



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño, manufactura y la
caracterización de un hidrófono con la
técnica fotoacústica para medir
concentraciones de NaCl en agua**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Luis Pablo Rangel Mendieta

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Rosalba Castañeda Guzmán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Resumen:

En el trabajo se presenta la justificación del diseño, fabricación y caracterización de un hidrófono con la finalidad de que este pueda ser empleado en experimentación con el método de fotoacústica en un laboratorio.

En la actualidad, el cuidado del medio ambiente se ha convertido en prioridad para algunas empresas las cuales buscan reducir su impacto al medio ambiente, por lo que para esta propuesta de hidrófono se utiliza una cerámica piezoeléctrica libre de plomo, pensando en cuidar tanto del medio ambiente como la salud de las personas.

Primero se presenta la metodología de diseño, la cual se orientó al usuario debido a que se entrevistó al personal de laboratorio que estaría utilizando el hidrófono, también se empleó el método de benchmarking para obtener información acerca de los materiales que se emplean en la industria actualmente para fabricar hidrófonos comerciales.

Una vez que se realiza el diseño, se presenta la fabricación del concepto en la cual se expone como se fabricaron algunas de las piezas y como se consiguieron algunas otras que son comerciales.

Posteriormente se muestran los resultados de la caracterización de la cerámica piezoeléctrica con el método de fotoacústica y su arreglo experimental. De igual forma, se presenta la caracterización del hidrófono con el método fotoacústica, esto para verificar, al comparar ambos resultados si los materiales utilizados, así como el diseño del hidrófono brindan un buen acoplamiento acústico.

Finalmente, se emplea el hidrófono en un caso práctico, que consiste en medir diferentes concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) disuelto en agua tridestilada para analizar el comportamiento de las señales fotoacústicas a medida que se incrementa la concentración de cloruro de sodio, esto se realizó desde 0 a 70 g/L y con un incremento de 10 g/L en cada medición.

Contenido

Agradecimientos.....	4
Objetivos	5
Objetivo general	5
Introducción.....	6
Hidrófono	6
Conceptos utilizados de metodología de diseño y desarrollo de productos.....	8
Cerámica piezoeléctrica.....	14
Fotoacústica.....	16
Transformada de Fourier.....	18
Correlación cruzada de señales.....	21
Metodología de diseño	21
Identificación de la necesidad	21
Objetivo del proyecto de diseño.....	23
Benchmarking	23
Definición de requerimientos.....	30
Definición de especificaciones	30
Generación de conceptos	31
Concepto 1	31
Concepto 2	32
Selección del concepto	32
Concepto.....	34
Fabricación del concepto	35
Metodología de caracterización del hidrófono con fotoacústica	38
Equipo y material utilizado	38
Arreglos de experimentación	40
Resultados y análisis	44
Resultados y análisis cerámica piezoeléctrica.....	44
Resultados y análisis hidrófono	45
Aplicación del hidrófono: Analizar la respuesta fotoacústica de diferentes concentraciones de NaCl en agua destilada	48
Equipo y material utilizado	48
Preparación de muestras	50

Arreglo de experimentación	51
Experimentación	53
Resultados y análisis	54
Conclusiones.....	58
Referencias	60
Anexos	61
Planos de piezas mecánicas del hidrófono	61
Planos de piezas mecánicas de la celda de acrílico empleada en el arreglo experimental	71

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por todo el tiempo que estuve en sus instalaciones, porque en ellas forjé mis metas e hice grandes amistades.

A mis padres María Esther Mendieta Lora y Enrique Rangel Martínez que me han brindado apoyo incondicional a la hora de plantear y ejecutar mis metas, porque las han hecho suyas y han sido mis más grandes pilares.

A mis hermanas Itzel Rangel Mendieta y Anette Rangel Mendieta que han sido pilares fundamentales en este proceso, agradezco su cariño, apoyo y palabras en momentos complicados.

A mi novia Aline Esmeralda Trejo Trejo quien me apoyo incondicional con mis metas y me da mucho cariño.

Al Ingeniero José Ángel Terán Hernández por apoyarme con este proyecto y su amistad.

A toda mi familia y amigos que me brindaron apoyo y amistad.

Al Maestro en Ciencias Arturo Ronquillo Arvizu por su amistad y todo el apoyo al realizar esta meta.

A la Doctora Rosalba Castañeda Guzmán quien me apoyo en todo momento con gran humanismo.

Al Doctor Santiago Jesús Pérez Ruiz por proporcionarme su tiempo y apoyo al ser mi sinodal.

Al Doctor Vicente Borja Ramírez por darme de su tiempo y apoyo al ser mi sinodal.

Al Maestro en Ingeniería Mariano García del Gallego, por brindarme su tiempo y apoyo al ser mi sinodal.

A todas y todos del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, especialmente a los y las integrantes del Laboratorio de Fotofísica y Películas Delgadas, por su apoyo y calidez humana para conmigo.

A los proyectos PAPIIT IN104121 por el apoyo al realizar este proyecto.

Al proyecto de CONAHCyT A1-S-22695 por el apoyo proporcionado al proyecto.

Objetivos

Objetivo general

El presente trabajo tiene como principal objetivo realizar los procesos de diseño, manufactura y caracterización con el método de fotoacústica de un hidrófono que se utilizará para medir concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) en agua destilada.

Introducción

Hidrófono

La palabra hidrófono proviene de dos términos o palabras, “hydro” que significa agua y “phone” que significa sonido [1]. El término hidrófono se emplea para nombrar a un transductor de sonido a voltaje que se encuentra sumergido en agua o en cualquier otro líquido; es decir, al estar sumergido en el líquido, es capaz de detectar las variaciones de presión de señales y ruido acústicas y produce un voltaje de salida proporcional a dicha presión; en algunos casos especiales los hidrófonos pueden funcionar como emisor [2].

Los principios físicos mediante los cuales se explica el funcionamiento de los hidrófonos se remontan a más de 200 años atrás desde los estudios de la electricidad y magnetismo, sin embargo, los transductores electroacústicos comenzaron a desarrollarse a inicios del siglo veinte [3]. Hay registros que mencionan que las primeras aplicaciones prácticas de los transductores electroacústicos fueron en submarinos de Estados Unidos en la primera guerra mundial para detectar enemigos u obstáculos bajo el agua. También se considera que una de las razones por las que surgió la necesidad de emplearlos fue por el accidente que sufrió un trasatlántico británico llamado RMS Titanic, el cual se estrelló con un iceberg gigante en 1912.

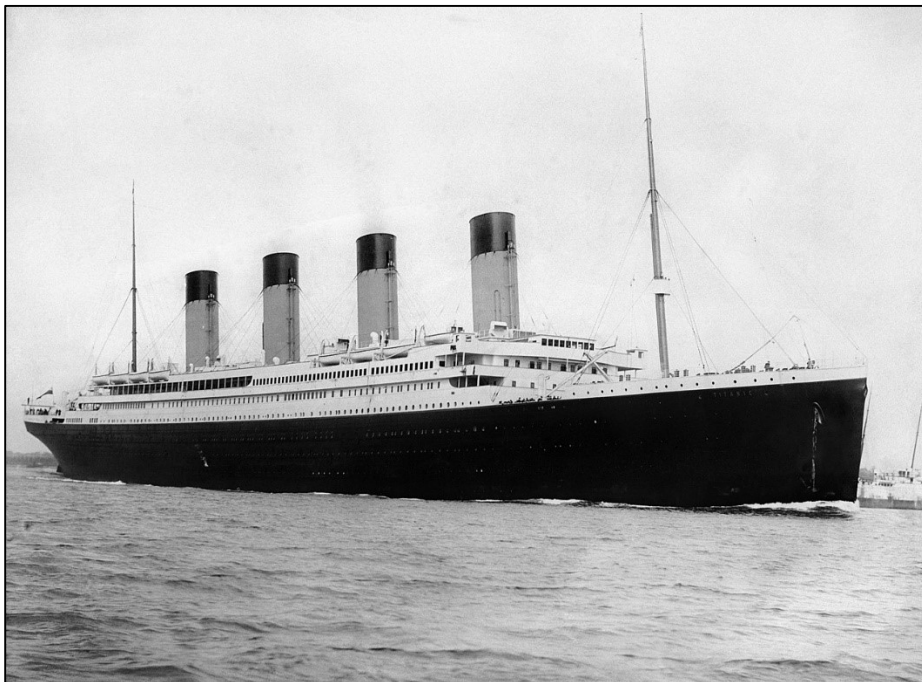


Figura 1. RMS Titanic

Aunque la primera aplicación de los hidrófonos se remonta a las primeras décadas del siglo veinte, estos comenzaron a tener mayor campo de investigación y

aplicación hasta después de la segunda guerra mundial, gracias a que se descubrieron nuevos materiales, principalmente cerámicos que ayudaron a la construcción de estos. Hasta llegar a finales del siglo veinte en que se descubrió un compuesto inorgánico (cerámica) denominado Titanato-zirconato de plomo o PZT que es hasta hoy en día el piezoeléctrico más utilizado en muchos tipos de sensores.

Es bien sabido que las principales aplicaciones de los hidrófonos se encuentran en el campo naval desde sus inicios, hoy en día, sus aplicaciones se han extendido a otros campos como el de la alimentación en el análisis de calidad en bebidas, la biomédica en imagenología, el cuidado del medio ambiente en estudios para encontrar contaminantes y variaciones biológicas e.n agua, en la industria petrolera, entre otras cosas.

Existen diferentes tipos de hidrófonos, aun así, estos se pueden clasificar en dos grandes grupos; los hidrófonos piezoeléctricos y los hidrófonos en fibra óptica [1]. Por razones prácticas solo hablaremos del primer grupo, es decir, los hidrófonos piezoeléctricos. Este tipo de hidrófonos se construyen con placas e incluso películas delgadas de materiales piezoeléctricos, que generalmente son de cerámicos o polímeros. Los materiales cerámicos se inclinan a tener modos de resonancia bien definidos, que son característicos de su geometría, espesor, expansión, entre otras cosas. Añadiendo a lo anterior, estos sistemas tienen alta sensibilidad cuando operan en resonancia, aunque su respuesta es más pequeña cuando operan fuera de esta debido a su factor de calidad mecánico, el cual es un parámetro que es proporcional a la eficiencia de vibración del dispositivo bajo prueba, e inversamente proporcional a su amortiguación o pérdidas internas.

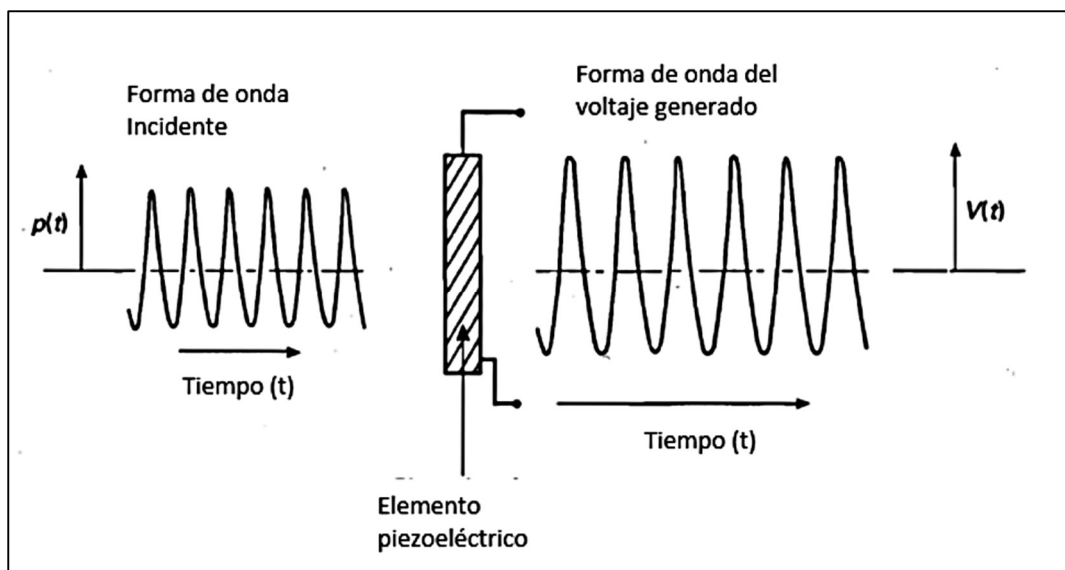


Figura 2. Funcionamiento de cerámica piezoeléctrica

Los hidrófonos piezoeléctricos también se pueden clasificar en tres grupos, los hidrófonos de membrana, los de aguja y finalmente los hidrófonos subacuáticos de baja frecuencia, los cuales en este caso son de nuestro interés. Estos hidrófonos operan por debajo de 500 kHz y pueden ser utilizados tanto en mar abierto como en laboratorios por su protección contra la corrosión y la resistencia a altas presiones.

Conceptos utilizados de metodología de diseño y desarrollo de productos

A continuación, se presentan los conceptos que se utilizaron para ejecutar la metodología de diseño y desarrollo del hidrófono.

Identificación de las necesidades

Primero, las necesidades son consideradas como independientes de cualquier producto particular que pudiéramos desarrollar, no son específicas del concepto que se persigue en última instancia, por lo que es indispensable tener la capacidad de identificar las necesidades de un cliente tomando en cuenta que no se sabe si finalmente resolverá dichas necesidades y en qué forma.

En el libro “Diseño y desarrollo de productos”, Karl T. Ulrich [4] menciona que identificar las necesidades del cliente es un proceso que consiste en cinco actividades principales, las cuales se enlistan y describen a continuación.

1. Recopilar datos sin procesar de los clientes.

Esta actividad se realiza al estar en contacto con los clientes y experimentando el ambiente en que se utiliza el producto y se puede estructurar mediante entrevistas, grupos de enfoque e incluso al observar el producto cuando se está utilizando.

2. Interpretar los datos sin procesar en términos de las necesidades de clientes.

Las necesidades de los clientes se deben expresar como enunciados escritos y son el resultado de hacer una interpretación de la necesidad con ayuda de los datos reunidos de los usuarios sin hacer un procesamiento previo de estos. Una forma de estructurar los enunciados de las necesidades consta de cinco actividades que se muestran a continuación.

- Expresar la necesidad en términos de lo que el producto tiene que hacer, no en términos de cómo puede hacerlo.
- Expresar la necesidad tan específicamente como la información originalmente recopilada.
- Utilizar enunciados en forma afirmativa, no en forma negativa.
- Expresar la necesidad como atributo del producto.
- Evitar las palabras debe y debería.

3. Organizar las necesidades en una jerarquía de necesidades primarias, secundarias y, de ser necesario, terciarias.

Al realizar las actividades 1 y 2, se debe obtener como resultado una lista igual o superior a 50 enunciados de necesidades. La finalidad de la actividad 3 es ordenar los enunciados antes mencionados en una lista de necesidades primarias de las cuales se desprenden necesidades secundarias que las caracterizan. Cuando se trata de un producto complejo, de las necesidades secundarias se pueden desprender necesidades terciarias. Entonces, se determina que las necesidades primarias son las más generales, mientras que las necesidades secundarias y terciarias expresan necesidades con mayor detalle.

Para realizar exitosamente esta actividad se pueden seguir una serie de seis pasos que se enlistan a continuación.

1. Imprima o escriba cada frase en una tarjeta separada o nota autoadhesiva.
2. Elimine frases redundantes; comprimir solo aquellas frases que sean idénticas en su significado.
3. Agrupe las tarjetas de acuerdo con la similitud de las necesidades que expresen.
4. Asigne una etiqueta para cada grupo.
5. Considere formar supergrupos formados de dos a cinco grupos.
6. Revise y edite los enunciados organizados de necesidades.

4. Establecer la importancia relativa de las necesidades.

Esta actividad consiste en establecer la importancia relativa de las necesidades del cliente identificadas en las actividades anteriores. El resultado es una valoración numérica de importancia para un subconjunto de las necesidades. Esta actividad se debe realizar en conjunto con los clientes o usuarios del producto y con la ayuda de encuestas realizadas, por lo que es indispensable que en este punto se tenga una buena comunicación con los clientes y/o usuarios del producto. Al estructurar la encuesta se debe establecer una escala razonable que se aplicara en todas las preguntas y se pueden adicionar características con diferente rubrica en las preguntas. Este proceso se puede realizar en persona, por teléfono, formularios de internet, redes sociales e incluso por correo electrónico. Finalmente, las respuestas de la encuesta se pueden caracterizar en varias formas, por la media, por la desviación estándar, o por el número de respuestas en cada categoría. Y, dichas respuestas se pueden usar después para asignar el valor de importancia a la declaración de necesidad.

5. Reflexionar en los resultados y el proceso.

Esta última actividad propone reflexionar acerca de los resultados obtenidos y el proceso que se realizó para llegar a ellos. El equipo debe cuestionar sus resultados para asegurar que sean consistentes con el conocimiento e intuición que ha desarrollado a través de muchas horas de trabajo e interacción con clientes. Cabe resaltar que, aunque este proceso de identificar necesidades se estructure lo mejor posible, no es una ciencia exacta por lo que no se pueden asegurar resultados exitosos siempre.

La siguiente imagen [4] nos muestra en que posición se encuentra la actividad de identificar las necesidades con respecto a las otras actividades que se realizan en el desarrollo de conceptos.

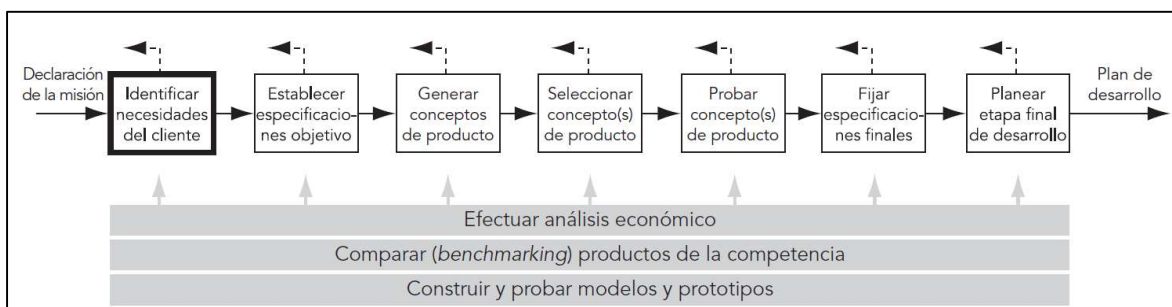


Figura 3. Posición de identificación de necesidades en el proceso de desarrollo de conceptos

Benchmarking

Una herramienta muy importante en el proceso de diseño fue benchmarking o benchmark que se puede considerar como una herramienta que consiste en una metodología que tiene como objetivo principal la evaluación y comparación de sistemas completos o componentes con respecto a características específicas, por ejemplo, rendimiento, fiabilidad o la seguridad [4]. De esta forma se logran mejores condiciones y referencias para tomar decisiones al ejecutar un proyecto, asimismo se brinda una mejor preparación frente a la competencia que, gracias a los avances tecnológicos, es cada día mayor. El benchmarking también ayuda a generar un ambiente cooperativo, esto porque propicia un mejor entendimiento de lo que es la mejora continua [5]. Por lo anterior consideramos que el benchmark puede servir para posicionar un producto o servicio, detectar oportunidades y amenazas, e incluso para generar contenido o productos innovadores.

Al realizar un benchmark, este debe caracterizarse por tres aspectos clave. El primero son las métricas, estas determinan que valores basados en mediciones deben considerarse para producir los resultados del benchmarking. El segundo aspecto son las cargas de trabajo quienes determinan bajo que escenarios o condiciones de uso se deben realizar las mediciones para calificar las métricas. Finalmente, como tercer aspecto principal se tiene la metodología de medición,

quien define el proceso de extremo a extremo para ejecutar el benchmark, recopilar medidas y generar buenos resultados.

Especificaciones del producto

Antes de comenzar a generar conceptos, al momento de diseñar un producto, idealmente, deben establecerse las especificaciones del producto, se considera que este término denote la descripción precisa de lo que el producto tiene que ser. Usualmente, las empresas utilizan "requisitos del producto" o "características ingenieriles" en este sentido. Otras usan "especificaciones" o "especificaciones técnicas" para hacer referencia a variables claves de diseño del producto. Un ejemplo de esto pueden ser el voltaje de operación de un motor eléctrico, la frecuencia de la red eléctrica en la que debe operar el motor e incluso la velocidad de rotación que debe tener el motor. Con lo anterior se establece que una especificación se conforma de una métrica y un valor. Por ejemplo, "Tiempo promedio de llenado" es una métrica, por otro lado "menos de 20 minutos" es el valor de esta métrica [4]. Cabe resaltar que el valor puede tomar distintas formas, un numero particular, un rango o una desigualdad; los valores deben ser marcados con las unidades apropiadas, por ejemplo, segundos, metros, kilogramos. Como resultado de lo anterior, una especificación se conforma de la métrica y el valor.

Especificaciones objetivo

Después de identificar las necesidades del cliente se establece una serie de necesidades objetivo, dichas necesidades se establecen por el grupo de desarrollo y son metas que describen un producto que se piensa que tendrá éxito en el mercado. posteriormente, estas especificaciones serán refinadas con base en las limitaciones del concepto del producto que haya sido seleccionado, por lo anterior es indispensable que las especificaciones objetivo se determinen antes de que los conceptos del producto se hayan generado y se hayan generado los más prometedores. A continuación, se muestran una serie de pasos que pueden seguirse para establecer las especificaciones objetivo.

1. Elaborar la lista de métricas.
2. Recabar informacion de comparaciones con la competencia.
3. Establecer valores meta ideales y marginalmente aceptables.
4. Reflexionar en los resultados y el proceso.

Generación de conceptos

La generación de conceptos es una actividad que requiere creatividad y se realiza una vez que se identifican las necesidades del cliente y se establecen las especificaciones objetivo con ayuda de las herramientas que se deseen implementar.

El concepto de un producto se considera como una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto. Es una descripción breve y

precisa de la forma en que se van a satisfacer las necesidades del cliente. Los conceptos se pueden expresar como bosquejos o como modelos tridimensionales aproximados y se pueden acompañar de breves descripciones conceptuales.

Al realizar la generación de conceptos se debe buscar implementar un método sistemático que ayude a evitar disfunciones en el equipo de desarrollo, muchas veces al no implementar un buen método en esta etapa lleva a no considerar categorías enteras de soluciones y lleva a conceptos que no satisfacen totalmente las necesidades del cliente.

Algunas herramientas que se pueden utilizar para generar un concepto se enlistan a continuación

1. Diagrama funcional
2. Entrevistas a usuarios líderes
3. Consultar a expertos
4. Buscar patentes
5. Buscar literatura publicada
6. Benchmark (comparación) de productos relacionados
7. Tabla de combinación de conceptos
8. Árbol de clasificación

Selección del concepto

La actividad de selección del concepto es un proceso que tiene como objetivo principal evaluar los conceptos generados con respecto a las necesidades del cliente y tomando en cuenta otros criterios que puedan llevar a una selección certera del concepto. Lo anterior se logra comparando los puntos relativamente fuertes y débiles de los conceptos, y seleccionando uno o más de estos para que posteriormente sean sometidos a investigación, pruebas o desarrollo.[4]

Algunos de los métodos de selección del concepto más utilizados se enlistan a continuación.

- Decisión externa: Los conceptos se hacen llegar al comprador, cliente, inversor o a otra entidad externa para su selección.
- Campeón del producto: Un miembro influyente del equipo de desarrollo selecciona el concepto que más le convence desde su percepción.
- Intuición: Se elige el concepto que se percibe mejor, es decir, se selecciona simplemente el que parece mejor, sin entrar en detalles técnicos.
- Votación múltiple: Cada miembro del equipo vota por los mejores conceptos desde su punto de vista y se elige el concepto que genera más votos.
- Encuesta en internet: En internet se pueden encontrar algunas herramientas para realizar encuestas que llegan a un gran número de personas que son incluso de otras partes del mundo y se clasifica cada concepto para encontrar el mejor.

- Pros y contras: Se realiza una lista de puntos fuertes y débiles de cada concepto y se hace la selección con base en la opinión del equipo.
- Prototipo y prueba: Se pueden construir y probar prototipos de cada concepto, haciendo una selección con base en los datos obtenidos en las pruebas; este método puede requerir más tiempo y gastos en el proceso de selección.
- Matrices de decisión: El equipo califica cada concepto contra criterios de selección especificados de antemano, los cuales pueden ser ponderados.

Matriz de selección

La matriz de selección o decisión es una herramienta que se puede utilizar en la selección del concepto como se mencionó anteriormente. Esta se puede realizar de la siguiente manera, primero se establecen los criterios de selección, los cuales se enlistan en la parte izquierda de la matriz. Estos criterios se establecen con base en las necesidades del cliente identificadas e incluso con las necesidades de la empresa o equipo que va a desarrollar el producto, estas pueden ser, bajo costo de manufactura, mínimo riesgo de responsabilidad, entre otras cosas. En la segunda columna de la matriz se establece un peso en porcentaje a cada criterio de selección, esto a consideración del equipo de desarrollo y la suma total debe dar como resultado el 100%. En las columnas siguientes, se colocan los conceptos que pueden ser con su imagen o simplemente su clasificación. Estos a su vez se dividen en dos columnas, una de calificación que puede ser del 0 al 10 y otra de evaluación ponderada que se calcula con el peso y la calificación otorgada. En la parte inferior de la matriz en una fila, se coloca el total de puntos de la evaluación ponderada para determinar que concepto obtuvo mayor puntaje. Finalmente, en una última fila se establece que concepto es el mejor candidato para desarrollar o seguir evaluando, todo esto con base en el puntaje más alto. A continuación, se muestra un ejemplo [4].

		Concepto							
		A (Referencia) Cilindro maestro		DF Tope de palanca		E Anillo amortiguador		G+ Tornillo del selector+	
Criterios de selección	Peso	Califi- cación	Evaluación ponderada	Califi- cación	Evaluación ponderada	Califi- cación	Evaluación ponderada	Califi- cación	Evaluación ponderada
Facilidad de manejo	5%	3	0.15	3	0.15	4	0.2	4	0.2
Facilidad de uso	15%	3	0.45	4	0.6	4	0.6	3	0.45
Facilidad de lectura de ajustes de dosis	10%	2	0.2	3	0.3	5	0.5	5	0.5
Precisión en medición de dosis	25%	3	0.75	3	0.75	2	0.5	3	0.75
Durabilidad	15%	2	0.3	5	0.75	4	0.6	3	0.45
Facilidad de manufactura	20%	3	0.6	3	0.6	2	0.4	2	0.4
Portabilidad	10%	3	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Total puntos			2.75	3.45	3.10		3.05		
Lugar			4	1	2		3		
¿Continuar?			No	Desarrollar		No		No	

Figura 4. Ejemplo de matriz de selección

Cerámica piezoeléctrica

La piezoelectricidad fue descubierta hacia 1880 por los hermanos Jacques y Pierre Curie, quienes notaron que, al presionar diferentes materiales como la turmalina, el cuarzo o la sal de Rochelle se producía una carga eléctrica sobre la superficie de estos. Posteriormente, Wilhelm G. Hankel le dio el nombre de piezoelectricidad y en sus estudios se demostró que esta propiedad se modifica con respecto a la temperatura y a la presión aplicada sobre el material [6].

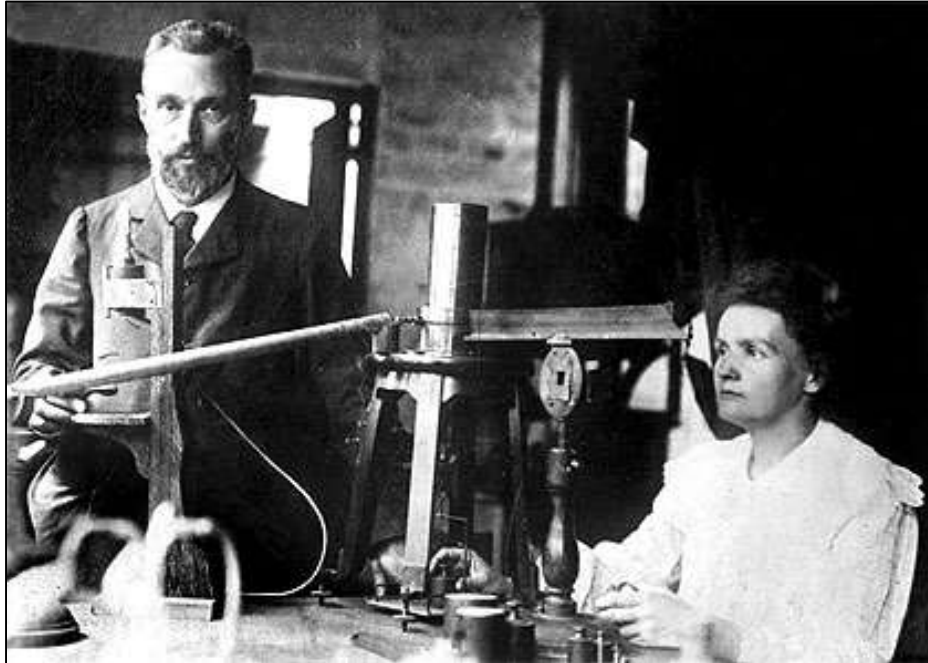


Figura 5. Hermanos Jacques y Pierre Curie

Los materiales cerámicos se han utilizado desde hace miles de años, incluso se tiene registro de su utilización desde los orígenes del hombre pues los utilizaban tanto para la construcción, como para la fabricación de utensilios para poder realizar tareas de tal importancia para la época como la supervivencia. Por ejemplo, la obsidiana que se compone de silicatos se utilizaba ampliamente para fabricar puntas de flecha y cuchillos rudimentarios que se utilizaban para obtener alimentos, vestimenta e incluso para construir refugios. Por otro lado, el hombre comenzó a utilizar arcillas más tarde para fabricar vasijas y tablillas donde culturas como la babilónica y la china, conservaban escritos de gran importancia. Después de siglos transcurridos la cerámica comenzó a utilizarse principalmente en artículos de cocina y en la construcción. Hasta entonces, estos materiales se consideran cerámicas tradicionales. Durante el siglo XX los materiales cerámicos realmente se volvieron de gran importancia con la invención del radio, radar, teléfono televisor, computadora, etc. Lo anterior condujo a desarrollar lo que se conoce hoy en día como cerámicas avanzadas las cuales cumplen con diversas funciones y

aplicaciones, como semiconductores, piezoeléctricos, aislantes, conductores iónicos, sustratos, catalizadores, etc [7].

