confiable del estado de las tuberías [19]. Los defectos en los materiales tales como grietas, deformaciones, huecos o inclusiones, también pueden ser detectados con este tipo de pruebas; siendo una de sus principales áreas de aplicación la industria aeroespacial, donde se requiere altos niveles de confiabilidad [20]. En referencia a la generación de mapas visuales a partir del ultrasonido, en [21] se evidencia una metodología





para determinar los defectos internos presentes en probetas de hormigón usando el análisis de imágenes ultrasónicas.

En bioingeniería, el ultrasonido de diagnóstico se usa como prueba no invasiva para producir imágenes dentro del cuerpo humano específicamente de tejidos blandos, como músculos, tendones y órganos. Un caso puntual es el estudio de la enfermedad arterial periférica, mediante un monitoreo constante con ondas ultrasónicas sobre sus paredes [22]. Las sondas del ultrasonido de diagnóstico, llamadas transductores, producen ondas sonoras que tienen frecuencias por arriba del umbral del oído humano (arriba de 20 kHz) [22]. El ultrasonido de diagnóstico es seguro y no produce radiación ionizante como la producida por los rayos X, la cual es nociva para la salud [23].

Tradicionalmente, mediante el ultrasonido de diagnóstico (1 MHz) se han producido imágenes no invasivas de los órganos internos del cuerpo. Sin embargo, no funciona correctamente con los huesos o tejidos porosos. En ciertas condiciones, el ultrasonido puede producir imágenes de los huesos (como en un feto) o de los pulmones en instantes en que pueden estar llenos de fluido. Entre los órganos de los cuales se pueden obtener imágenes mediante ultrasonido de diagnóstico están: el corazón, vasos sanguíneos, ojos, tiroides, cerebro, tórax, órganos abdominales, piel y músculos [24].

En la actualidad, un método de carácter no invasivo y de costo accesible a la población común no está disponible para estudiar las prótesis que contienen componentes de UHMWPE. En este sentido, el campo de la medicina ortopédica requiere una herramienta que permita revisar y evaluar *in vivo* el estado de los componentes de una articulación artificial, especialmente las construidas por este tipo de polímero. A continuación, se describen algunos conceptos referentes a la propagación ultrasónica, la cual permitiría realizar este tipo de diagnósticos de forma no invasiva.

## Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

En este capítulo se describen generalidades teóricas referentes a la propagación de ondas ultrasónicas y conceptos relacionados directamente con la evaluación no destructiva (END). Además, se revisan algunas características importantes del material de estudio (UHMWPE) usado en prótesis articulares.

### 2.1 Propagación de Ondas Ultrasónicas

Las ondas mecánicas se originan por el movimiento forzado de una porción de un medio deformable. Mientras los elementos del medio son deformados, la perturbación se transmite de un punto a otro viajando a través de éste. Las ondas ultrasónicas son perturbaciones mecánicas, con la característica principal de pertenecer al espectro acústico en frecuencias encontradas en el rango de los 20 kHz hasta valores de 1 GHz [25]. La propagación de la onda se produce gracias a la energía transmitida entre las diferentes partículas que conforman un cuerpo, las cuales oscilan alrededor de un punto de equilibrio. En la Figura 2.1, se muestra una representación esquemática de este fenómeno, donde las partículas oscilan de forma longitudinal a la dirección de propagación de la onda mecánica.

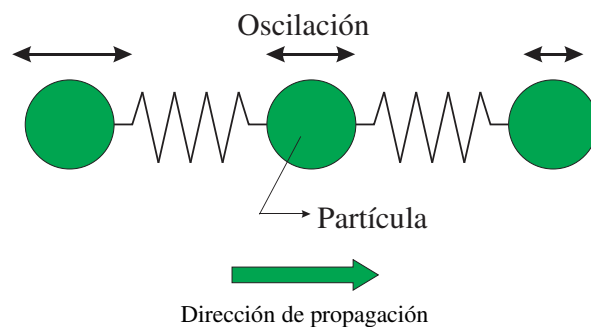


Figura 2.1 Esquema de propagación ultrasónica de una onda longitudinal.

Este tipo de ondas tienen aplicaciones en diversos campos, clasificados según el rango de la frecuencia en el espectro acústico. En la Figura 2.2 se muestran las diferentes aplicaciones ultrasónicas con sus respectivos valores de frecuencia de transmisión.

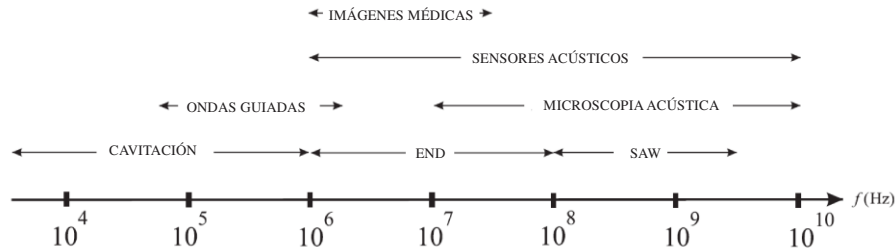


Figura 2.2 Rangos de frecuencia de ultrasonido para diversas aplicaciones [25].

Es de especial interés para el desarrollo de este trabajo, el rango espectral relacionado con la evaluación no destructiva (NDE, por sus siglas en inglés) encontrado entre frecuencias de 1 MHz y 100 MHz. Mediante la implementación de NDE es posible llevar a cabo detección de defectos en materiales, medición de propiedades elásticas, medición de espesores en paredes delgadas o membranas, así como la determinación de diversas propiedades de materiales y estructuras [25].

### 2.1.1 Propiedades de las ondas ultrasónicas

Las ondas ultrasónicas se propagan en un cuerpo sólido debido a la vibración de las moléculas que lo integran. Por esta razón, el comportamiento de este tipo de ondas mecánicas se asocia a una onda del tipo senoidal [26]. Principalmente las propiedades presentes en una onda ultrasónica son: longitud de onda, amplitud, frecuencia y velocidad de propagación. En la Figura 2.3 se muestra el esquema de onda con sus respectivas propiedades.

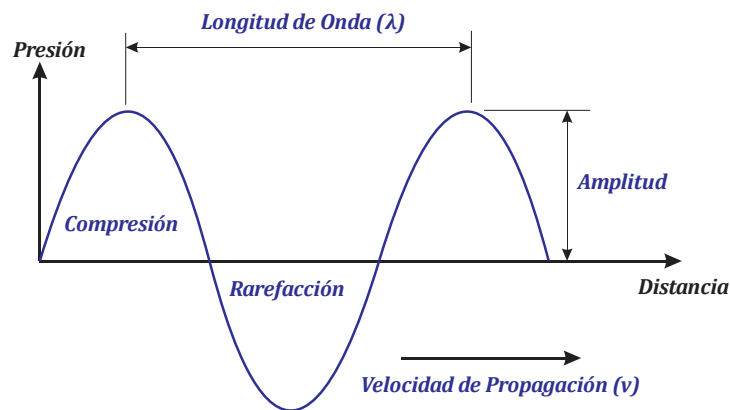


Figura 2.3 Propiedades de onda mecánica.

La descripción de cada una de las anteriores propiedades se muestra a continuación:

- Longitud de onda ( $\lambda$ ) representa la distancia entre dos crestas consecutivas de una Onda. Una característica importante de este parámetro es que es inversamente proporcional a la frecuencia, una onda de baja frecuencia mantendrá una longitud de onda más grande que una de alta frecuencia.
- Amplitud (A) representa el valor medido desde el punto de equilibrio de la onda hasta su punto máximo (cresta). En el caso de las ondas mecánicas específicamente las de ultrasonido, este valor se presenta en voltios o decibeles.
- Frecuencia (f), su valor está directamente relacionado con el número de oscilaciones por unidad de tiempo y se calcula con la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

donde T, es el periodo de la onda, el cual hace referencia al tiempo necesario para describir una oscilación completa.

- Velocidad de propagación (v): Esta velocidad depende directamente de las características elásticas del medio en el que viaja la onda. Se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda * f \quad (2.2)$$

Además de las propiedades nombradas, existen dos zonas significativas en la propagación de las ondas ultrasónicas, la compresión y la rarefacción. La primera representa la compresión que sufren las moléculas cuando se agrupan por acción del pulso acústico (alta presión) y la segunda indica la zona en que las moléculas se disponen relativamente separadas a la etapa de compresión (Ver Figura 2.4).

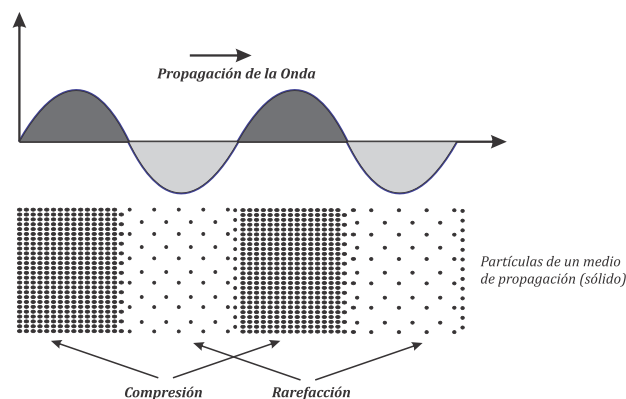


Figura 2.4 Compresión y rarefacción de las moléculas en un medio de propagación.

Estas características se aplican a los diferentes tipos de ondas que se pueden encontrar en el campo de propagación ultrasónica. En la siguiente sección se describen algunos tipos de ondas usadas en la evaluación no destructiva (END) con ultrasonido.

### 2.1.2 Tipos de ondas ultrasónicas

Entre los diferentes tipos de ondas ultrasónicas se destacan las siguientes:

**Ondas Volumétricas o de Bulk:** Son ondas elásticas que se propagan en los cuerpos sólidos y continuos. El efecto de estas ondas en el medio donde se transmiten se traduce en variaciones de presión local a medida que ocurre la propagación. Estas ondas pueden ser de tipo longitudinal o transversal como se ilustra en la Figura 2.5.

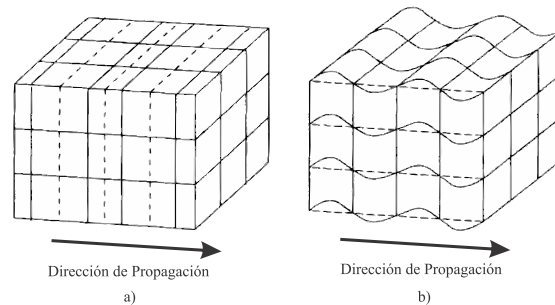


Figura 2.5 Ondas Volumétricas: a) Longitudinales y b) Transversales [27].

En la Figura 2.6, se muestra una inspección típica usando ondas volumétricas, donde se logra evidenciar que la cobertura de la detección es pequeña en comparación con el tamaño del material sólido donde se requiere detectar alguna discontinuidad.

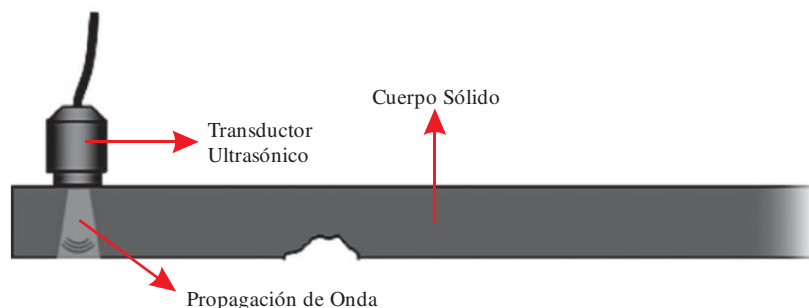


Figura 2.6 Evaluación ultrasónica tradicional con ondas Bulk [25].

Las ondas volumétricas presentan ciertas desventajas que restringen su aplicación en diferentes casos, especialmente en grandes zonas de inspección por las siguientes razones: el

escaneo o inspección se debe realizar punto por punto y la distancia debe ser fija desde el transductor al objeto analizado [28]. Sin embargo, existen situaciones en las cuales las ondas Bulk son de gran utilidad, específicamente en la caracterización de las propiedades elásticas de los materiales [29], detección de fallas internas en sólidos [30] y verificación de espesores [19]. Es de resaltar, que en la inspección ultrasónica aplicada en la etapa experimental descrita en el Capítulo 3, se utilizan este tipo de ondas.

Ondas superficiales o de Rayleigh: Este tipo de ondas empezaron a ser estudiadas a partir de estudios sismológicos dirigidos por Lord Rayleigh en 1885, donde se empezaron a evidenciar movimientos ondulatorios sobre la superficie del suelo [25]. La característica principal radica en que la amplitud de las ondas disminuye a medida que su trayectoria se aleja de la superficie, como se ilustra en la Figura 2.7.

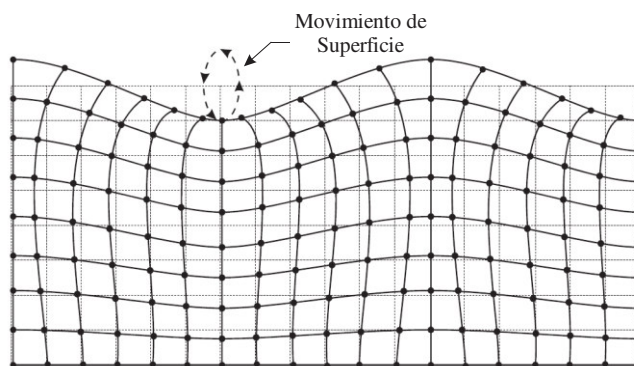


Figura 2.7 Diagrama de desplazamiento mecánico ondas de Rayleigh [25].

Esta clase de onda ultrasónica se forma a partir de dos componentes: uno del tipo transversal (normal a la superficie del sólido) y otra de tipo longitudinal. Otra de las características es el movimiento elíptico producido por fuerzas que no se encuentran en equilibrio sobre las superficies, donde dicho movimiento reduce su amplitud exponencialmente a medida que aumenta la profundidad debajo de la superficie. En general, este tipo de ondas presentan varias longitudes de onda en el espesor del sólido permitiendo despreciar el desplazamiento de las partículas en algunas longitudes de onda por debajo de la superficie (baja amplitud) [31].

Entre las aplicaciones de las ondas Rayleigh se pueden encontrar: medición de espesor de recubrimientos metálicos [32], medición de parámetros de fluidos (viscosidad de

cizallamiento) [33] y detección de micro-fisuras mediante la técnica de escaneo con calentamiento por láser [34], entre otras.

**Ondas Lamb o de Placa:** Estas ondas, a diferencia de las ondas de Rayleigh se propagan a lo largo de una placa delgada sólida (finita). Son de tipo elástico y el movimiento de las partículas se encuentra en el plano que contiene la dirección de propagación de la onda y la normal de la placa. En el análisis del comportamiento de las ondas Lamb, la importancia radica en encontrar los modos de onda, cuya velocidad depende de la relación entre la longitud de onda y el espesor de la placa [25]. Los diferentes modos de onda ocurren entre los dos puntos (transmisión y recepción) dependiendo del ángulo de entrada de la onda y de la frecuencia del pulso ultrasónico (Ver Figura 2.8).

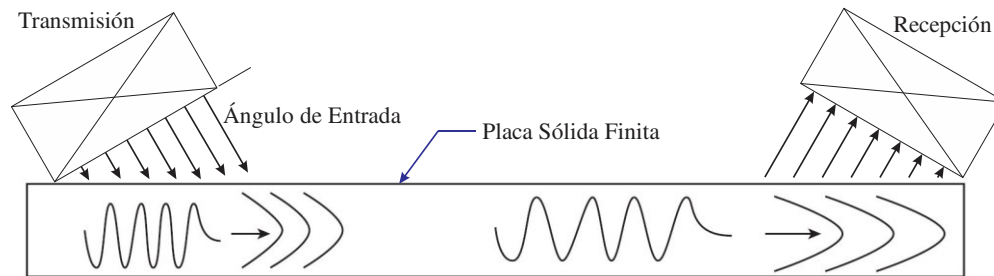


Figura 2.8 Evaluación ultrasónica ondas Lamb.

Uno de los conceptos necesarios para la emisión y recepción de ondas ultrasónicas es el efecto piezoeléctrico. En dicho principio, están basados los transductores ultrasónicos de mayor uso en la industria de la END. En la siguiente sección se presentan las características de este efecto.

### 2.1.3 Efecto Piezoeléctrico

La generación de ondas ultrasónicas se puede lograr mediante diferentes métodos: piezoelectricidad, electro-estricción, magneto-estricción, acústica electromagnética, generación laser, entre otras. De estas diferentes técnicas, el efecto piezoeléctrico es el más usado en la generación de ultrasonido [25].

El efecto Piezoeléctrico hace referencia al fenómeno en el cual, se le aplica un esfuerzo mecánico a un cristal y se produce una deformación sumada a una diferencia de potencial

entre las caras del cristal (efecto piezoeléctrico directo), cuyo cambio de potencial es posible detectar y cuantificar. También es posible invertir el proceso a un efecto indirecto, con la aplicación de una diferencia de potencial sobre el cristal y como resultado se genera una vibración traducida en una onda ultrasónica (Ver Figura 2.9). Bajo este efecto funciona el transductor ultrasónico usado en el desarrollo experimental de este proyecto y explicado a detalle en la sección 3.1.3.

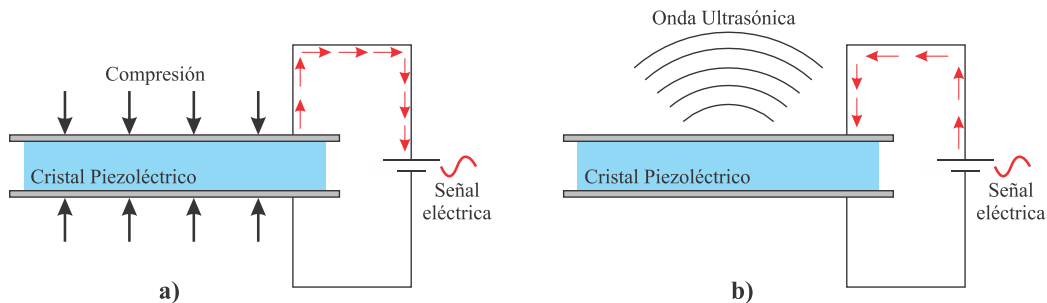


Figura 2.9 Efecto piezoeléctrico: a) Efecto directo y b) Efecto indirecto.

En la siguiente sección se describe una de las aplicaciones de los principios ultrasónicos de más uso en la industria y específicamente en la inspección no destructiva.

#### 2.1.4 Método de inspección por ultrasonido

La inspección por ultrasonido se basa en la propagación de ondas mecánicas de alta frecuencia normalmente entre 0.5 y 15 MHz [25]. Esta metodología de END se emplea en un amplio rango de aplicaciones ingenieriles, entre ellas están: la detección o evaluación de defectos, mediciones dimensionales, caracterización de propiedades elásticas en materiales, etc.