En nuestro caso estamos interesados en las cerámicas ferroeléctricas quienes tienen excelentes propiedades piezoeléctricas y son utilizadas de forma masiva en sensores, actuadores, transductores, transformadores, dispositivos de sonido, entre otras cosas. El cerámico ferromagnético más utilizado es el denominado PZT, el cual es un óxido complejo a base de plomo, circonio y titanio ($PbZr_xTi_{1-x}O_3$) [8]. En la actualidad su producción es masiva y constituye más del 90% de la producción mundial de piezoeléctricos. Este material contiene aproximadamente 60% de plomo en peso lo cual representa un grave problema ambiental, pues al igual que cualquier producto los componentes tienen una vida útil y muchas veces las empresas no se interesan en el desarrollo sustentable de productos por lo que estos son desechados al medio ambiente en lugar de ser confinados o recuperados para su reutilización, lo que provoca contaminación y daños a la salud. Además, al plomo se le considera como uno de los elementos más tóxicos para la salud humana ya que al ser ingerido se acumula en el cerebro provocando graves daños en el sistema nervioso central, en los riñones y sangre. Algunas de las consecuencias de su ingestión son el desarrollo de cáncer en la sangre e incluso muerte prematura en aquellas personas que tienen contacto directo.

A pesar de lo antes mencionado, la industria electrónica demanda mayor cantidad de piezoeléctricos cada día para construir aparatos electrónicos, lo que ha orillado a algunos países, principalmente los de la unión europea a establecer planes para la sustitución de los PZT por piezoeléctricos libres de plomo.

Uno de los materiales piezoeléctricos libres de plomo más prometedores por sus potenciales aplicaciones es el niobato de potasio-sodio ($K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$ o *KNN*) debido a sus buenas propiedades piezoeléctricas ($\sim 120 \frac{pC}{N}$, $K_p \sim 0.36$), y su elevada temperatura de Curie ($\sim 420^\circ C$) [9].

En el caso de la cerámica piezoeléctrica utilizada en el hidrófono propuesto, se trata de una variante de la estructura KNN, propuesta por Rigoberto López Juárez, Doctor en Ciencia e Ingeniería de Materiales en la UNAM la cual se denomina KNLNS-BCZ (Potasio K, Sodio Na, Litio Li, Niobio Nb, Antimonio Sb, Bario Ba, Calcio Ca y Circonio Zr). La cerámica fue sinterizada por el método tradicional de estado sólido a $1140 [^\circ C]$ durante un tiempo de 4 [horas] [9].

A continuación, se presenta una tabla con las características físicas de la cerámica utilizada.

Número	Características	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Densidad $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$
1	KNLNS Ba Ca Zr Ca 0.06 1140 [°C] 4 [h]	10.71	1.06	4.58

Tabla 1. características de la cerámica piezoeléctrica utilizada

Fotoacústica

La palabra fotoacústica se conforma de dos palabras de origen griego, la primera, <<phōs>> significa luz y la segunda, <<akouō>> que significa oír o escuchar, por lo anterior, la palabra fotoacústica tiene como significado << escuchar la luz >> [10].

Esencialmente, se considera que la fotoacústica pertenece a un conjunto de técnicas experimentales que se identifican como fototérmicas. Dichas técnicas se caracterizan por hacer incidir un haz de luz modulado sobre la muestra a investigar, un porcentaje de la energía suministrada por este haz luminoso es absorbida por la muestra por lo que se provoca un calentamiento en la misma debido a los efectos termoelásticos generados por la absorción del flujo energético incidente [10]. En términos generales, en la técnica fotoacústica el material se dilata en el orden de nanómetros como resultado del calentamiento que provoca la luz incidente. En el momento en que este regresa a su estado anterior al de excitación se emiten ondas sónicas. Con lo anterior se puede considerar que el efecto fotoacústico es en realidad el resultado de un proceso de transformación de energía luminosa a energía térmica y posteriormente a acústica; como se muestra en el siguiente diagrama.

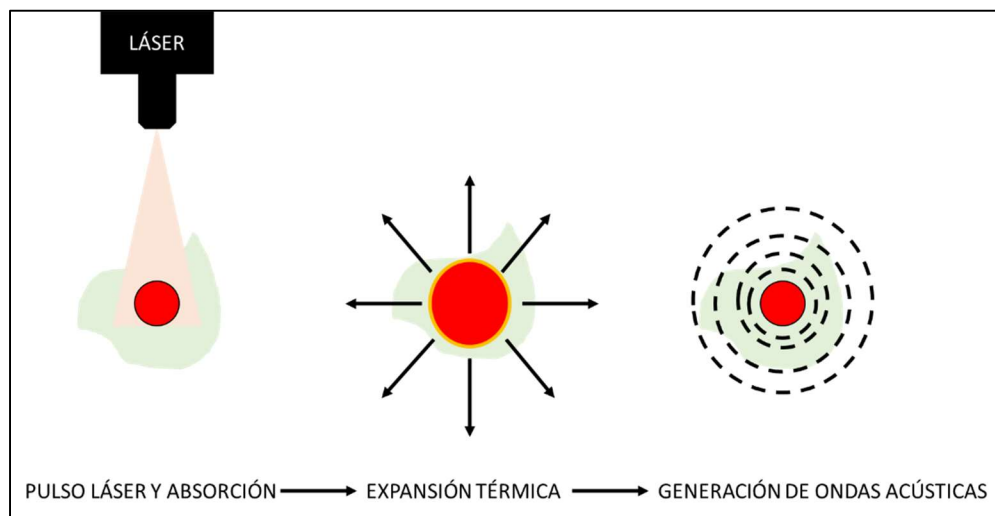


Figura 6. Efecto fotoacústico por láser pulsado

El descubrimiento del efecto fotoacústico, que data de hace más de un siglo, en 1880, se le atribuye a Alexander Graham Bell (1847-1922) un inventor escocés-estadounidense mientras trabajaba junto con Charles Summer Tainter quien era un fabricante de instrumentos ópticos, en un proyecto que el denominó el fotófono, un dispositivo con el cual se transmitía el sonido mediante la utilización de luz solar como portadora de información y que se constituyó como la primera patente de comunicación inalámbrica [10]. Sus descubrimientos se encuentran registrados en un artículo denominado “Upon the production and reproduction of sound by light” que se puede traducir al español como “Sobre la producción y reproducción del sonido por medio luz”.

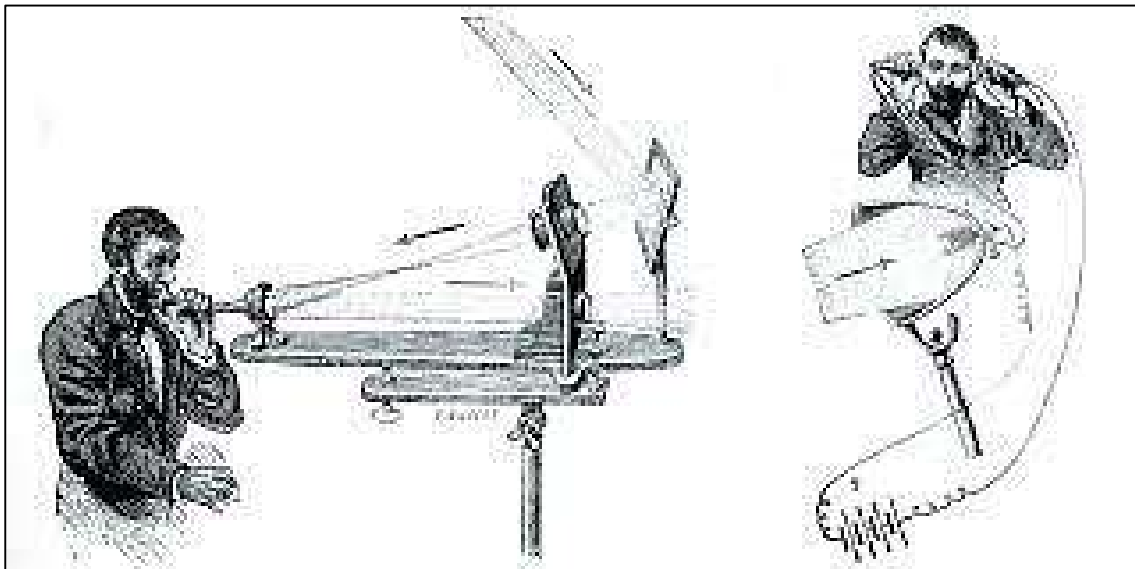


Figura 7. Alexander Graham Bell trabajando en el fotófono

Cuando Bell experimentaba en la fabricación del fotófono, se percató de que el selenio y otros materiales, particularmente sólidos, emiten sonido cuando son iluminados con luz intermitente, esto lo lograba haciendo pasar la luz a través de un disco rotatorio con agujeros. Al mismo tiempo Bell descubrió que la intensidad del sonido emitido depende de la longitud de onda o color de la luz que hacía incidir en los materiales. Con lo anterior llegó a la conclusión de que el efecto se genera por la absorción de radiación óptica fuera de la región visible, del espectro electromagnético.

El efecto fotoacústico perdió interés en los años posteriores a su descubrimiento debido a que en ese momento no se le podía dar alguna aplicación por las limitaciones tecnológicas y de conocimiento. Sin embargo, en el año de 1976, gracias a los avances tecnológicos como el láser, el micrófono y los amplificadores operacionales dos investigadores llamados Allan Rosenzweig y Allen Gersho, pertenecientes a Laboratorios Bell en New Jersey publicaron un artículo que hoy en día se considera como uno de los mejores modelos teóricos que describen el efecto

fotoacústico, lo anterior porque gracias a su modelo se pueden realizar mediciones experimentales [11].

En la actualidad la técnica fotoacústica se emplea en áreas como la medición de trazas de gases, determinación de propiedades de líquidos y sólidos, e incluso en la generación de imágenes de objetos opacos. Algunas de las razones por la que esta técnica ha ido destacando es por su simpleza, su bajo costo relativo y la grande flexibilidad para implementarla a numerosos procesos de medida.

Los arreglos experimentales de la técnica fotoacústica están formados de tres componentes principales, el primero se trata de una fuente de excitación, que generalmente es un láser pulsado. El segundo se trata de dos elementos; el recipiente o celda donde se pondrá la muestra que se pretende estudiar, donde se encuentra unido el sensor que medirá la señal. Finalmente, el tercer componente es la actividad de procesar la señal captada con el fin de obtener información e interpretar los resultados de la técnica [12].

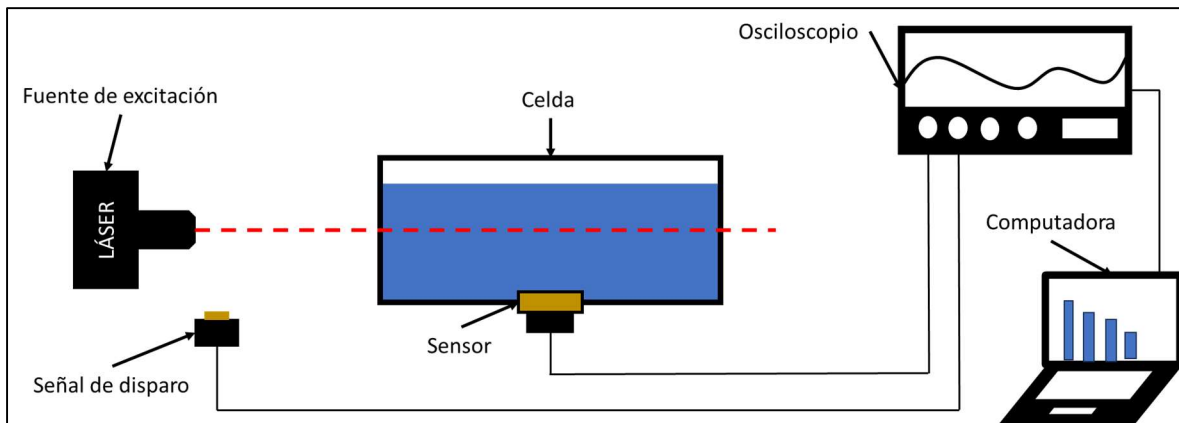


Figura 8. Arreglo experimental para método fotoacústico

Transformada de Fourier

En el procesamiento de señales se considera a la Transformada de Fourier como una herramienta matemática que nos ayuda a convertir una señal que se encuentra muestreada en el dominio del tiempo o espacio, en una señal en el dominio de la frecuencia temporal o espacial [13]. Esta conversión del dominio del tiempo al de la frecuencia, nos ayuda a conocer características importantes de una señal por ejemplo sus componentes de frecuencia.

Esencialmente, la Transformada de Fourier nos permite conocer en una señal que está compuesta de diferentes señales, las frecuencias de estas señales que la conforman. Por ejemplo, en la siguiente imagen se puede observar una señal obtenida en color amarillo; en esta no se puede apreciar a simple vista cuales son

las frecuencias de las señales que la componen. Sin embargo, Transformada de Fourier es una herramienta que nos ayuda a conocer cuáles son las señales componentes de dicha señal; como se muestra en la imagen, dentro del marco blanco se pueden observar las señales componentes de la señal en cuestión.

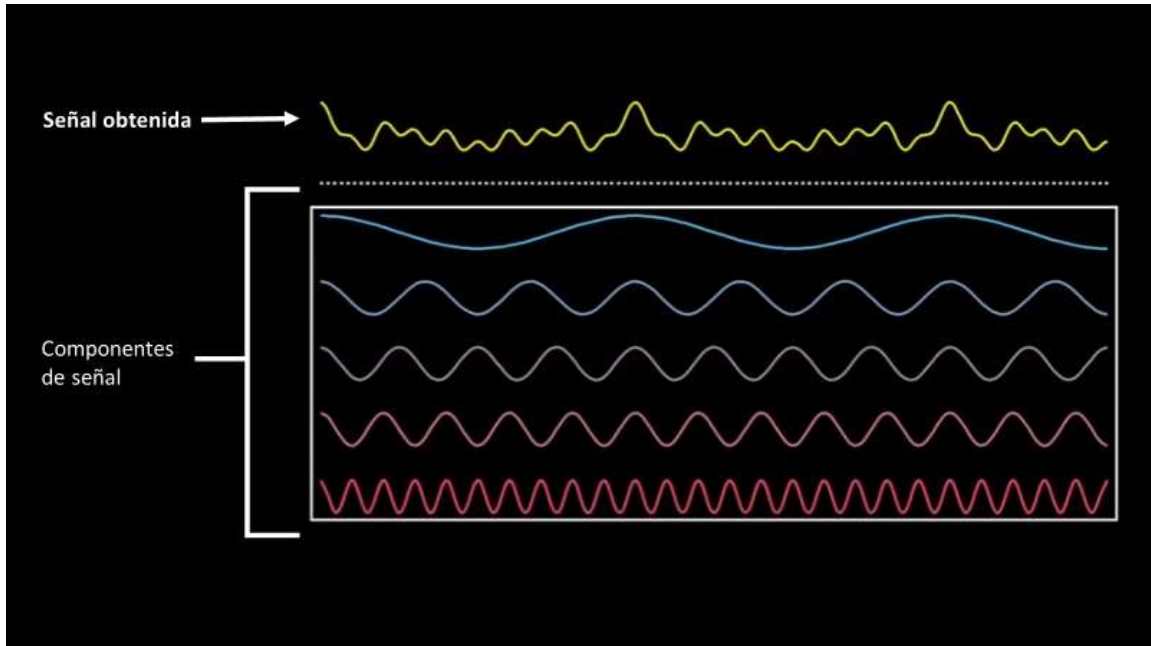


Figura 9. Visualización de la Transformada de Fourier

Por cuestiones prácticas se utilizó en MATLAB, la herramienta de Transformada Rápida de Fourier (sus siglas en inglés son FFT, Fast Fourier Transform), esta es un algoritmo eficiente que nos ayuda a calcular la Transformada de Fourier Discreta y su inversa [14]. Esta herramienta es comúnmente utilizada en el procesamiento digital de señales, así como el filtrado de estas.

Se puede definir a la Transformada de Fourier para un vector x con puntos n muestreados uniformemente por

$$y_{k+1} = \sum_{j=1}^{n-1} \omega^{jk} x_{j+1}$$

$\omega = e^{-2\frac{\pi i}{n}}$ es una de las raíces complejas de unidad n donde i es la unidad imaginaria. Para x e y , los índices j y k oscilan entre 0 y $n - 1$ [14].

A continuación, se muestra una imagen obtenida de MATLAB donde se muestran las gráficas obtenidas de la función FFT.

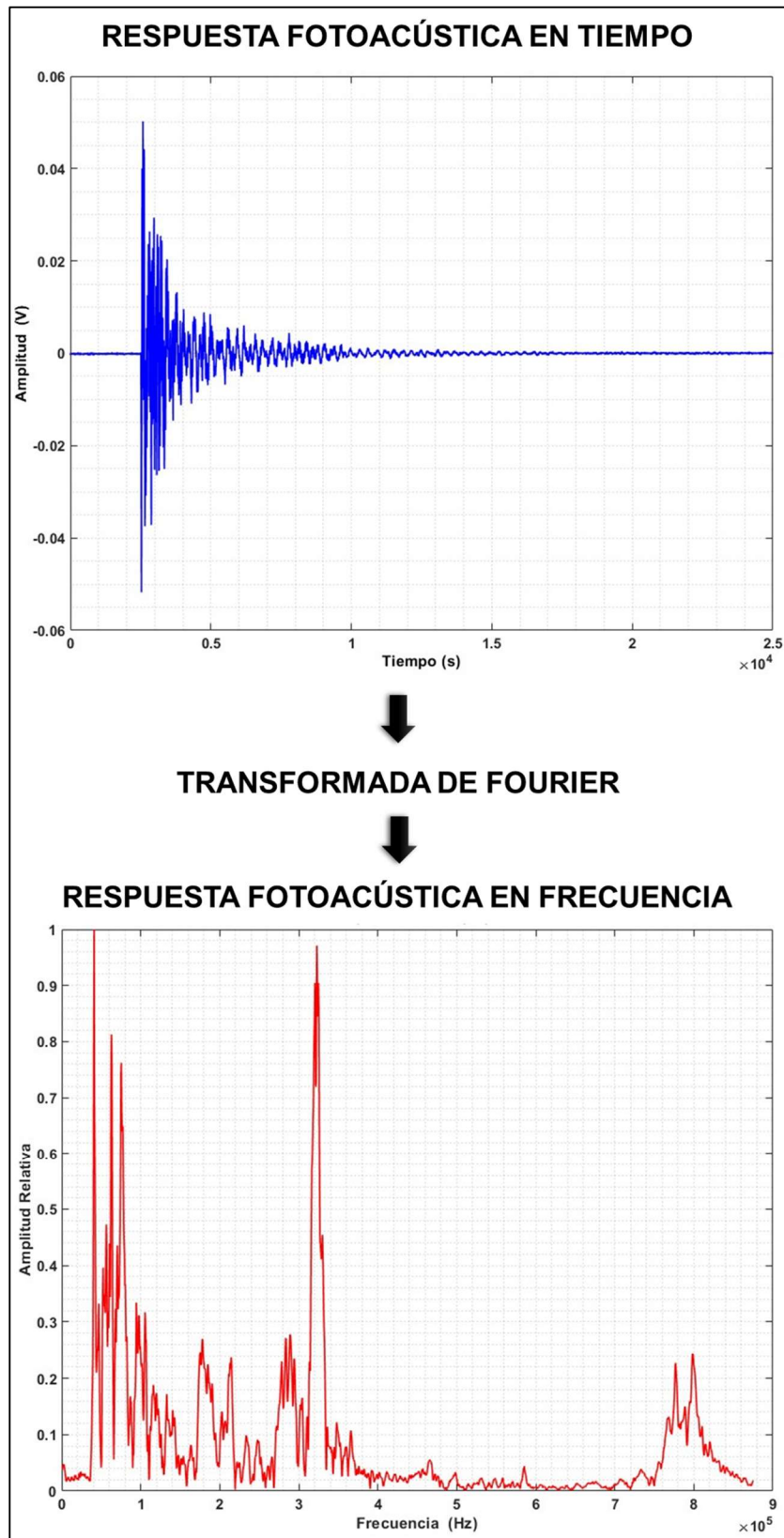


Figura 10. Señal obtenida en el dominio del tiempo y Transformada de Fourier

Correlación cruzada de señales

En procesamiento de señales, la correlación cruzada se considera una medida de similitud entre dos señales que se encuentran en el dominio del tiempo y, dicha medida se encuentra en función del desplazamiento de una con respecto a la otra [15]. A continuación, se muestra la función que define a la correlación cruzada.

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) x_2^*(t - \tau) dt$$

Donde R es la función de correlación cruzada y se encuentra en función del retraso relativo de tiempo τ [16].

Metodología de diseño

Durante la implementación de la metodología de diseño se tuvieron algunas limitantes en cuanto a los pasos a seguir, debido a que se tiene información reducida en cuanto a usuarios de hidrófonos comerciales, por otro lado, el proceso de diseño se enfocó en las necesidades que se tienen para la implementación de un hidrófono en experimentos de laboratorio. También cabe resaltar que la mayoría de las actividades de la metodología de diseño empleada es tomada en cuenta por profesores de la Facultad de Ingeniería en proyectos de asignaturas de diseño del producto, diseño mecatrónico, CAD y CAM, entre otras.

Identificación de la necesidad

La primera actividad realizada fue identificar la necesidad, al inicio se enlistaron una serie de necesidades expuestas por el personal del Laboratorio de Fotofísica y Películas Delgadas en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT); se entrevistaron un total de cinco personas, las cuales realizan mediciones con el método de fotoacústica y que en este caso serán los usuarios finales del hidrófono.

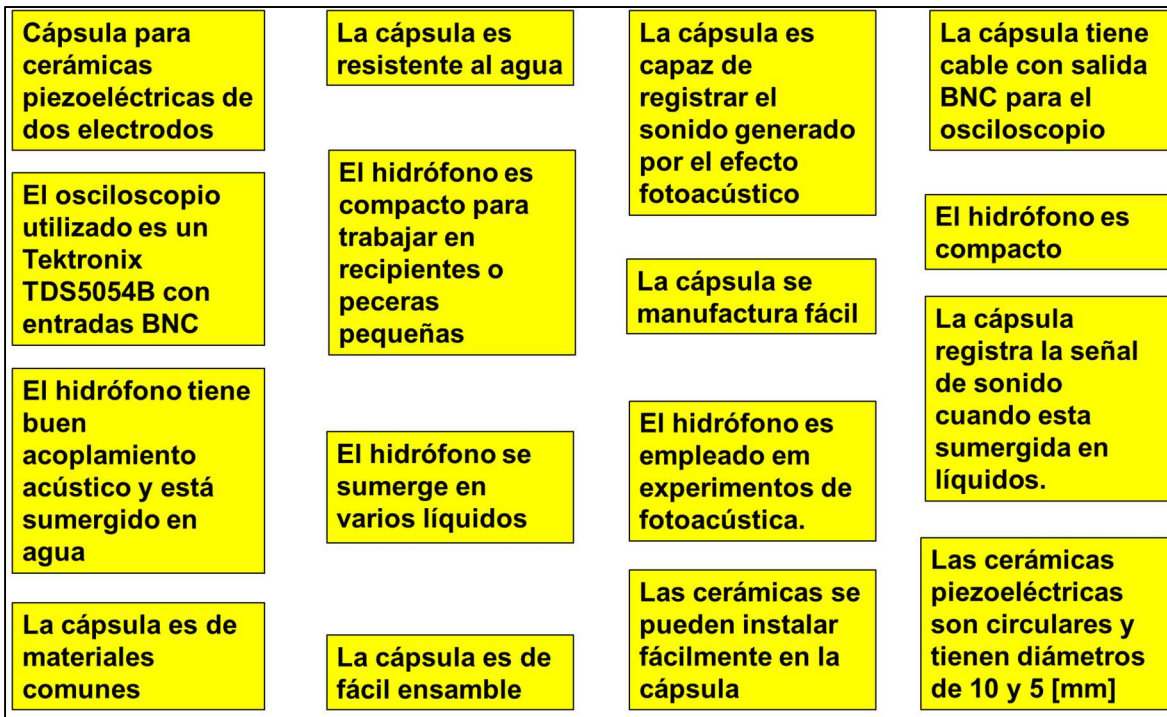


Figura 11. Necesidades de los usuarios recopiladas

Posteriormente se analizaron las necesidades registradas y se estructuraron grupos según su similitud para descartar las necesidades redundantes.

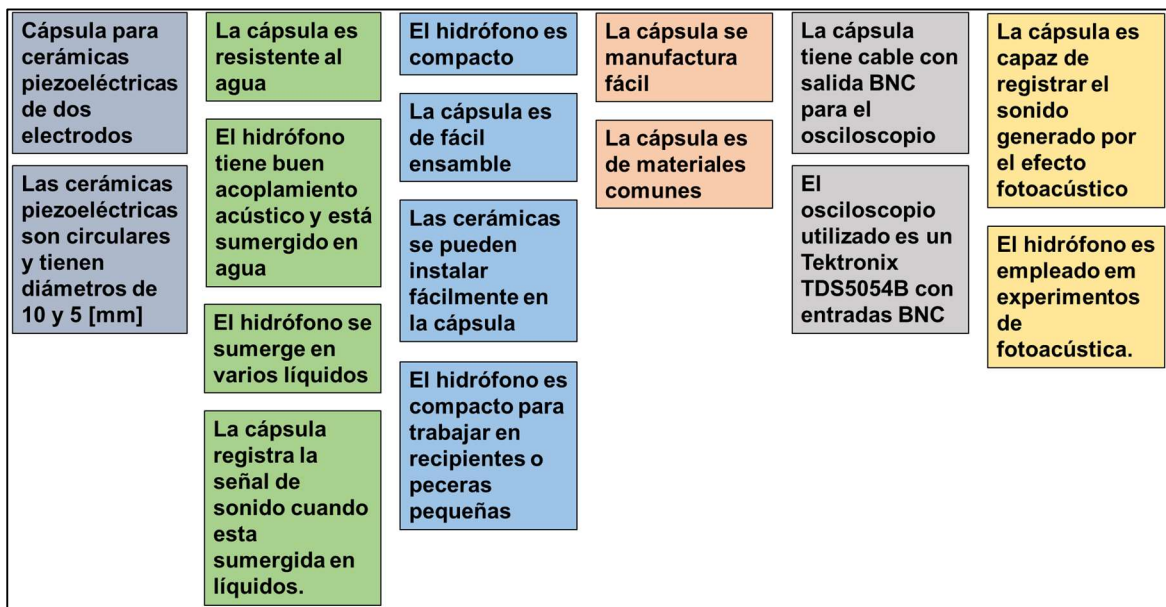


Figura 12. Necesidades de los usuarios clasificadas

Finalmente, se estableció la necesidad identificada en un párrafo que se muestra a continuación:

Se propone un proyecto que consiste en el diseño y la fabricación de una capsula compacta con electrodos, salida BNC y buen acoplamiento de impedancias acústicas, resistente al agua, para almacenar cerámicas piezoeléctricas con el objetivo de generar un hidrófono empleado en experimentos de fotoacústica. Lo anterior se propuso una vez que se analizaron las demandas de los usuarios, las dimensiones de la cerámica piezoeléctrica proporcionada y considerando la aplicación del hidrófono.

Objetivo del proyecto de diseño

Luego de identificar la necesidad se estableció el objetivo para el proyecto de diseño a desarrollar. Se estableció un párrafo con el objetivo considerando el campo de implementación de la cápsula, las dimensiones de las cerámicas piezoeléctricas que se utilizarán y algunos otros elementos identificados en las necesidades; con lo anterior el objetivo para el proyecto de diseño se muestra a continuación:

Diseñar y fabricar la capsula para un hidrófono, que sea capaz de almacenar cerámicas piezoeléctricas de un diámetro aproximado de 10.73 mm, y un espesor de 1.14 mm y que asegure un buen acoplamiento acústico para realizar mediciones en experimentos de fotoacústica.

Benchmarking

Antes de continuar con la definición de requerimientos, se realizó un proceso de benchmarking para verificar dimensiones, materiales, aplicaciones, entre otras características que apoyaran a la selección de materiales y al diseño del hidrófono. Se tomaron en cuenta productos que se encuentran en frecuencias similares a la de la cerámica utilizada para la fabricación del hidrófono, la cual oscila entre 150 y 300 KHz. Para la comparación se analizaron cinco hidrófonos comerciales que se muestran a continuación.

1. Hidrófono en miniatura modelo 8103 [17].

Empresa: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S.