En general, una prueba de inspección por ultrasonido se basa en la captura y cuantificación de las ondas reflejadas y transmitidas con el objetivo de caracterizar diferentes aspectos (espesores, propiedades elásticas, discontinuidades, etc.). Existen dos tipos básicos de inspección: pulso-eco y transmisión continua. En el primero, se detectan los ecos de un pulso propagado sobre el material con un transductor como emisor y receptor. En el segundo, se transmiten ondas continuamente, donde la emisión y recepción se ejecuta por dos transductores independientes [35]. En esta sección, se enfatiza particularmente en la



inspección ultrasónica de Pulso-Eco, con la cual se caracteriza geoméricamente el desgaste en probetas de UHMWPE.

El modo Pulso-eco indica la emisión de un pulso ultrasónico, producido por un transductor piezoeléctrico con la particularidad de detectar el eco que presenta esta onda mecánica cuando choca con una discontinuidad representada por un cambio de material o un defecto estructural. Mediante esta técnica es posible detectar la velocidad de propagación y el factor de atenuación en el material midiendo el tiempo de viaje de la onda y los cambios de amplitud en los picos máximos de la señal, despreciando los efectos de difracción que la onda pueda tener al reflejarse.

En la Figura 2.10, se muestra esquemáticamente la forma en que se logran detectar las discontinuidades en un sólido en el caso del uso del modo pulso-eco en modo de contacto.

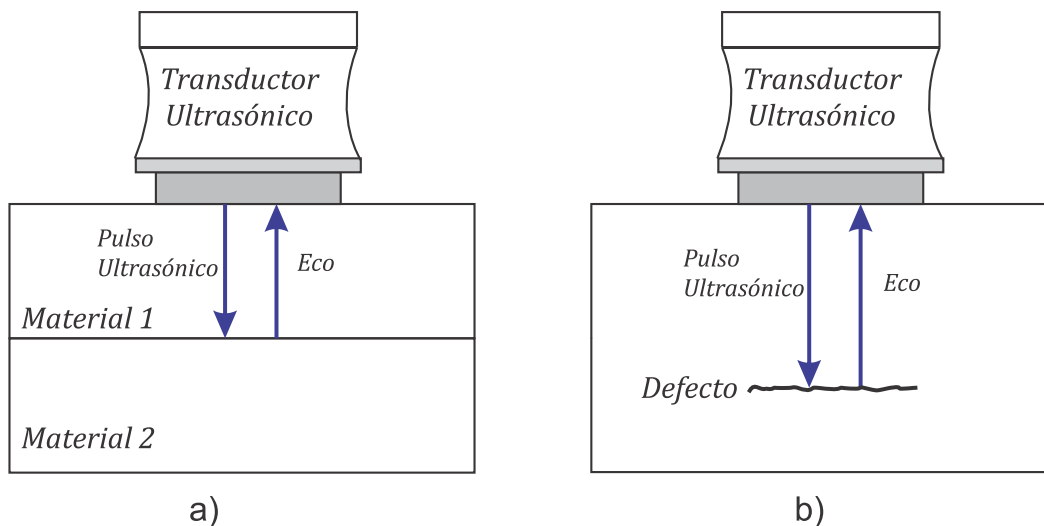


Figura 2.10 Modo pulso-eco: a) Cambio de material y b) Defecto o discontinuidad.

En el modo Pulso-eco en inmersión, el transductor no está en contacto con el material (Ver Figura 2.11). Para este modo, se deben analizar la distancia entre los dos rebotes consecutivos de la onda, el primero producido por la superficie superior y el segundo por la inferior.

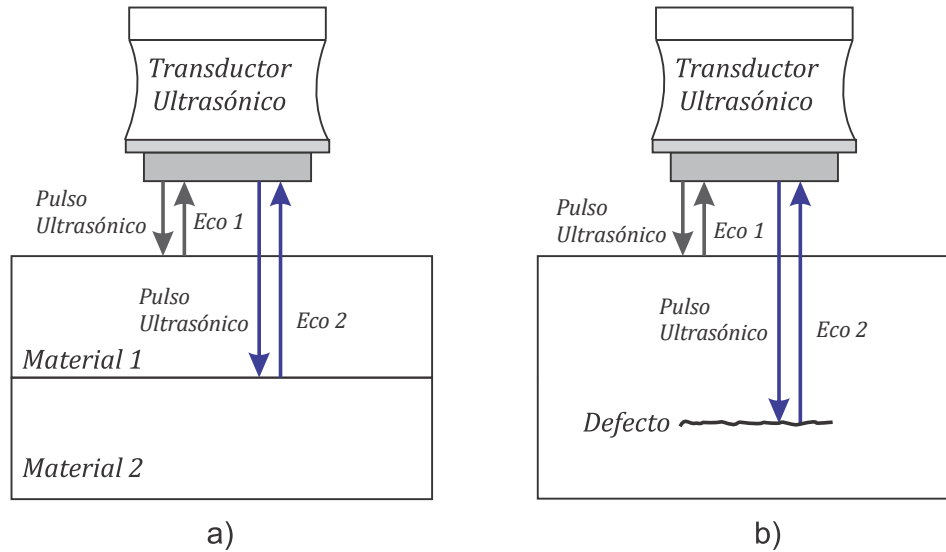


Figura 2.11 Modo pulso-eco en inmersión: a) Cambio de material y b) Defecto o discontinuidad.

En el modo de transmisión Pulso-Eco, dos factores directamente relacionados con la propagación de la onda son analizados: la velocidad de propagación y la atenuación del pulso. La primera está relacionada con el tiempo entre ecos producidos por los rebotes del pulso en las discontinuidades y, a partir de éste, se genera el parámetro de velocidad de propagación en el medio.

La ecuación (2.3) permite calcular la velocidad de propagación ultrasónica.

$$v = 2e/t_T \quad (2.3)$$

donde  $v$ , es la velocidad de propagación de la onda en el material;  $e$ , es el espesor del material en el punto donde se dispone el transductor; y  $t_T$ , es el tiempo de viaje de la onda en el material.

Normalmente, el tiempo entre ecos se visualiza en un osciloscopio, donde los pulsos de la onda mecánica son convertidos en una señal eléctrica. Esta señal es sincronizada en el osciloscopio para observar los diferentes rebotes del pulso de forma instantánea. En la Figura 2.12 se visualiza una señal de osciloscopio con los ecos de un pulso ultrasónico (picos máximos en amplitud).

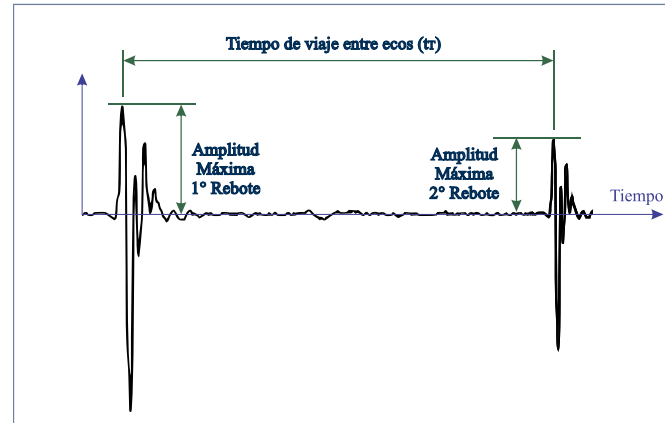


Figura 2.12 Ecos o rebotes de un pulso ultrasónico.

En el modo Pulso-eco generalmente se miden dos formas de velocidad: relativa y absoluta. La primera se usa para determinar pequeños cambios en el parámetro de velocidad de propagación, cuando intervienen parámetros externos como temperatura o presión; y en la segunda, el objetivo es monitorear las constantes elásticas del material (medio de propagación) [25].

La atenuación representa la reducción de la amplitud en el pulso a medida que se producen los diferentes rebotes. Este parámetro es sensible a pequeños cambios en la estructura del material o defectos mínimos. En la medida de la atenuación es importante verificar que las lecturas no estén alteradas por pérdidas debidas a la posición errónea del transductor, difracción de la onda o falta de homogeneidad del material [25]. Normalmente, la atenuación se mide a partir de la comparación de amplitud en dos ecos continuos usando un comparador exponencial. Las siguientes ecuaciones permiten calcular el coeficiente de atenuación ultrasónica para un medio de propagación.

$$\alpha [Np/m] = \frac{1}{L} * \ln(R_{avg}) \quad (2.4)$$

$$R_{avg} = \frac{\frac{A_1}{A_2} + \frac{A_2}{A_3} + \dots + \frac{A_{n-1}}{A_n}}{n - 1} \quad (2.5)$$

donde  $\alpha$ , es el coeficiente de atenuación ultrasónica;  $R_{avg}$ , es la relación promedio de amplitud;  $n$ , es el número de ecos analizados;  $L$ , es la distancia entre los ecos analizados; y  $A_i$ , es la respectiva amplitud del  $i$ -ésimo eco. Generalmente, la atenuación se proporciona en

decibeles (dB) mediante el siguiente factor:  $\alpha(dB/m) = 8.686 * \alpha(Np/m)$  [36]. Una de las principales aplicaciones de la técnica Pulso-Eco consiste en la generación de mapas bidimensionales que representan visualmente las variaciones de los parámetros de propagación de la onda, mientras se escanea un área determinada. Dichos mapas se denominan C-Scan, cuyas características se describen en la siguiente sección.

### 2.1.5 C-Scan.

La técnica C-Scan consiste en un análisis bidimensional de una vista superior o plana de una pieza de prueba, donde se identifican parámetros como la amplitud o profundidad de la señal y tiempos de vuelo de la onda en cada punto de la pieza de prueba mapeada a su posición [37]. En la Figura 2.13 se ilustra la forma en que se realiza la inspección sobre una muestra en el modo C-Scan, en este caso se toma un registro (Pulso-eco) por cada punto en la trayectoria del transductor. La información obtenida en cada punto, para el interés de la investigación es la detección de los tiempos de viaje de la onda en el material de prueba.

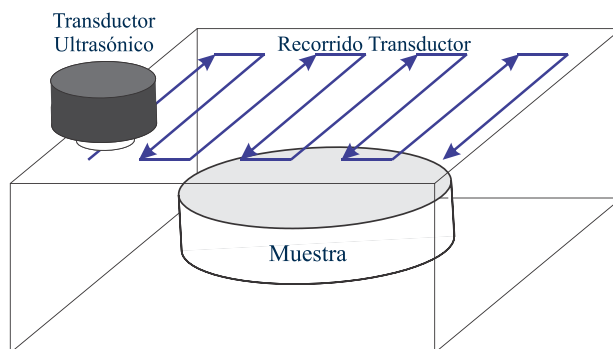


Figura 2.13 Mapeo C-Scan.

En este trabajo, se propone el escaneo de probetas fabricadas con UHMWPE, mismo que se utiliza para la fabricación de implantes articulares de rodillas. Las características principales de dicho material se presentan a continuación.

## 2.2 Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE).

El UHMWPE es un tipo de polímero usado en el campo ortopédico generalmente clasificado como un homopolímero lineal. Un polímero es una molécula que consiste en muchos segmentos llamados monómeros los cuales pueden ser iguales en toda la cadena

molecular, este caso se conoce como homopolímero lineal [9]. La representación de la cadena de homopolímero lineal se muestra en la Figura 2.14.



Figura 2.14 Representación esquemática de un homopolímero lineal [9].

El polietileno está formado por un polímero generado a partir de gas de etileno ( $C_2H_4$ ). En la Figura 2.15 se muestra el esquema de la estructura química del etileno y el polietileno.

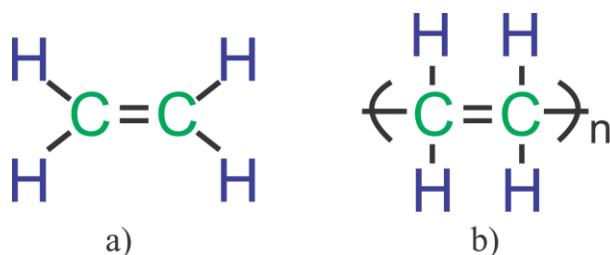


Figura 2.15 Esquema de la estructura química a) etileno b) polietileno [9].

Existen diferentes tipos de polietileno, sintetizados a partir de diferentes pesos moleculares y arquitecturas de cadena. Generalmente, los polietilenos presentan un peso molecular de menos de 50,000.00 g/mol. El UHMWPE, en comparación a la mayoría de los polietilenos, presenta un peso molecular aproximado de 6,000,000.00 g/mol. Adicionalmente, el UHMWPE cuenta con diversas propiedades mecánicas que favorecen su implementación, mismas que se presentan en seguida.

### 2.2.1 Propiedades mecánicas del UHMWPE.

El UHMWPE presenta excelentes propiedades físicas y mecánicas, entre las que se resaltan la lubricidad, la resistencia al impacto y la resistencia al desgaste. Estas características han permitido que este polímero se presente como un candidato excepcional para ser usado en las prótesis de rodilla y cadera principalmente (Artroplastia), donde progresivamente ha ido reemplazando algunos metales como el acero inoxidable.

En la Tabla 2.1 se muestran las propiedades mecánicas para el UHMWPE grado quirúrgico, obtenidas a partir de una prueba experimental desarrollada sobre un simulador de cadera multidireccional, según reporta Kurtz [9].

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas UHMWPE grado quirúrgico.

Propiedad	Valor
Peso Molecular ( $10^6$ g/mol)	3.5 - 7-5
Temperatura de Fusión ( $^{\circ}$ C)	132-138
Relación de Poisson	0.46
Gravedad Específica	0.925 - 0.945
Módulo de Elasticidad (GPa)	0.5 - 0.8
Límite elástico (GPa)	21-28
Esfuerzo último (GPa)	39-48

El grado quirúrgico del UHMWPE se clasifica según su composición y tratamientos mediante la nominación GUR. En la siguiente sección se explica detalladamente la importancia de esta codificación.  $10^6$

### 2.2.2 Resinas GUR.

Actualmente, la empresa Celanese© (inicialmente conocida como Ruhrchemie AG) suministra UHMWPE de grado superior para aplicaciones ortopédicas del orden quirúrgico. La resina se fabrica en Bishop, Texas, Estados Unidos y Oberhausen, Alemania. Los grados de resina producidos en Bishop y Oberhausen utilizan la misma tecnología de catalizador y se someten a procesos similares de síntesis de resina. Están reguladas bajo las normas ASTM F-648 e ISO-5834. La compañía Celanese, utiliza la designación GUR para sus diferentes grados de UHMWPE en todo el mundo; el acrónimo GUR se forma de la primera letra de las palabras granular, UHMWPE y Ruhrchemie [9].

En cuanto a la denominación de los diferentes tipos de UHMWPE grado GUR, la compañía Celanese©, ha generado un código único que permite diferenciar los diversos factores de su composición. En la Figura 2.16 se ilustra el contenido de la codificación.

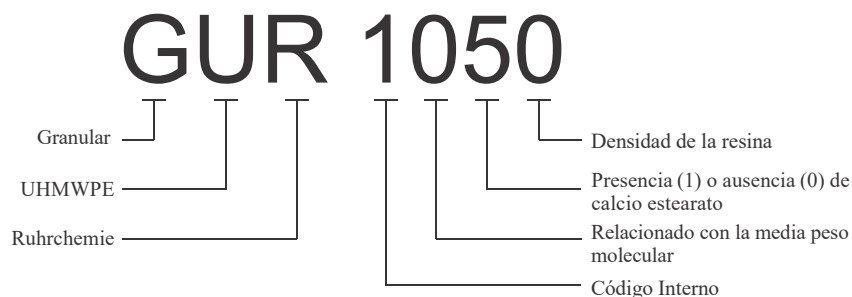


Figura 2.16 Codificación para UHMWPE grado quirúrgico (Celanese Company).

## Capítulo 3. Desarrollo Experimental

En el desarrollo de este capítulo se explica detalladamente el proceso realizado para la construcción de probetas, pruebas de desgaste y barrido ultrasónico. Siguiendo los objetivos planteados, el diseño del experimento está dividido principalmente en dos (2) etapas:

*Etapa I. Determinación de cambios en la profundidad de la superficie de probetas de UHMWPE aplicando la técnica de inspección ultrasónica (inmersión) Pulso – Eco.* En esta etapa se busca determinar el desgaste sobre especímenes de UHMWPE con reducción de espesor como representación del desgaste y, además, verificar la resolución de la técnica usada. En la Figura 3.1 se muestra la secuencia del procedimiento aplicado en esta etapa.

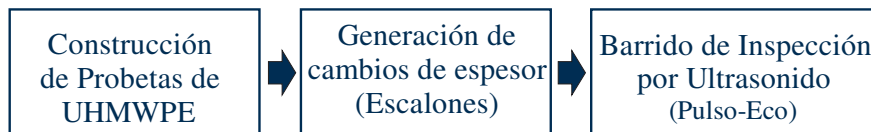


Figura 3.1 Metodología de desarrollo - Etapa I.

*Etapa II. Inspección del desgaste artificial en los especímenes de UHMWPE.* Esta etapa se centra en caracterizar el desgaste sufrido por especímenes de UHMWPE a diferentes ciclos de carga aplicados con un dispositivo diseñado y construido para este trabajo basado en la técnica Pin On Disk, el cual se detalla más adelante. En la Figura 3.2 se muestra el diagrama del proceso seguido en la etapa II.

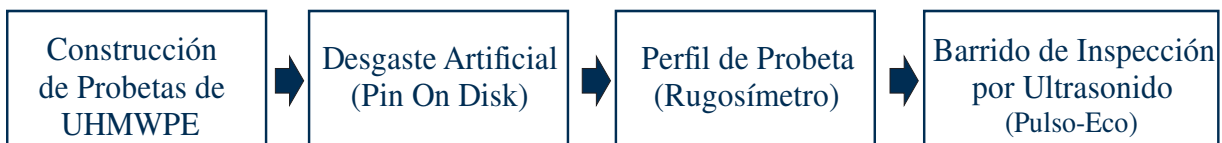


Figura 3.2 Metodología de desarrollo - Etapa II.

Antes de explicar cada una de las etapas planteadas, es necesario describir los equipos usados durante el desarrollo experimental y determinar la propiedad de velocidad de propagación en el material UHMWPE. En la siguiente sección se describe el sistema experimental y cada uno de sus componentes.

### 3.1 Sistema Experimental.

Para el desarrollo de la etapa experimental correspondiente a las pruebas de inmersión ultrasónica, se usó la plataforma de pruebas generada en el Verano de la Investigación de 2017 bajo la dirección del Dr. Antonio de Jesús Balvantín García [38, 39, 40]. Esta plataforma permite aplicar la técnica C-SCAN [41] sobre diferentes piezas, gracias a la precisión brindada por el brazo robótico NACHI® MZ04 [42]. A continuación, se describen sus características principales, así como su funcionamiento.