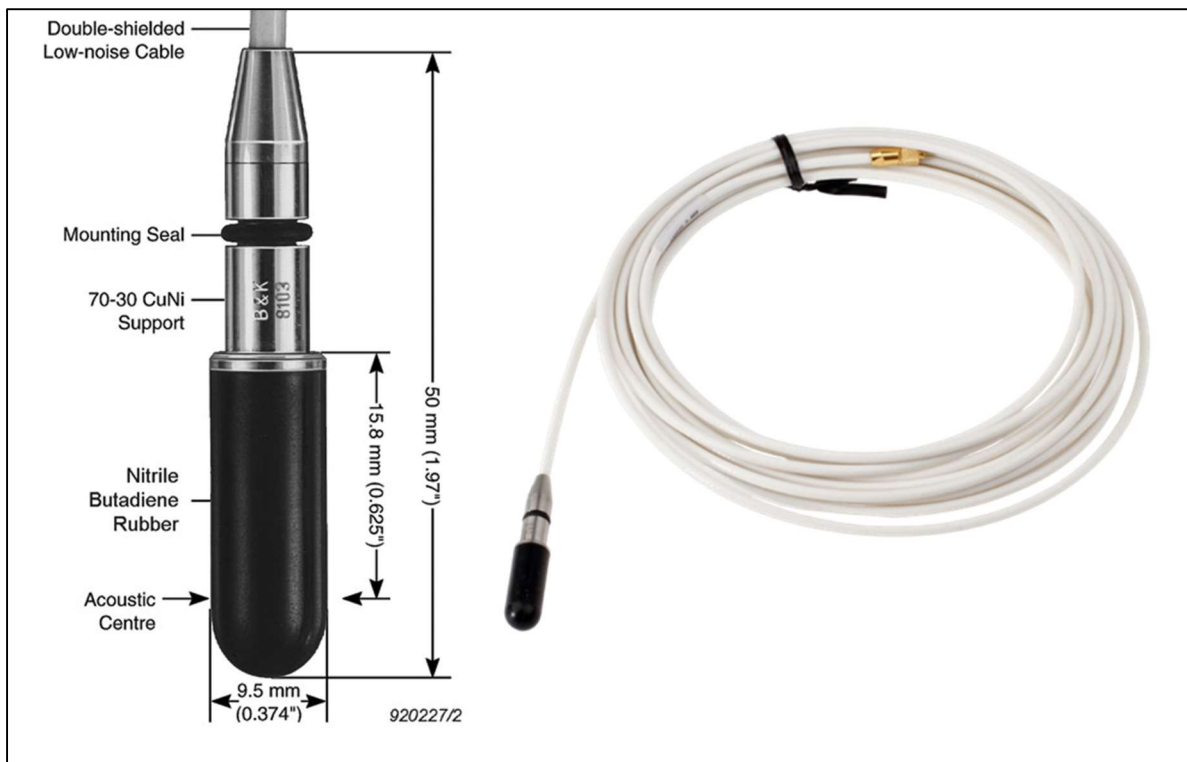


Figura 13. Hidrófono Brüel & Kjær en miniatura modelo 8103

Tabla de características	
Dimensiones	50 mm x 9.5 mm
Aplicaciones	Industriales y de laboratorio de alta frecuencia.
Longitud de cable	6 metros
Conector	Conector de micropuntos 10-32 UNF
Rango de frecuencias	0.1 Hz - 180 KHz
Sensibilidad de recepción	-211 dB referido a 1 V/ μ Pa.
Material de cubierta	Caucho de Nitrilo Butadieno
Material de capsula	CuNi

Tabla 2. Características del hidrófono modelo 8103 de Brüel & Kjær

2. HIDRÓFONO DE ALTA FRECUENCIA ZET 323 (BC 323) [18].

Empresa: ZETLAB.



Figura 13. Hidrófono de alta frecuencia ZET 323

Tabla de características	
Dimensiones	173 mm x 23 mm
Aplicaciones	Industriales en detección y control de fugas, control de vibraciones, monitoreo y diagnóstico de instalaciones hidráulicas.
Longitud de cable	10 metros
Conector	BNC
Rango de frecuencias	Inferior: 20 Hz - 20 KHz Superior: 160 KHz
Sensibilidad de recepción	-211 dB, -192, -172 referido a 1 V/ μ Pa.
Material de cubierta	No especificado
Material de capsula	Acero inoxidable 12X18H10T

Tabla 3. Características de hidrófono ZET 323

3. Hidrófono en miniatura YS-3000 [19].

Empresa: SEIS TECH.



Figura 14. Hidrófono en miniatura YS-3000

Tabla de características	
Dimensiones	85 mm x 25 mm
Aplicaciones	Industria sísmica, sistemas nodales y estudios sísmicos de pozos.
Longitud de cable	No especificado
Conector	LCK-2M / KCK / KCL / Kooter/BNC
Rango de frecuencias	Inferior: 2 Hz - 30 KHz Superior: 180 KHz
Sensibilidad de recepción	-201 dB referido a 1 V/ μ Pa.
Material de cubierta	Poliuretano universal
Material de capsula	Poliuretano universal

Tabla 4. Características Hidrófono en miniatura YS-3000

4. Hidrófono icListen SC35, SC60 [20].

Empresa: OCEAN SONICS.



Figura 15. Hidrófono icListen SC35

Tabla de características	
Dimensiones	165 mm x 48 mm
Aplicaciones	Industriales, gas y petróleo, marítimas de monitoreo.
Longitud de cable	No especificado
Conector	BNC
Rango de frecuencias	10 Hz - 200 KHz
Sensibilidad de recepción	-170 referido a 1 V/ μ Pa.
Material de cubierta	Plástico
Material de capsula	Titanio

Tabla 5. Características hidrófono icListen SC35

5. Hidrófono esférico modelo 8105 [21].

Empresa: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S.

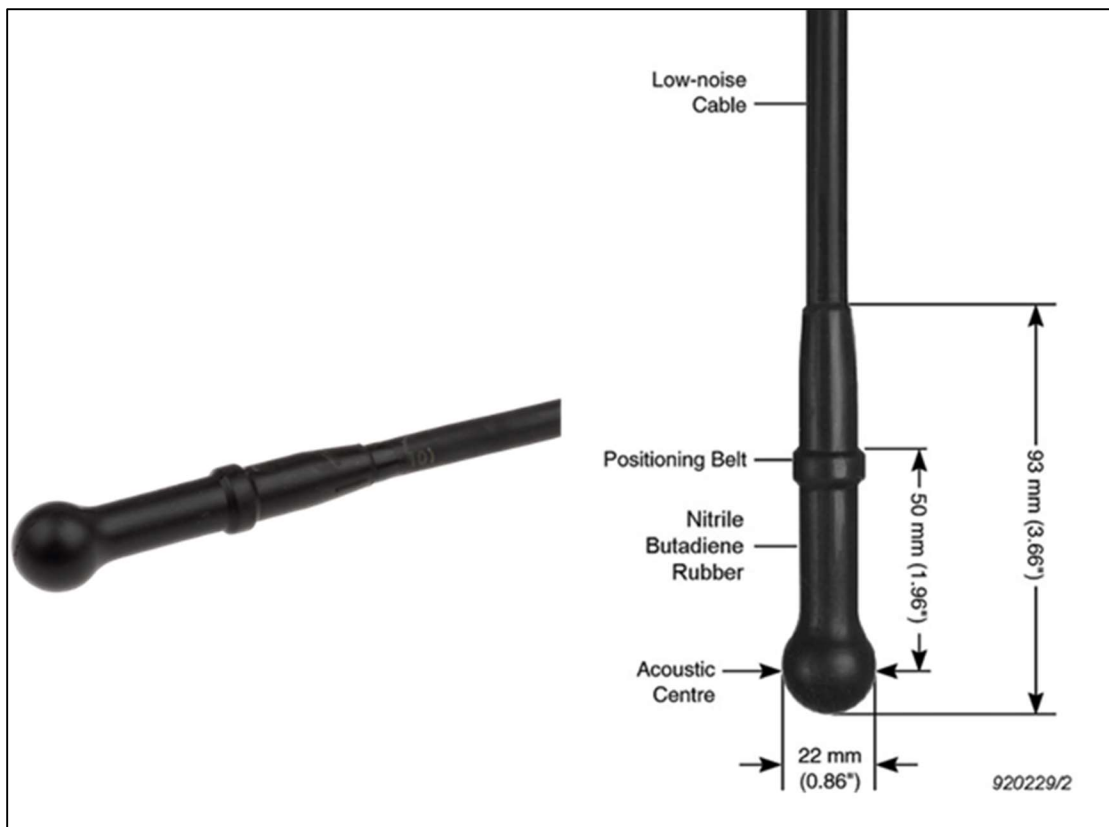


Figura 16. Hidrófono esférico modelo 8105 de Brüel & Kjær

Tabla de características	
Dimensiones	93 mm x 22 mm
Aplicaciones	Industriales y de laboratorio, grandes profundidades.
Longitud de cable	10 – 200 metros
Conector	BNC
Rango de frecuencias	0.1 Hz - 160 KHz
Sensibilidad de recepción	-205 dB referido a 1 V/ μ Pa.
Material de cubierta	Caucho de Nitrilo Butadieno
Material de capsula	Caucho de Nitrilo Butadieno

Tabla 6. Tabla de características del hidrófono esférico modelo 8015 de Brüel & Kjær

Finalmente, se condensa la información en la tabla que está a continuación para utilizarla en los próximos pasos del proceso de diseño.

Características	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5
Dimensiones [mm]	50 x 9.5	173 x 23	85 x 25	165 x 48	93 x 22
Aplicaciones	Industriales y de laboratorio de alta frecuencia	Industriales en detección y control de fugas, control de vibraciones, monitoreo y diagnóstico de instalaciones hidráulicas	Industria sísmica, sistemas nodales y estudios sísmicos de pozos.	Industriales, gas y petróleo, marítimas de monitoreo.	Industriales y de laboratorio, grandes profundidades.
Longitud de cable [mts]	6	10	No especificado	No especificado	10 - 200
Conector	10-32 UNF	BNC	LCK-2M / KCK / KCL / Kooter/BNC	BNC	BNC
Rango de frecuencias [Hz]	0.2 - 180000	20 - 160000	2 - 180000	10 - 200000	0.1 - 160000
Sensibilidad de recepción [dB re 1 V/ μPa]	-211	-211	-201	-170	-205
Material de cubierta	Caucho de Nitrilo Butadieno	No especificado	Poliuretano universal	Plástico	Caucho de Nitrilo Butadieno
Material de cápsula	CuNi	Acero inoxidable 12X18H10T	Poliuretano universal	Titanio	Caucho de Nitrilo Butadieno

Tabla 7. Tabla de información condensada de benchmarking

Definición de requerimientos

En la definición de requerimientos se consideró la información recabada en el Laboratorio de Fotofísica y Películas Delgadas del ICAT, con la finalidad de satisfacer las necesidades de los usuarios; se enlistan a continuación.

- El hidrófono tiene una forma compacta, y se arma de forma fácil y rápida.
- Es resistente al agua.
- Tiene un buen acoplamiento acústico.
- Posee un cable largo con conector de salida BNC.

Definición de especificaciones

La definición de especificaciones se presenta como la siguiente lista de enunciados que fue resultado de la condensación y análisis de la información adquirida en los pasos anteriores, como la identificación de las necesidades y el proceso de comparación (benchmarking). Dichos enunciados nos proporcionan la mayoría de la información necesaria para comenzar a realizar el proceso de diseño conceptual.

- El hidrófono debe tener unas dimensiones de máximo 100 mm de largo por 20 mm de ancho.
- El hidrófono debe ser resistente al agua.
- El hidrófono debe contener en su interior dos electrodos para conectar la cerámica piezoeléctrica.
- El hidrófono debe tener buen acoplamiento de impedancia acústica.
- El hidrófono debe ser capaz de almacenar en su interior cerámicas piezoeléctricas de un diámetro aproximado de 10.73 mm, y un espesor de 1.14 mm.
- El hidrófono debe tener un cable de salida de mínimo 1.5 m de largo.

Generación de conceptos

Para esta actividad se realizaron dos conceptos en los que se tomaron en cuenta las especificaciones y demás información de las actividades anteriores, para finalmente, llegar a la selección de uno de los conceptos.

Concepto 1

El concepto número uno propone una estructura de tres piezas en material de latón y superficie frontal plana cubierta de poliuretano. En su interior se encuentra la cerámica piezoeléctrica que es comprimida por un resorte que funciona por electrodo y un cilindro de acrílico que funciona como material aislante entre la pared de la capsula que funciona como un electrodo y el resorte que funciona como el segundo electrodo. La segunda pieza oprime el resorte y mantiene fija la cerámica. La tercera pieza propone una conexión tipo BNC con dos juntas tóricas, una en cada extremo de la rosca para asegurar un buen aislamiento contra el agua, finalmente cable coaxial con conector de salida tipo BNC macho.



Figura 17. Concepto 1 generado en el proceso de diseño

Concepto 2

El concepto dos se conforma de dos piezas principales en material de acero inoxidable. La primera pieza tiene una superficie frontal cilíndrica y tiene una cubierta de poliuretano, en su interior se encuentra la cerámica piezoeléctrica que es oprimida por un resorte que funciona como electrodo y un cilindro de acrílico que envuelve el resorte y que funciona como aislante entre el resorte y la pared de la capsula. La segunda pieza funciona como conexión, que consiste en una placa de cobre aislada con un cojinete de acrílico y conectada al alambre de cobre del cable coaxial y que oprime al resorte, por otro lado, el otro electrodo del cable coaxial se conecta a la pieza de acero mediante una conexión mecánica y se aísla para impedir el paso de líquidos hacia el interior del hidrófono. La conexión entre las dos piezas se hace roscada y con juntas tóricas en los extremos para asegurar el aislamiento.

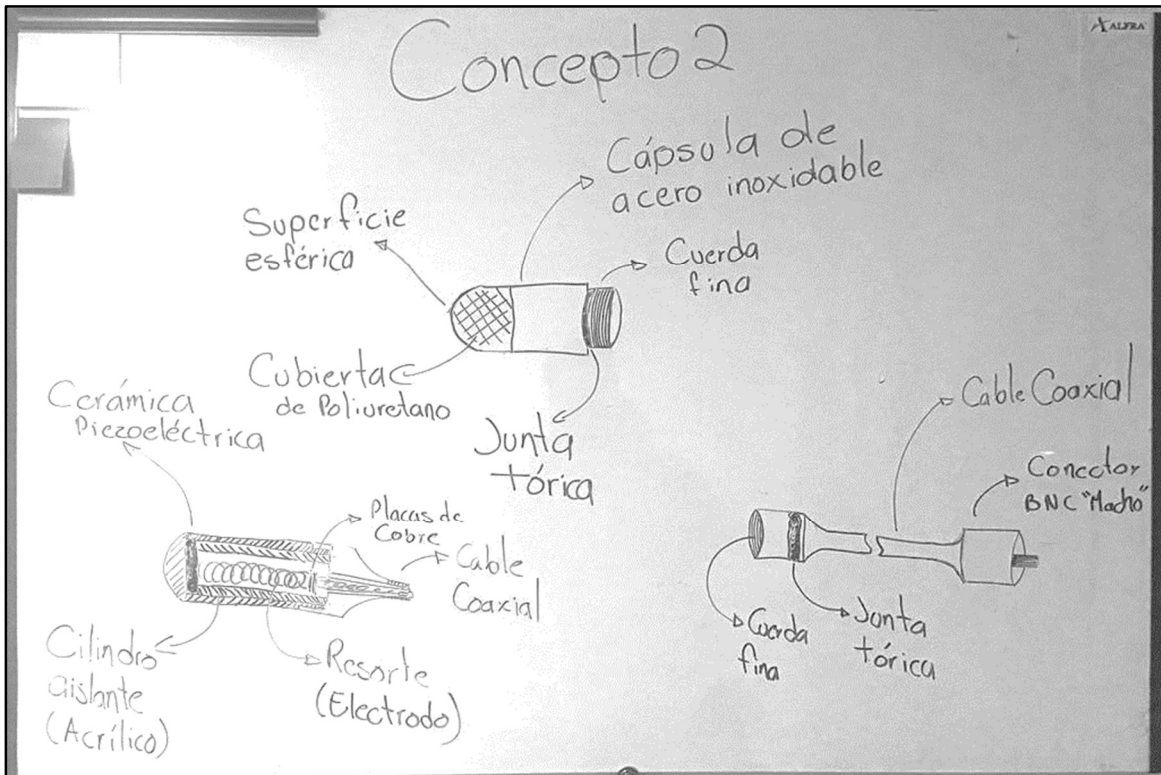


Figura 18. Concepto 2 generado en el proceso de diseño

Selección del concepto

Para elegir uno de los dos conceptos se realizó un análisis denominado matriz de selección, en donde se establecieron criterios enfocados a satisfacer las necesidades de los usuarios, asegurar su implementación, disminuir costos de manufactura y minimizar el tiempo de manufactura.

Matriz de selección

A los criterios mostrados en la matriz de selección se les dio un peso en una escala del 0 al 100 por ciento, donde 100 es el peso máximo. A continuación, se da una breve explicación del peso asignado a cada criterio.

Tamaño del hidrófono: se asignó un porcentaje de 20, esto porque será utilizado en un laboratorio y debe tener dimensiones compactas para su fácil aplicación en los arreglos del laboratorio.

Facilidad de ensamble: se asignó un peso de 25 debido a que los usuarios cuentan con distintas cerámicas piezoeléctricas con las mismas dimensiones y se requiere que sea fácil intercambiarlas.

Mantenimiento: este criterio tiene un peso de 10, ya que debe ser fácil de limpiar e intercambiar piezas.

Facilidad para implementarlo: A este criterio se le dio un peso de 15 ya que es de suma importancia su rápida y fácil implementación para dar uso a las cerámicas piezoeléctricas.

Costo de manufactura: El criterio de costo de manufactura se estableció debido a que se requiere un hidrófono que tenga un bajo costo de fabricación para poder implementarlo y tenga un costo menor al de los hidrófonos que ya existen en el mercado.

Tiempo de manufactura: El tiempo de manufactura se consideró con la finalidad de seleccionar un concepto que se fabrique e implemente en el menor tiempo posible.

Criterios	Peso	Concepto 1		Concepto 2	
		Calificación	Evaluación ponderada	Calificación	Evaluación ponderada
Tamaño del hidrófono	20%	5	1	9	1.8
Facilidad de ensamble	25%	6	1.5	8	2
Mantenimiento	10%	7	0.7	8	0.8
Facilidad para implementarlo	15%	7	1.05	5	0.75
Costo de manufactura	10%	8	0.8	7	0.7
Tiempo de manufactura	10%	6	0.6	9	0.9
Total	100%		5.65		6.95

Tabla 8. Matriz de selección del proceso de diseño

Al realizar un análisis de los dos conceptos con la matriz de selección se llegó a la conclusión de que el concepto numero dos es el concepto que podría implementarse de acuerdo con las necesidades de los usuarios.

Concepto

El trabajo de realizar el concepto ejecutó tomando en cuenta el diseño del concepto numero dos antes mostrado, sin embargo, se realizaron un par de modificaciones considerando información de algunos criterios analizados en la matriz de selección. La primera modificación fue la selección del material. Debido a que el material acero inoxidable es más costoso, difícil de conseguir y de maquinar, lo que afecta el tiempo y el costo de manufactura, se decidió utilizar latón para el concepto, el cual es más fácil de conseguir y maquinar. Para la cuestión de diseño, se decidió utilizar el concepto dos con la única modificación de mantener su superficie frontal plana, en lugar de esférica, esto con la finalidad de tener un diseño más fácil y rápido de maquinar y ensamblar.

El concepto final del hidrófono se desarrolló con la herramienta Autodesk Inventor 2024, donde se realizó el diseño de nueve componentes, que a continuación se enlistan con una breve descripción.

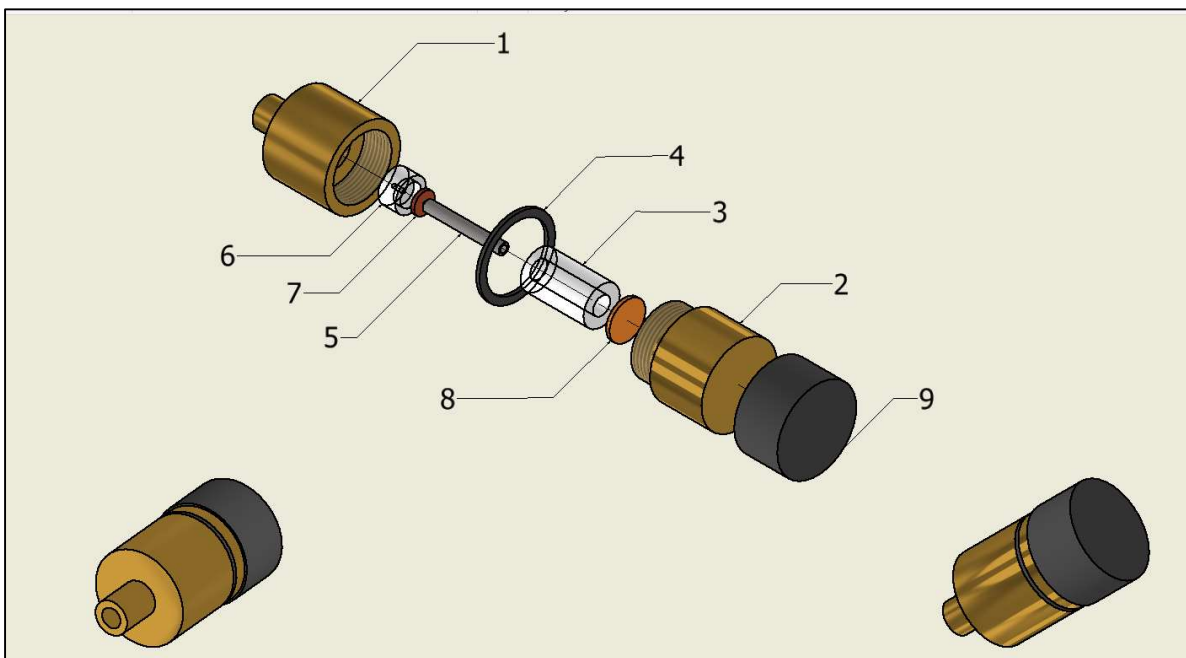


Figura 19. Dibujo de conjunto del concepto final

Número Pieza	De Material	Descripción
1	Latón	Parte 1 de la capsula con rosca interior en un lado y del otro, entrada para cable coaxial donde se soldará la malla de dicho cable para que esta funcione como electrodo.
2	Latón	Parte 2 de la capsula con rosca exterior para ensamblar con parte 1 y funcione como electrodo.
3	UHMW	Tubo aislante para resorte electrodo.
4	Caucho	O-ring de caucho para asegurar un ensamble impermeable.
5	Acero-Pintura de Plata	Resorte de acero, recubierto con pintura de plata para mejorar la conductividad eléctrica utilizado como electrodo.
6	UHMW	Cojinete aislante para electrodo.
7	Cobre	Cojín de cobre para ensamble con soldadura al alambre de cable coaxial y mecánico al resorte electrodo.
8	Cerámica	Cerámica piezoeléctrica proporcionada por el Laboratorio de Fotofísica en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM.
9	Vinil-Caucho	Cubierta de cinta aislante para mejorar acoplamiento de impedancia acústica en el agua.

Tabla 9. características de piezas del concepto final

Fabricación del concepto

En cuanto a la fabricación del concepto, algunas piezas se mandaron maquinar en un taller de torno, otras se fabricaron en casa y algunas se compraron.

Las piezas 1 y 2 que se fabricaron de latón y las piezas 3 y 6 de UHMW, se mandaron maquinar en un taller de torno y tomo un tiempo estimado de 1 hora en fabricar cada pieza.

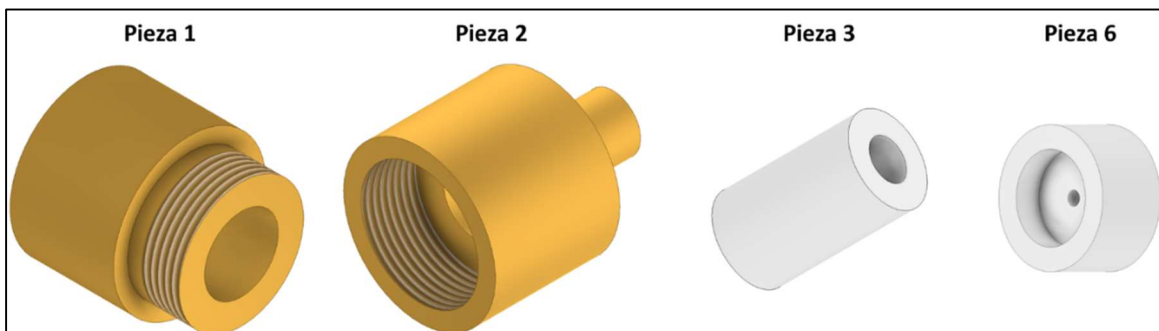


Figura 20. Piezas del concepto final fabricadas en torno

Por otro lado, la pieza 7 que se fabricó en cobre, consistió en perforar una lámina de cobre de 1 [mm] de espesor y se cizallo para obtener su forma redondeada. Este proceso se realizó en un tiempo estimado de 30 minutos.



Figura 21. Pieza fabricada manualmente con taladrado y cizallas

La pieza 5 que se trata de un resorte de acero, se recubrió con pintura de plata con el objetivo de obtener una mejor conductividad eléctrica. Se llevo un tiempo estimado de 10 minutos aplicando el recubrimiento de pintura de plata y 3 horas aproximadamente para obtener un secado uniforme.

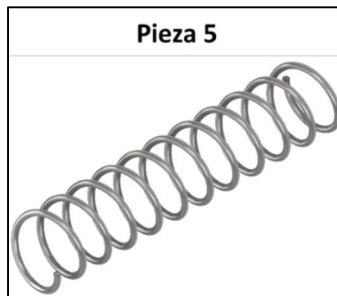


Figura 22. Resorte adquirido

La pieza 4 que es un oring de caucho y la 9 se trata de cinta de vinil-caucho, se compraron ya que son piezas y materiales que se encuentran en el mercado.

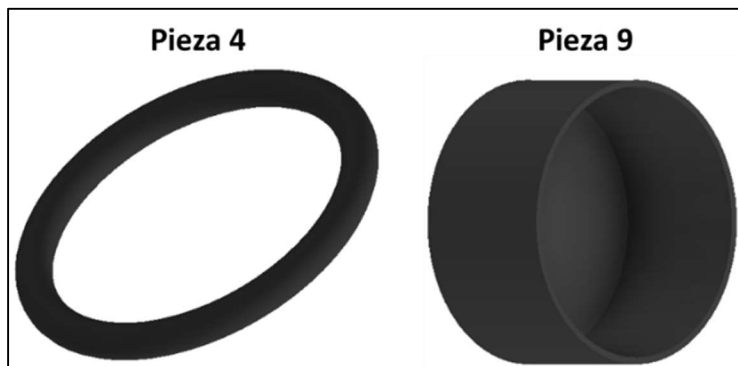


Figura 23. Oring de caucho y cinta de vinil de caucho

La pieza numero 8 es la cerámica piezoeléctrica y fue proporcionada por el Laboratorio de Fotofísica y Películas Delgadas del ICAT.

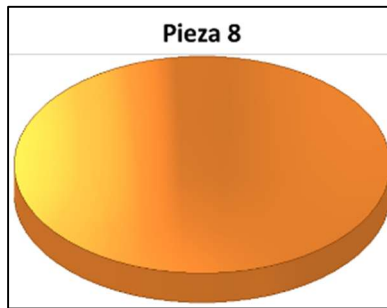


Figura 24. Cerámica piezoeléctrica utilizada en el hidrófono

Una vez que todos los materiales y piezas estuvieron reunidas se realizó el proceso de ensamble el cual duró un tiempo aproximado de 30 minutos. A continuación, se enlista una breve descripción del proceso de ensamblado.

1. Se colocó a presión la pieza número 6 que es el cojinete de UHMW en la pieza 1 de latón y a su vez la pieza numero 7 (cojín de cobre) sobre la pieza 6, igualmente a presión.
2. Posteriormente se instaló el cable coaxial en la pieza1 soldando con estaño la malla de este en la superficie de latón de la pieza en cuestión. Por otra parte, se soldó con estaño el alambre del cable coaxial al cojín de cobre.
3. Se colocó el oring de caucho (pieza 4) en la pieza 2 de latón para asegurar buen aislamiento contra el agua.
4. Se introdujo la cerámica en la pieza 2 y a su vez el tubo aislante de UHMW (pieza 3).
5. Luego se introdujo el resorte de acero y recubierto con pintura de plata (pieza 5) en el tubo aislante (pieza 3) para después ensamblar las dos piezas del latón (piezas 1 y 2) roscándolas y teniendo cuidado que el resorte se colocara bien sobre el cojín de cobre.
6. Finalmente se aisló toda la superficie de la cápsula con una capa de cinta aislante de vinil-caucho y se aisló completamente la conexión del cable coaxial a la capsula como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 25. Fotografía del hidrófono terminado

Metodología de caracterización del hidrófono con fotoacústica

Para caracterizar el hidrófono se realizaron dos arreglos experimentales con fotoacústica, el primer arreglo fue para caracterizar la cerámica piezoeléctrica utilizada y el segundo arreglo experimental se realizó para caracterizar el sensor, en aire y en un medio acuoso; a continuación, se presenta la documentación de los trabajos realizados para caracterizar el hidrófono

Equipo y material utilizado

Los arreglos se realizaron con equipo instalado en el Laboratorio de Fotofísica en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM. En breve se muestra el equipo utilizado para los arreglos experimentales.


Número	Descripción	Figura
1	<p>Láser pulsado EKSPLA NL300 Nd:YAG de conmutación Q bombeado. Frecuencia de repetición de pulso de 10 Hz Duración de pulso de 5 ns. Longitud de onda de emisión de 1064 nm; con módulo intercambiable tiene una longitud de onda de 532 nm.</p>	
2	<p>Osciloscopio Tektronix TDS5054B</p>	
3	<p>Fotodiodo Thorlabs PDA10A Silicon Amplified Detector</p>	
4	<p>Laptop OMEN</p>	
5	<p>Cable BNC/Caimán</p>	
6	<p>Celda de acrílico con ventanillas de cuarzo</p>	
7	<p>Software MATLAB 2023a</p>	
8	<p>Agua tridestilada</p>	

Tabla 10. Material y equipo utilizado en la caracterización de la cerámica y el hidrófono

Arreglos de experimentación

El primer arreglo experimental se realizó con la finalidad de conocer la respuesta fotoacústica de la cerámica piezoeléctrica; se realizaron las siguientes actividades.