#### 3.1.1 Plataforma Experimental END.

La plataforma experimental tiene como aplicación principal, la inspección ultrasónica de zonas con trayectorias controladas mediante el uso de un robot serial NACHI® MZ04. En la Figura 3.3, se observa la plataforma experimental END, localizada en la Celda de Manufactura de la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato (DICIS-UG).

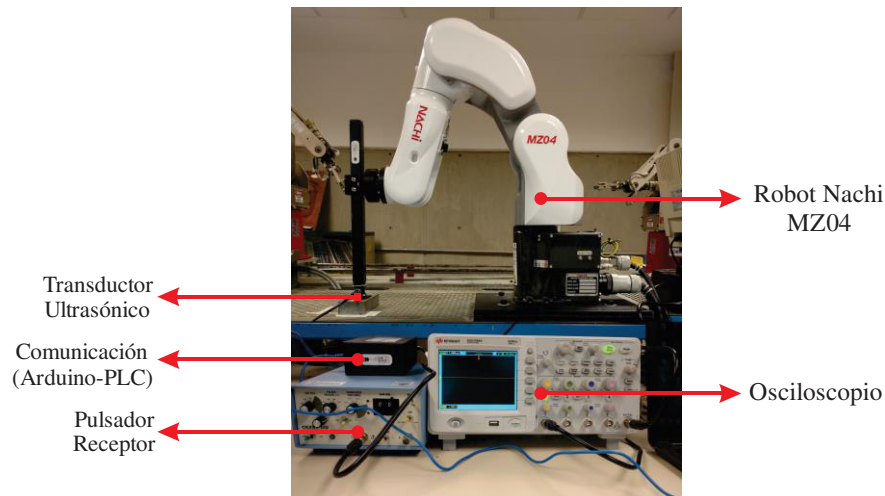


Figura 3.3 Plataforma experimental END.

En la Figura 3.4 se muestra un diagrama, en el cual se identifica la forma en que están enlazados los diferentes subsistemas de la plataforma experimental. El funcionamiento de este sistema de inspección es cíclico y se desarrolla en la siguiente secuencia:

1. Posicionamiento del robot NACHI® en el punto inicial de inspección, donde el robot espera la orden de pasar al siguiente punto.



2. Captura con la interfaz de la lectura ultrasónica del punto inicial.
3. La computadora, mediante el sistema de comunicación Arduino<sup>®</sup>-PLC, emite la orden para que el robot se mueva al siguiente punto.
4. Continúa con la captura y nuevamente el robot pasa al siguiente punto.

Estos pasos se repiten secuencialmente hasta cubrir la zona de inspección que se requiere analizar.

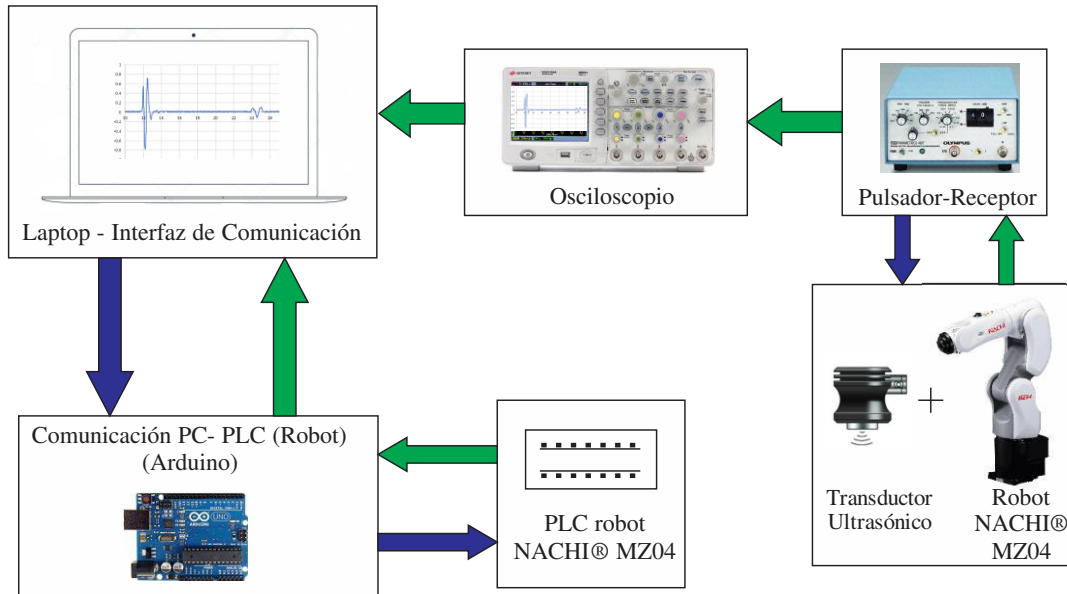


Figura 3.4 Diagrama de subsistemas - plataforma experimental END.

A la plataforma experimental se le agregó la opción de programar las trayectorias de forma automática mediante coordenadas de puntos, ya que inicialmente se debían guardar manualmente punto a punto para la trayectoria deseada de inspección. La programación de las trayectorias se implementó con la siguiente secuencia, usando el simulador virtual del robot NACHI<sup>®</sup>:

- a) Generación de los puntos en formato de texto. Los puntos deben generarse en orden de ejecución y en formato de texto (.txt), usando la sintaxis {x,y,z}. Los valores de x, y, z representan las coordenadas de cada punto y en este caso se ingresan en milímetros.
- b) Polilíneas. Dentro del simulador virtual, se insertan los puntos mediante el comando polilíneas, el cual genera la secuencia deseada manteniendo los puntos en la trayectoria.

- c) Adaptación de Herramientas. El herramental y el recipiente de probeta se modelan en CAD, se insertan en la plataforma *virtual robot* de NACHI® [43] y se configura el primero como la herramienta del robot. En la Figura 3.5 se observa la forma en que se disponen los elementos y la configuración que debe mantener cada uno de ellos.

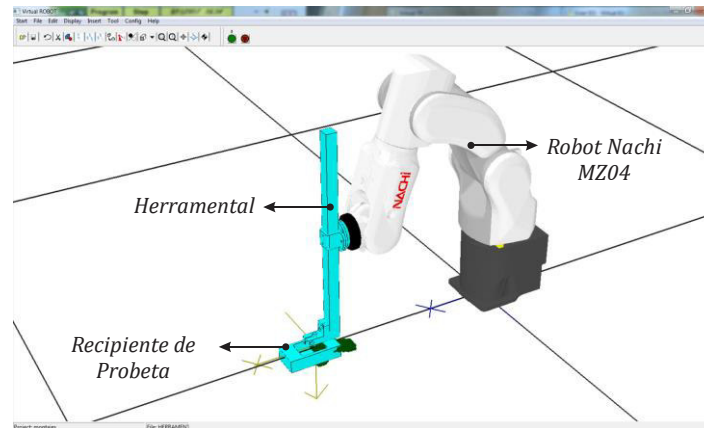


Figura 3.5 Montaje experimental en plataforma Virtual Robot.

- d) Posicionamiento del herramental. En este paso, es importante definir la dirección de trabajo del herramental. Con la opción “conjunto de path” se debe coordinar que la posición del herramental del robot tenga siempre la dirección (-Z).
- e) Generación de programa. Finalmente, se reproduce el seguimiento de la trayectoria y se verifica el correcto funcionamiento. Con estas observaciones hechas, se genera el programa compatible con el robot NACHI®.
- f) Antes de transmitir el programa al robot, es necesario agregar entre todas las líneas de trayectorias del programa los siguientes comandos: SET[0104], DELAY[1], RESET[0104], WAITI[197]; necesarios para la comunicación de la interfaz de la plataforma experimental.

Con este procedimiento es posible programar la inspección en trayectorias complejas sin necesidad de ingresar los puntos manualmente, gracias a la interfaz virtual del robot.

En la siguiente sección, se presentan brevemente las características de los equipos utilizados en la plataforma END.

### 3.1.2 Pulsador /Receptor de Pulsos Ultrasónicos.

El equipo OLYMPUS® 5077PR es un pulsador/receptor de ondas ultrasónicas usado en el campo de la END, que en conjunto con un osciloscopio y un transductor piezoeléctrico se orientan para aplicaciones principalmente en: detección de defectos, calibración de espesores y caracterización de las propiedades de propagación en diferentes medios (materiales). En la Figura 3.6 se muestra el equipo usado.



Figura 3.6 Pulsador Receptor OLYMPUS 5077PR [44].

Este equipo emite pulsos eléctricos de onda cuadrada hacia el transductor piezoeléctrico, donde se generan los pulsos cortos de ultrasonido. Estos rebotan sobre una superficie debido al fenómeno de reflexión y el transductor detecta el regreso parcial o total de la onda convirtiéndolo en una señal eléctrica, la cual es amplificada por la unidad receptora del equipo. Estas señales son salidas del equipo disponibles para visualizar en un osciloscopio. Algunas especificaciones importantes del equipo se enlistan a continuación:

- Modo de operación: Pulso-eco y transmisión continua
- Voltaje de pulso disponible: -400 V, -300 V, -200 V, -100 V
- Impulso de salida de sincronización: 3 V a 50  $\Omega$ C
- Ancho de banda para recepción: 1 kHz a 75 MHz
- Requerimientos de potencia: 100/120/220/240 V AC, 50/60 Hz
- Rango de temperatura de operación: 0°C a 50°C
- Dimensiones: 178 mm x 89 mm x 232 mm
- Peso del equipo: 2.3 kg

Este equipo, en conjunto con el transductor ultrasónico constituyen el equipo básico para una inspección ultrasónica en transmisión Pulso-Eco. En la siguiente sección se describen los detalles del transductor usado en esta investigación.

### 3.1.3 Transductor Olympus® - RB 10 MHz.

En un sistema de inspección por ultrasonido, el transductor es uno de los componentes más críticos. Es la parte que se encuentra constantemente en contacto directo con la zona de inspección y es el que finalmente transmite y recibe el pulso ultrasónico. Por estas razones su configuración debe ser óptima con el objetivo de no generar análisis erróneos al momento de una inspección.

El Olympus® RB es un transductor de ondas longitudinales de un solo elemento, el cual funciona mediante el efecto piezoeléctrico descrito en la sección 2.1.3. Está configurado para operar a una frecuencia de 10 MHz y 12.7 mm [0.5 pulg] de tamaño nominal. Presenta una conexión BNC (Bayonet Neill–Concelman) de radiofrecuencia, que permite establecer la comunicación con un pulsador/receptor de señales ultrasónicas (Ver sección 3.1.2). En la Figura 3.7 se ilustra el transductor, con las dimensiones principales ( $A=16$ ,  $B=29.46$ ,  $C=31.75$ , mm).

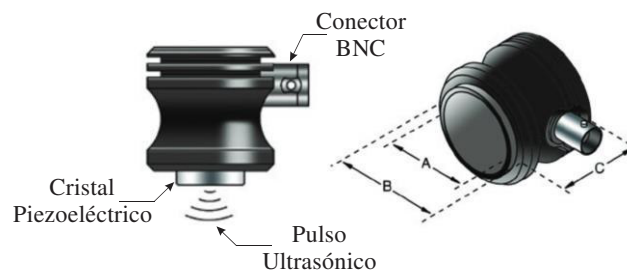


Figura 3.7 Transductor ultrasónico Olympus® – RB 10 MHz [44].

Entre las principales aplicaciones de este transductor, están:

- Detección de defectos en vigas rectas y medición de espesores.
- Detección y dimensionamiento de delaminaciones.
- Caracterización de materiales y mediciones de velocidad del sonido.
- Inspección de chapas, palanquillas, barras, piezas forjadas, piezas fundidas, extrusiones, y una amplia variedad de otros materiales metálicos y elementos no metálicos.

- Para uso continuo en materiales de hasta 50°C.

El transductor ultrasónico implementado en un sistema de inspección C-Scan, necesariamente debe ser orientado por un sistema en coordenadas bidimensionales. En el desarrollo experimental de esta investigación, se usó el robot NACHI® MZ04 para cumplir con esta función, cuyas características se describen en la siguiente sección.

### 3.1.4 Robot NACHI® MZ04.

El NACHI® MZ04 es un robot manipulador serial que permite seis grados de libertad en su movimiento con actuación asistida por servomotores AC. Éste es usado en la etapa experimental para posicionar el transductor ultrasónico sobre diferentes superficies de forma controlada y precisa. En la Figura 3.8 se muestra el robot, el cual se encuentra ubicado en el Laboratorio de Manufactura en la DICIS – UG.



Figura 3.8 Robot NACHI® MZ04 [45].

A continuación, se muestran algunas especificaciones técnicas del equipo:

- Máximo peso soportado: 4 kg
- Precisión en la posición: 0.02 mm
- Temperatura de operación: 0-45 °C
- Peso del equipo: 26 kg
- Almacenamiento de programas: 9.999 programas.

Una de las principales ventajas de este tipo de robot es la programación del seguimiento de trayectorias a partir de puntos coordinados en las tres direcciones cartesianas relativas al movimiento del robot (X, Y y Z). En la Figura 3.9 se muestran las direcciones usadas ajustadas para el movimiento del robot.

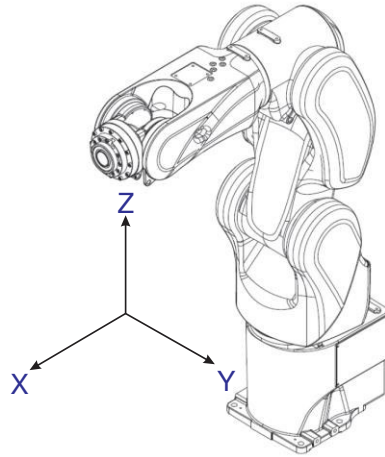


Figura 3.9 Direcciones de desplazamiento robot NACHI® MZ04

Finalmente, la plataforma de inspección requiere un visualizador de las señales. En este caso se utilizó un osciloscopio donde se observan las señales en tiempo real. Sus características se muestran en la siguiente sección.

### 3.1.5 Osciloscopio Keysight® DSO1004A.

Este instrumento permite la representación gráfica de señales eléctricas. El Osciloscopio Keysight® DSO1004 (Figura 3.10) permite un amplio ángulo de visión, pantalla de color brillante, su capacidad de memoria es de 8 veces más que otros osciloscopios y presenta una velocidad de muestreo de hasta 2 GSa/s (Gigamuestras por segundo) [46].



Figura 3.10 Osciloscopio Keysight® DSO1004A.



Este osciloscopio presenta opciones para aplicar filtros digitales para limpiar las señales de ruidos o perturbaciones que alteren las lecturas. En el caso de la captura de las señales del pulso ultrasónico se requiere usar esta función para evitar posibles alteraciones en la respuesta por ruidos eléctricos principalmente ocasionados por la comunicación con el robot. En cuanto a la detección de los pulsos eléctricos emitidos por el pulsador/receptor, el equipo mantiene una señal de sincronía para mostrar en tiempo real el comportamiento del pulso ultrasónico. Una de las principales ventajas es la posibilidad de medir parámetros de la señal en tiempo real.

Una de las primeras aplicaciones desarrolladas con estos equipos durante la ejecución del trabajo de investigación, fue la caracterización de las propiedades de propagación del UHMWPE, que se describe a continuación.

### **3.2 Caracterización propiedades de propagación del UHMWPE.**

Durante el desarrollo de este trabajo principalmente se utilizó la propiedad referente a la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el material. Por esta razón es necesario definir de forma experimental la velocidad de propagación de onda en el material y usar propiedades reales del polietileno usado.

Las propiedades de propagación del ultrasonido en el material se midieron usando el osciloscopio, el pulsador/receptor y el transductor piezoeléctrico de 10 MHz descritos en la sección 3.1. Se utilizó UHMWPE de grado comercial en lugar de material biocompatible. Esta decisión se apoyó en que el material de grado quirúrgico presenta propiedades de propagación de onda ultrasónica similar a las presentadas en el material comercial. Sin embargo, se dispone de una pequeña muestra de material quirúrgico y se decide verificar su velocidad de propagación, con el objetivo de tener una comparación cuantificada entre estos dos polietilenos.

#### **3.2.1 Propiedades de propagación de ultrasonido en UHMWPE GUR 1050 grado quirúrgico.**

El UHMWPE de grado quirúrgico tiene un elevado costo y por razones de limitación en el recurso no se desarrollaron las pruebas de desgaste y evaluación ultrasónica con este tipo de material. Sin embargo, se obtuvo una muestra de UHMWPE GUR 1050 de grado quirúrgico [9] con el propósito de calcular su velocidad de propagación de onda ultrasónica y verificar la

similitud de esta propiedad con la del material comercial utilizado para las pruebas. La muestra disponible de GUR1050 se observa en la Figura 3.11.



Figura 3.11 Muestra de UHMWPE GUR1050 grado quirúrgico.

El procedimiento empleado para caracterizar la propiedad de velocidad de propagación fue el siguiente:

- Usando la técnica Pulso-Eco se toman diferentes mediciones longitudinalmente de la muestra, desplazando el transductor 2 mm hasta alcanzar 20 mm de recorrido como se muestra en la Figura 3.12. En cada una de las posiciones se adquiere la señal generada, mediante la interfaz de captura.

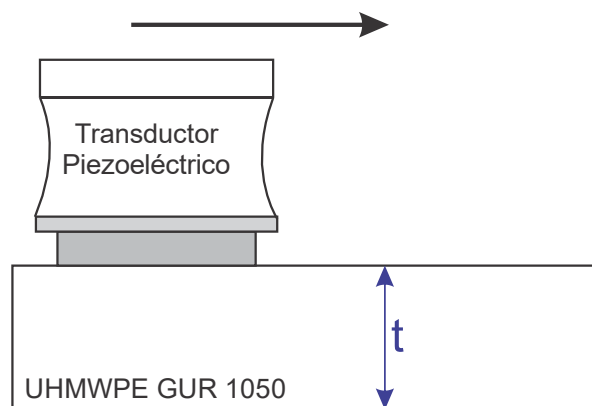


Figura 3.12 Mediciones ultrasónicas - UHMWPE GUR 1050.

- En cada uno de los puntos donde se registran las lecturas de ultrasonido es necesario medir con un micrómetro para tener el valor adecuado de espesor de la muestra. La medida registrada ( $t$ ) se muestra en la Figura 3.13, tomada cada 2 mm durante 20 mm con el fin de tener mantener correspondencia con las mediciones ultrasónicas hechas.



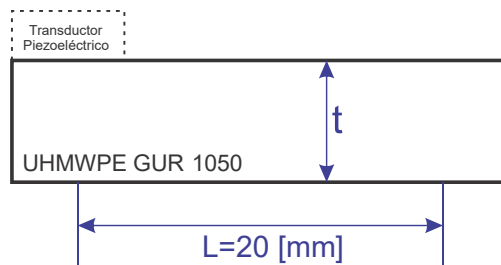


Figura 3.13 Longitudes requeridas – Muestra de UHMWPE GUR 1050.