- Se conectó la cerámica piezoeléctrica mediante dos electrodos del cable BNC/caimán al osciloscopio y se fijó a una base de la mesa experimental.
- Posteriormente, se alineó el láser pulsado EKSPLA NL300 Nd:YAG acondicionado para emitir luz verde de 532 nm de longitud de onda de tal modo que este incidiera directamente a una de las caras de la cerámica.
- Ya que se alineó el láser se sujetó el fotodiodo a la mesa con la finalidad de registrar la señal de disparo del láser pulsado y se conectó a una de las entradas BNC del osciloscopio Tektronix TDS5054B.
- La siguiente actividad fue hacer incidir el láser sobre la cerámica para generar el efecto fotoacústico durante un periodo corto de tiempo, mientras se registró la señal generada en el osciloscopio Tektronix TDS5054B.
- Una vez registrada y guardada la señal fotoacústica esta se procesó en MATLAB con programas proporcionados por el laboratorio. El primer programa convierte los archivos con extensión (.wfm) donde se guarda la información registrada por el osciloscopio, en archivos de tipo dato para poder trabajarlos.
- Finalmente, con los programas de MATLAB proporcionados por el Laboratorio de Fotofísica y Películas Delgadas se procesaron los datos obteniendo las gráficas de las respuestas fotoacústica de cada medición en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

A continuación, se muestra un esquema e imagen del arreglo experimental.

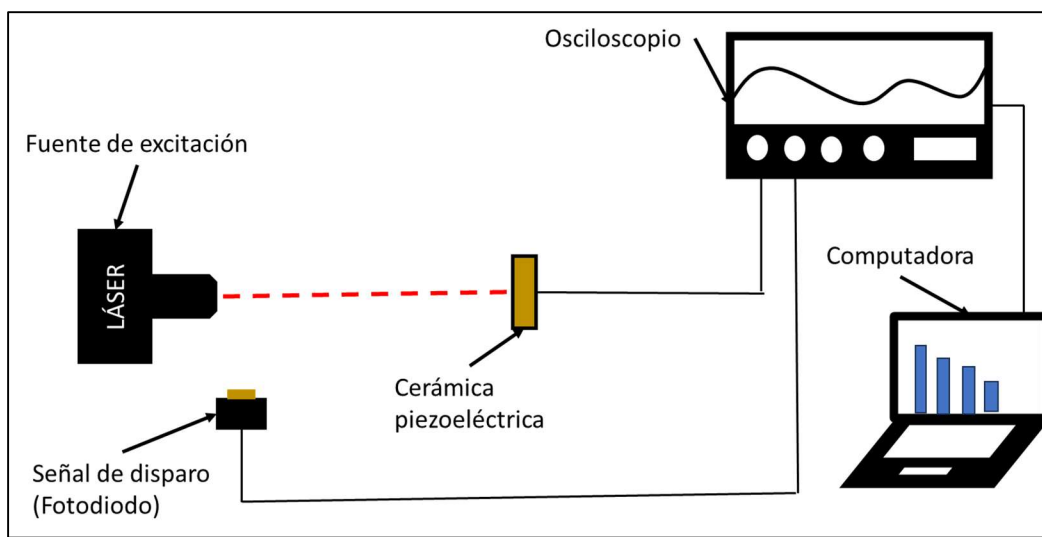


Figura 27. Arreglo experimental para caracterización de la cerámica piezoeléctrica

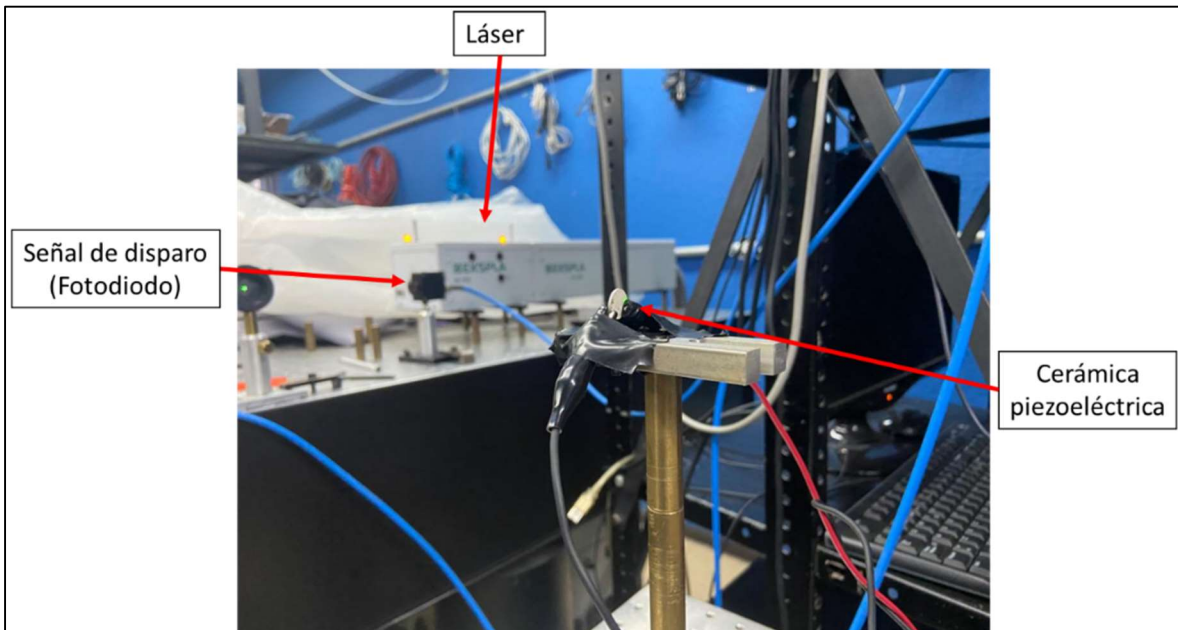


Figura 28. Fotografía de arreglo experimental para caracterización de la cerámica piezoeléctrica

Para el segundo arreglo experimental se realizaron dos mediciones, una en aire y una en agua, esto con la finalidad de conocer la respuesta fotoacústica en los dos medios y así, comprobar que el hidrófono tiene un buen acoplamiento acústico cuando este se sumerge en agua. A continuación, se enlistan las actividades realizadas en este arreglo experimental.

- La primera actividad fue sujetar el hidrófono a una celda de acrílico que fue diseñada con la finalidad de que este se pueda sumergir completamente y se conectó a una de las entradas BNC del osciloscopio.
- Posteriormente se alineo la celda al laser pulsado EKSPLA NL300 Nd:YAG esta vez acondicionado para emitir una longitud de onda de 1064 nm (infrarrojo), de tal forma que este incidiera de manera perpendicular a la cara del hidrófono a través de una de las ventanas de cuarzo para que el láser incidiera sobre la superficie de este.
- Ya que se alineo el láser se sujetó el fotodiodo a la mesa con la finalidad de registrar la señal de disparo del láser y se conectó a una de las entradas BNC del osciloscopio Tektronix TDS5054B.
- Teniendo todo en posición, se realizó la primera medición, la cual consistió en registrar la señal fotoacústica captada por el osciloscopio inmerso en aire.
- Para la segunda medición se agregaron 400 ml de agua tridestilada a la celda de acrílico con la finalidad de que el hidrófono estuviera completamente sumergido. Finalmente se registró la señal fotoacústica.

- Una vez registrada y guardada la señal fotoacústica esta se procesó en MATLAB con programas proporcionados por el laboratorio. El primer programa convierte los archivos con extensión (.wfm) donde se guarda la información registrada por el osciloscopio, en archivos de tipo dato para poder trabajarlos.
- Por último, se graficaron los datos en el dominio del tiempo y el de la frecuencia en MATLAB.

Las siguientes imágenes muestran el arreglo experimental utilizado.

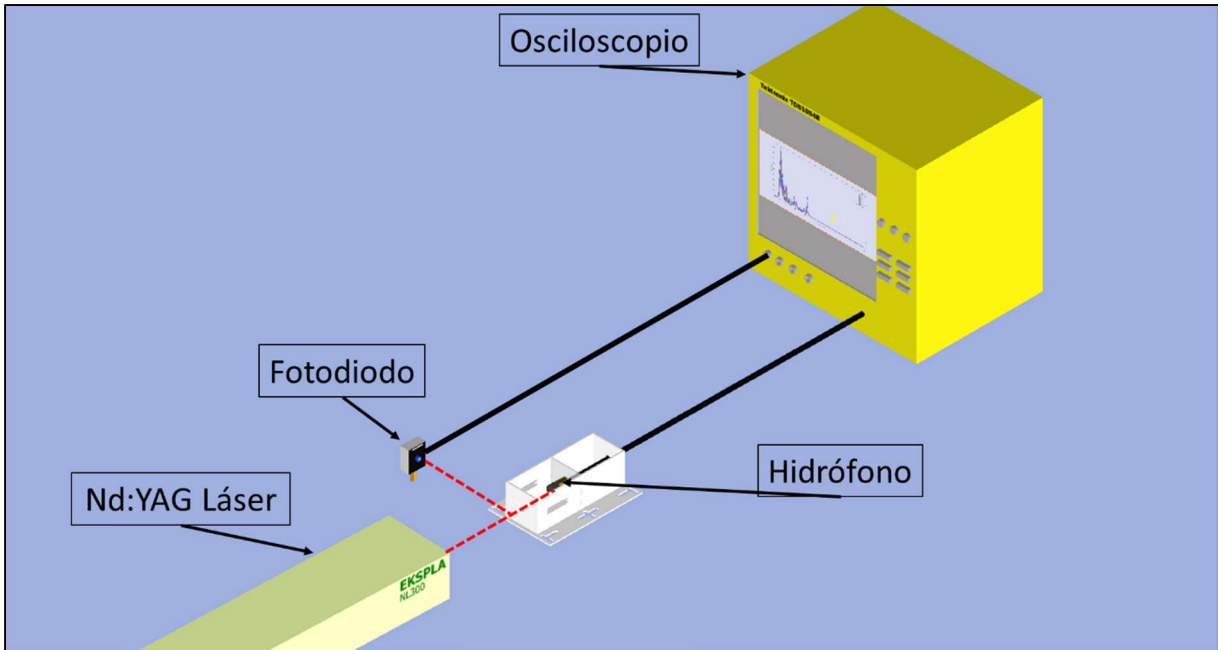


Figura 26. Arreglo experimental para caracterización del hidrófono

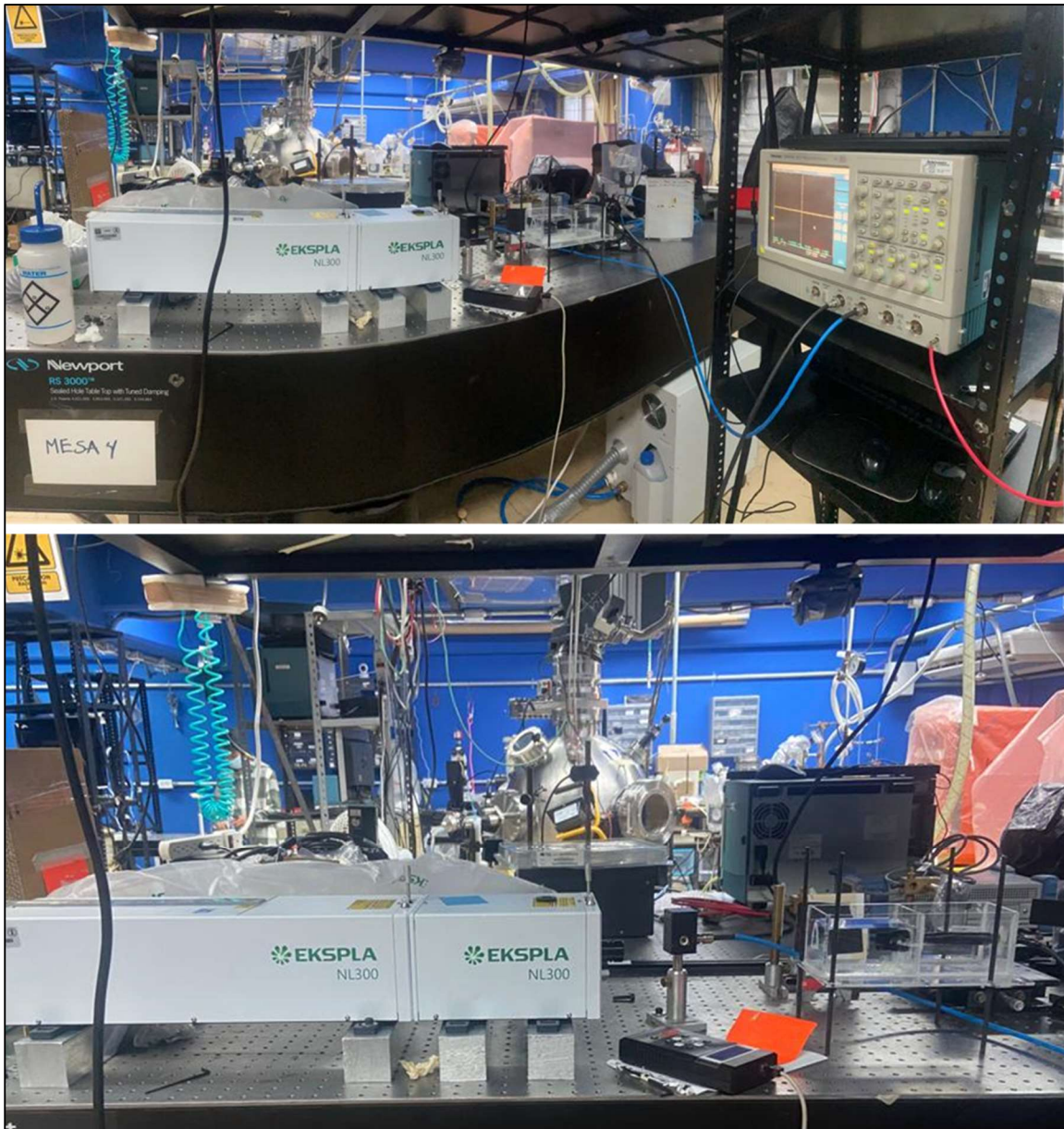


Figura 30. Fotografías de arreglo experimental para caracterización del hidrófono

Resultados y análisis

Resultados y análisis cerámica piezoeléctrica

El primer arreglo experimental se realizó con la finalidad de conocer las frecuencias de resonancia de la cerámica piezoeléctrica utilizada para construir el hidrófono. La respuesta fotoacústica de la cerámica piezoeléctrica está representada en las siguientes imágenes, este resultado fue al hacer incidir el láser de forma directa en la superficie de una de las caras del sensor. Una vez que se obtuvo esta información en el dominio del tiempo se puede observar un voltaje máximo de 116 [mV].

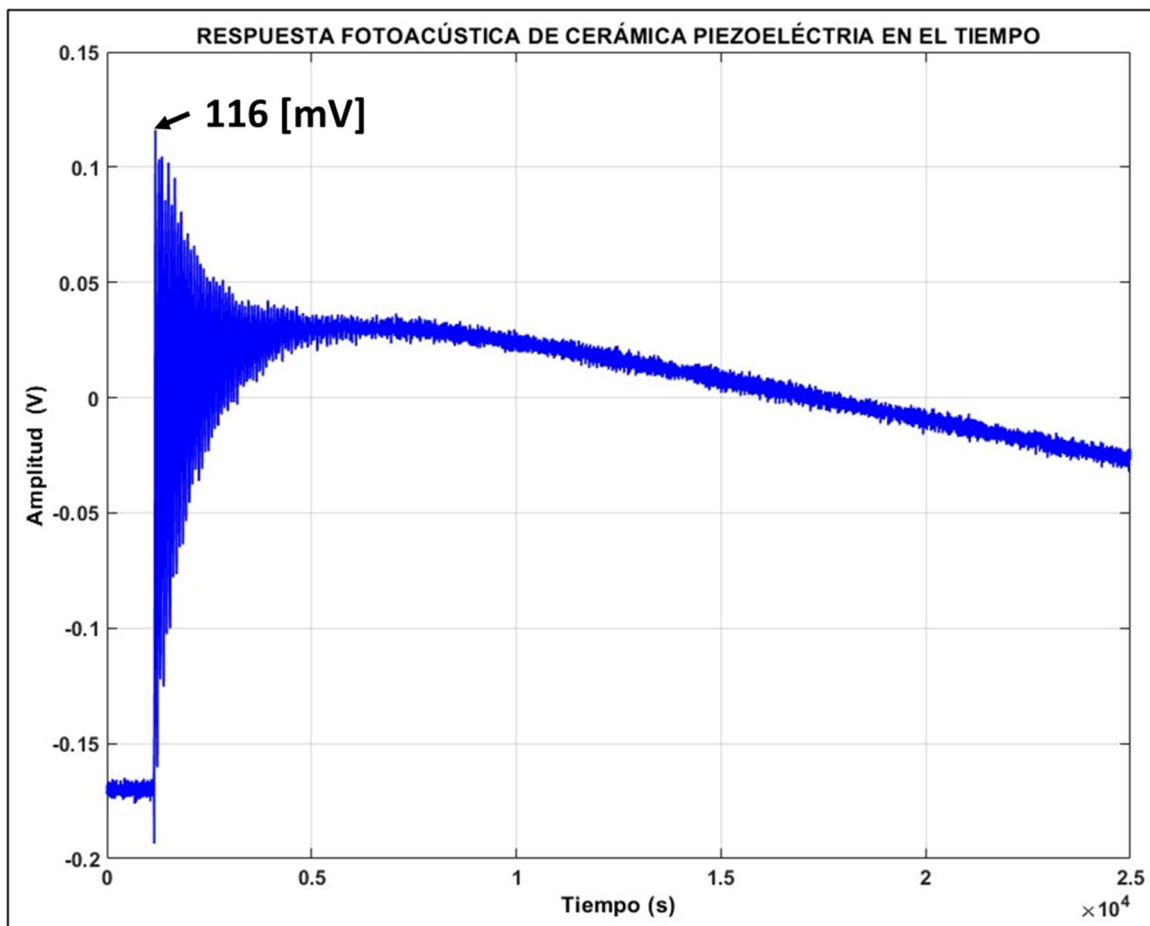


Figura 27. Grafica de señal fotoacústica obtenida de la cerámica piezoeléctrica

Al realizar la Transformada de Fourier, se pueden ver las frecuencias de resonancia de nuestro sistema que en este caso es la cerámica piezoeléctrica. La frecuencia de resonancia se encuentra en 320 [KHz] debido a que es la que muestra una amplitud relativa más grande. Sin embargo, en la gráfica se pueden observar otras frecuencias en las que responde la cerámica, por lo que se considera que su

respuesta en frecuencia es 320 -1582 [KHz] aproximadamente. En las siguientes imágenes se muestran los resultados.

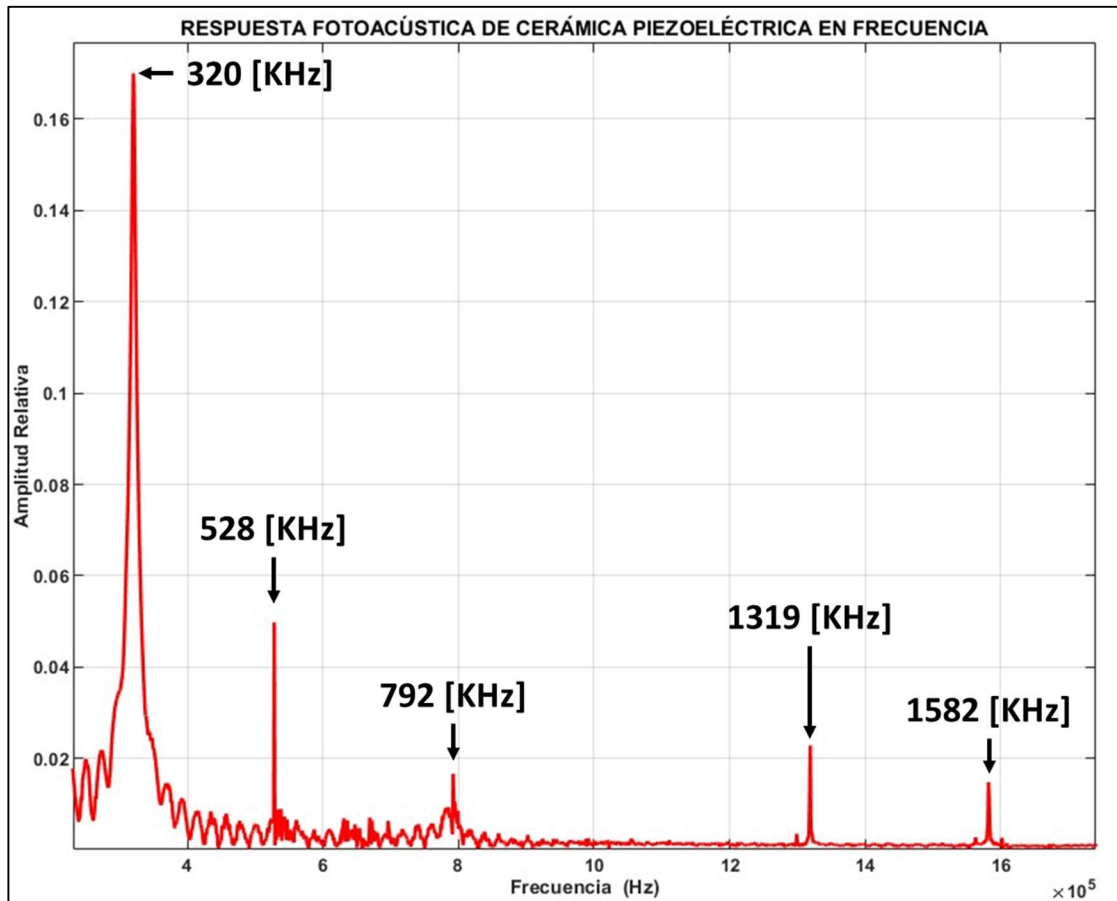


Figura 28. Respuesta fotoacústica de la cerámica piezoeléctrica en frecuencia

Resultados y análisis hidrófono

Como se mencionó anteriormente, el segundo arreglo experimental se realizó para cumplir dos objetivos específicos. El primero fue verificar si el hidrófono tiene un buen acoplamiento acústico cuando este se sumerge en algún fluido que en este caso fue agua tridestilada, que es el medio en que normalmente operara y se comparó con la respuesta fotoacústica del hidrófono inmerso en aire. A continuación, se muestra las respuestas fotoacústicas del hidrófono en los medios antes mencionados.

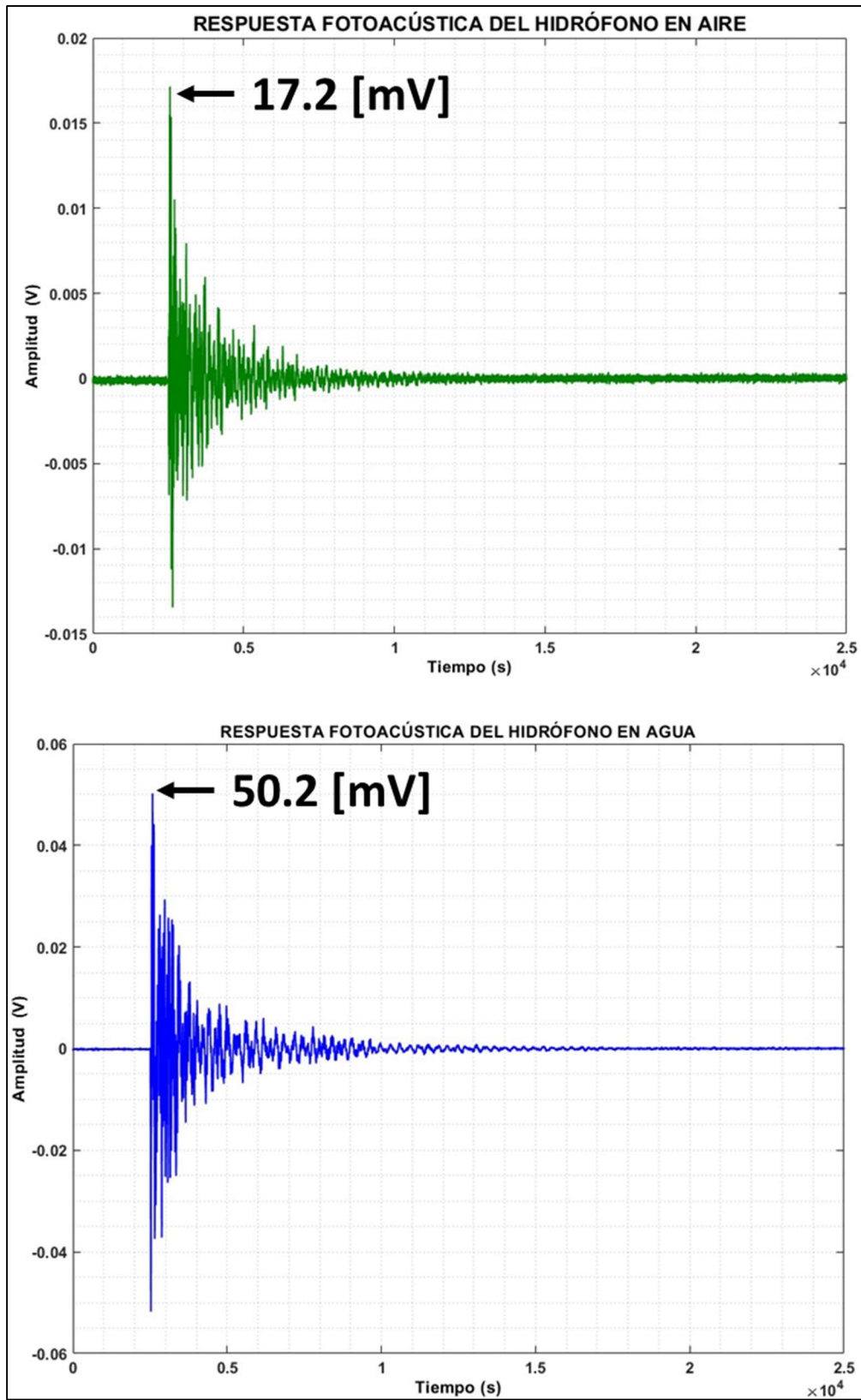


Figura 29. Respuesta fotoacústica en tiempo del hidrófono sumergido en aire y agua

Como se puede apreciar en la imagen anterior, el hidrófono tiene una mayor sensibilidad cuando este se encuentra sumergido en agua por el hecho de presentar una amplitud mayor que el doble de la amplitud obtenida cuando este se encuentra inmerso en aire. Con lo anterior podemos decir que este tiene un buen acoplamiento acústico en el agua y esto es el resultado de la buena selección de materiales utilizados para fabricar el hidrófono.

El segundo objetivo fue caracterizar el hidrófono cuando este se encuentra sumergido en agua tridestilada y tomarlo como referencia, considerando que el agua no contiene contaminante alguno. Como se muestra en la imagen anterior el hidrófono genera un voltaje máximo de salida de 50 [mV] cuando se hace incidir el láser directamente en su cara plana. Por otro lado, su respuesta fotoacústica en el dominio de la frecuencia nos ayuda a visualizar la respuesta en frecuencia de este. En la imagen que se encuentra a continuación, podemos apreciar que la frecuencia con mayor amplitud relativa se encuentra en 41 [KHz], seguida se encuentra la frecuencia de 323 [KHz] y la de 797.5[KHz]. Las frecuencias anteriores se tomaron en cuenta debido a que casi coinciden con las frecuencias que arrojó la respuesta en frecuencia de la cerámica piezoeléctrica. Entonces, tomando en cuenta que la primera frecuencia con mayor amplitud de la señal fue 41[KHz] y que la última frecuencia mostrada en la gráfica es 797.5 [KHz] y que coincide con la respuesta en frecuencia de la cerámica piezoeléctrica, podemos decir que la respuesta en frecuencia del hidrófono es 41 – 797.5 KHz aproximadamente.

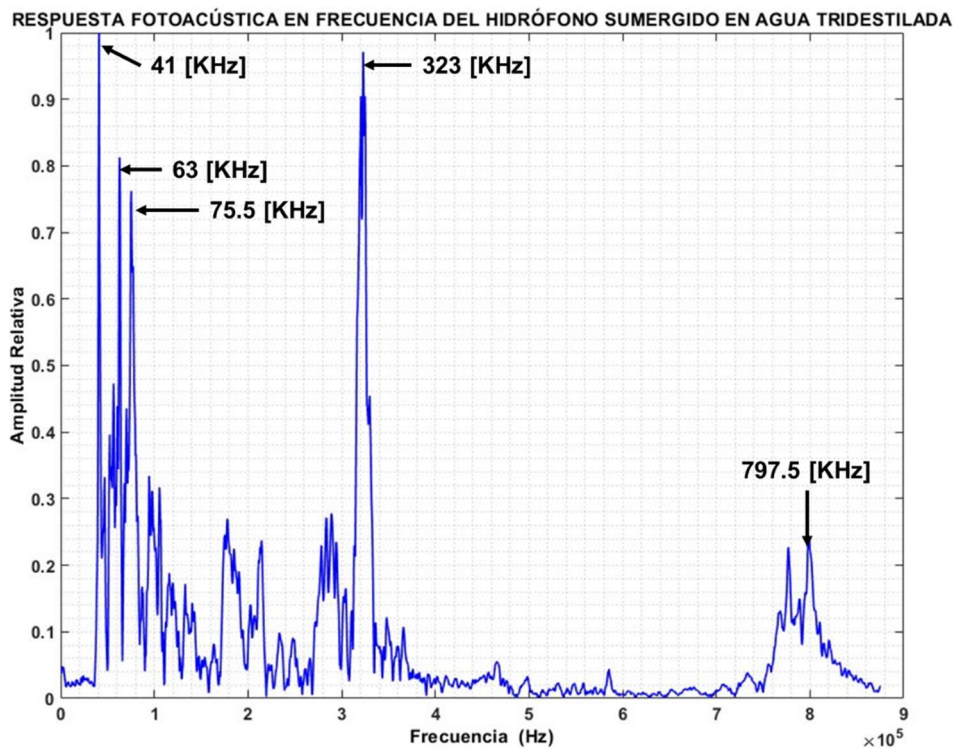



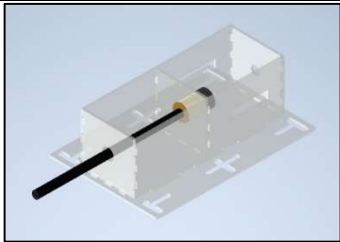





Figura 30. Respuesta fotoacústica del hidrófono sumergido en agua en el dominio de la frecuencia

Aplicación del hidrófono: Analizar la respuesta fotoacústica de diferentes concentraciones de NaCl en agua destilada

El hidrófono se fabricó principalmente para que se midieran concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) disuelto en agua destilada con el método fotoacústica, por lo que se diseñó el hidrófono, la celda de acrílico con ventanas de cuarzo y el arreglo experimental para tal aplicación; a continuación, se muestran los trabajos realizados para demostrar una aplicación del hidrófono diseñado y fabricado.