Las medidas registradas con el micrómetro se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Mediciones Micrómetro UHMWPE GUR1050.

Longitud L (mm)	Espesor t (mm)
2	12.69
4	12.70
6	12.71
8	12.71
10	12.72
12	12.73
14	12.74
16	12.74
18	12.75
20	12.75
Promedio	12.72

- Ahora se analizan las señales generadas de la técnica Pulso-Eco. En las señales se busca el tiempo entre los picos que representan los reflejos de la onda ultrasónica en el material. Una señal típica generada para este caso se observa en la Figura 3.14.

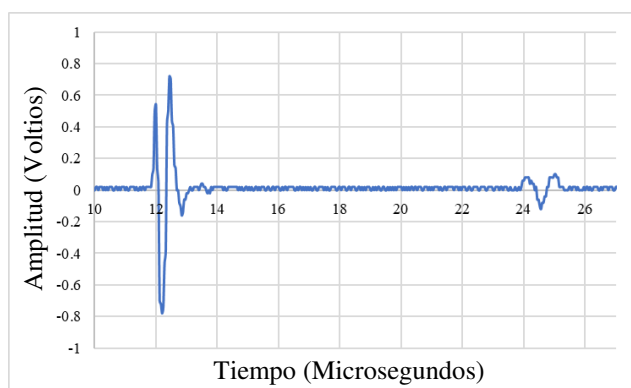


Figura 3.14 Señal capturada Pulso-Eco UHMWPE GUR1050.

En todas las señales registradas se observa un valor constante entre los dos picos máximos de la señal. En este caso se usa la técnica de Pulso-eco con el transductor directamente sobre la superficie del material. Por esta razón con el tiempo del rebote inicial (primer pico) se logra conocer el tiempo de propagación de onda en el material. El valor observado en las señales capturadas fue de  $12.04 \mu s$ , que permanece constante posiblemente por la resolución limitada de captura del osciloscopio usado. Por ello, se calcula una velocidad de propagación promedio del material.

Utilizando la técnica de Pulso-eco es posible establecer la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en un material. En este caso se tiene el tiempo que tarda la onda en viajar desde el transductor hasta la superficie inferior ( $t_1$ ) y regresar hasta la superficie superior ( $t_2$ ) obtenido del primer pico de la señal capturada. Los tiempos de viaje de la onda ultrasónica en el material se muestran en la Figura 3.15.

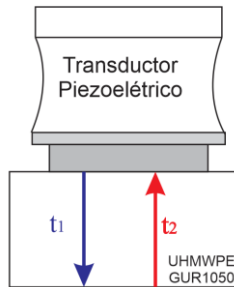


Figura 3.15 Tiempos de propagación de onda ultrasónica.

Considerando una velocidad de propagación constante en el material se establece este valor, mediante la siguiente expresión:

$$v = \frac{2t}{t_1 + t_2} \quad (3.1)$$

donde  $v$ , es la velocidad de propagación de onda ultrasónica en el material;  $t_1$  y  $t_2$ , son los tiempos en que tarda la onda en viajar por el material (Figura 3.15); y  $t$ , es el espesor (promedio) de la muestra de UHMWPE GUR1050.

Finalmente, con el tiempo total de propagación ( $t_1 + t_2$ ) de  $12.04 \mu s$  y un espesor promedio de  $12.72 \text{ mm}$  se calcula la velocidad promedio de propagación del ultrasonido en el

material de grado quirúrgico usando la ecuación (3.1). En este caso se obtuvo el siguiente valor para la velocidad de propagación ( $v_Q$ ) en el UHMWPE GUR1050:

$$v_Q = 2.1137 \frac{mm}{\mu s} = 2113.7 \frac{m}{s}$$

Con la caracterización del material biocompatible, se procede a evaluar la velocidad de propagación en el UHMWPE comercial.

### 3.2.2 Propiedades de Propagación UHMWPE comercial.

Normalmente, el UHMWPE es comercializado a nivel industrial con gran variedad en su composición y propiedades mecánicas según las aplicaciones (maquinaria textil, tolvas para carbón y camiones de volteo, equipos de embotellado, parachoques y revestimiento para barcos) [9]. El material adquirido para las pruebas experimentales es UHMWPE comercial, el cual tiene un costo de aproximadamente 3,000.00 MXN por metro longitudinal (diámetro de 38.1 mm).

La velocidad de propagación de los pulsos ultrasónicos en el material comercial se obtuvo con un procedimiento similar al descrito en la sección 3.2.1. Para este caso, el recurso de material disponible permitía tomar muestras con diferente espesor. Las muestras analizadas con la técnica Pulso-Eco se cortaron a un espesor nominal ( $t$ ) de 6 y 12 mm con un diámetro de 38.1 mm. Para tener un valor promedio del espesor de cada una de las probetas, se decidió tomar diferentes mediciones con el micrómetro y realizar un promedio para cada una de las probetas, donde se obtuvieron valores de 6.02 y 12.07 mm, respectivamente.

El siguiente paso es propagar el ultrasonido a través de cada una de las probetas usando la técnica pulso-eco (contacto), encontrando el tiempo en que la onda tarda en viajar por el material (Figura 3.15) con ayuda del transductor piezoeléctrico de 10 MHz, el osciloscopio y el Pulsador/Receptor. En la Tabla 3.2 se muestran los tiempos registrados.

Tabla 3.2 Registros de tiempo - UHMWPE comercial.

Espesor ( $t$ ) [mm]	Tiempo ( $t_1+t_2$ ) - [ $\mu s$ ]
6.02	5.68
12.07	11.43



Finalmente, usando la ecuación (3.1) se calcula la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en el UHMWPE comercial, encontrando el siguiente resultado promedio:

$$v_c = 2.115852 \frac{mm}{\mu s} = 2115.852 \frac{m}{s}$$

Observando las características de propagación (velocidad) del ultrasonido en el material quirúrgico y comercial, se observa una diferencia de aproximadamente 0.1 %, valor aceptable para tener una evaluación ultrasónica similar en ambos casos. Sin embargo, es conveniente realizar una prueba de hipótesis ( $\mu_1 = \mu_2$ ) para verificar la igualdad de las dos medias. Se plantean las siguientes hipótesis:

$$\text{Hipótesis nula: } \mu_Q = \mu_C$$

$$\text{Hipótesis alternativa: } \mu_Q \neq \mu_C$$

donde  $\mu_Q$ , es la velocidad media de propagación del UHMWPE grado quirúrgico; y  $\mu_C$ , la velocidad media de propagación del material comercial. Las hipótesis se evalúan con la prueba t de dos muestras [47]. El estadístico de prueba en este caso es el siguiente:

$$t_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (3.2)$$

donde  $\bar{y}_1$  y  $\bar{y}_2$ , es el promedio de los datos de velocidad de propagación en cada material;  $n_1$  y  $n_2$ , son el número de datos de velocidad de propagación tomadas para cada material; y  $S_p^2$ , es una estimación de la varianza común calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (3.3)$$

donde  $S_1^2$  y  $S_2^2$ , son las dos varianzas muestrales individuales calculadas a partir de:

$$S^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n - 1} \quad (3.4)$$

Finalmente, se obtiene un valor para el estadístico de prueba de  $t_0 = -0.55$ . El criterio de rechazo de la hipótesis nula es  $|t_0| > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2}$ . De las tablas de distribución t de Montgomery [47] se obtiene  $t_{0.025, 10} = 2.228$  con un nivel de confianza de  $\alpha$  al 95%. De esta

forma, se acepta la hipótesis nula y se concluye que las medias de las velocidades de propagación de los dos materiales son estadísticamente similares.

Continuando con el desarrollo experimental, en la siguiente sección se describe la primera etapa implementada.

### **3.3 Determinación de cambios en la profundidad de la superficie de probetas de UHMWPE aplicando la técnica ultrasónica de inmersión Pulso – Eco.**

La técnica de ultrasonido, específicamente Pulso-eco, es usada para determinar los espesores de diferentes materiales normalmente de metales. En esta etapa se quiere determinar la aplicabilidad y resolución de la técnica sobre el material UHMWPE. Inicialmente se busca generar diferentes escalones sobre probetas de este polietileno, como una reproducción del desgaste en el material cuando se altera su espesor. De esta forma, además es posible determinar la resolución de lectura para la técnica planteada. Rateike [3] reporta que en pruebas de desgaste hechas sobre prótesis de rodilla se encontraron profundidades de desgaste de hasta 0.2 mm, valor tomado como referencia en la generación de los escalones maquinados sobre las probetas.

#### **3.3.1 Construcción de Probetas.**

El UHMWPE generalmente usado en prótesis de rodilla y cadera debe ser biocompatible [9], en este caso se logró determinar que la propagación en material quirúrgico y comercial es muy similar (0.1% de diferencia), por lo tanto se decidió realizar las pruebas con este último. Para llevar a cabo los experimentos en este trabajo, se obtuvieron las probetas a partir de una barra redonda (38.1 mm) de UHMWPE de tipo comercial, diámetro seleccionado según las medidas para disco recomendadas por la norma ASTM G99 [48] para prueba Pin on Disk. La decisión de usar material de grado comercial se centró en la similitud de la propiedad de propagación del ultrasonido entre los dos materiales, por lo tanto, no se justificaba la compra de material biocompatible con un elevado costo. Las medidas de las probetas están basadas en la norma ASTM G99, la cual define los parámetros para la prueba de desgaste Pin on Disk [49], en cuya técnica está basado el sistema de desgaste diseñado para este trabajo.

En esta etapa se obtuvieron 4 probetas con espesor de 6 mm, espesor recomendado por la norma ASTM G99[48]. El proceso de construcción se muestra a continuación:

- La barra redonda de UHMWPE es montada sobre el torno convencional, como se muestra en la Figura 3.16, donde se realiza una operación de careado para obtener una superficie uniforme.



Figura 3.16 Montaje de material - Torno Convencional.

- Con la superficie uniforme, se corta el material a 10 mm de espesor, para tener una buena condición de sujeción sobre la probeta, y finalmente llegar al espesor deseado de 6 mm mediante operación de careado. Es importante que la herramienta de corte esté bien afilada para generar una superficie sin marcas pronunciadas de mecanizado.
- Con las operaciones de mecanizado aplicadas, las superficies planas de la probeta presentan líneas producidas por la herramienta de corte. Para asegurar un acabado superficial adecuado es necesario pulir las caras de cada una de las probetas. El procedimiento se desarrolló lijando en dirección perpendicular a las trayectorias del maquinado hasta desbistarlas, en este paso se usó lija No. 400. Este proceso se repitió progresivamente con las lijas 600, 800, 1000, 1200 y 1500 hasta lograr el acabado idóneo. El acabado final de una de las probetas se muestra en la Figura 3.17.

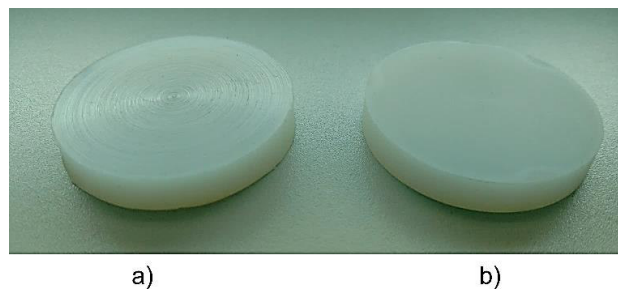


Figura 3.17 Probeta UHMWPE: a) Huellas de mecanizado y b) Acabado final.

### 3.3.2 Cambios de espesor en probetas.

En esta parte del proceso se generó sobre cada una de las probetas un cambio en el espesor, aplicando operación de corte con un torno convencional. El esquema del cambio de espesor requerido se muestra en la Figura 3.18.

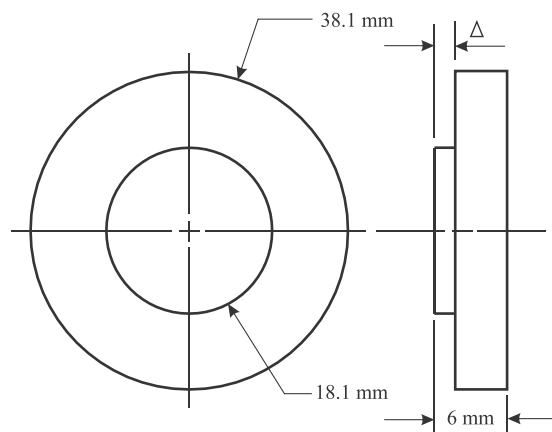


Figura 3.18 Variación en el espesor de probeta UHMWPE.

A la distancia  $\Delta$  (Figura 3.18) se le asignaron los siguientes valores: 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 mm. Estos valores se seleccionaron para tener un rango amplio de lecturas de espesor en el material, partiendo del máximo valor obtenido de profundidades de desgaste (0.2 mm) en trabajos anteriores [3], donde finalmente un cambio de espesor puede ser consecuencia de diversas condiciones de desgaste. Los cortes para estos cambios de espesor se realizaron en el torno convencional por el nivel de precisión requerido (0.1 mm). En la Figura 3.19 se muestra la probeta de UHMWPE con cambio de espesor en 0.4 mm.



Figura 3.19 Probeta UHMWPE - escalón de 0.4 mm.

### 3.3.3 Inspección Ultrasonido de Inmersión (Pulso-Eco).

Cada una de las probetas son inspeccionadas usando la técnica de ultrasonido por inmersión (Pulso-eco). En este paso se usa la plataforma experimental END, para detectar los cambios de espesor producidos en las probetas, cuyo montaje en la plataforma experimental se muestra en la Figura 3.20.

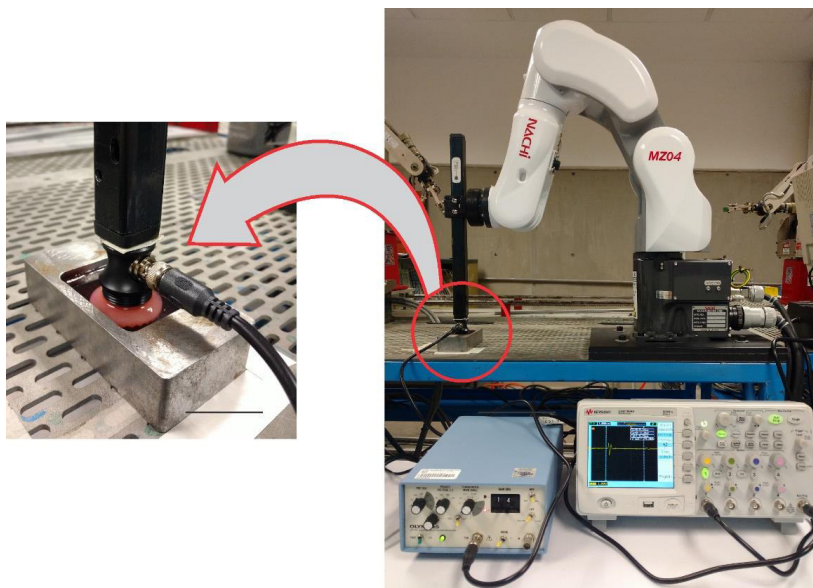


Figura 3.20 Plataforma experimental END.

La técnica ultrasónica de Pulso-Eco en modo inmersión, requiere un medio acoplante entre el transductor y la pieza inspeccionada. Para el caso del estudio realizado en este trabajo, una prótesis de UHMWPE se encuentra interna en la rodilla recubierta por tejido y sustancias corporales. Esta razón justificó el uso de la solución de Hank's (H6136 – SIGMA) [50] como medio acoplante, con el objetivo de acercar el experimento a la realidad. En la Figura 3.21 se muestra una de las probetas inmersa en la solución salina.



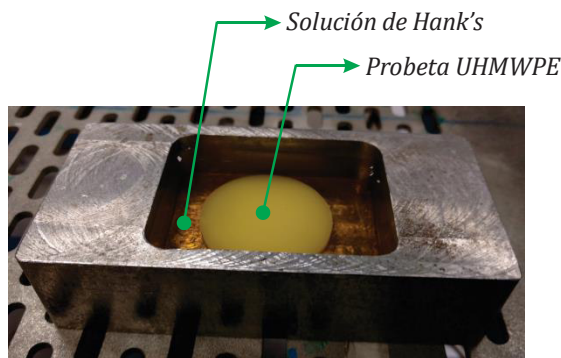


Figura 3.21 Probeta de UHMWPE en solución de Hank's.

Con la probeta fija en el recipiente metálico e inmersa en la solución de Hank's se procede a realizar el barrido ultrasónico (C-Scan). En este barrido se tomaron lecturas cada milímetro para tener una resolución aceptable de los resultados, aunque es posible recorrer el transductor cada 0.02 mm según el nivel de precisión que presenta el robot NACHI® [42]. En la Figura 3.22 se muestra el esquema de configuración de la probeta respecto al transductor piezoeléctrico. El transductor se ubicó a un (1) milímetro por arriba de la probeta de UHMWPE. Esta distancia no afecta las mediciones, ya que en la inspección por inmersión se tiene en cuenta el tiempo entre el primer y segundo rebote para el cálculo del espesor del material.

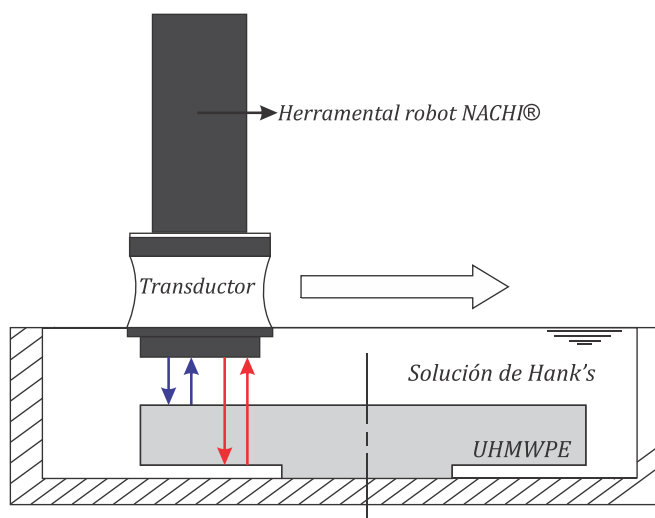


Figura 3.22 Esquema de barrido ultrasónico.

La inspección se realiza mediante el tipo de análisis C-Scan (Ver sección 2.1.5), aunque no es necesario realizar un barrido sobre un área específica en la probeta debido a la condición de simetría axial (Figura 3.23). De esta forma, se obtiene un perfil de alturas donde se busca

detectar la variación en la superficie del material. Este procedimiento, se aplicó cinco (5) veces sobre cada una de las probetas para buscar repetibilidad en los resultados y conocer las variaciones que se presentan.

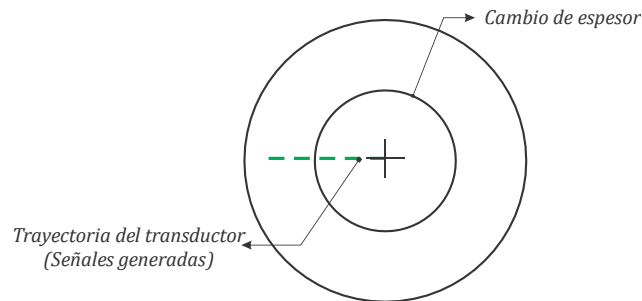


Figura 3.23 Trayectoria de transductor.

### 3.3.4 Procesamiento de señales.

Una señal generada con la inspección por ultrasonido de inmersión (Pulso eco) sobre un área determinada de la superficie del material, generalmente se visualiza de la forma mostrada en la Figura 3.24. El primer pico máximo en amplitud representa el primer rebote de la onda en la superficie superior y el segundo corresponde al rebote en la superficie inferior, ver Figura 3.25).

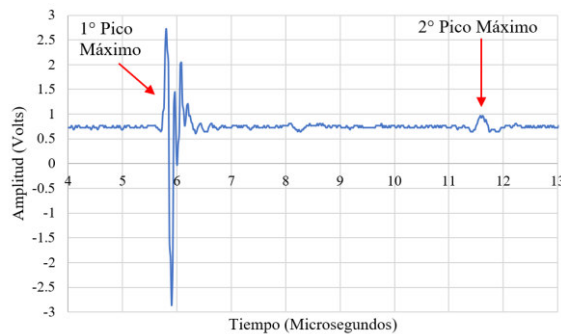


Figura 3.24 Señal típica pulso-eco en UHMWPE.

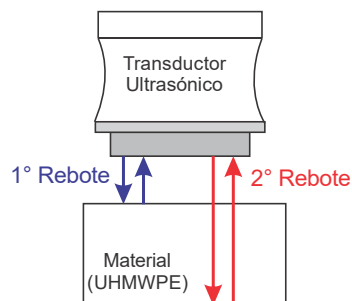


Figura 3.25 Secuencia señal pulso-eco inmersión.



Las señales se adquieren mediante la interfaz desarrollada en el software LabView® de la Plataforma Experimental de END [51]. Como se vio en la sección 2.1.4, la inspección por ultrasonido en Pulso-eco, de forma general, permite conocer el espesor que presenta un material al conocer el tiempo de rebote entre los dos picos máximos (superficie superior e inferior, respectivamente). Con el tiempo y las propiedades de propagación de la onda ultrasónica (velocidad) conocidas para el material, se determina el espesor del material en la zona inspeccionada usando la ecuación (3.1).

El procesamiento de las señales generadas se realizó en un programa desarrollado en el software MATLAB® (Ver Apéndice A.). La secuencia de su funcionamiento es la siguiente:

1. Lectura de las señales generadas, las cuales son guardadas por LabView® en archivos de datos con extensión “.lvm”. En este paso, se usa la función “addpath”, para agregar la carpeta con todos los datos, e “importdata”, para extraer los valores numéricos de cada una de las señales.
2. Con las señales generadas, el algoritmo permite encontrar los picos máximos y calcula el tiempo entre los dos picos máximos. Los picos máximos se promediaron con los 5 valores máximos en cada zona, para asegurar la lectura frente a un posible ruido que pudiera contaminar la señal.
3. Finalmente, se extrae la secuencia de tiempos de los puntos inspeccionados en el barrido ultrasónico de la probeta.

Para finalizar, los resultados obtenidos en esta etapa se presentan en el Capítulo 4. En la siguiente etapa, se presenta el desarrollo experimental para la inspección de probetas de UHMWPE con desgaste artificial.

### **3.4 Inspección del desgaste artificial en los especímenes de UHMWPE.**

A continuación, se describe el procedimiento experimental para la evaluación ultrasónica de probetas de UHMWPE con desgaste generado mediante la prueba Pin on Disk.

#### **3.4.1 Desgaste Artificial.**

La reproducción de las condiciones tribológicas bajo las cuales está sometido el material de prótesis UHMWPE es una opción compleja de implementar experimentalmente, debido a las

diferentes sustancias que actúan sobre este tipo de inserto en un cuerpo humano [52]. El desgaste por fricción generado en esta etapa experimental sobre el UHMWPE se implementa con lubricación seca, condición que permite llevar el material a un nivel crítico de pérdida volumétrica en la superficie.

La prueba Pin-on-disk [48] es usada para desgaste por fricción entre dos superficies y su principio de funcionamiento se basa en el contacto entre un pin cargado axialmente y un disco rotativo, como se muestra en la Figura 3.26. El desarrollo de esta prueba generalmente muestra el comportamiento del coeficiente de fricción con relación a los ciclos de carga. En este caso no se necesita específicamente este parámetro. Se requiere generar un desgaste sobre el UHMWPE, determinarlo geoméricamente (perfil de rugosidad) y evaluarlo con propagación ultrasónica. Es de resaltar que el tribómetro, equipo usado para ejecutar la prueba Pin on Disk no se encuentra disponible en la Universidad de Guanajuato, por lo cual se optó en diseñar y construir un dispositivo destinado a estas pruebas a la medida de la necesidad del proyecto.

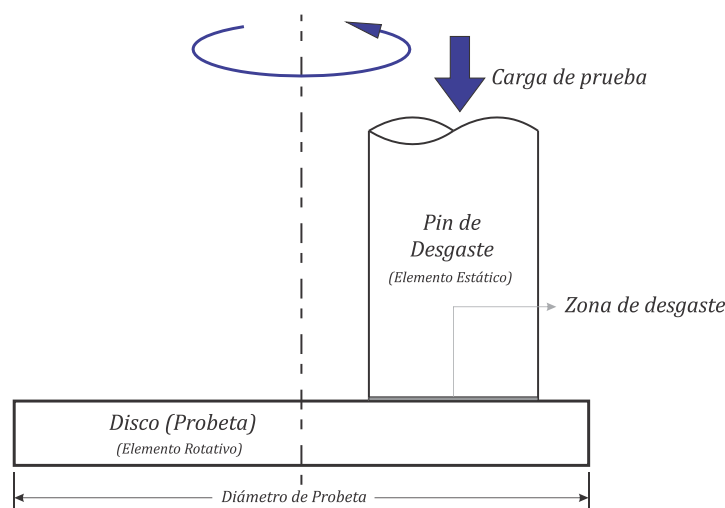


Figura 3.26 Esquema de prueba Pin on Disk.

Las razones antes mencionadas, justificaron el desarrollo de una prueba experimental basada en la técnica Pin on Disk, con la ventaja de tener este sistema de desgaste disponible en las instalaciones de la Universidad de Guanajuato. Aprovechando la facilidad de acceso a los tornos convencionales, se ideó un dispositivo adaptable a estos equipos con el propósito de aprovechar el sistema de rotación y la capacidad de períodos prolongados de trabajo continuo.

El dispositivo está diseñado a partir de la necesidad de mantener una fuerza constante sobre el pin de desgaste. Para el caso del montaje de la probeta de UHMWPE en el torno convencional, la fuerza aplicada sobre la probeta por el pin de acero inoxidable debe disponerse en forma horizontal. Por lo tanto, se requiere una configuración que convierta la fuerza vertical del peso de referencia en una fuerza horizontal. Bajo este requerimiento de diseño, el dispositivo se desarrolló a partir de un sistema hidráulico (Figura 3.27).

El sistema hidráulico de transmisión de fuerza requiere atención especialmente en la selección del fluido. Para este caso, se requiere un fluido con baja compresibilidad, que permita transmitir la fuerza sin generar pérdidas considerables. Se seleccionó el fluido para frenos hidráulicos DOT 3 a base de glicol. Éste es un fluido aproximadamente incompresible, presenta la ventaja de transmitir la fuerza que se aplica a través de él en igual magnitud sobre el sistema que lo contiene, siempre y cuando se mantenga cerrado herméticamente [53]. En la Tabla 3.3 se destacan algunas propiedades del fluido DOT3. En la Figura 3.27 se muestra el esquema general del dispositivo de desgaste para usarse en torno convencional.

Tabla 3.3 Propiedades fluido hidráulico DOT3 [54].

Nombre	Método	Unidades	Castrol Brake Fluid DOT3
Apariencia	Visual	-	Líquido claro y brillante
p H	SAE J1703	p H	7 - 11
Viscosidad Cinemática 40°C	Proovedor	mm <sup>2</sup> /s	1400 max.
Viscosidad Cinemática 100°C	ASTM D445	mm <sup>2</sup> /s	1.8 min
Densidad @20°C	IP 160	g/ml	1.05

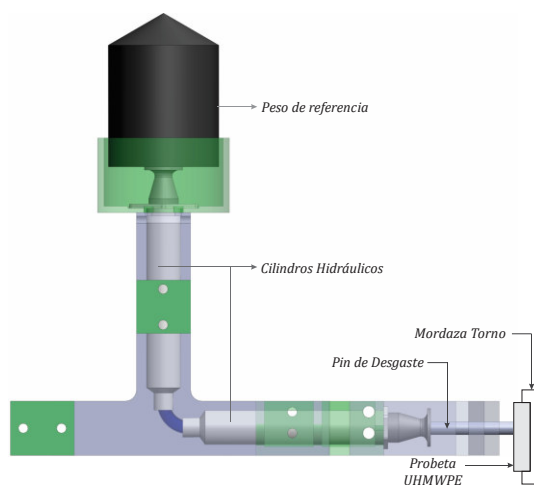


Figura 3.27 Esquema del dispositivo de desgaste.

El dispositivo transmite la fuerza generada por el peso de referencia mediante la presión hidráulica generada en los cilindros, de esta forma el pin de desgaste ejerce una fuerza constante sobre la probeta de UHMWPE sujeta con la mordaza del torno. Esta última, permanece en rotación continua y es así como se produce el desgaste basado en la técnica Pin on Disk.

El dispositivo se construyó a partir de impresiones 3D con material PLA (ácido poliláctico) y en lámina de acero estructural de 3.175 mm para brindar mayor rigidez. El pin está fabricado de acero inoxidable. En la Figura 3.28 se muestra el dispositivo construido.

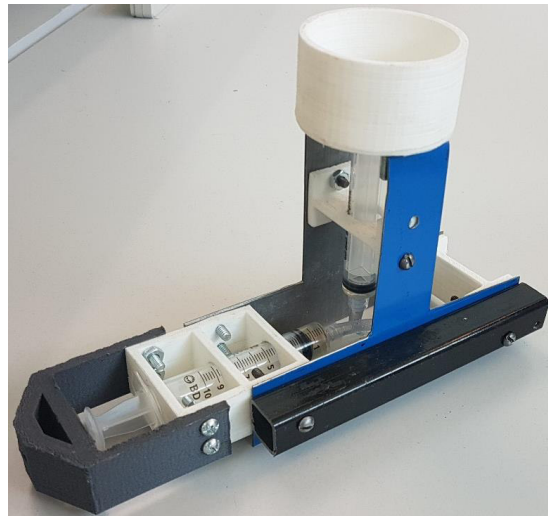


Figura 3.28 Dispositivo de desgaste basado en prueba Pin on Disk.

Un parámetro necesario para la prueba de desgaste es el peso de referencia que se debe aplicar en el dispositivo. Para conocer el valor de este peso, se consideró una relación de la presión que soporta el material UHMWPE en una rodilla promedio con la presión requerida en el área de contacto del pin. Es de resaltar que la carga se define de esta forma para llevar el desgaste aproximadamente a la condición real del material en una prótesis de rodilla. Para este caso, se plantea una prótesis en una persona promedio con un valor de peso soportado en la rodilla de 75 kg. El peso es considerado en una situación en que el cuerpo está apoyado en una sola pierna.

En la Figura 3.29, se muestran las áreas de contacto de la prótesis de rodilla, donde descansan los cóndilos femorales, en las cuales se soporta el peso en su totalidad. A partir de

una geometría de prótesis de rodilla reportada por Rateike [3], se obtiene una medida aproximada de  $732 \text{ mm}^2$  para cada una de las áreas de contacto.

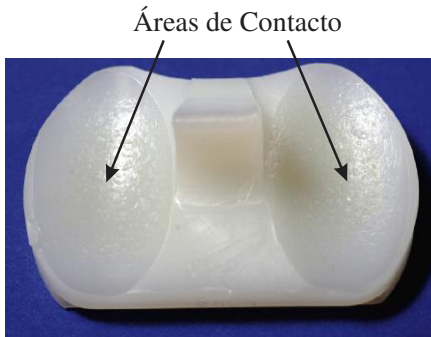


Figura 3.29 Vista superior, componente de UHMWPE en ATR [9].

A partir de estos parámetros y conociendo el diámetro del pin (5.4 mm) [48], se define la fuerza requerida en el dispositivo de desgaste a partir de las siguientes ecuaciones:

$$P_P = \frac{F_W}{2 * A_C} \quad (3.5)$$

donde  $P_P$ , es la presión sobre una prótesis de rodilla;  $F_W$ , es la fuerza sobre la prótesis (75 kg); y  $A_C$ , es el área de contacto de la prótesis de rodilla.

Ahora, se calcula la fuerza requerida en el dispositivo, asociando la presión que soporta el UHMWPE en la prótesis, con la presión sobre este material ejercida por el pin en la prueba de desgaste. Esta relación se consigue a partir de la siguiente ecuación:

$$F_D = P_P * \pi * r_p^2 \quad (3.6)$$

donde  $F_D$ , es la fuerza del pin en el dispositivo de desgaste y  $r_p$ , es el radio del pin. Finalmente, se obtiene la fuerza  $F_D$  con un valor de 10.67 N. Para fines prácticos se decidió implementar en el dispositivo una masa de referencia de 1 kg.

El sistema hidráulico mediante el cual está actuado el dispositivo de desgaste, presenta ciertas pérdidas de transmisión de la fuerza, principalmente por fricción en sus componentes. Una forma de detectar la eficiencia del dispositivo se centra en la medición de la fuerza en el pin al momento de ser cargado con el peso de referencia. Dicha fuerza, se mide instrumentando el sistema de desgaste con un sensor de presión MF01, como se muestra en la Figura 3.30.

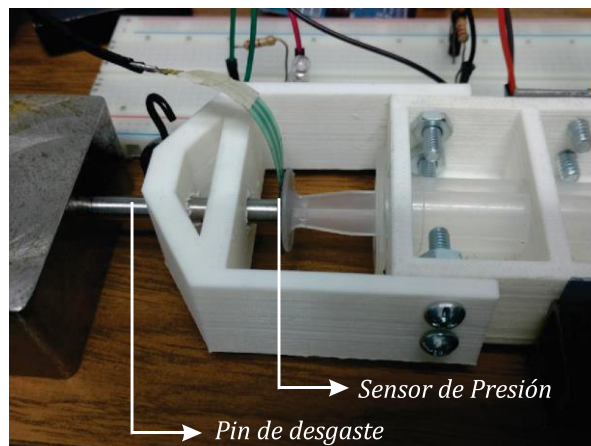


Figura 3.30 Instrumentación pin de desgaste con masa de referencia de 1 kg.

A partir de esta medición, se observa que para una carga de 1 kg usada como peso de referencia en el dispositivo de desgaste, aproximadamente existe un 8% de pérdidas en la transmisión de la fuerza. Este valor de pérdida es aceptable para este caso, ya que las condiciones del desgaste son llevadas a un caso aproximado al estado tribológico real del UHMWPE actuando como prótesis de rodilla.

La velocidad de deslizamiento es otro parámetro necesario en la prueba de desgaste [48]. Para las pruebas se eligió una velocidad de rotación de 490 rpm conforme a la norma ASTM G99-05, con una velocidad de deslizamiento de 154 mm/s, ubicando el pin en el punto más cercano al centro de la probeta de UHMWPE.

El procedimiento para realizar las pruebas de desgaste se describe a continuación:

- 1) Montaje del material en el torno. La barra redonda de UHMWPE con una longitud de 200 mm aproximadamente, es montada en la mordaza del torno permitiendo que sobresalga una parte, como se muestra en la Figura 3.31. Con la pieza montada, se procede a realizar una operación de careado en la superficie plana de la barra. De esta forma, se garantiza que el material no tenga irregularidades en el instante en que se adapte el dispositivo de desgaste. Finalmente se proporciona un acabado a la superficie plana siguiendo el procedimiento descrito en la sección 3.3.1.





Figura 3.31 Montaje material UHMWPE en el torno convencional.

- 2) Instalación del dispositivo de desgaste. Con la barra de material puesta en las mordazas del torno, se procede a montar el dispositivo de desgaste en el porta-herramienta del torno como se muestra en la Figura 3.32. En este paso, es importante verificar que la parte plana del pin quede paralela a la cara de la probeta de UHMWPE. Una vez que el pin es dispuesto de forma correcta, se agrega el peso de referencia al dispositivo y se da un pequeño avance (5 mm) para estabilizar la presión. El pin debe ubicarse en la periferia del centro de la probeta (Figura 3.33).

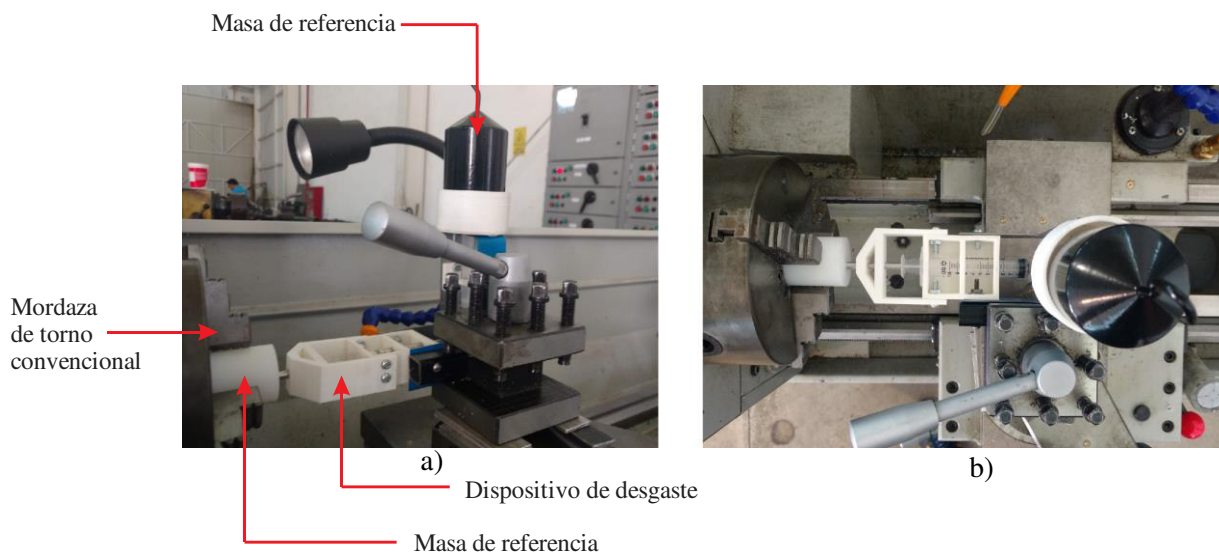


Figura 3.32 Montaje de dispositivo de desgaste: a) Vista lateral y b) vista superior.