Equipo y material utilizado

Número	Descripción	Figura
1	<p>Láser pulsado EKSPLA NL300 Nd:YAG de conmutación Q bombeado.</p> <p>Frecuencia de repetición de pulso de 10 Hz</p> <p>Duración de pulso de 5 ns.</p> <p>Longitud de onda de emisión de 1064 nm; con módulo intercambiable tiene una longitud de onda de 532 nm.</p>	
2	<p>Osciloscopio Tektronix TDS5054B</p>	
3	<p>Fotodiodo Thorlabs PDA10A Silicon Amplified Detector</p>	
4	<p>Laptop OMEN</p>	

5	Frasco de vidrio de 1 litro con taparroscas	
6	Celda de acrílico con ventanillas de cuarzo	
7	Software MATLAB 2023a	
8	Agua tridestilada	
9	Bascula PIONEER OHAUS	
10	Cloruro de sodio (NaCl) 99% puro Sigma-Aldrich	
11	Charola de polietileno	



12	Toallas libres de pelusa KIMTECH			
13	Alcohol etílico			

Tabla 11. Material y equipo utilizado en la aplicación del hidrófono

Preparación de muestras

Las actividades que se ejecutaron para preparar las muestras fueron las siguientes:

- La primera actividad realizada fue limpiar y desinfectar cada una de las 7 charolas de polietileno para descartar alguna partícula contaminante pues esta podría afectar las mediciones.
- Posteriormente se pesaron 4 gramos de cloruro de sodio (NaCl) en cada charola con ayuda de la báscula PIONEER OHAUS.



Figura 31. fotografía de las muestras de NaCl previamente pesadas en la báscula gramera del fondo

- Una vez que se pesó el cloruro de sodio, se limpió la celda de acrílico cuidadosamente para evitar que quedara algún residuo dentro de esta y haciendo énfasis en las ventanillas de cuarzo, pues por medio de estas entra el láser a la muestra.
- Finalmente, se limpió el frasco y su taparrosca con detenimiento para evitar que se quedara algún residuo.

A continuación, se presenta una tabla de los pesos de cloruro de sodio (NaCl) obtenidos por la báscula en cada charola.

Número de charola	NaCl (gramos)
1	4.0001
2	4.0001
3	4.0000
4	4.0001
5	4.0000
6	4.0001
7	4.0003

Tabla 12. Pesajes de las muestras de NaCl obtenidos con la báscula utilizada

Arreglo de experimentación

El arreglo de experimentación consistió en fijar la celda de acrílico a la mesa de trabajo y a una distancia de 27.5 centímetros de la salida del láser a la ventanilla de cuarzo de la celda donde se encuentra la muestra, de tal forma que el láser viaje paralelamente a la cara frontal del hidrófono; a una distancia de aproximadamente 10 [mm].

Posteriormente se aseguró el fotodiodo para captar el disparo del láser y se conectó a una entrada BNC del osciloscopio al igual que el hidrófono.

El hidrófono se encuentra fijo en la celda de acrílico de tal forma que se encuentre sumergido completamente en la muestra que debe ser de 400 [ml]. A continuación, se muestra una imagen y una foto del arreglo experimental realizado.

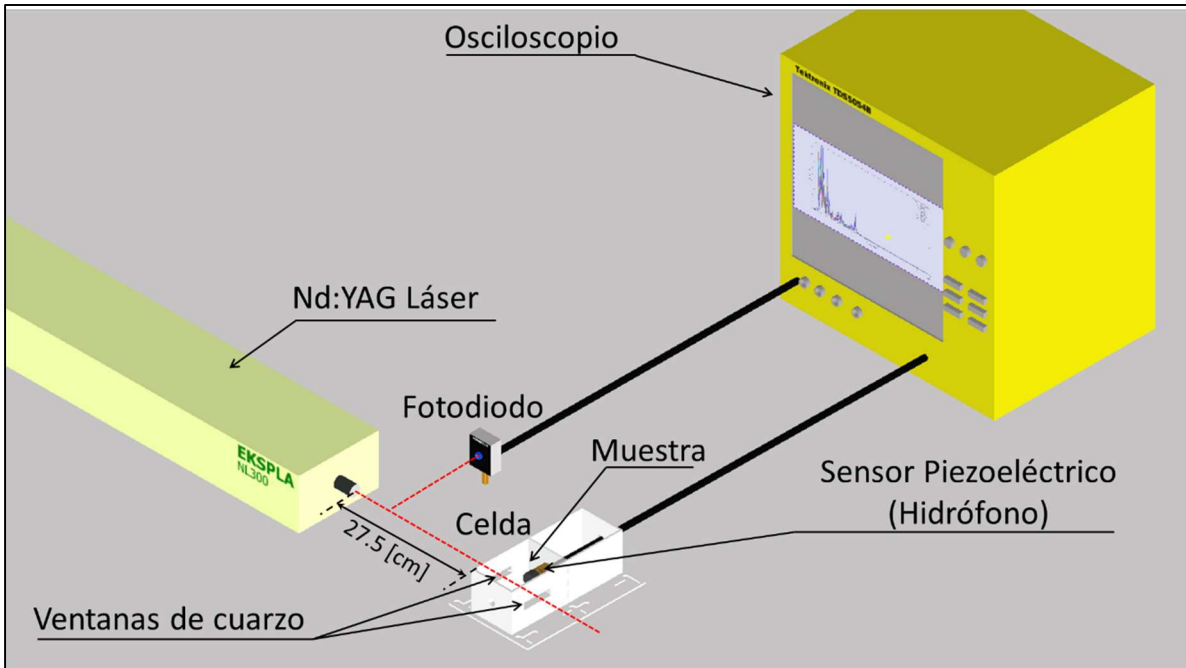


Figura 36. Arreglo experimental para la aplicación del hidrófono

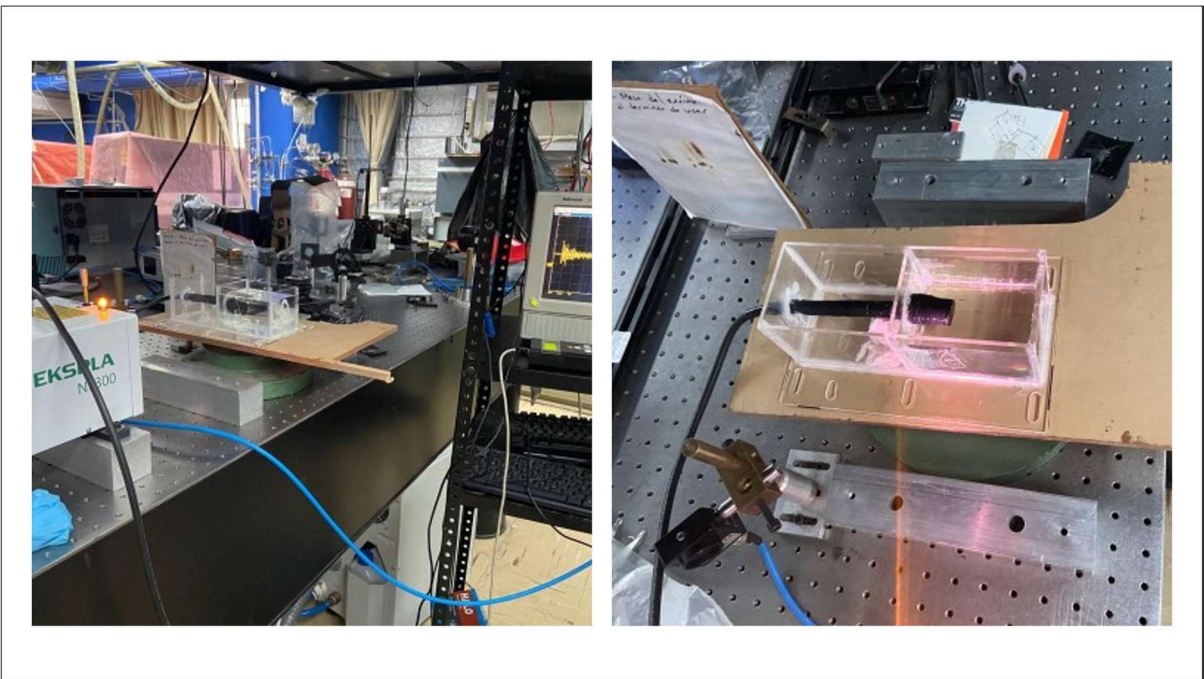


Figura 32. Fotografías del arreglo experimental utilizado para la aplicación del hidrófono

Experimentación

Las mediciones de diferentes concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) puro, se llevaron a cabo con láser pulsado de 1064 [nm] de longitud de onda, es decir infrarrojo y se llevaron a cabo las siguientes actividades.

- La primera medición se llevó a cabo con agua tridestilada, se vertieron 400 [ml] de agua tridestilada a la celda de acrílico y se le hizo incidir el láser para generar el efecto fotoacústico mientras se registraba la señal en escalas de [200 μ s] y [2 μ s].
- Para la segunda medición se vertió el agua de la celda en un frasco de cristal de 1 litro y se agregaron 4 gramos de cloruro de sodio (NaCl) puro para obtener una concentración de 10 g/l (10 gramos de cloruro de sodio por cada litro de agua). Se diluyó el cloruro de sodio con la mano y en movimientos circulares durante 3 minutos; hasta que estuviese completamente diluida. A continuación, se vertió nuevamente el agua en la celda para realizar mediciones y registrar las señales fotoacústicas nuevamente en escalas de [200 μ s] y [2 μ s].
- Se repitió la actividad anterior 7 veces hasta llegar a una concentración de 70 g/l, cada vez se agregaron 4 gramos de cloruro de sodio para obtener concentraciones en múltiplos de 10 gramos.
- Una vez realizadas las mediciones se obtuvieron 16 archivos de tipo [.wfm] y se guardaron en una memoria USB para trasladarlos del osciloscopio a la computadora.
- Teniendo los archivos en la computadora se separaron en dos carpetas diferentes, los 8 archivos en escala de 200[μ s] y los otros 8 archivos en escala 2[μ s]. Todo lo anterior para poder procesar los datos obtenidos.
- Finalmente, con los programas de MATLAB proporcionados por el Laboratorio de Fotofísica y Películas Delgadas se procesaron los datos obteniendo las gráficas de las respuestas fotoacústica de cada medición en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, así como un análisis de correlación cruzada de señales para estudiar las respuestas obtenidas en el dominio del tiempo.

El programa proporcionado por el Laboratorio de Fotofísica y Películas Delgadas para realizar el análisis de correlación cruzada de señales, básicamente consiste en comparar la señal de referencia, que en este caso es la señal fotoacústica obtenida del agua destilada, con las señales fotoacústicas obtenidas de cada concentración de NaCl diluido en agua destilada.

Resultados y análisis

El objetivo principal de aumentar las concentraciones de cloruro de sodio en el experimento es para analizar como varia la señal de la respuesta fotoacústica obtenida. En breve, se muestra la respuesta fotoacústica de cada medición.

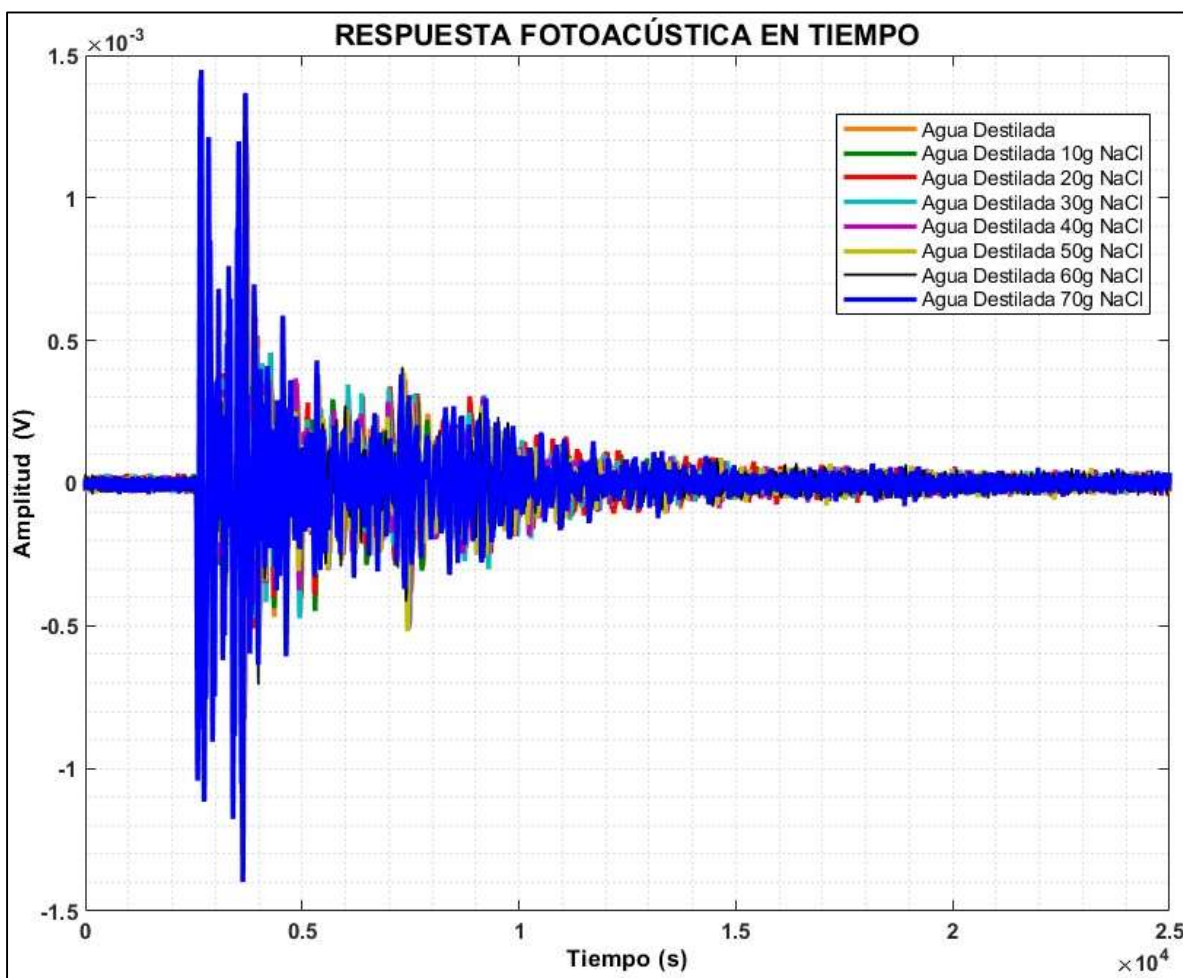


Figura 33. Respuestas fotoacústicas en tiempo obtenidas al variar la concentración de NaCl

Se encontraron dos cosas importantes al analizar los resultados obtenidos del experimento. La primera cosa que se observó fue que a medida que se aumentó la concentración de cloruro de sodio disuelto en agua tridestilada, la señal obtenida llegaba más rápido, dicho de otra forma, es que el tiempo de arribo de la señal es menor a medida que se aumenta la concentración de cloruro de sodio (NaCl), como se puede observar en la siguiente imagen.

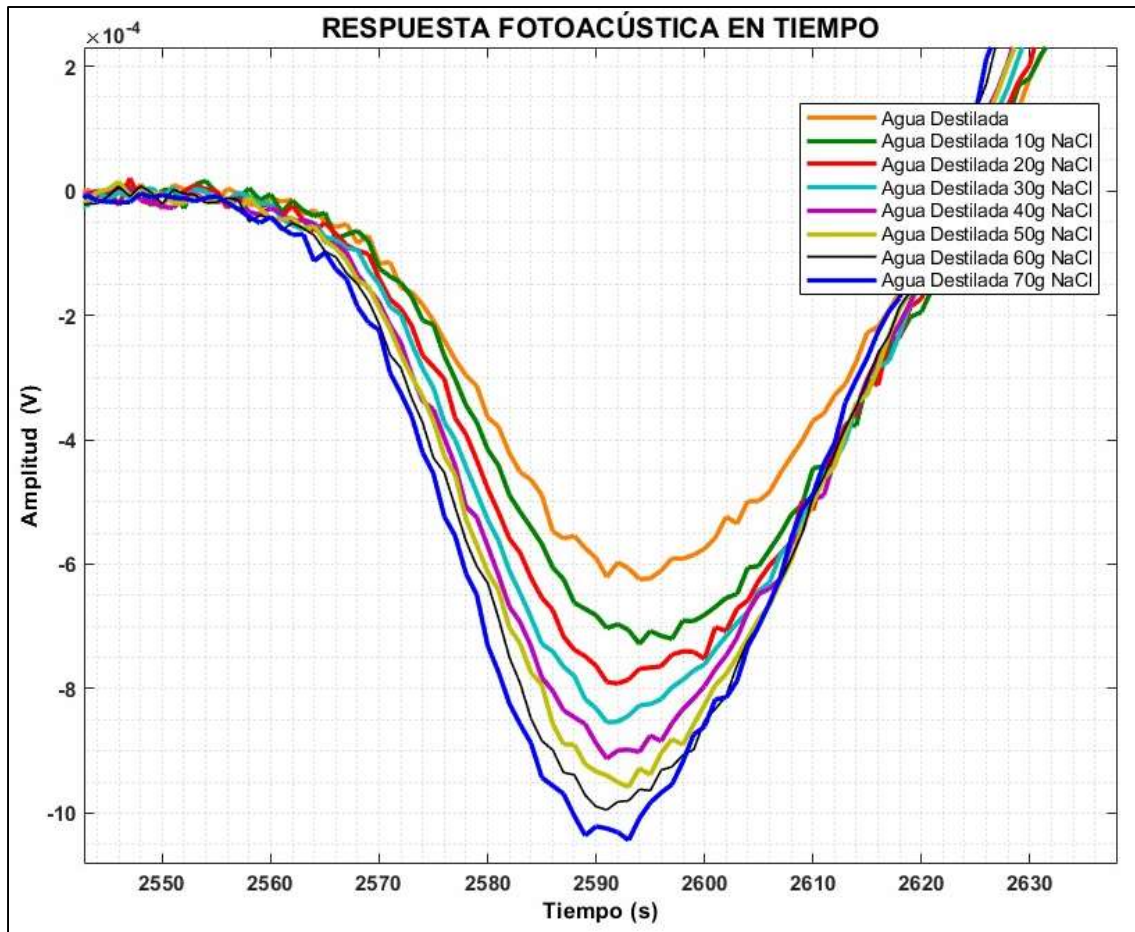


Figura 34. Arribo de la señal fotoacústica al variar la concentración de NaCl

Otra de las observaciones fue que a medida que se aumenta la concentración de cloruro de sodio en el agua tridestilada, la señal fotoacústica captada por el hidrófono tiene una mayor amplitud como se muestra a continuación.

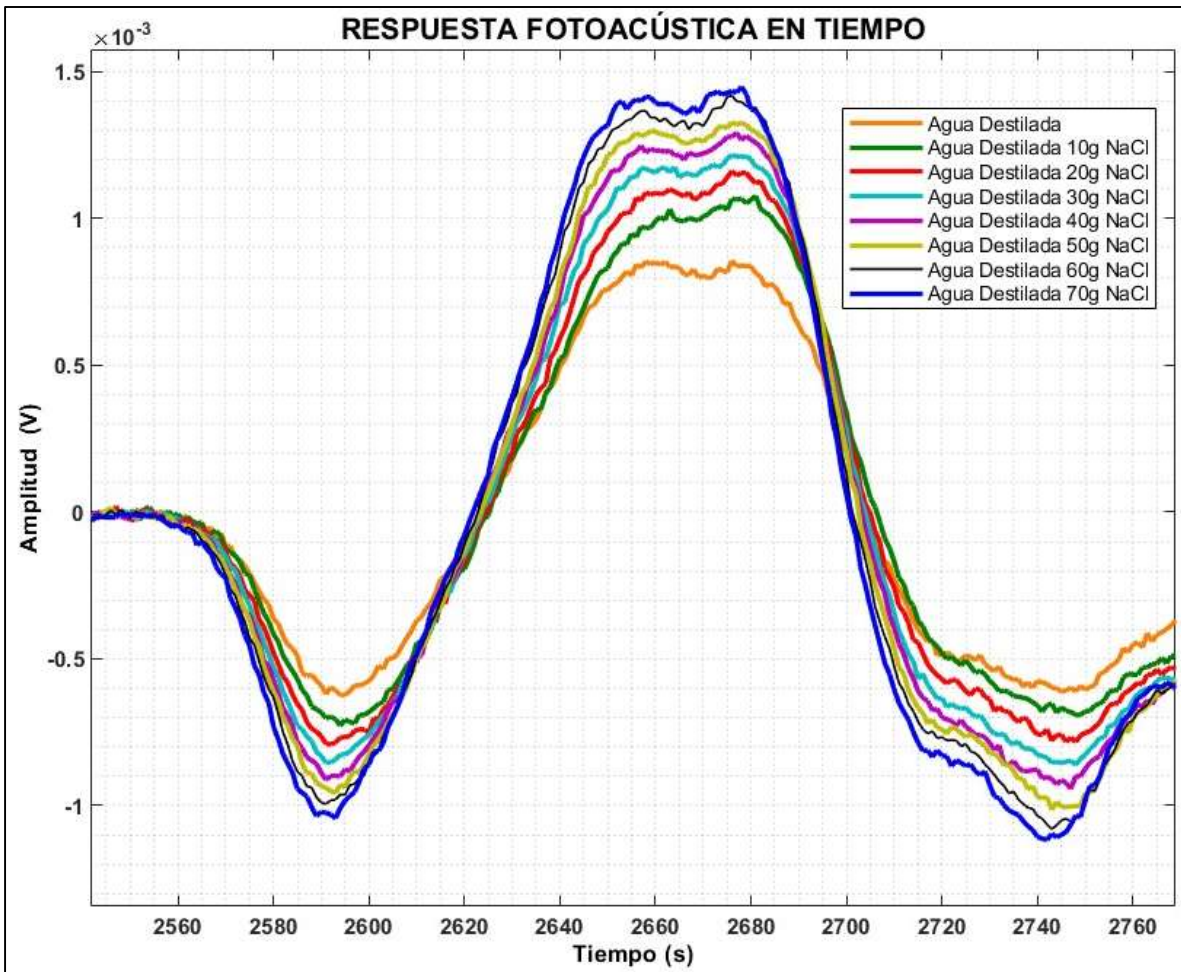


Figura 35. Amplitud de la señal fotoacústica registrada al aumentar la concentración de NaCl

Finalmente, con ayuda del análisis de correlación cruzada de señales se logra ver como a medida que se va aumentando la concentración de cloruro de sodio disuelto en agua tridestilada la señal fotoacústica en el dominio del tiempo es más diferente respecto a la señal de referencia que en este caso es la del agua tridestilada sin ningún contaminante, con lo anterior y como se muestra en la siguiente gráfica, la señal fotoacústica va cambiando a medida que se aumenta la concentración de cloruro de sodio.

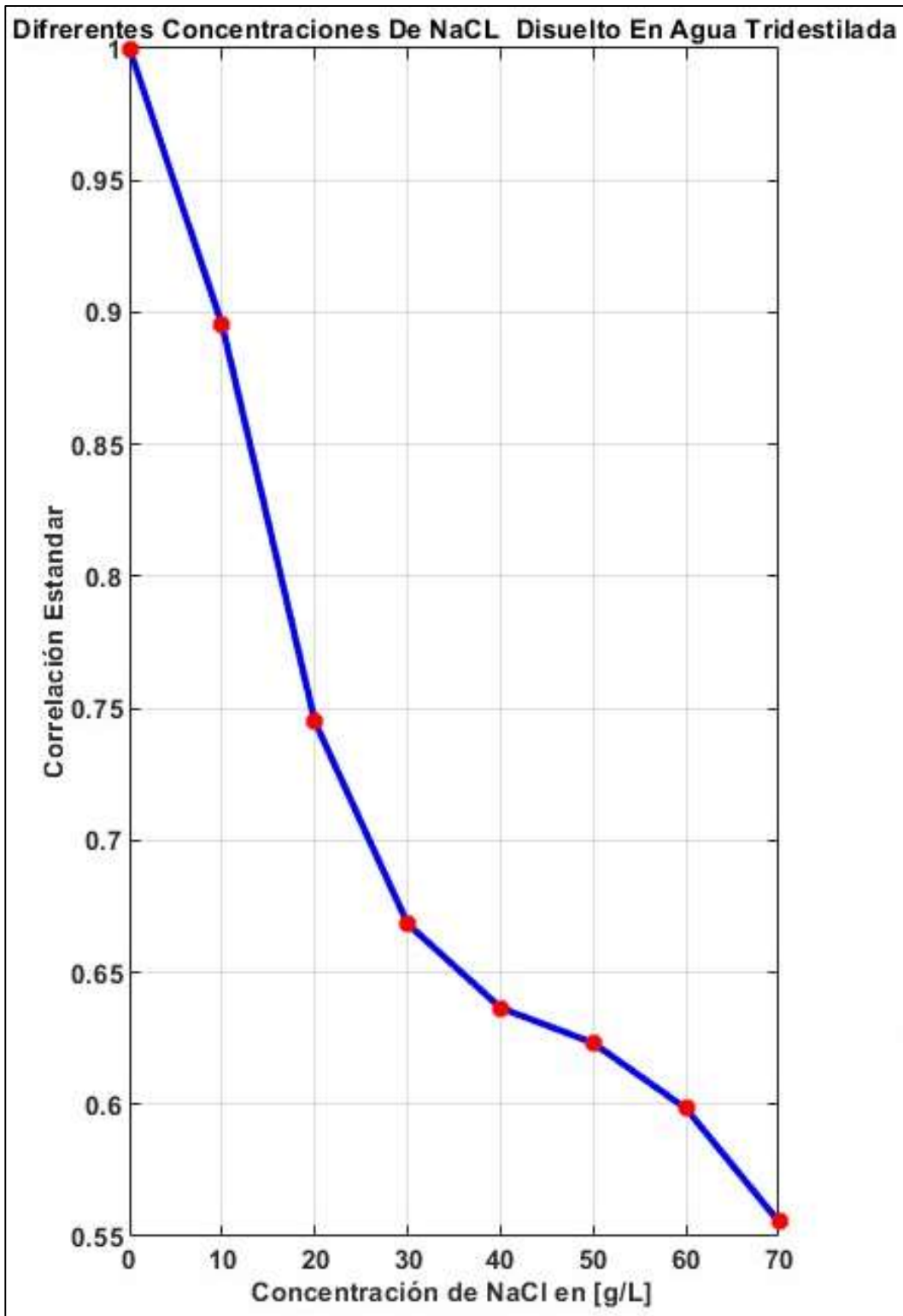


Figura 36. Grafica obtenida de la correlación estándar de las señales fotoacústicas obtenidas al aumentar la concentración de NaCl

Conclusiones

Recordando el objetivo general del proyecto de tesis que fue diseñar, fabricar y caracterizar con fotoacústica un hidrófono, además de utilizarlo para medir diferentes concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) disuelto en agua tridestilada, podemos formular las siguientes conclusiones.

Primero, al realizar el diseño se tuvieron algunas complicaciones tales como la falta de información documentada de los hidrófonos comerciales ya existentes y que se utilizaría para realizar el análisis benchmarking. Otra dificultad que se encontró fue el hecho de no contar con un equipo de varios integrantes a la hora de realizar los conceptos, al ejecutar esta tarea una sola persona se encuentra con el problema de cometer los mismos errores en cada uno de los conceptos y, aunque solo se realizaron dos conceptos se tornó una tarea difícil al no contar con distintas opiniones y es por eso que se requiere un equipo de diseño de al menos dos integrantes para que haya diversidad de ideas y conceptos, ya que como se dice coloquialmente, dos personas piensan más que una y esto se refleja en satisfacer las necesidades del cliente de una forma más rápida y eficiente siempre que se cuente con una buena o excelente organización. Por otro lado, el hecho de recopilar información de los clientes o usuarios finales a la hora de identificar las necesidades, ayudó bastante al momento de generar y fabricar los conceptos, cosas tales como el tipo de conexión que debe tener al osciloscopio, la facilidad de ensamble y manufactura, las dimensiones de la cerámica piezoeléctrica, las dimensiones deseadas por los usuarios, entre otras cosas, fueron de gran utilidad para generar los conceptos. En cuanto a la toma de decisiones, al seleccionar uno de los dos conceptos ayudó mucho recabar información acerca de los materiales que se querían utilizar debido a que de esta dependen cosas como el tiempo y costos de manufactura, herramientas a utilizar para la fabricación, las dimensiones que se pueden lograr de las piezas con cada material, entre otras cosas. Finalmente, cabe resaltar que el proceso de diseño de un producto se refleja demasiado, no solo en su fabricación, también en el producto terminado y su funcionalidad para los clientes que en este caso son los usuarios finales, por lo que al diseñar un producto se debe estructurar y llevar a cabo buen un proceso.

En cuanto el proceso de fabricación es indispensable mencionar que al realizar el diseño se tiene que verificar que las herramientas y materiales que se van a utilizar sean fáciles de conseguir, esto porque al fabricar las piezas se encontraron algunas dificultades por las dimensiones deseadas ya sea porque se necesitaban herramientas que no se encuentran fácil o simplemente que el taller de torno no contaba con ellas y se tenía que esperar un tiempo para adquirirlas. Por otra parte, considero que el tiempo de fabricación fue corto gracias a que se eligieron materiales que se maquinan fácilmente como lo es el cobre, el latón y el UHMW y muchos otros se encuentran y adquieren fácilmente. Agregando a lo anterior, en cuanto al proceso

de ensamble del hidrófono, considero que este se trata de una tarea sencilla gracias a que cada una de las piezas se diseñaron y fabricaron de tal forma que estas se acoplaran rápido y sin esfuerzos; solo presionando levemente, roscando y soldando con estaño puntos de fácil acceso.