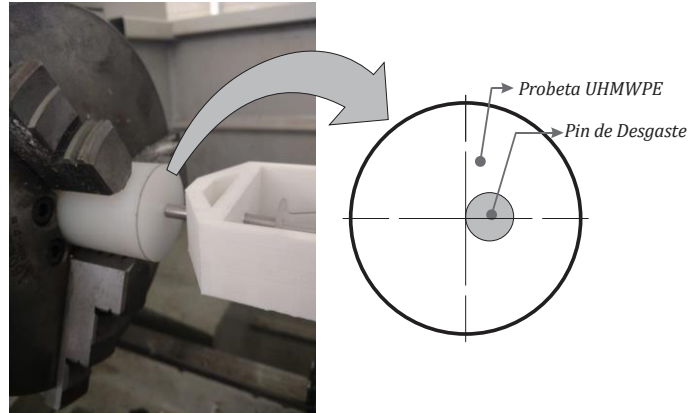


Figura 3.33 Ubicación pin de desgaste.

- 3) Inicio de los ciclos de desgaste. Antes de iniciar el desgaste, el torno es configurado con una velocidad de rotación de 490 rpm, según las condiciones especificadas anteriormente. Los ciclos de desgaste (una revolución del material) son controlados con el tiempo de prueba. Finalmente, el desgaste inicia en operación continua para cada probeta. En la Tabla 3.4 se muestran los ciclos aplicados para 3 probetas de UHMWPE, conforme a la norma ISO 14243-1:2009 [55].

Tabla 3.4 Ciclos de desgaste.

Probeta	Tiempo (Horas)	Ciclos de Desgaste
1	5	1.47E+05
2	10	2.94E+05
3	20	5.88E+05

Finalmente, se presenta una huella de desgaste sobre cada una de las probetas como se representa en la Figura 3.34.

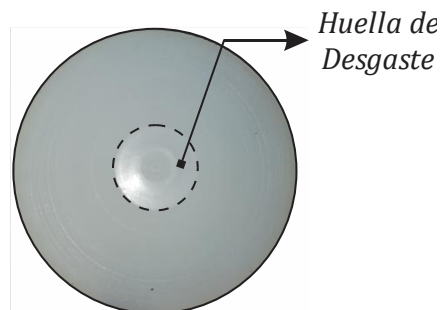


Figura 3.34 Huella de desgaste en probeta de UHMWPE.

- 4) Corte de la probeta. Al terminar la prueba, cada una de las probetas es cortada a un espesor de 12 mm para luego realizar operación de careado sobre la cara cortada. Esta distancia, es el mínimo valor para obtener condiciones mínimas de sujeción y facilitar la ejecución del maquinado de forma correcta. En la Figura 3.35 se muestran las probetas desgastadas.



Figura 3.35 Probetas de UHMWPE con desgaste artificial - Pin on Disk (espesor nominal de 12 mm).

### 3.4.2 Cuantificación geométrica del desgaste

El desgaste es posible determinarlo a partir de diferentes formas: midiendo la cantidad de masa perdida a partir de una micro-gramera, definiendo el volumen perdido o analizando la geometría del material antes y después del desgaste. Para este caso, la orientación de las pruebas está dirigida a prótesis de rodilla, impidiendo realizar algún tipo de pesaje de la prótesis. La opción con mayor factibilidad es la comparación geométrica del material para llegar a una comparación equivalente con el resultado de las pruebas ultrasónicas, las cuales emiten espesores en los diferentes puntos analizados del material.

Una forma de conocer geoméricamente el desgaste en las probetas de UHMWPE es mediante el perfil de rugosidad y partir de éste, determinar la profundidad del desgaste comparando la zona desgastada y aquella en la que no hace contacto el pin. El perfil de rugosidad se mide con el equipo Mitutoyo® SJ-310 [56], en cada una de las probetas (Figura 3.36).

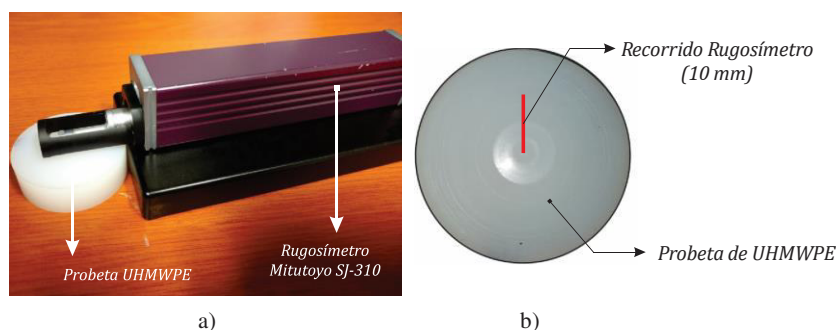


Figura 3.36 a) Prueba de Rugosidad y b) Esquema de longitud del perfil de rugosidad.

La prueba de rugosidad se realiza para las probetas 1, 2 y 3. A partir de este análisis se obtiene un perfil de alturas incluyendo ambas zonas (con y sin desgaste). Los perfiles obtenidos se observan en la Figura 3.37.

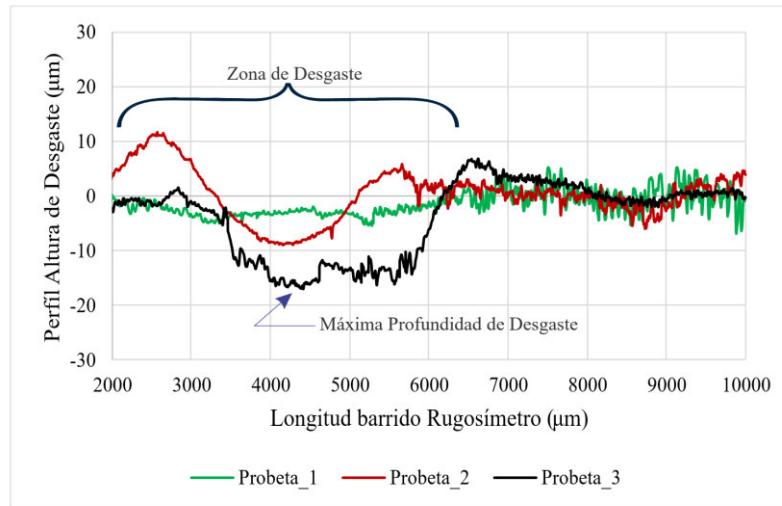


Figura 3.37 Perfil de alturas zona de desgaste - Probetas UHMWPE.

El interés específico en los anteriores perfiles se enfoca en la profundidad que alcanza el desgaste inducido con la prueba Pin On Disk en las probetas de UHMWPE, como medición del nivel de desgaste que sufre cada una de ellas. En este caso, se toma el valor máximo de la profundidad del desgaste y se realiza la comparación con la lectura ultrasónica tomada en el sitio del desgaste.

### 3.4.3 Inspección Ultrasonido (Pulso-Eco).

En el desarrollo de la segunda etapa, se induce un desgaste artificial (Pin on Disk) sobre el material UHMWPE, donde se logra alcanzar una profundidad máxima de desgaste de aproximadamente 18  $\mu\text{m}$ . En el análisis de la primera etapa, se evidenció que la resolución de los equipos disponibles para las pruebas de inmersión permite detectar un cambio en el espesor del material mayor o igual a 0.2 mm. Sin embargo, en esta etapa se aplicó la inspección ultrasónica usando la técnica Pulso-eco en modo de contacto para detectar el desgaste a este nivel (Ver sección 2.1.4)

El objetivo de la técnica de ultrasonido pulso-eco en modo contacto, se enfoca en determinar el tiempo de viaje de la onda en el material analizando el primer pico (rebote) de la

señal. En cada una de las probetas se hicieron cinco (5) lecturas con el equipo de ultrasonido a una frecuencia de 10 MHz en ambas zonas con y sin desgaste en un solo punto (Figura 3.38).

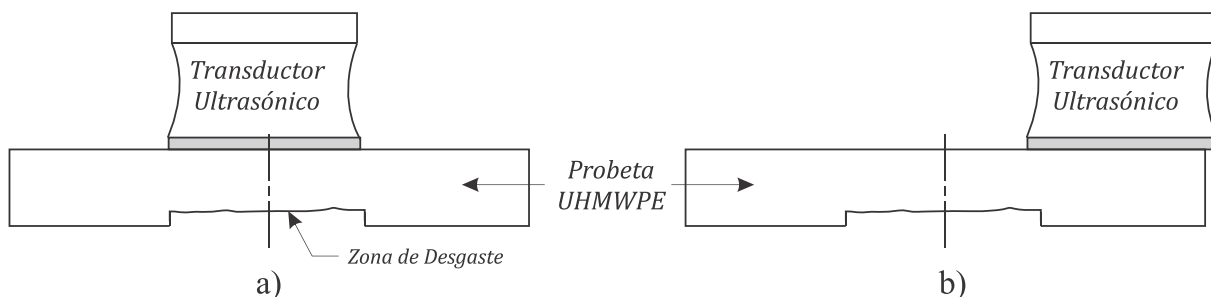


Figura 3.38 Mediciones ultrasónicas: a) Zona de desgaste y b) Zona libre de desgaste.

En este caso se analiza el primer rebote de la señal, determinando el tiempo donde se encuentra el primer pico máximo. Para determinar un valor correcto, se amplió la imagen de la señal en el osciloscopio específicamente en la zona de amplitud máxima (Figura 3.39).

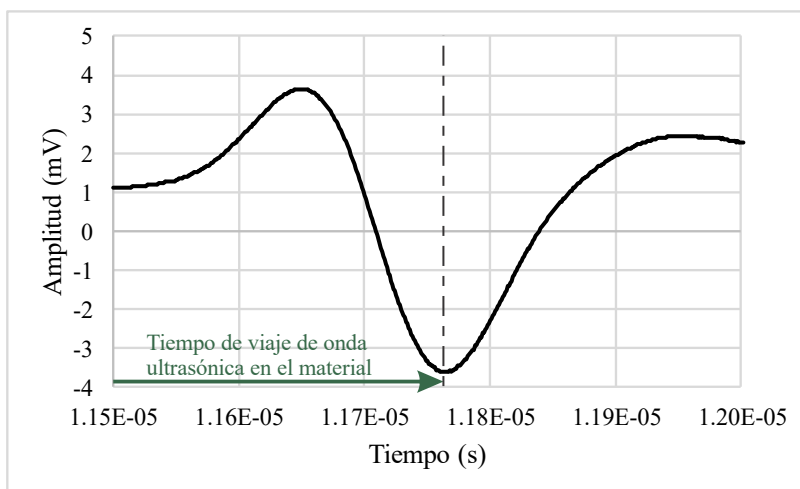


Figura 3.39 Pico de amplitud máximo (Primer rebote de la onda).

A partir de la determinación de este tiempo en las zonas mostradas de la Figura 3.38, y usando las expresiones descritas en la sección 2.1.4, se determina el espesor en cada una de las zonas permitiendo detectar el desgaste que sufre el material aplicando la técnica ultrasónica pulso-eco. Los resultados de esta etapa se presentan en el Capítulo 4.

## Capítulo 4. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo experimental para las dos etapas desarrolladas, así como, un análisis estadístico con el objetivo de verificar las variaciones presentes en la lectura emitida por la técnica de ultrasonido pulso-eco aplicada en ambas situaciones.

En el desarrollo experimental se destacó la ejecución de dos (2) etapas, en las cuales se aplicó la técnica de ultrasonido de pulso eco en modo de inmersión y en contacto a probetas de material UHMWPE. En la primera etapa, se identifica la capacidad de la plataforma END [51] en la configuración de inmersión, para la detección de disminución en la pared emulando un proceso de desgaste; y en la segunda, se estudia un proceso de desgaste artificial aplicado con la técnica Pin on Disk, donde se registran disminuciones en el espesor del orden de los micrómetros, detectando estas variaciones mediante la técnica ultrasónica Pulso-eco. En la siguiente sección, se presentan los resultados y discusión para la etapa I.

### **4.1 Determinación de cambios en la profundidad de la superficie de probetas de UHMWPE aplicando la técnica de inspección ultrasónica (inmersión) Pulso – Eco.**

Como resultados directo de esta etapa, se obtienen los tiempos de viaje de la onda ultrasónica a través del material para cada uno de los puntos seguidos por la trayectoria del transductor, mediante un tratamiento previo de la señal generada y descrito en la sección 3.3.4. Este procedimiento, se aplica a cada una de las probetas con cambios de espesor de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 mm. En la Figura 4.1, se observa la zona en que se realizaron los barridos ultrasónicos para detectar las variaciones en la señal ultrasónica según el cambio en la superficie en cada una de las probetas.

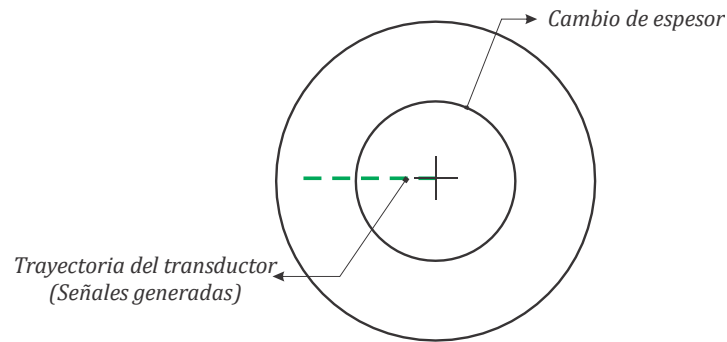
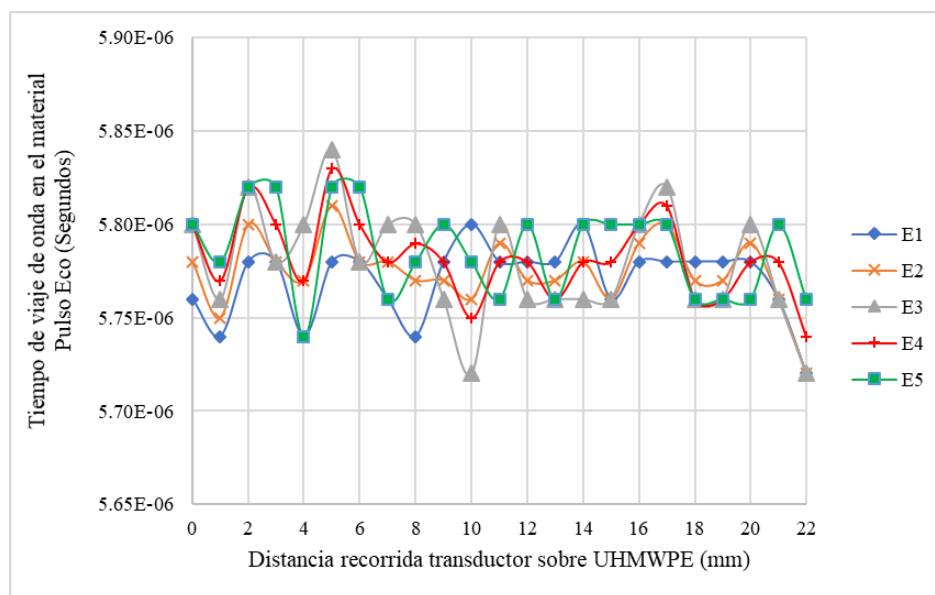
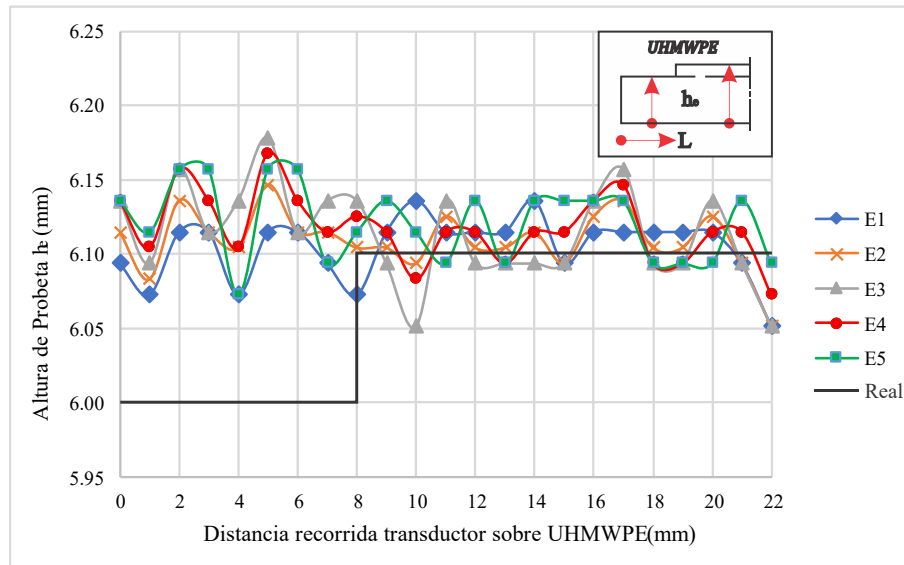


Figura 4.1 Probeta UHMWPE, trayectoria de barrido ultrasónico.

Los tiempos de viaje de pulso ultrasónico para cada uno de los puntos inspeccionados sobre la trayectoria seguida con el transductor. En la Figura 4.2, se ilustran las cinco (5) repeticiones para la inspección sobre la probeta de  $\Delta=0.1$  mm.

Figura 4.2 Tiempos de viaje de pulso ultrasónico - Probeta con  $\Delta=0.1$  mm.

Con el tiempo de viaje de la onda a través del material, se calcula la distancia recorrida por este pulso en cada uno de los puntos de la trayectoria. Luego, se crea un perfil de la superficie de la probeta con los espesores calculados en cada uno de los puntos, usando la metodología descrita en la sección 2.1.4. En la Figura 4.3 se presentan los resultados para 5 repeticiones (E1, E2, E3, E4, E5) y la medida real de la probeta (R).

Figura 4.3. Perfil de altura de probeta.  $\Delta=0.1$  mm.

En la Figura 4.3, se identifica que los resultados presentan una variación entre un valor de 6.08 y 6.14 mm, y no se observa el cambio de espesor para este espécimen. La verificación de la variación de los resultados de la inspección ultrasónica frente al valor real de las dimensiones de la probeta se puede desarrollar mediante una prueba estadística, en la que se busca aceptar la hipótesis nula de que la media de la altura de probeta en algunos puntos seleccionados es igual a la medida real de la probeta.

En la zona donde el espesor de la probeta es 6.0 mm, se seleccionan los puntos con distancias “L” de 2, 5 y 9 mm, para los cuales se plantean las siguientes hipótesis:

$$\text{Hipótesis Nula: } H_0: \mu = 6.0$$

$$\text{Hipótesis alternativa: } H_1: \mu \neq 6.0$$

En este caso, se propone realizar la prueba de hipótesis mediante una prueba  $t$  de una muestra, aceptando el supuesto adicional que la población sigue una distribución normal y teniendo en cuenta que las desviaciones de la normalidad son moderadas y no afectarán seriamente el resultado [47], según se observa en la gráfica de perfil de alturas (Figura 4.3).

El estadístico de prueba para este caso es el siguiente:

$$t_0 = \frac{\bar{y} - \mu_0}{S/\sqrt{n}} \quad (4.1)$$



donde  $\bar{y}$ , es el promedio de los datos;  $\mu_0$ , es la media especificada;  $S$ , es la desviación estándar muestral y  $n$ , es el tamaño de la muestra. La hipótesis nula se rechaza si se cumple la condición:  $|t_o| > t_{\alpha/2, n-1}$ , donde  $\alpha$ , es el nivel de confianza al 95%. De la tabla para distribución t de Montgomery [47] se obtiene el valor para  $t_{\alpha/2, n-1}$ . En la Tabla 4.1 se muestran los valores obtenidos para la prueba de hipótesis aplicada.

Tabla 4.1 Valores obtenidos para la prueba de hipótesis.

Puntos (Distancias en mm)	$t_{0.025, 5}$	$t_o$	Hipótesis aceptada
2	2.571	-15,89	Alternativa
5		-9,5	Alternativa
9		-14.33	Alternativa

Con los anteriores análisis aplicados, se rechaza la hipótesis nula  $\mu = 6.0$ , en los puntos con distancias “L” de 2, 5 y 9 mm, para un nivel de confianza de 0.05 y 4 grados de libertad. Esta decisión permite diagnosticar que con la técnica ultrasónica aplicada no se detectan cambios en la profundidad del material a un nivel de 0.1 mm.

De igual forma, para las probetas con  $\Delta = 0.2$  mm se obtienen los perfiles de la superficie, siguiendo el procedimiento aplicado para la probeta de  $\Delta=0.1$  mm. En estos casos las diferencias en la superficie son notorias en la Figura 4.4. Sin embargo, es necesario verificar mediante una prueba t las diferentes hipótesis referentes a la comparación entre el valor medio de las observaciones y el valor de referencia, en este caso la altura real (R) en los puntos seleccionados.

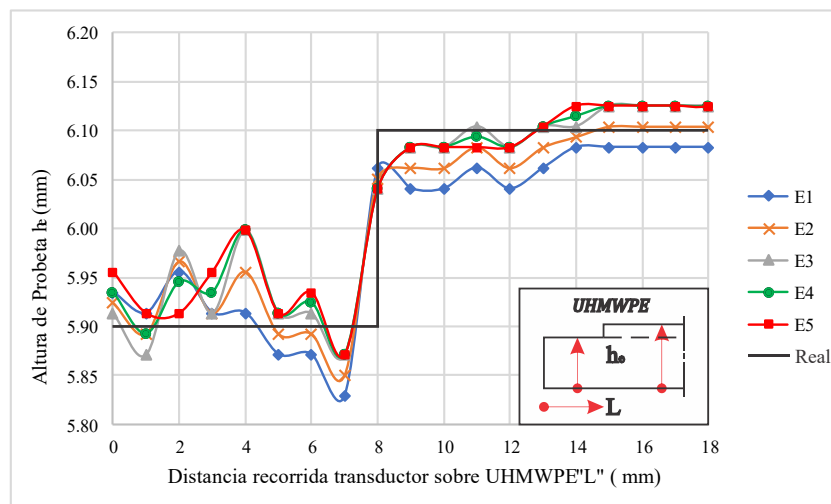


Figura 4.4. Perfil de superficie de probeta.  $\Delta=0.2$  mm.

En un cambio de 0.2 mm en la superficie de la probeta, algunos puntos presentan variaciones significativas, posiblemente producto de ruidos al momento de capturar la señal (Figura 4.4). Por esta razón, en la zona inicial (nivel bajo) se seleccionan los puntos donde L es igual a 1, 3 y 5 mm, en cada uno de ellos se realiza la prueba *t*. Ésta considera la hipótesis nula que la media es similar al valor de referencia de 5.9 mm y en la otra zona los puntos con L igual a 11, 15 y 17 mm para un valor de referencia de 6.1 mm. En ambos casos, el resultado de la prueba evidenció que no existen diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) de las medias muestrales con los valores de referencia. De este análisis es posible determinar que la técnica de inspección usada permite identificar para este nivel ( $\Delta = 0.2$  mm) los cambios en el perfil de la superficie (Figura 4.5).

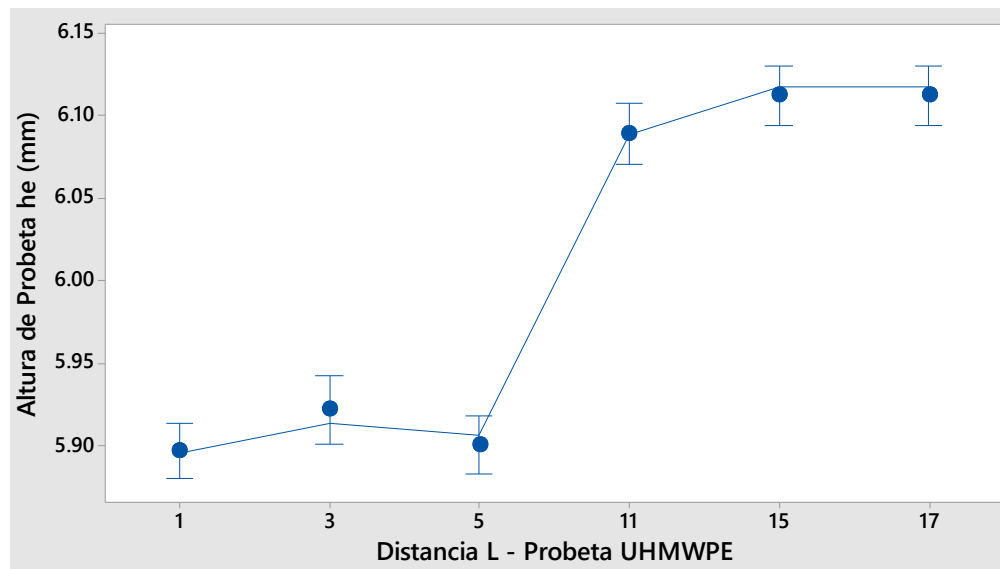
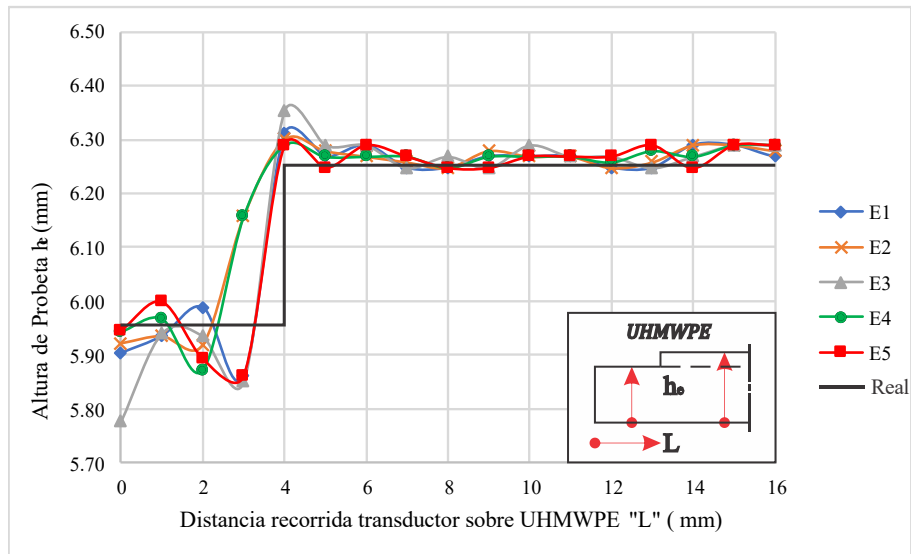
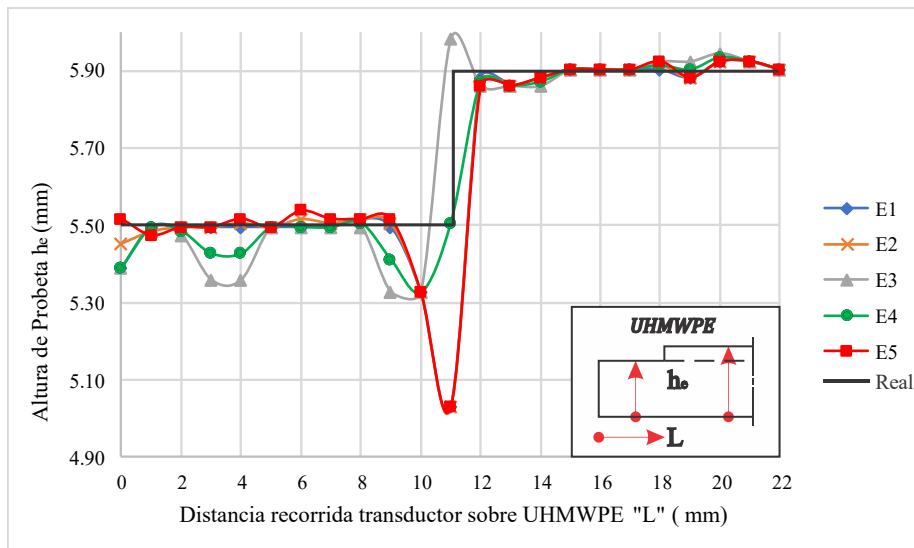


Figura 4.5 Altura de superficie promedio -  $\Delta = 0.2$  mm (Puntos prueba de hipótesis).

A continuación, se presentan los resultados para los cambios de perfil de las probetas con  $\Delta$  de 0.3 y 0.4 mm. Es de resaltar que estos resultados provienen de una relación entre el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica en el material (UHMWPE) y su velocidad de propagación. En la Figura 4.6 y Figura 4.7, se ilustran los perfiles de altura de probeta para ambos niveles.

Figura 4.6 Perfil de superficie de probeta.  $\Delta=0.3$  mm.Figura 4.7 Perfil de superficie de probeta.  $\Delta=0.4$  mm.

El análisis estadístico de hipótesis también se desarrolló para estos dos especímenes ( $\Delta$  de 0.3 y 0.4 mm, usando la prueba  $t$ . Para los cuales, en los puntos analizados resultó que las medias no presentan una diferencia estadísticamente significativa ( $P>0.05$ ) con la media de referencia, representada por las medidas reales de la probeta. En las Figuras 4.8 y 4.9, se observan los puntos analizados con sus respectivos intervalos de altura de probeta.

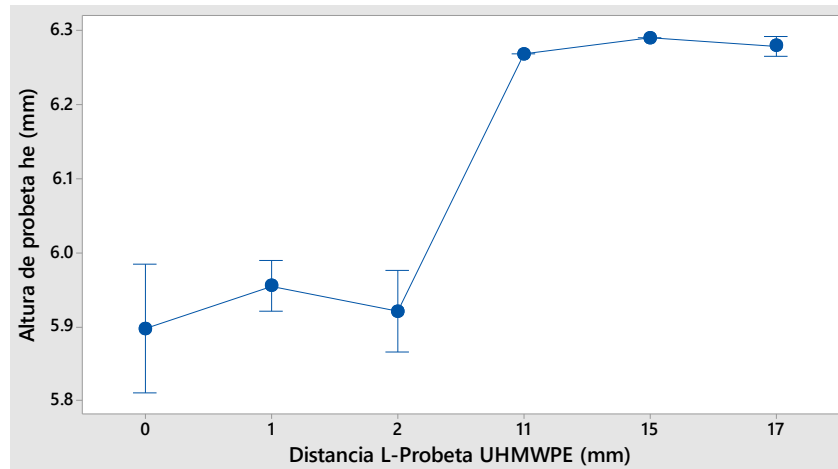


Figura 4.8 Altura de superficie promedio -  $\Delta=0.3$  mm (Puntos prueba de hipótesis).

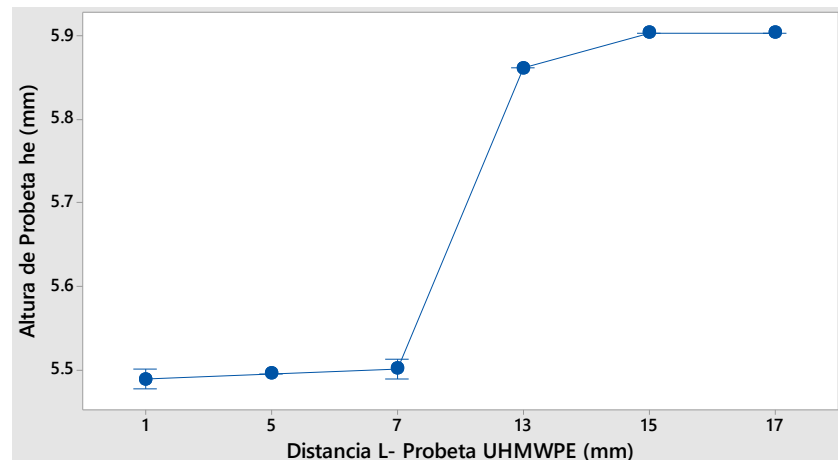


Figura 4.9 Altura de superficie promedio -  $\Delta=0.4$  mm (Puntos prueba de hipótesis).

Una vez analizados los resultados de la etapa I, se establece que la inspección ultrasónica por inmersión implementada permite detectar cambios mayores a 0.2 mm en la profundidad de una superficie plana en una probeta de UHMWPE.

A continuación, se presentan los resultados derivados de la inspección ultrasónica aplicada a probetas con desgaste artificial.

## 4.2 Inspección del desgaste artificial en los especímenes de UHMWPE.

En esta etapa, se toman en cuenta los resultados para las tres (3) probetas de UHMWPE, desgastadas artificialmente con la aplicación de la técnica Pin on Disk [48] a diferentes ciclos. Para este caso, se obtienen los tiempos de viaje (pulso-eco) de la onda ultrasónica en el

material en un punto fuera de la zona de desgaste y uno dentro de ésta, con 5 repeticiones de la inspección en cada uno de ellos. El número de ciclos aplicado se presentó en la Tabla 3.4.

Los tiempos de viaje de la onda en el material se presentan en la Tabla 4.2. En este caso, el análisis se enfoca en determinar la diferencia de alturas de material entre la zona de la probeta donde se aplicó desgaste y en la zona libre de éste. Con el análisis se busca determinar la capacidad de la técnica ultrasónica para detectar cambios a nivel micrométrico.

Tabla 4.2 Tiempos de vuelo de onda en UHMWPE (Pulso-eco) en  $\mu\text{s}$ .

Región	Probeta		
	1	2	3
Zona de Desgaste	11.203	11.285	11.643
	11.223	11.288	11.645
	11.239	11.283	11.644
	11.231	11.286	11.643
	11.245	11.293	11.645
Zona sin desgaste	11.239	11.297	11.672
	11.239	11.299	11.677
	11.203	11.299	11.677
	11.245	11.301	11.672
	11.203	11.313	11.675

En las siguientes gráficas, se muestran los resultados de la inspección ultrasónica para los valores de altura de probeta en cada uno de los especímenes con diferentes ciclos de desgaste. En la Figura 4.10 se observa que entre valores de las medias no existe un cambio visible, a diferencia de la Figura 4.11 y Figura 4.12, donde se evidencia una diferencia notable entre los dos valores medios. Sin embargo, es necesario aplicar algunos análisis estadísticos para confirmar estas observaciones.

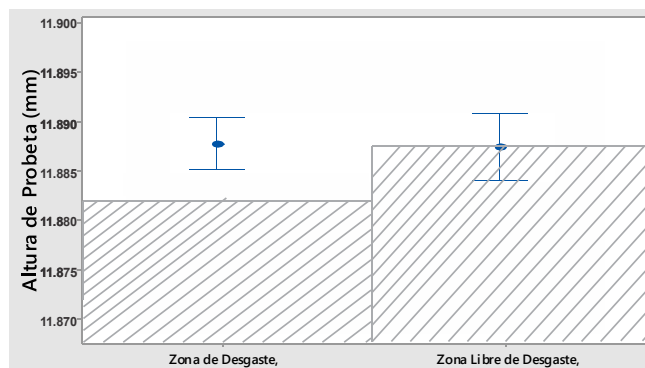


Figura 4.10 Valores de altura de probeta (mm). Probeta 1: 147000 ciclos.

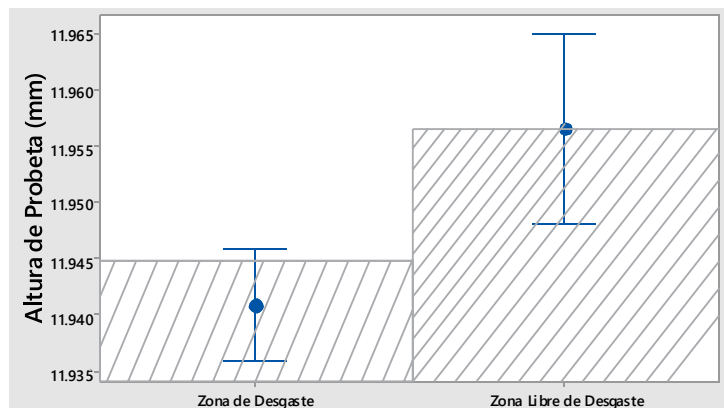


Figura 4.11 Valores de altura de probeta (mm). Probeta 2: 294000 ciclos.

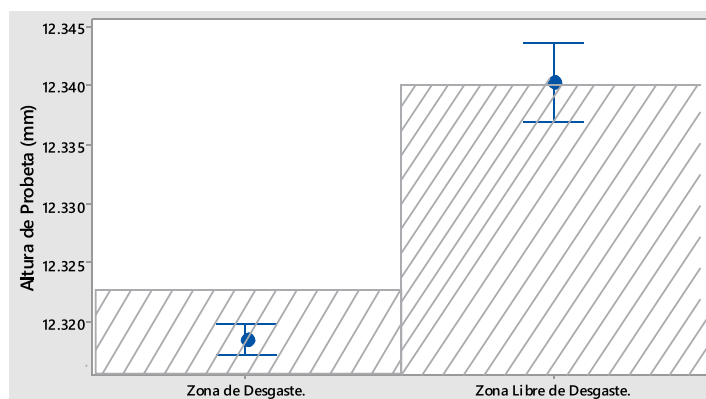


Figura 4.12 Valores de altura de probeta (mm). Probeta 3: 588000 ciclos.