Otra cosa que es importante mencionar es que el costo de fabricación del hidrófono fue de aproximadamente \$700.00 pesos mexicanos, sin tomar en cuenta el valor de las investigaciones previas que se utilizaron para desarrollarlo, lo anterior es para resaltar que el costo del hidrófono que se fabricó y caracterizó es mucho menor al precio en que se encuentran los hidrófonos comerciales, los cuales se encuentran entre 500 y 1000 dólares.

Finalmente, en cuanto a la caracterización y utilización del hidrófono con el método de fotoacústica, hay un par de cosas por mencionar. Primero la cuestión del tiempo que se llevó en realizar las mediciones, ya que se llevó un largo tiempo en ejecutarlas debido a que se requiere equipamiento que solo se encuentra en el laboratorio y a que había muchos usuarios en ese momento por lo que había que esperar turno. Por otro lado, se tuvo que diseñar varias veces el arreglo experimental hasta que se fue perfeccionando, esto porque al tratarse de una señal sonora generada al hacer incidir el haz de láser pulsado directamente a la muestra esta técnica es muy sensible porque la señal de sonido obtenida se debe en gran parte a las cosas que toca el haz de laser. Sin embargo, una vez que se perfeccionó el arreglo experimental, se contaba con el material y se diseñó una buena celda para almacenar las muestras, las mediciones se realizaron fácilmente. Como se mencionó antes, la técnica fotoacústica es muy sensible por su naturaleza y es por eso que a manera de propuesta, esta se puede ir perfeccionando con el diseño de algún mecanismo que mantenga fija la celda donde se almacena la muestra y se encuentra el hidrófono, de tal manera que cada que se quiera cambiar el líquido muestra, esta no varíe su posición inicial y el haz de laser siga incidiendo en la misma dirección de la celda y por ende la muestra; así como establecer un buen proceso de preparación de las muestras para que estas no se contaminen al realizarlo.

Referencias

- [1] Alvarez, F. (2017). *Instrumentación de un hidrófono en fibra óptica empleando un interferómetro tipo sagnac*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [2] Petrearse, R. (2017). *Construcción e instrumentación de hidrófono óptico*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [3] L. Butler, J., & H. Sherman, C. (2016). *Transducers and arrays for under water sound*. Cohasset: Editorial Board.
- [4] Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (Quinta ed.). Impreso en México: The McGraw-Hill Companies.
- [5] Morris, R. (2009). *Fundamentos del diseño de productos*. Barcelona: Parramón Ediciones.
- [6] Gibbs, F. (2022). *Modelado y caracterización de cerámicas piezoeléctricas libres de plomo para su aplicación en un motor piezoeléctrico ultrasónico*. Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [7] Centro de Ciencias Genómicas UNAM. (26 de Abril de 2023). *Pablo Vinuesa: Centro de Ciencias Genómicas UNAM*. Obtenido de Centro de Ciencias Genómicas UNAM Web Site: <https://www.ccg.unam.mx/>
- [8] López, R. (2011). *Síntesis y caracterización de materiales piezoeléctricos libres de plomo*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [9] Carreño, B. (2021). Effect of antimony content on electrical and structural properties of $0.98(\text{K}0.48\text{Na}0.52)0.95\text{Li}0.05\text{Nb}1-x\text{SbxO}3-0.02\text{Ba}0.5(\text{Bi}0.5\text{Na}0.5)0.5\text{ZrO}3$. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 60, 266-272.
- [10] Marin, E. (2008). Escuchando la luz: breve historia y aplicaciones del efecto fotoacústico. *Latin-American Journal of Physics Education*, 209-215.
- [11] Cedillo, J. (2021). *Alcances de la fotoacústica de láser pulsado para identificar adulteración en matrices líquidas*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- [12] Cusato, L., & M., E. (2017). Caracterización de líquidos por técnica fotoacústica: estudios de sensores piezoeléctricos de banda ancha. *Revista Elektron*, 08-15.
- [13] 3Blue1Brown Español. (08 de Junio de 2023). ¿Qué es la Transformada de Fourier? Una introducción visual. Estados Unidos.
- [14] The MathWorks, Inc. (07 de Junio de 2023). *Transformadas de Fourier: MathWorks*. Obtenido de MathWorks Web Site: <https://la.mathworks.com>

- [15] Science Direct. (20 de Agosto de 2023). *Correlacion cruzada: Science Direct*.
Obtenido de Science Direct Web Site: <https://www.sciencedirect.com>
- [16] Swarna, G. (20 de Julio de 2023). *Cross Correlation Function: Tutorialspoint*.
Obtenido de Tutorialspoint Web site: <https://www.tutorialspoint.com>
- [17] Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. (20 de Enero de 2023).
Hydrophone Types 8103, 8104, 8105 and 8106: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. Obtenido de Brüel & Kjær Web Site:
<https://www.bksv.com/es>
- [18] ZETLAB. (23 de Enero de 2023). *Hidrófonos de embutir y sumergibles: ZETLAB*. Obtenido de ZETLAB Web Site: <https://zetlab.com>
- [19] SEIS TECH. (20 de Enero de 2023). *Miniature hydrophone YS-3000: SEIS TECH*. Obtenido de SEIS TECH Web site: <https://www.seis-tech.com>
- [20] Ocean Sonics. (20 de Enero de 2023). *Smart hydrophones: Ocean Sonics*.
Obtenido de Ocean Sonics web site: <https://oceansonics.com>
- [21] Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. (26 de Enero de 2023).
Hidrófono Esférico modelo 8105: Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S. Obtenido de Brüel & Kjær Web Site:
<https://www.bksv.com>

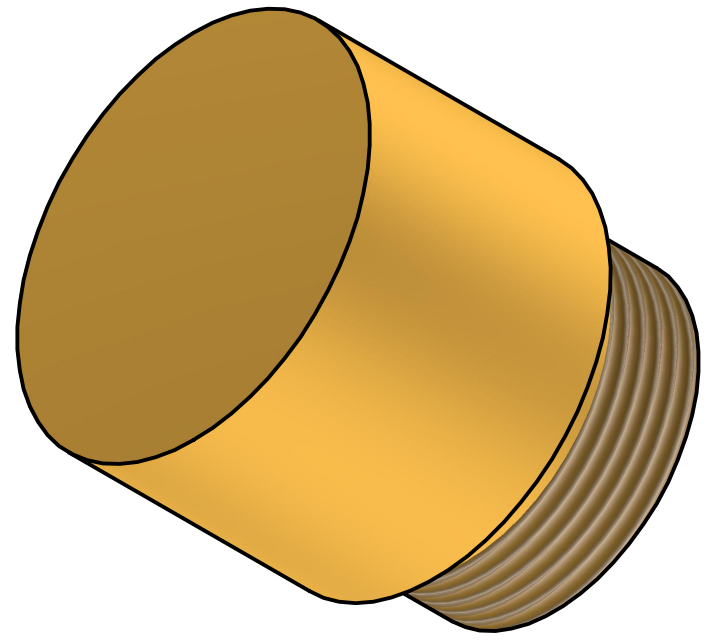
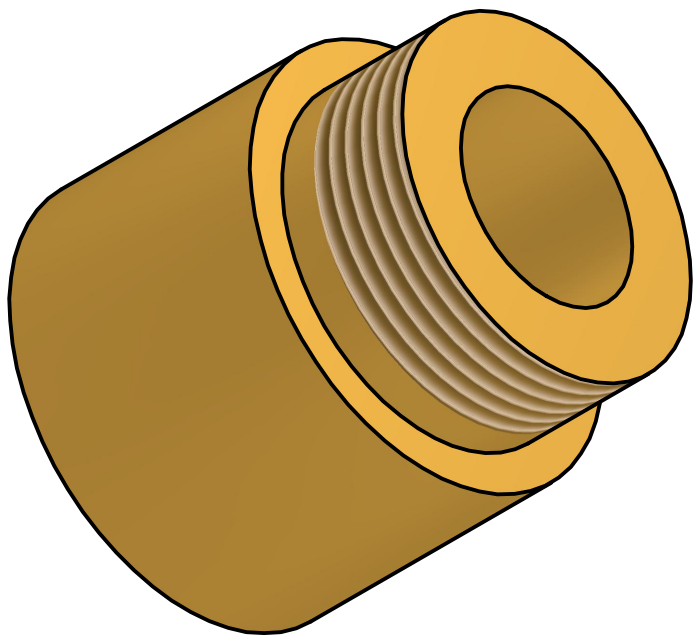
Anexos

Planos de piezas mecánicas del hidrófono

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

D

D

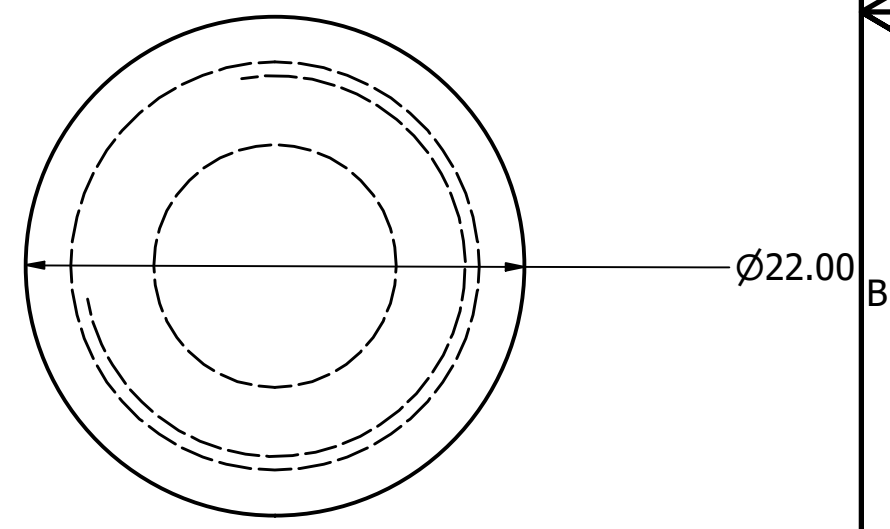
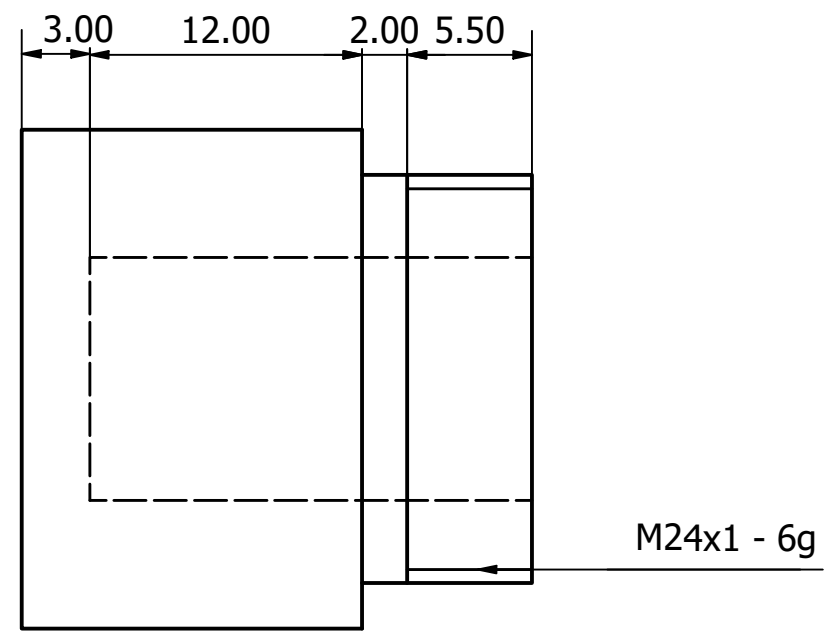
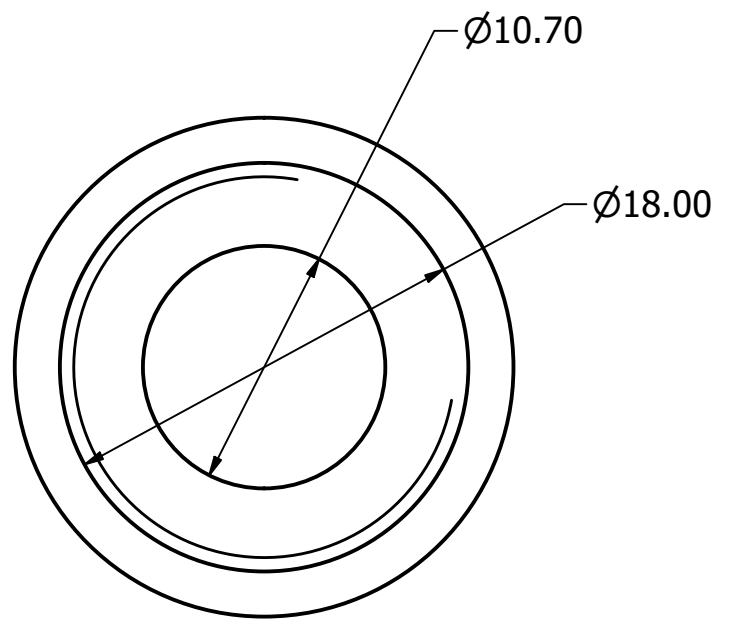


C

C

B

B



B

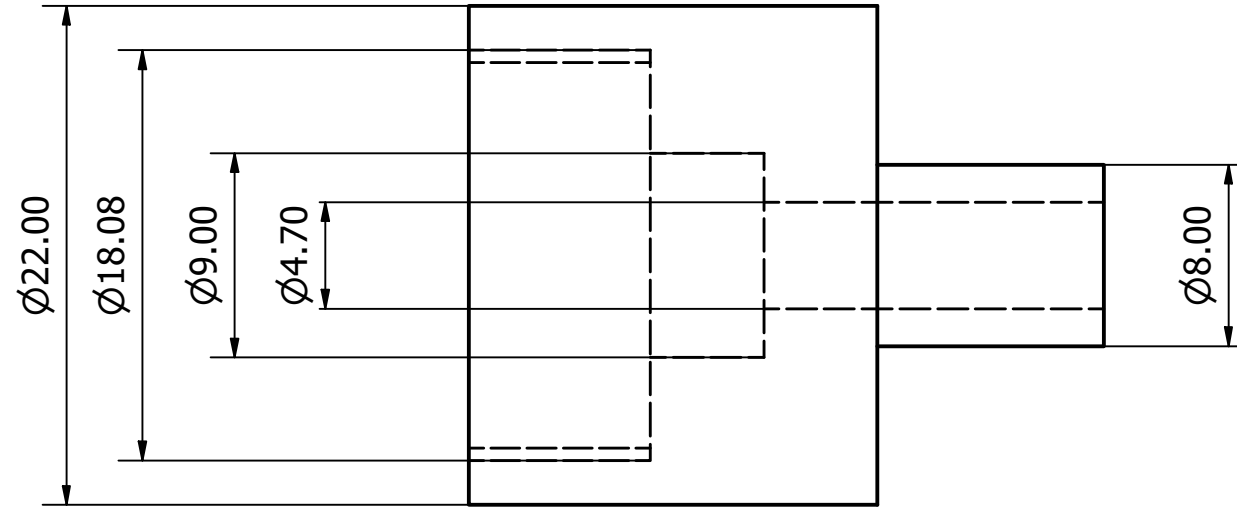
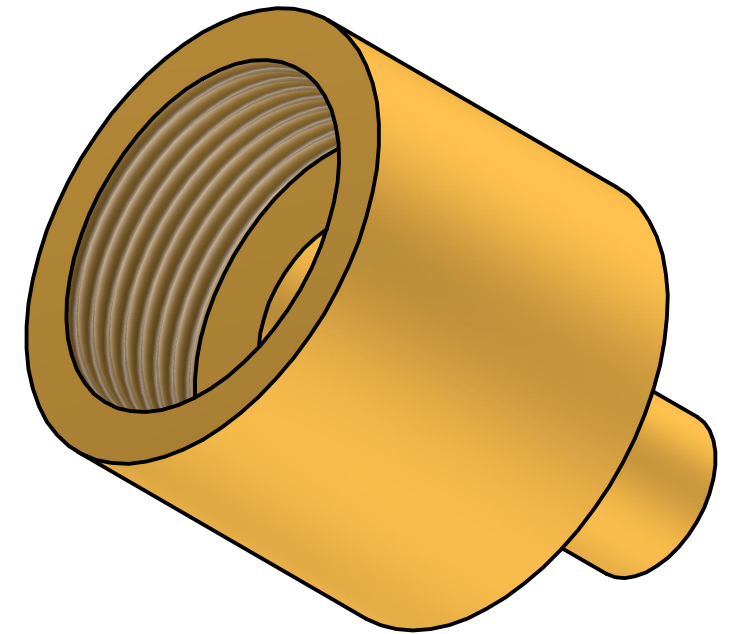
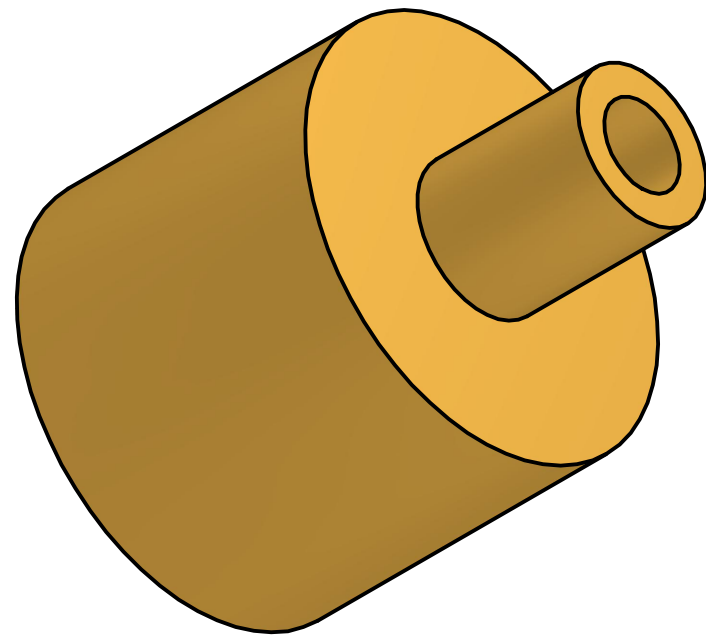
B

A

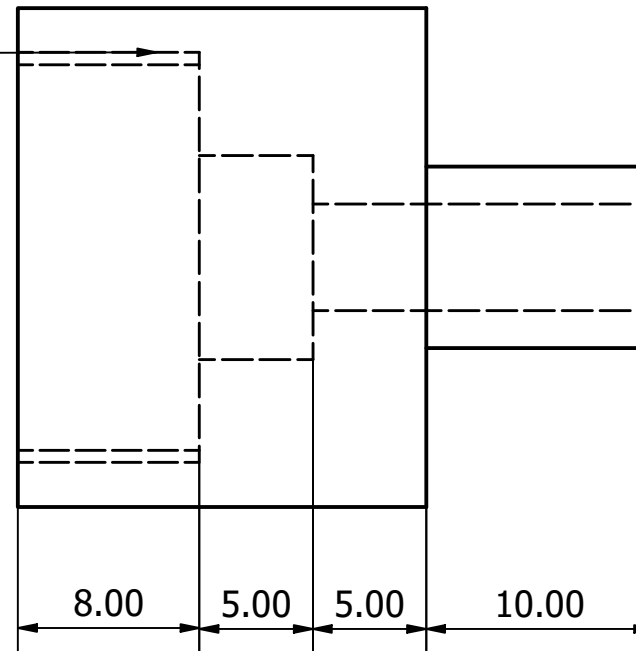
A

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

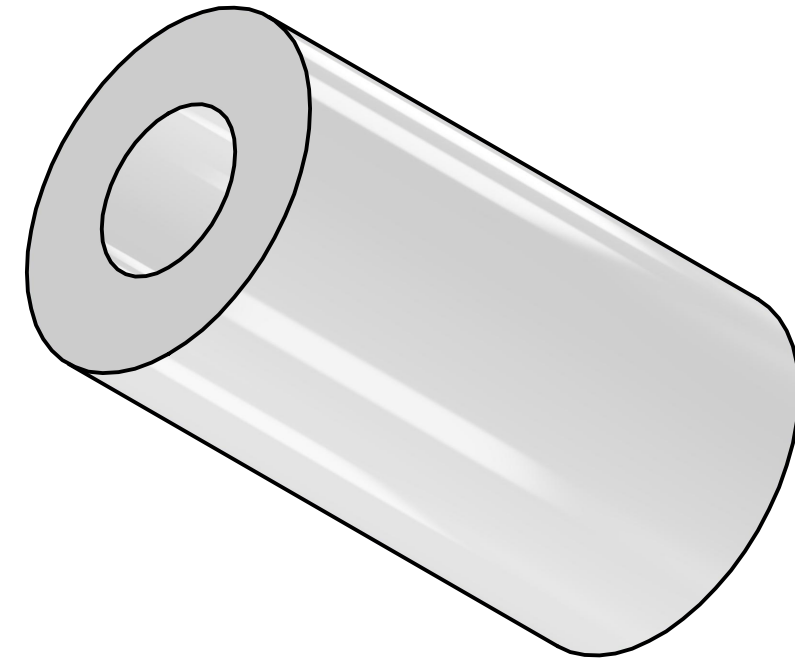
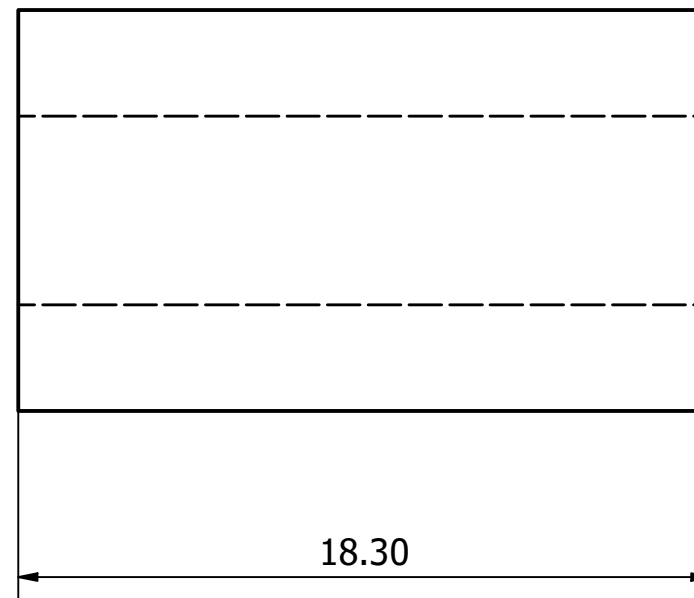
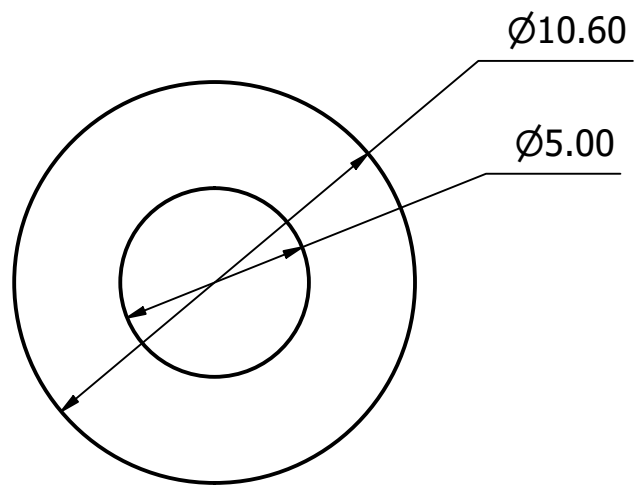
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 1	
Material: Latón	Escala: 3:1	Edición 1	Hoja 1
	Unidades: [mm]		



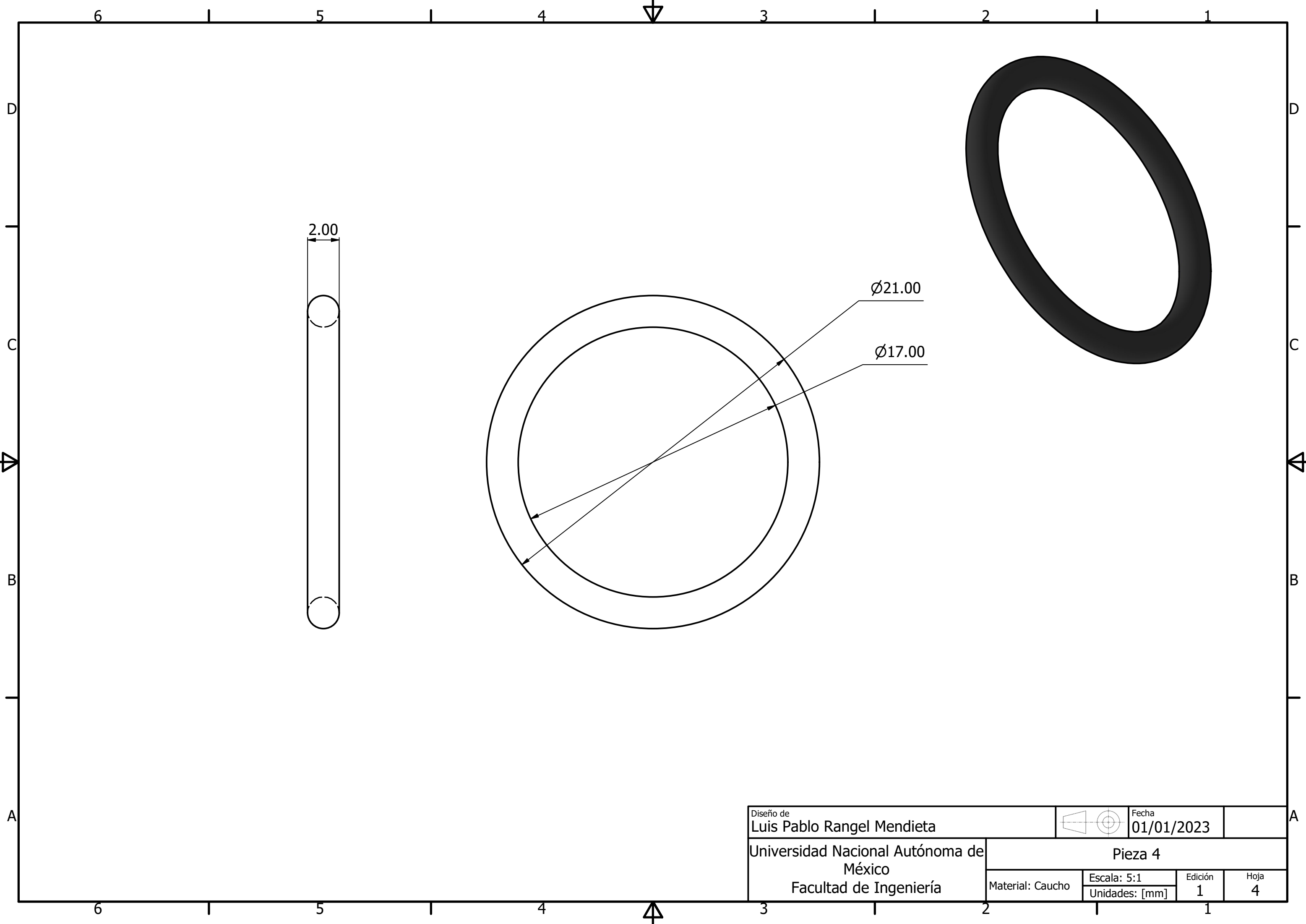
M24x1 - 6H



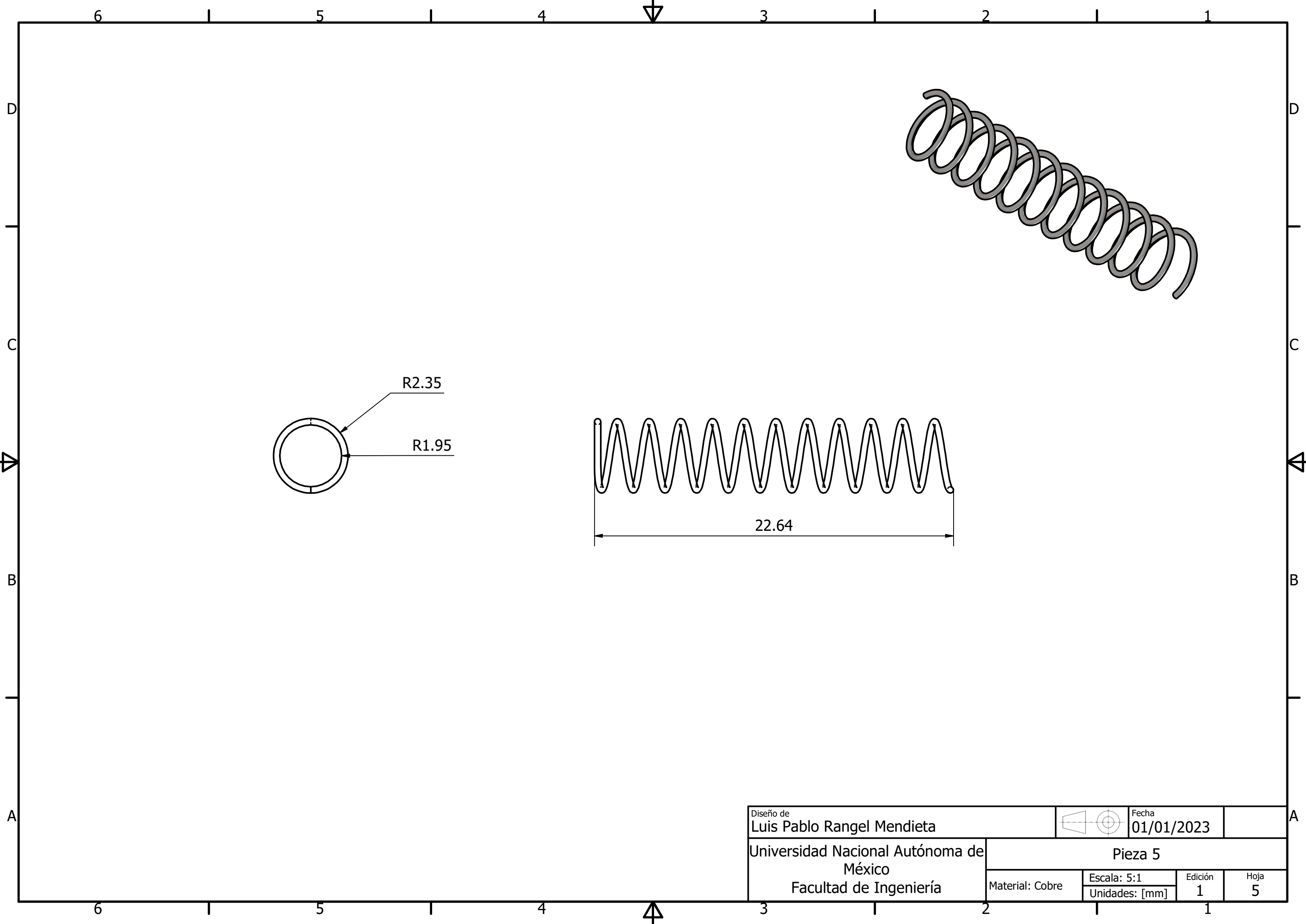
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 2	
Material: Latón	Escala: 3:1	Edición 1	Hoja 2
	Unidades: [mm]		