El primer análisis se centra en encontrar si las medias de los valores de altura en las zonas de cada una de las probetas presentan una diferencia significativa entre ellos. Se plantea la hipótesis nula de que la media de la altura en la zona desgastada es igual a la media en la zona libre de desgaste y se verifica con la prueba de Kruskal-Wallis. Esta prueba estadística, se usa en casos, donde se requiere comparar la igualdad de las medias, sin tener en cuenta la normalidad en los datos [47].

La prueba de Kruskal-Wallis se aplica con un nivel de confianza de  $\alpha$  al 95% y 1 grado de libertad. El resultado de esta prueba mostró que para la probeta 1, las dos medias de altura de probeta en las dos zonas no presentan una diferencia significativa ( $P > 0.05$ ) por lo tanto, se infiere que la técnica ultrasónica no detectó el desgaste a este nivel. Para las probetas 2 y 3 la prueba arrojó que si existe una diferencia estadística ( $P < 0.05$ ) entre ambas medias, razón que permite comprobar que el sistema presenta capacidad para detectar cambios en las



profundidades de desgaste hasta un nivel de  $9 \mu m$  según las profundidades máximas observadas en la Figura 3.37.

Un segundo análisis necesario, se enfoca en encontrar la diferencia porcentual entre la profundidad de desgaste tomada de la lectura ultrasónica y la detectada con el perfil de alturas (rugosímetro). Para la probeta 2 y 3 se midió una profundidad de desgaste de 9 y  $17 \mu m$ , respectivamente. Comparando estos valores, con las lecturas ultrasónicas en cada una de las probetas, se obtiene un error relativo de 44.4 % para la probeta 2 y de 29.41% para la probeta 3. Es notable que el porcentaje se reduce a medida que aumenta la profundidad del desgaste, posiblemente, debido a la disminución en la capacidad de los equipos para detectar cambios a medida que la distancia tiende a 0.

Finalmente, se confirma mediante los análisis estadísticos aplicados que, si es posible conocer el desgaste a través del análisis en los cambios geométricos en probetas de UHMWPE, con ciertas limitaciones en la resolución.

## Conclusiones

El objetivo planteado para este trabajo de tesis fue la inspección ultrasónica para generar una metodología que permita identificar el desgaste en probetas de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) usado en prótesis articulares. A continuación, se presentan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados conseguidos:

Para el desarrollo de este trabajo de tesis, se fabricaron probetas cilíndricas planas de material UHMWPE con diferentes espesores. Adicionalmente, a varias probetas se les maquinaron escalones de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 mm. Inicialmente, se verificó la capacidad del ultrasonido de detectar variaciones en el espesor de la probeta y determinar su máxima resolución. De los resultados obtenidos durante el escaneo de los escalones se determinó que, utilizando transductores de 10 MHz, la máxima resolución del sistema de inspección ultrasónico de inmersión es de 0.2 mm.

Una vez determinada la máxima resolución de la plataforma experimental, se diseñó y fabricó un sistema de desgaste (similar a la técnica Pin on Disk) para generar artificialmente una degradación en el material. Cabe destacar que, para el desarrollo del dispositivo basado en la técnica Pin on Disk, se aplicaron diferentes conceptos estudiados en cursos de la Maestría en Ingeniería Mecánica específicamente en el campo del diseño mecánico. Este tipo de desarrollos, apoyan la investigación en la Universidad de Guanajuato, promoviendo el uso de tecnologías propias en la parte experimental de las tesis. El dispositivo se encuentra en proceso de protección de derechos en camino a una solicitud de patente.

Con el dispositivo de desgaste fabricado, se determinaron los tiempos, revoluciones y ciclos de carga con los que se generarían los desgastes deseados. Posteriormente, se midió a través del uso de perfiles de rugosidad la profundidad del desgaste en cada una de las probetas resultando valores de 5, 9 y 17  $\mu\text{m}$ . Con base en estos resultados, no se logró alcanzar la máxima resolución de la plataforma experimental, por lo que se decidió propagar el ultrasonido en condición de contacto. De esta inspección, fue posible detectar los cambios de 9 y 17  $\mu\text{m}$  con un error relativo de 44.4 y 29.41% respectivamente. A partir de estos resultados se establece que para los niveles de desgaste de 9 y 17  $\mu\text{m}$  si es posible detectar



los cambios implementando el sistema de inspección con ultrasonido. Sin embargo, se requieren transductores de mayor frecuencia ( $\gg 10$  MHz), para tener mayor precisión en el diagnóstico del desgaste y detectar variaciones menores a los  $9 \mu\text{m}$ .

A partir de los resultados de inspección ultrasónica obtenidos, se estableció una metodología experimental orientada en el diagnóstico no invasivo para determinar el nivel de desgaste en especímenes planos de UHMWPE de grado comercial. Con factibilidad de ser aplicada en material biocompatible, ya que se midieron las propiedades de propagación tanto del material comercial, como del material de grado quirúrgico GUR1050. Con base en este análisis, se estableció una diferencia relativa de 0.1% entre las características de propagación de los dos materiales. Este porcentaje, permite suponer un comportamiento similar entre ambos materiales cuando se propagan ondas ultrasónicas a través de ellos.

Finalmente, la metodología aplicada y los resultados alcanzados también permiten establecer las bases preliminares para la creación de una plataforma de diagnóstico *in vivo* del desgaste en componentes de UHMWPE de prótesis articulares.

## Trabajos Futuros

En el desarrollo de esta investigación se implementó una metodología para la evaluación del desgaste en probetas planas de UHMWPE. Sin embargo, es necesario incluir algunas condiciones reales de la zona articular donde se encuentran los componentes de este tipo de material. Con las diferentes condiciones aplicadas de forma experimental se lograría aplicar este tipo de inspección a un individuo para diagnosticar su implante articular.

Una de las primeras condiciones necesarias para continuar desarrollando este tipo de investigación, es la incorporación de geometrías equivalentes al implante protésico para los especímenes de UHMWPE. En este caso, se usaron probetas planas para establecer las bases preliminares de la inspección ultrasónica sobre este polietileno, sin tener en cuenta las superficies curvas donde descansa el cóndilo femoral. Con diferentes configuraciones de transductores ultrasónicos se podría evaluar este tipo de superficies.

Por otra parte, la solución de Hank's empleada como entorno local del UHMWPE y acoplante de las ondas ultrasónicas, se puede reemplazar por tejido cadavérico y fluidos corporales humanos. Estos cambios, reproducirían de una mejor forma las condiciones en las que se mantienen los componentes protésicos de este material en una persona.

Finalmente, con las condiciones reales aplicadas, se podría generar una plataforma de diagnóstico no invasivo basada en ultrasonido, dirigida a pacientes con implantes articulares. De esta forma, se determinaría el estado de los componentes de UHMWPE para detectar su grado de desgaste. Además, una implementación de este tipo limitaría el número de cirugías de revisión, la mayoría de las veces innecesaria por desconocer el estado de la prótesis.

---

## **Apéndices**

## Apéndice A. Código de Programación MATLAB®

El tratamiento de las señales generadas en la inspección ultrasónica se desarrolló mediante lenguaje programación del software MATLAB®. A continuación, se presenta el código implementado para detectar el tiempo de vuelo de una onda ultrasónica en el material en modo inmersión.

```
%Cálculo de tiempos de viaje de onda en material

for ind=1:5                %Contador para diferentes lecturas

    %Agrega la carpeta que contiene las señales
    addpath(['H:\TESIS\SignalsW_02052018\PROBETA_02\P' num2str(ind)])

    for ii=1:1

        for jj=1:28

            ind, ii, jj]    % Indicador de progreso de programa

            %Importar cada una de las señales
            U=importdata(['Sig.lvm' num2str(ii) '_' num2str(jj) '.lvm']);

            X=U(:,1);        %Guarda el vector de tiempo
            Y=U(:,2);        %Guarda el vector de amplitud

            X1=80;           %Posición del primer cursor (Primer pico
            máximo)
            X2=120;         %Posición del segundo cursor (Primer pico
            máximo)

            %Detección del tiempo para primer pico máximo en amplitud
            for i=1:(X2-X1)
                V1(i)=U(X1+i,2); %Extrae los valores del rango entre cursores
            end

            [a b]=find(V1==max(max((V1)))); % Localiza la posición del valor
            máximo

            X3=370;         %Posición del primer cursor (Segundo pico
            máximo)
            X4=430;         %Posición del segundo cursor (Segundo pico
            máximo)

            %Detección del tiempo para segundo pico máximo en amplitud
            for i=1:(X4-X3)
                V2(i)=U(X3+i,2); %Extrae los valores del rango entre
                cursores
            end

            [c d]=find(V2==max(max((V2)))); %Localiza la posición del valor
            máximo
```

```

    U1=X1+b(1);      % Posición del tiempo para primer pico máximo
    U2=X3+d(1);      % Posición del tiempo para segundo pico máximo

    t(ii,jj)=U(U2,1)-U(U1,1); % Calcula el tiempo entre picos.

    end

end
h(:,ind)=t;          %Se almacenan los tiempos de viaje de onda
en la matriz h
end

```

## Referencias

- [1] American Academy of Orthopaedic Surgeons, “Total Knee Replacement, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://orthoinfo.aaos.org/en/treatment/total-knee-replacement/>. [Consultado: 10-mar-2018].
- [2] World Health Organization, “Chronic rheumatic conditions”, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.who.int/chp/topics/rheumatic/en/>. [Consultado: 20-feb-2018].
- [3] E. Rateike, “Evaluación del desgaste en insertos protésicos de articulación de rodilla”, Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Gto, 2013.
- [4] Global Data, “Mexico Orthopedic Devices Market Outlook to 2016”, Mexico, 2010.
- [5] M. Slouf, “Monitoring and minimization of UHMWPE wear in total joint replacements”, Doctoral dissertation, Academy of Sciences of the Czech Republic, 2012.
- [6] A. M. Kandahari, X. Yang, K. A. Laroche, A. S. Dighe, D. Pan, y Q. Cui, “A review of UHMWPE wear-induced osteolysis: The role for early detection of the immune response”, Bone Research, vol. 4, pp. 16014, 2016.
- [7] Micro Photonics INC, “Micro Photonics”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.microphotonics.com>. [Consultado: 30-mar-2018].
- [8] S. D. Parikh, “Computerized Ultrasonic Raytracing Model for C-scans of Solid Steel Bridge Pins”, Doctoral dissertation, Virginia Tech, 1998.
- [9] S. M. Kurtz, Uhmwpe Biomaterials Handbook, Burlington (MA), 2009.
- [10] S. G. Ghalme, A. Mankar, y Y. Bhalero, “Biomaterials in Hip Joint Replacement”, Int. J. Mater. Sci. Eng., vol. 4, pp. 113-125, 2016.

- [11] J. Harris y R. Cisloiu, “A study of the mechanical properties of Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)”, Conference Proceedings, Department of Mechanical Engineering, University of Pittsburgh, 2003.
- [12] S. Castiella-Muruzábal, M. A. López-Vázquez, J. No-Sánchez, I. García-Fraga, J. Suárez-Guijarro, y T. Bañales-Mendoza, “Artroplastia de rodilla”, *Rehabilitacion*. vol. 41. No. 6, pp. 290-308, 2007.
- [13] American Academy of Orthopaedic Surgeons, “Total Knee Replacement”, orthoinfo, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://orthoinfo.aaos.org>. [Consultado: 20-feb-2018].
- [14] M. Simoncini, “Design and integration of an instrumented knee prosthesis” Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2014.
- [15] Lund University, “Annual Report 2017- Knee arthroplasty register”, Elvins Grafiska AB, Helsingborg, 2017.
- [16] OCDE, “Obesidad y la Economías de la Prevención”. [En línea]. Disponible en: <https://www.oecd.org>. [Consultado: 22-feb-2018].
- [17] D. H. Williams y D. S. Garbuz, “Total knee arthroplasty: Techniques and results”, *BC Med. J.*, vol. 52, No. 9, pp. 447-454, 2010.
- [18] L. Puppulin et al., “Validation of a protocol based on Raman and infrared spectroscopies to nondestructively estimate the oxidative degradation of UHMWPE used in total joint arthroplasty”, *Acta Biomaterials*, vol. 38, pp. 168-178, 2016.
- [19] W.-G. Yi, M.-R. Lee, J.-H. Lee, y S.-H. Lee, “A study on the ultrasonic thickness measurement of wall thinned pipe in nuclear power plants”, en *12th Asia-Pacific Conference on NDT*, pp. 4–10, 2006.
- [20] NASA, “Ultrasonic testing of aerospace materials”, 2007.
- [21] M. Molero, S. Aparicio, G. Al-Assadi, M. J. Casati, M. G. Hernández, y J. J. Anaya,

- “Evaluation of freeze-thaw damage in concrete by ultrasonic imaging”, *NDT E Int.*, vol. 52, pp. 86-94, 2012.
- [22] C. Deane, B. Brkljačić, y S. Castellani, “Ultrasound in peripheral arterial disease”, en *EFSUMB Course Book on Ultrasound*, Latimer Trend & Company Ltd, 2012.
- [23] Institutos Nacionales de Salud, “Ultrasonido”, Instituto Nacional de Bioingeniería e Imágenes Biomédicas, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.nibib.nih.gov/>. [Consultado: 02-dic-2017].
- [24] Instituto nacional de bioingeniería e imágenes médicas, “Ultrasonido”, NIBIB, 2013.
- [25] N. J. D. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. Montreal: CRC press, 2002.
- [26] T. G. Leighton, “What is ultrasound?”, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. vol. 93, no. 1-3, pp. 3-83, 2007.
- [27] K. Hashimoto, “Bulk Acoustic and Surface Acoustic Waves”, en *Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications: Modelling and Simulation*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000, pp. 1–23.
- [28] J. L. Rose, *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, 2014.
- [29] M. F Markham, “Measurement of elastic constants by the ultrasonic pulse method”, *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 8, pp. 56, 2002.
- [30] A. P. Mouritz, C. Townsend, y M. Z. Shah Khan, “Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics”, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 60. no. 1, pp. 23-32, 2000.
- [31] E. G. Ruedlinger Standen, “Ultrasonografía Médica”, Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2002.
- [32] F. Lakestani, J. F. O. Coste, y R. Denis, “Application of ultrasonic Rayleigh waves to thickness measurement of metallic coatings”, *NDT&E Int.*, vol. 28, no. 3, pp. 171-



178, 1995.

- [33] M. B. Gitis y V. A. Chuprin, “Application of surface and normal ultrasonic waves for measuring the parameters of technical fluids: I. Shear viscosity measurements”, *Tech. Phys.*, vol. 57, núm. 1063–7842, pp. 671–676, 2012.
- [34] L. Jia, L. Dong, C. Ni, Z. Shen, y H. Zhang, “Application of ultrasonic surface waves in the detection of microcracks using the scanning heating laser source technique”, *Chinese Opt. Lett.*, vol. 10, núm. 11, 2012.
- [35] T. Kundu, *Ultrasonic nondestructive evaluation: engineering and biological material characterization*. CRC press, 2003.
- [36] P. K. Dubey, S. Rajagopalan, V. M. Pendsey, y S. J. Sharma, “High resolution ultrasonic attenuation measurement in pulse-echo setu”, *MAPAN-Journal Metrol. Soc. India*, 2008.
- [37] Olympus, “Mapeo C-scan”, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumentation/cscan/>. [Consultado: 05-abr-2018].
- [38] L. A. Perez Nieto, “Puesta en marcha de un sistema experimental para la caracterización de materiales usando pruebas ultrasónicas de inmersión”, *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 3, núm. 2395–9797, pp. 2433–2437, 2017.
- [39] V. M. Ledesma Rodriguez, “Programación de una tarea de inspección con ondas ultrasónicas usando el robot manipulador NACHI MZ04”, *Jóvenes en la Ciencia.*, vol. 3, núm. 2395–9797, pp. 2670–2674, 2017.
- [40] A. Muñoz Vega, “Diseño y fabricación de un herramental de sujeción para el robot NACHI MZ04”, *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 3, núm. 2395–9797, pp. 2020–2024, 2017.
- [41] Olympus, “C-Scan”, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumentation/cscan/>. [Consultado: 18-abr-2018].
- [42] NACHI-FUJIKOSHI CO, *Standard specifications: MZ04-01/MZ04E-01-CFD*. 2017.

- [43] N.-F. CO, "Simulation tool for FD/CFD controller FD on DESK Light/Regular/Pro OPERATING MANUAL", 2017.
- [44] Olympus Corporation, "NDT Instruments", 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.olympus-ims.com>. [Consultado: 18-ago-2018].
- [45] NACHI-FUJIKOSHI CORP, "Compact and super fast robot MZ04/MZ04E", 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/eng/rob/hand/mz04a.htm>.
- [46] Keysight, "DSO1000A/B - Series Portable Oscilloscopes", 2018. [En línea]. Disponible en: [www.keysight.com](http://www.keysight.com). [Consultado: 17-ago-2018].
- [47] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments. 8th ed.. New York: John Wiley & Sons. 2012.
- [48] American Society for Testing and Materials, "ASTM G99-05 - Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus", ASTM Stand., 2011.
- [49] V. Saikko, "Effect of contact area on the wear and friction of UHMWPE in circular translation pin-on-disk tests", J. Tribol., vol. 139, pp. 061606 1- 061606 5, 2017.
- [50] L. Yang y E. Zhang, "Biocorrosion behavior of magnesium alloy in different simulated fluids for biomedical application", Mater. Sci. Eng. C, vol. 29, no. 5, pp. 1691-1696, 2009.
- [51] A. Muñoz V., L. A. Perez N., y V. M. Ledesma R., "Verano de Investigacion 2017: Evaluación no Destructiva END", Universidad de Guanajuato, 2017.
- [52] M. M. Sava, B. Munteanu, E. Renault, Y. Berthier, y A. M. Trunfio-Sfarghiu, "Tribological Analysis of UHMWPE Tibial Implants in Unicompartmental Knee Replacements: From Retrieved to In Vitro Studies", Biotribology, vol. 13, pp. 1-15, 2018.
- [53] Chemical Oil, "Líquido para freno hidráulico", Líquido para freno hidráulico, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://www.chemicaloil.com.mx>. [Consultado: 10-jun-

2018].

- [54] Castrol Philippines, “Brake Fluid DOT 3- Increased safety margin”, 2015.
- [55] ISO, ISO 14243-1:2009 Implants for surgery -Wear of total knee-joint prostheses. 2009.
- [56] M. A. Corporation, “SURFTEST SJ-310 Series”, Aurora, IL, 2014.