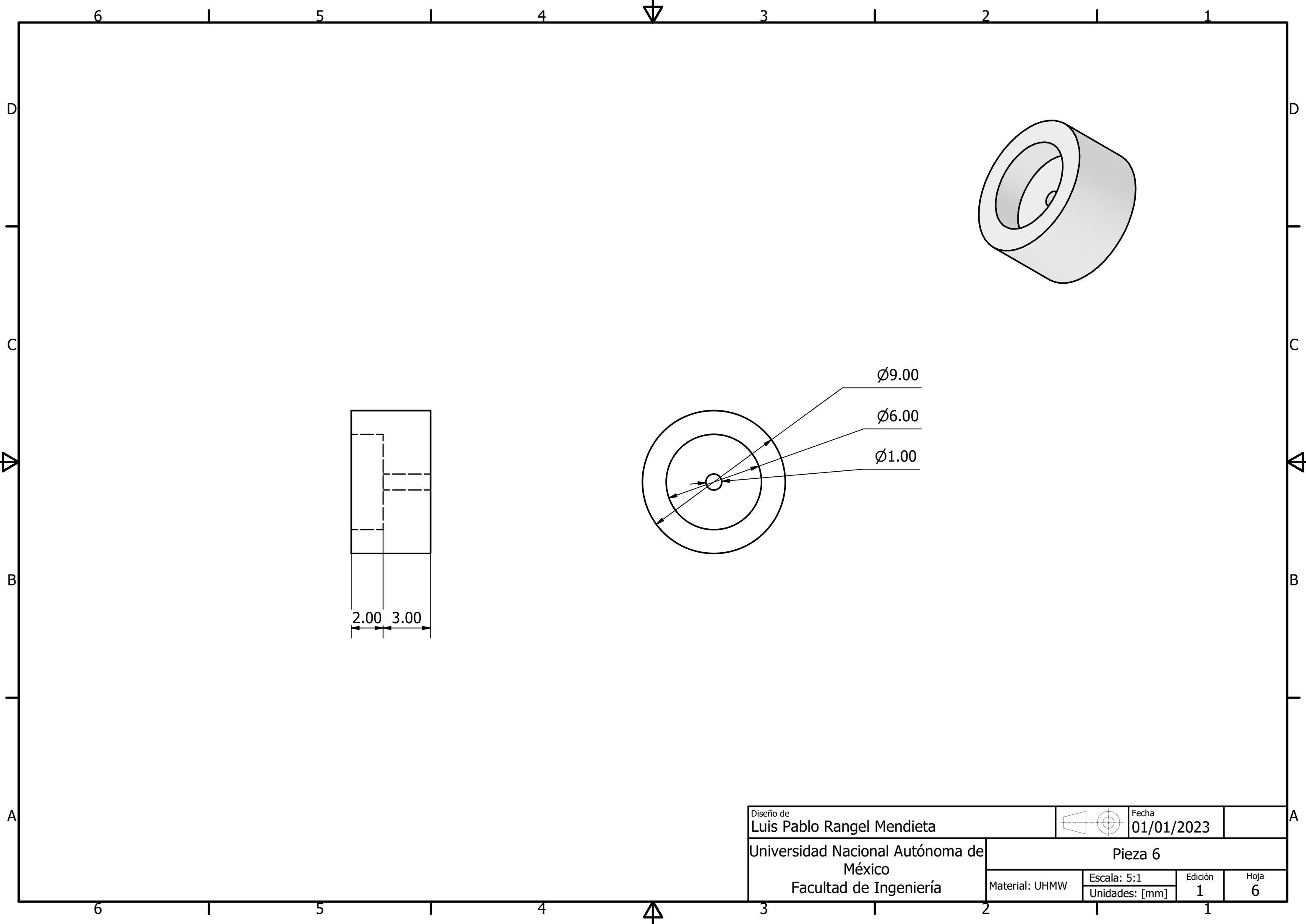
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 3	
Material: UHMW	Escala: 5:1	Edición 1	Hoja 3
	Unidades: [mm]		



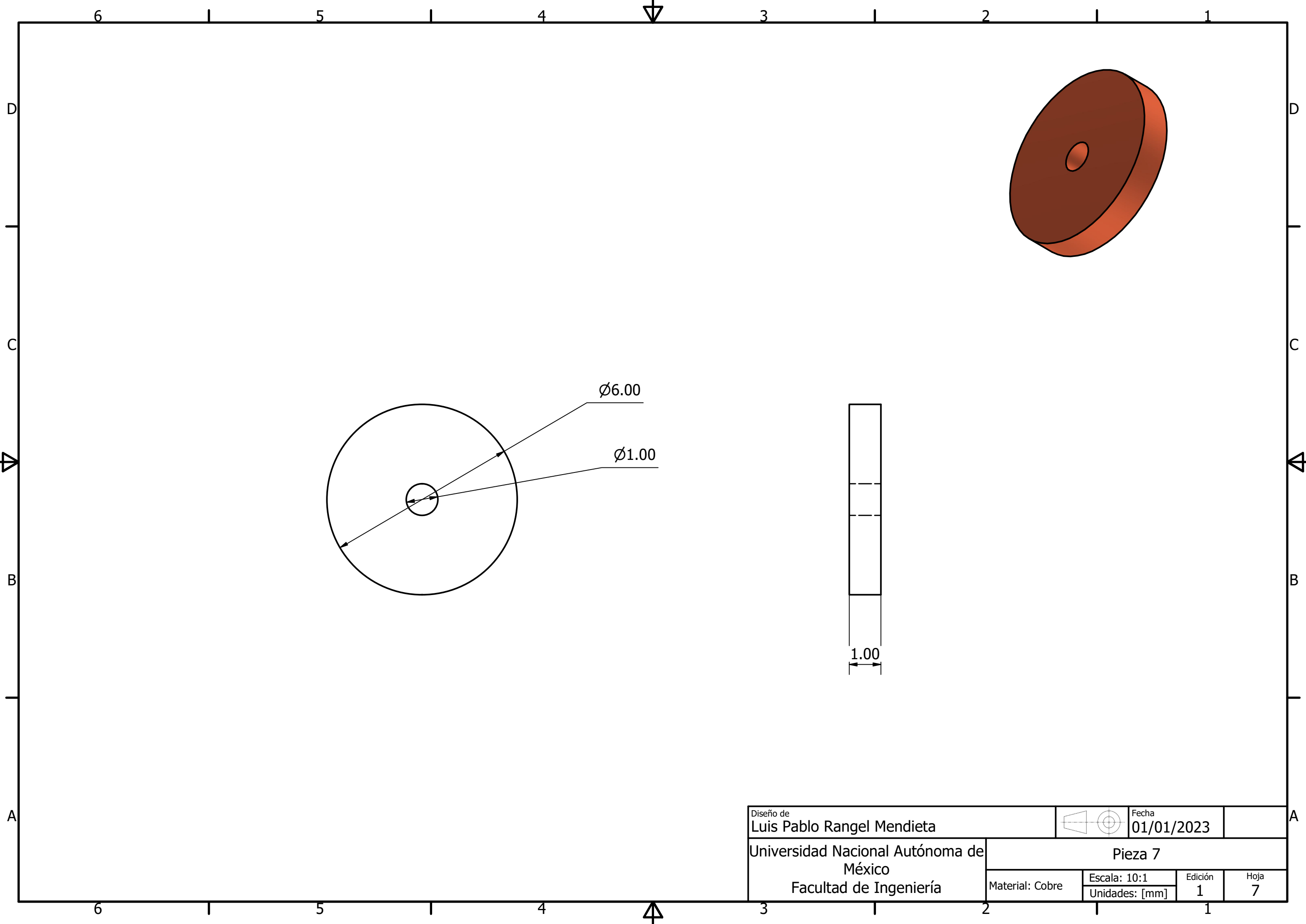
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 4	
Material: Caucho	Escala: 5:1	Edición 1	Hoja 4
	Unidades: [mm]		



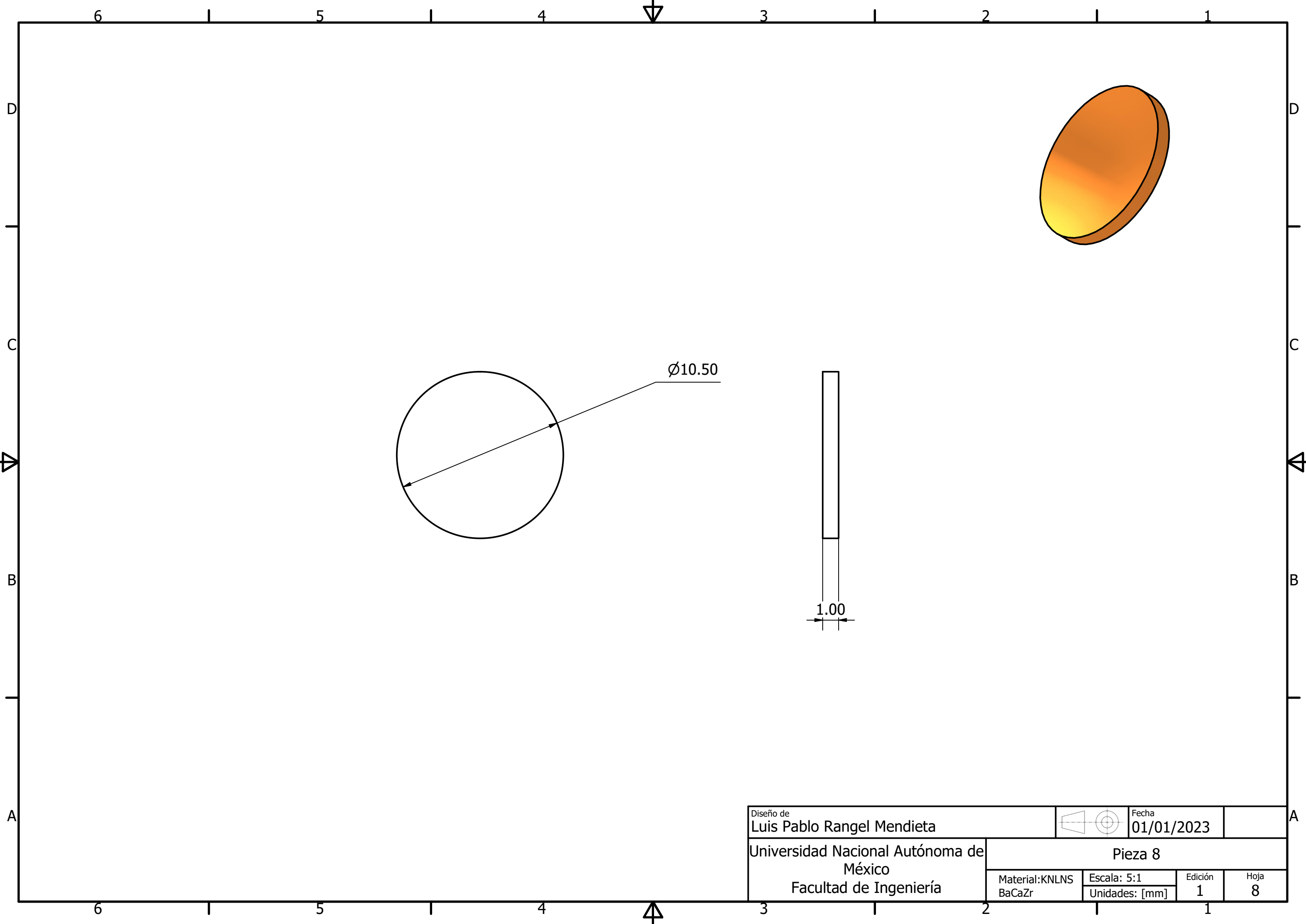
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 5	
Material: Cobre	Escala: 5:1	Edición 1	Hoja 5
	Unidades: [mm]		



Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 6	
Material: UHMW	Escala: 5:1	Edición 1	Hoja 6
	Unidades: [mm]		

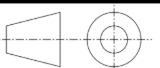


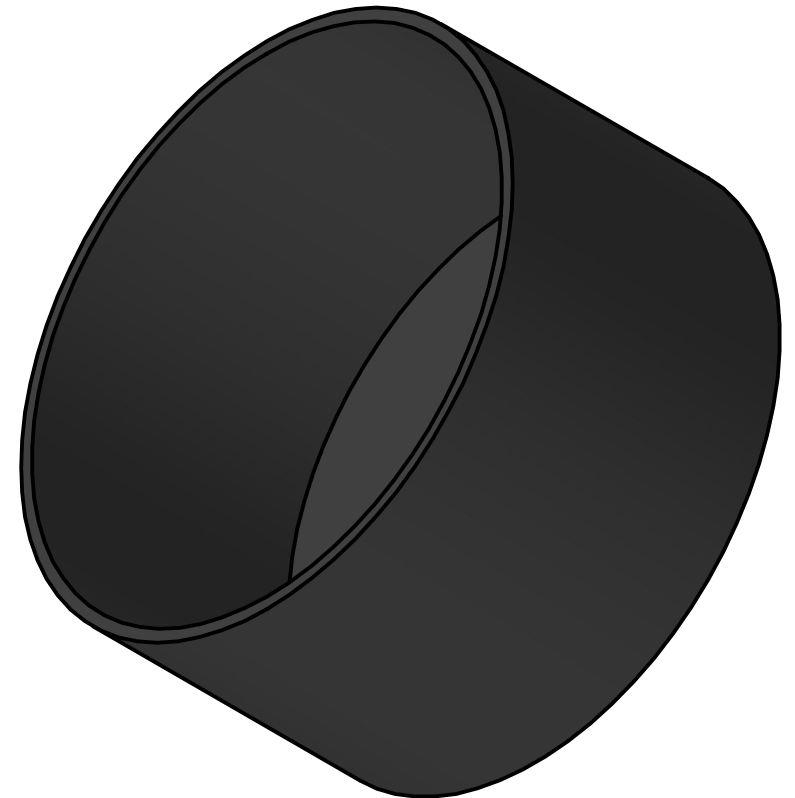
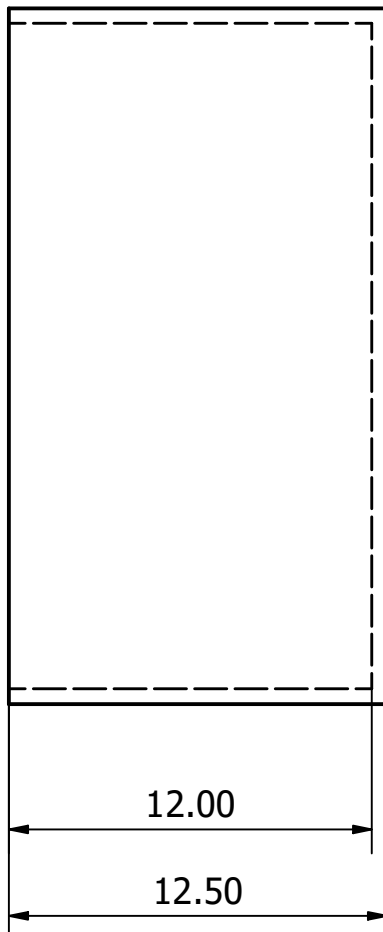
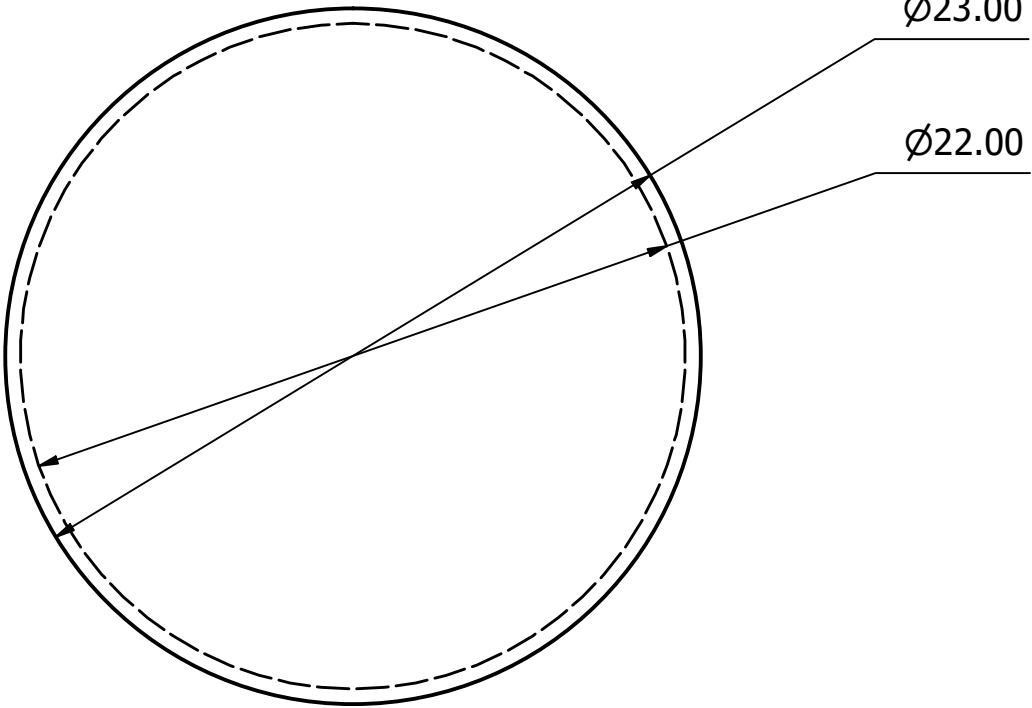
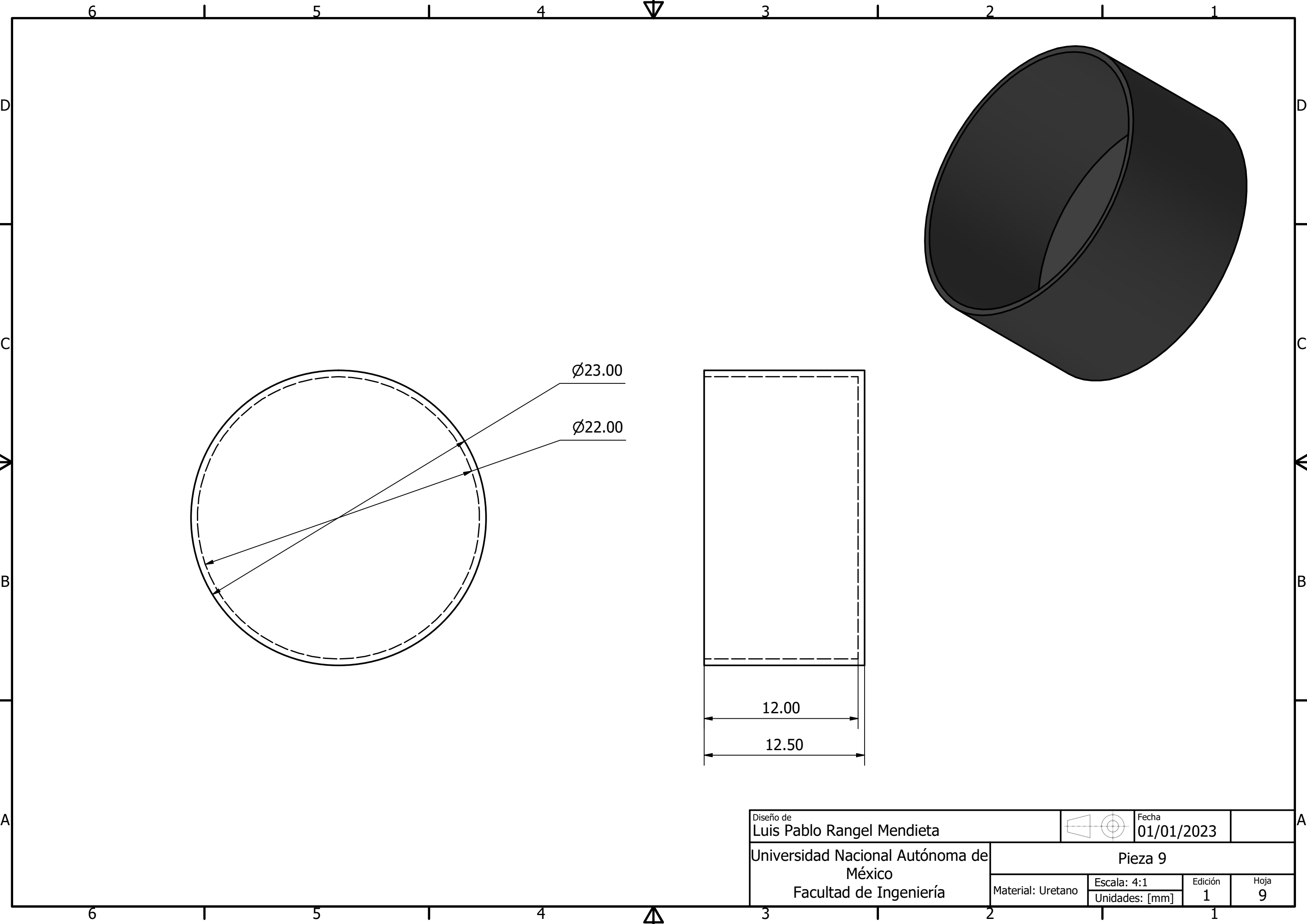
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 7	
Material: Cobre	Escala: 10:1	Edición 1	Hoja 7
	Unidades: [mm]		



Ø10.50

1.00

Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta				Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 8			
Material:KNLNS BaCaZr		Escala: 5:1 Unidades: [mm]		Edición 1	Hoja 8



Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 9	
Material: Uretano	Escala: 4:1	Edición 1	Hoja 9
	Unidades: [mm]		

Planos de piezas mecánicas de la celda de acrílico empleada en el arreglo experimental

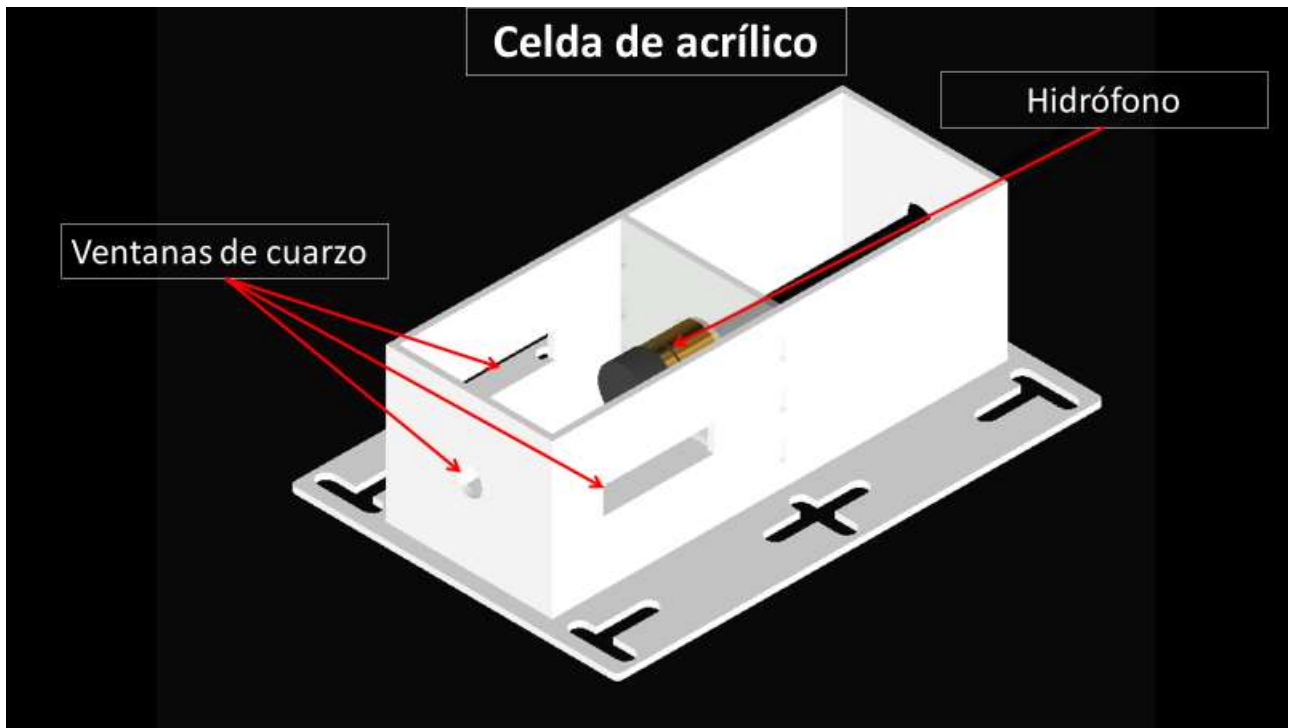
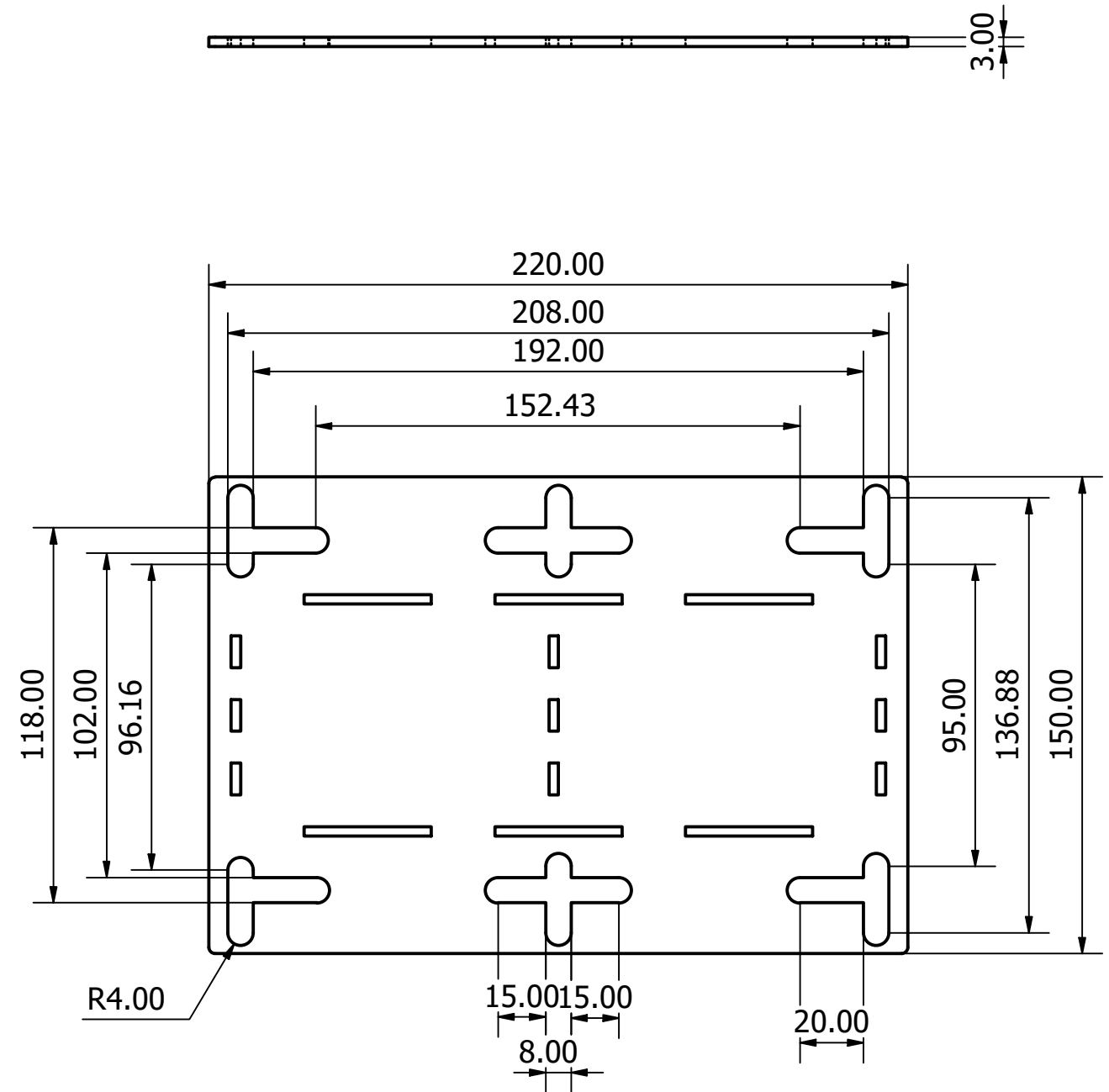
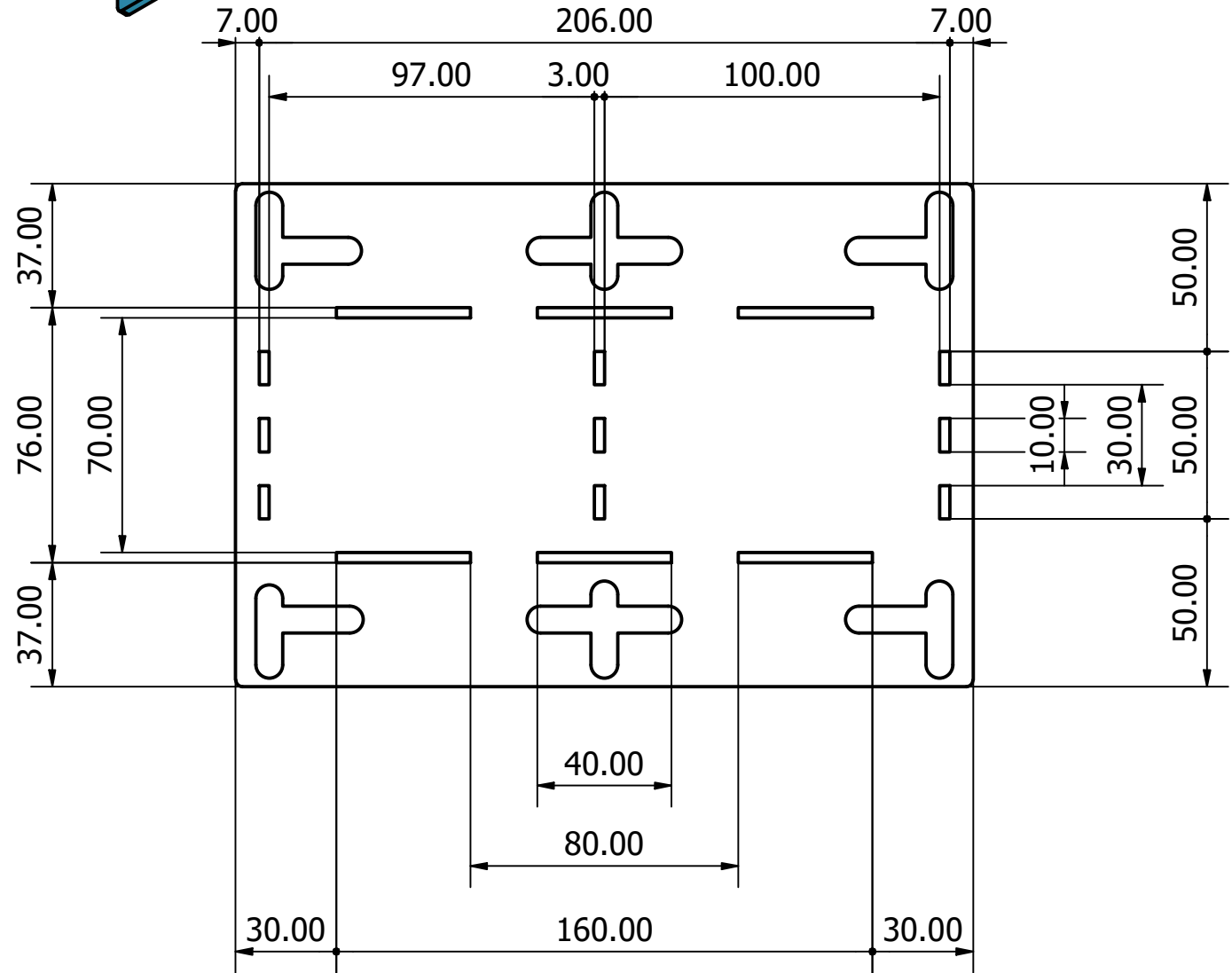
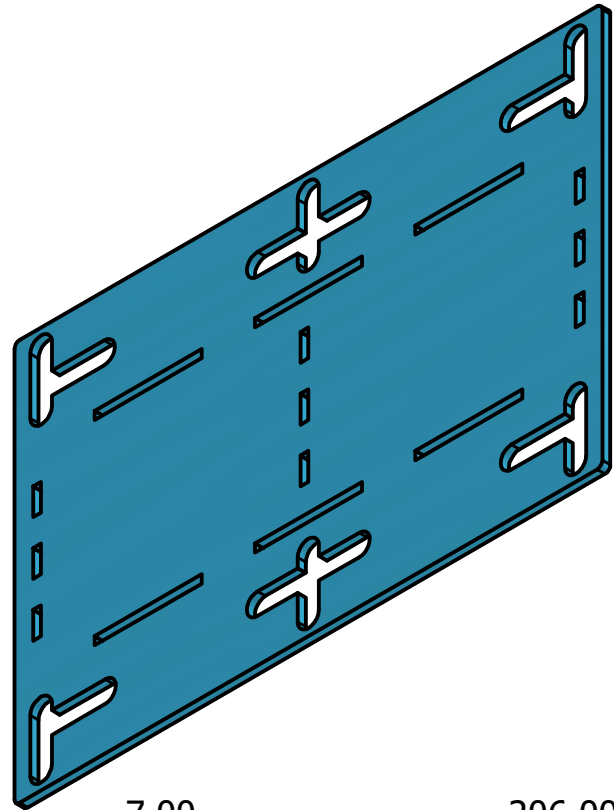
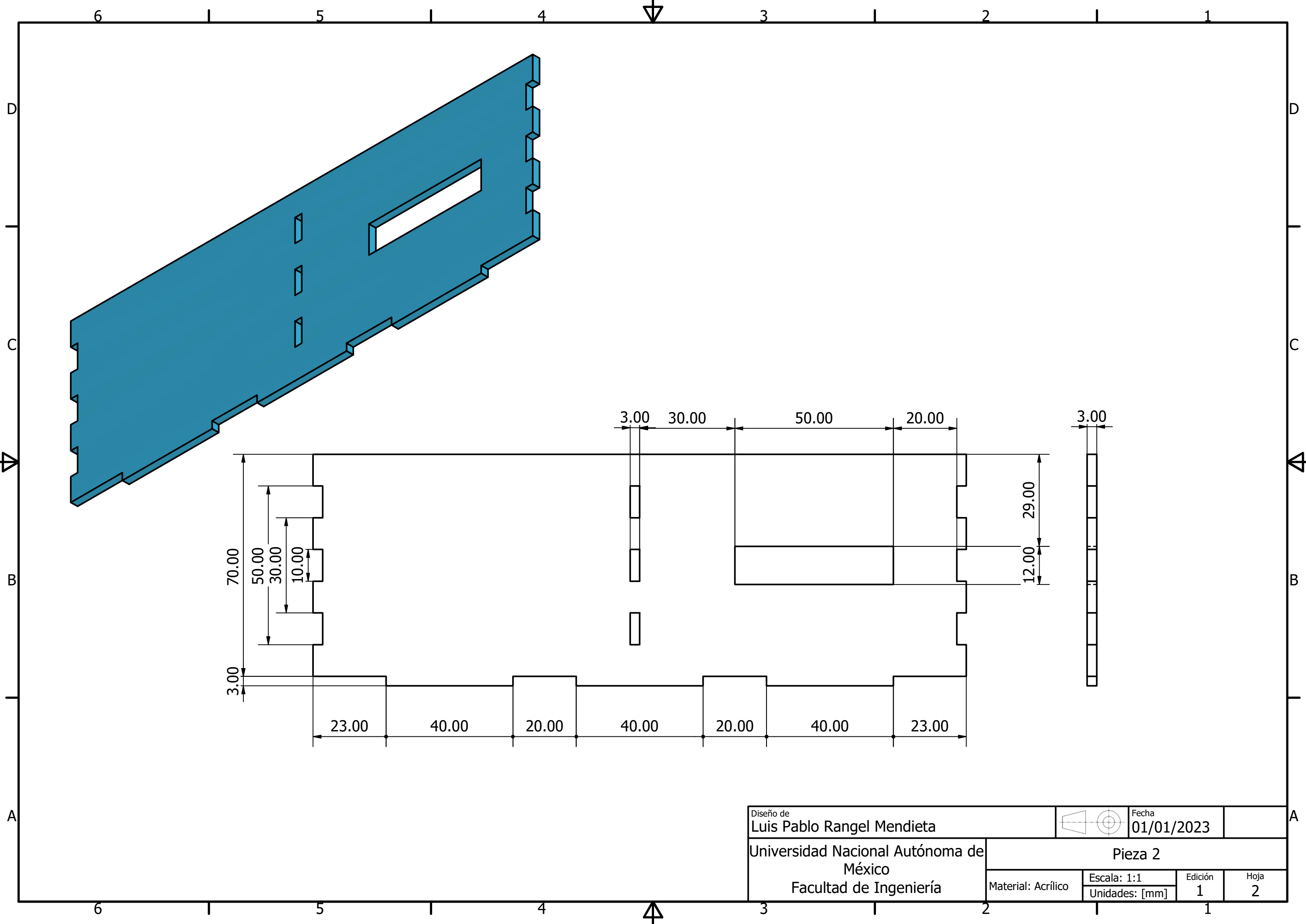


Figura 42. Celda de acrílico diseñada para el arreglo experimental.

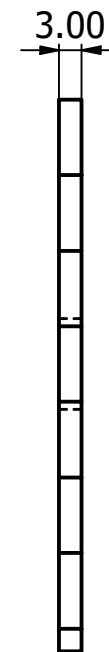
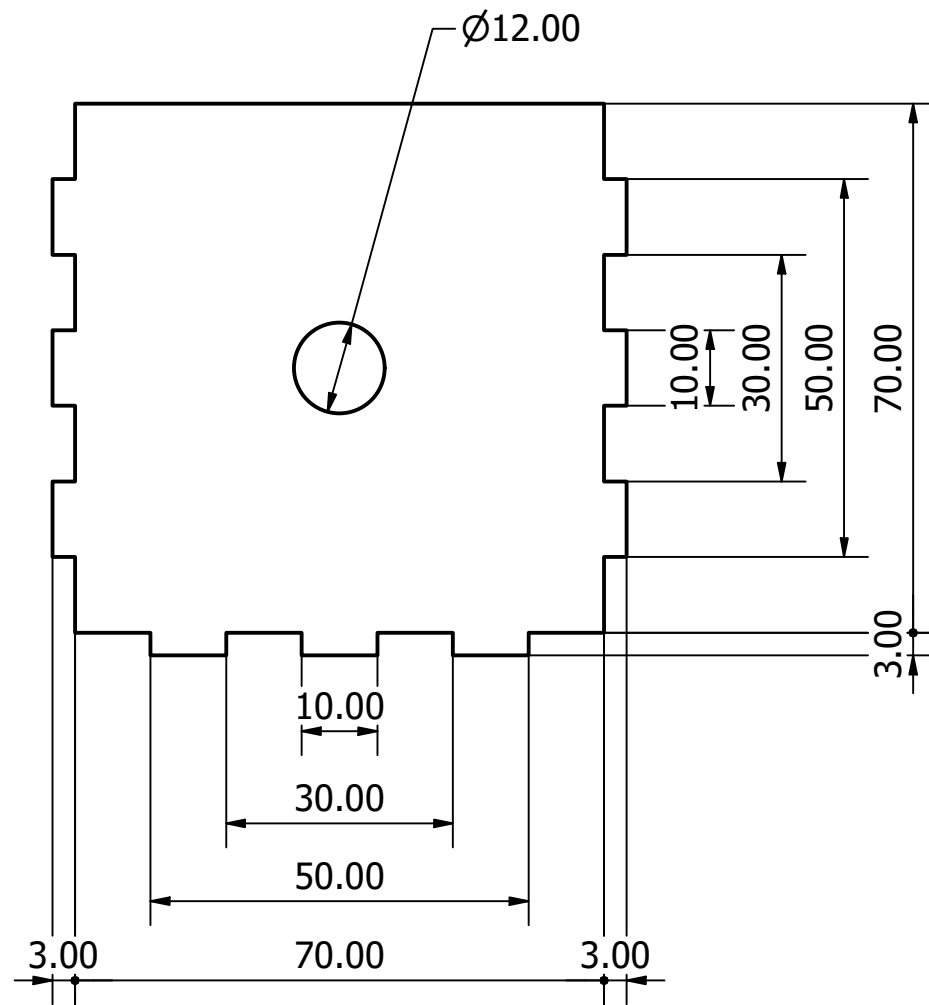
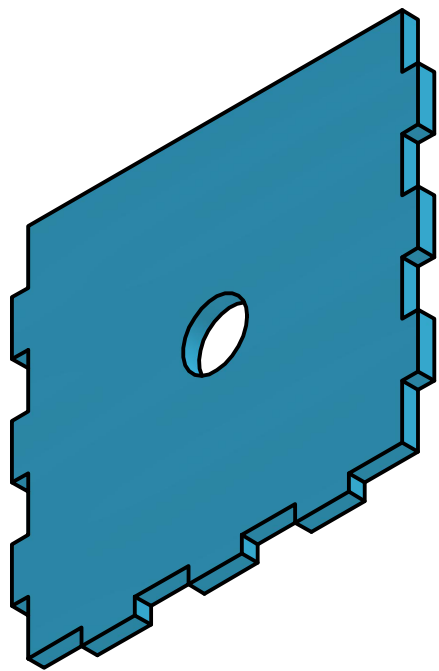
Nota: La pieza número 2 se fabrica dos veces para realizar el ensamble de la celda.



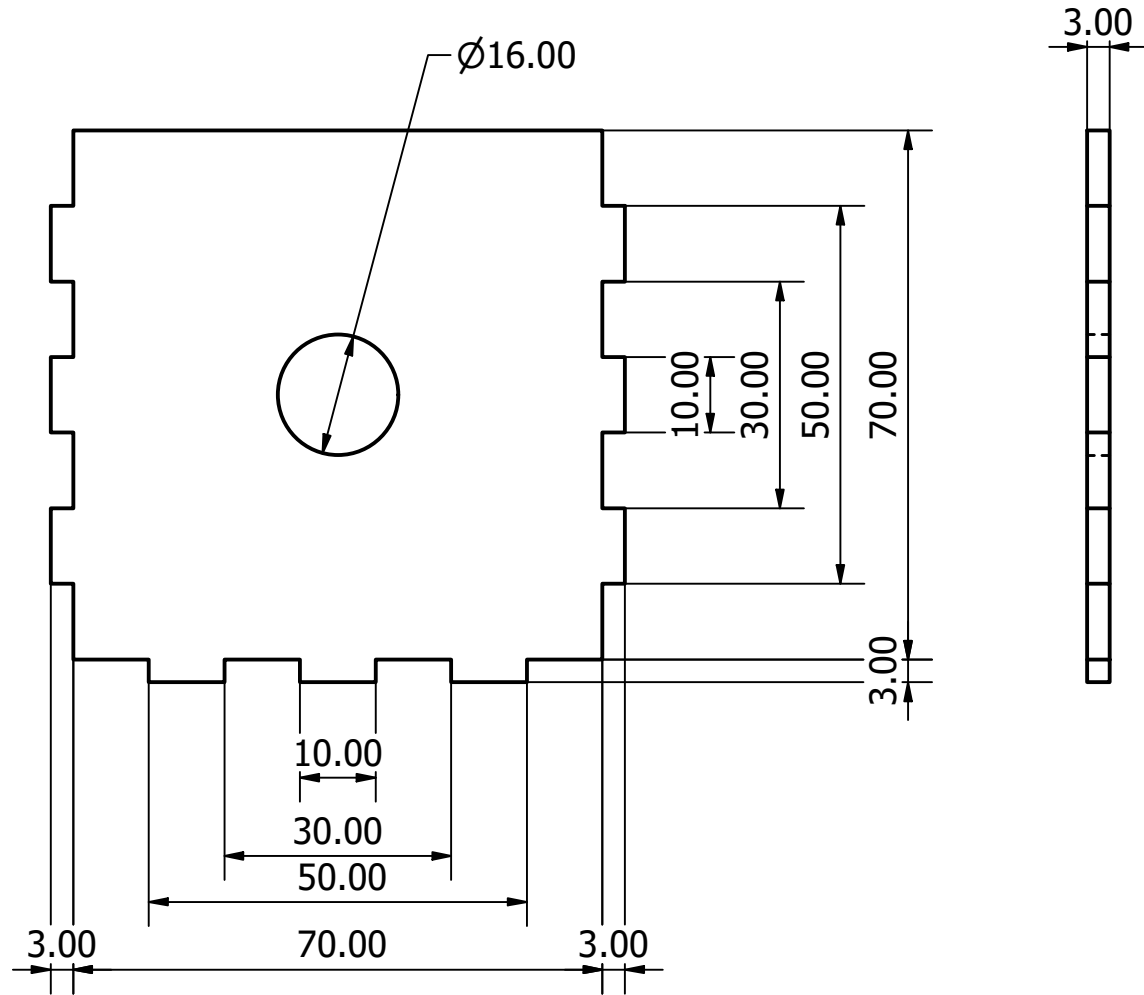
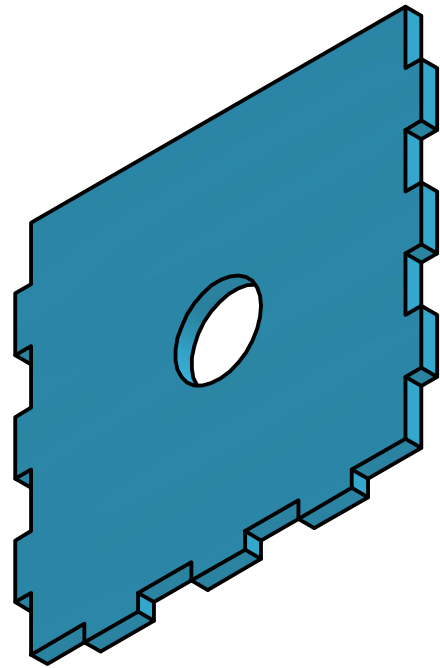
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 1	
Material: Acrílico	Escala: 1:2	Edición 1	Hoja 1
	Unidades: [mm]		



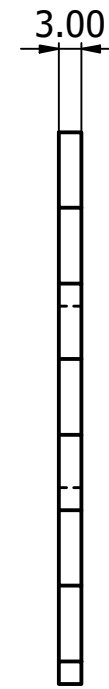
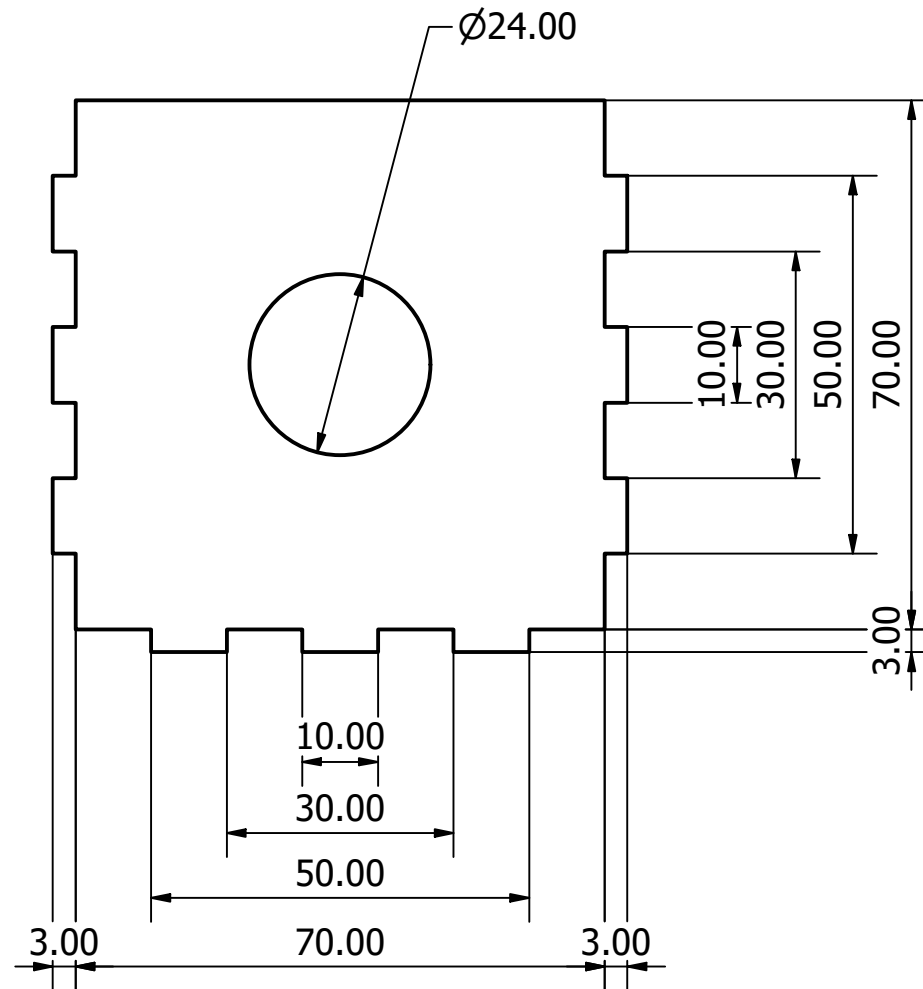
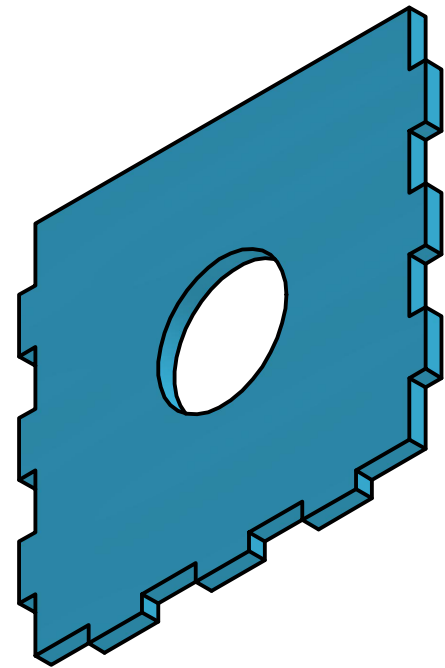
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 2	
		Material: Acrílico	Edición 1
		Escala: 1:1 Unidades: [mm]	Hoja 2



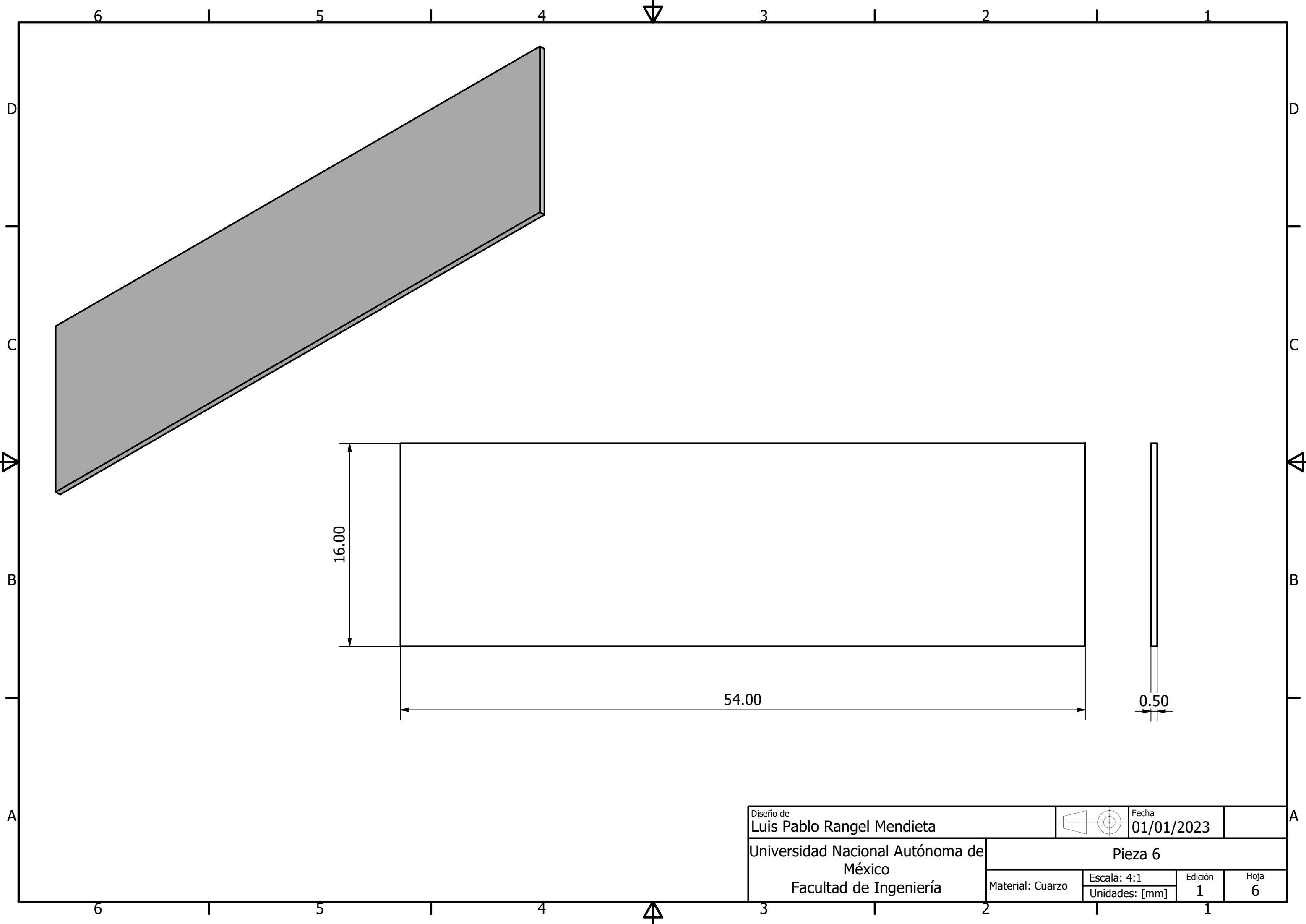
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 3	
Material: Acrílico	Escala: 1:1	Edición 1	Hoja 3
	Unidades: [mm]		



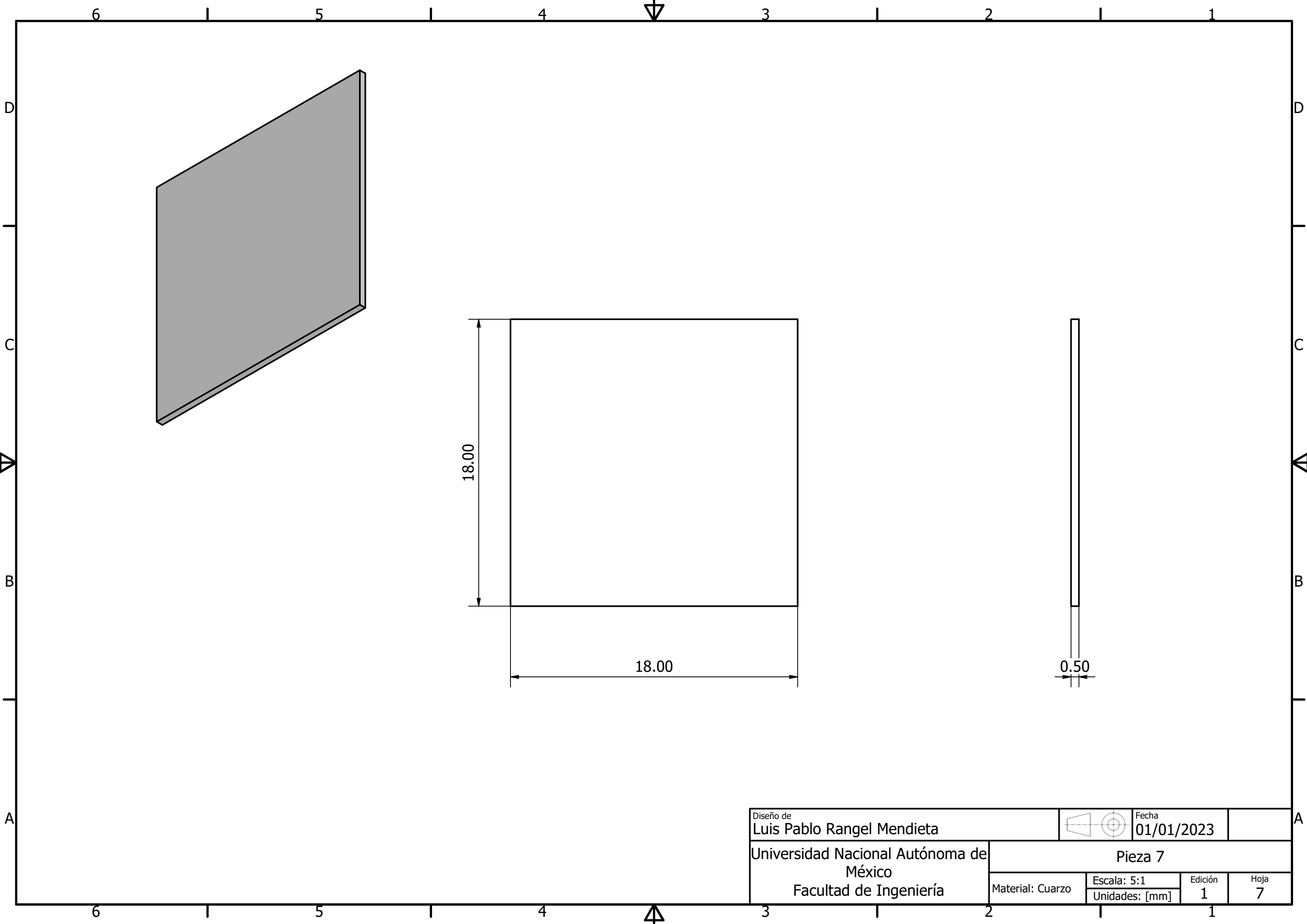
Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 4	
Material: Acrílico	Escala: 1:1	Edición 1	Hoja 4
	Unidades: [mm]		




Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 5	
Material: Acrílico		Escala: 1:1	Edición 1
		Unidades: [mm]	Hoja 5



Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta		Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ingeniería		Pieza 6	
Material: Cuarzo	Escala: 4:1	Edición 1	Hoja 6
	Unidades: [mm]		



Diseño de Luis Pablo Rangel Mendieta				Fecha 01/01/2023	
Universidad Nacional Autónoma de México		Pieza 7			
Facultad de Ingeniería		Material: Cuarzo	Escala: 5:1	Edición 1	Hoja 7
		Unidades: [mm]			