



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Dispositivo mecánico para acelerar la  
corrosión-erosión por cavitación  
hidrodinámica en muestras metálicas**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

Fernando Ramírez Céspedes

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Francisco Antonio Godínez Rojano



**Ciudad Universitaria, Ciudad de México., 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, TA100119, “Dispositivos mecánicos para producir cavitación hidrodinámica.” Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

Agradezco mucho a todos mis profesores y profesoras que a lo largo de la carrera me dotaron de su conocimiento.

Especial agradecimiento a mi tutor de tesis, el Dr. Francisco Antonio Godínez Rojano, cuyo apoyo fue muy importante para poder desarrollar este trabajo.

*Todo comienzo siempre desembocará en un final.  
Por supuesto a veces estamos ansiosos por empezar, sin embargo en ocasiones nos gustaría que  
nunca terminara.*

*En cualquier ciclo debemos tomarle importancia al camino.  
Esto es lo único que podemos disfrutar sin temor a que nos pueda ser arrebatado,  
hoy termina mi vida como estudiante y comienza una como ingeniero.*

## *Dos pilares para un corazón.*

Al acto de *amar* es muy complejo y tiene percepciones muy propias de cada individuo.

Sin embargo creo que algo que siempre te ayudara a *ser mejor* para ti mismo es que alguien te lo pueda brindar, por ejemplo tus padres. Ellos son los primeros que creen en ti y nunca te abandonarán ante los conflictos.

Me gustaría decir que tengo a los mejores padres, sin embargo existirían al menos dos detalles ahí. El primero es que no existe punto de comparación derivado de su *unicidad*. El segundo es que son humanos, debido a esto seguramente han cometido errores.

Lo que sí puedo decir con toda seguridad es que me aman, lo sé porque ellos me han convencido de que puedo conseguir el mundo. Soy muy afortunado de poder experimentar ese sentimiento de amor, porque se trata de algo *genuino*.

Yo ya deje de querer el mundo, hoy solo quiero demostrarles que su pequeño ha podido lograr algo que, más allá de su esfuerzo propio, ha sido gracias a los dos pilares que lo han sustentado a lo largo de su vida.

Hoy solo quiero agradecer por el regalo de tenerlos, yo prometo mantenerlos *eternamente* en mi corazón.

*Los amo.*

## *Gracias totales*

Lo que más atesorare de mi Universidad no es lo que encontré en las aulas o adentro de los libros.

Siempre será el café que me tome en compañía de un amigo, el consejo de un profesor, las caminatas a través de sus parques, las visitas a sus museos , jugar fútbol en sus canchas, las veces que reí o llore frente a la Biblioteca Central, besar algún amor debajo de la lluvia.

Me quedo con todo el conocimiento adquirido pero, las acciones antes mencionadas son las que en realidad me hicieron más humano y por ende vislumbran dentro de mi alma como momentos de plenitud.

A todas aquellas personas con las que conviví a lo largo de esta aventura no me queda más que agradecer por compartirme de su tiempo, las guardaré con cariño en mis memorias.

# ÍNDICE

## INTRODUCCIÓN

▪ Antecedentes.....	1
▪ Definición del problema.....	3
▪ Justificación.....	4
▪ Objetivo general.....	5
▪ Objetivos particulares.....	5

## CAPÍTULO 1: PRINCIPIOS BÁSICOS

▪ 1.1 Corrosión.....	6
▪ 1.2 Electroquímica.....	7
▪ 1.3 Cavitación.....	8
▪ 1.4 Cavitación hidrodinámica.....	9
▪ 1.5 Corrosión por cavitación.....	11
▪ 1.6 Erosión.....	12

## CAPÍTULO 2: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

▪ 2.1 Metodología de diseño.....	14
▪ 2.2 Diseño de concepto.....	15
▪ 2.3 Diseño de detalle.....	20
▪ 2.4 Dinámica del cierre súbito.....	24
▪ 2.5 Arreglos electroquímicos.....	27

## **CAPÍTULO 3: MANUFACTURA Y ENSAMBLE**

- 3.1 Metodología de manufactura..... 31
- 3.2 Prototipo funcional..... 32

## **CAPÍTULO 4: EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS**

- 4.1 Experimento de cavitación  
hidrodinámica..... 35
- 4.2 Análisis del chorro cavitante..... 37
- 4.3 Análisis de la velocidad de cierre de la pinza..... 41
- 4.4 Experimento de funcionamiento  
automático..... 43

**CONCLUSIONES..... 46**

**REFERENCIAS..... 49**

**APÉNDICE..... 52**



# INTRODUCCIÓN

## ANTECEDENTES

La pared de acero de una tubería siempre estará sujeta a corrosión interna. Dicha corrosión va a depender de la materia que se transporte a través de la tubería, que consisten en líquidos y/o gases. Estos serán causantes del desgaste por corrosión que sufra dicha pared.

Dos formas específicas de corrosión resultan de nuestro interés; corrosión uniforme y picaduras [1]. En el primer caso, tenemos que el grosor de la pared disminuye de una manera más o menos uniforme. Un problema derivado de esto es que no sería posible reparar la tubería; la pared se debilitará, colapsando cuando ya no sea capaz de soportar la presión interna. Por otra parte, en el segundo caso, se provocan picaduras en zonas puntuales y esto puede ocasionar fugas, lo que representa un problema. La corrosión uniforme es relativamente más fácil de controlar que la corrosión por picaduras, sin embargo, lo ideal sería evitar dichos fenómenos.

En la ingeniería e industria existen situaciones donde es necesario transportar fluidos a altas velocidades por medio de tuberías (existen casos particulares que incluyen tubos Venturi o placas de orificio utilizados como medidores y/o controladores de flujo). Estas condiciones representan caídas de presión (en ocasiones por debajo de la presión de vapor del líquido transportado) que originan cavitación y como consecuencia de esto se presenta el fenómeno de corrosión-erosión, provocando efectos indeseables en la superficie interna de los tubos. De manera general este fenómeno se da por efectos combinados de la acción química y la mecánica del flujo.

A través de la historia reciente, podemos observar que se han desarrollado numerosos sistemas, métodos y aparatos para detectar y medir los efectos de la corrosión y/o erosión en tuberías (bajo condiciones normales de operación o en reposo) con la intención de tener información sobre el estado de las tuberías y aplicar, en caso de resultar necesario, un mantenimiento preventivo o correctivo. Como prueba de esto se han desarrollado diversas patentes destinadas a la inspección/monitoreo/medición de la corrosión acelerada por medio de un flujo en tuberías, cada una de ellas presenta particularidades, ventajas y limitantes [2-7].

¿Sería de utilidad contar con un dispositivo que genere cavitación hidrodinámica, de forma automatizada y así estudiar la corrosión acelerada?

Esta es la pregunta a la que responde el trabajo desarrollado en esta tesis. La técnica propuesta es capaz de producir chorros de fluido cavitante (flujo bifásico) para estudiar/medir su efecto erosivo-corrosivo en muestras de distintos materiales. En años recientes, se han construido dispositivos mecánicos para producir cavitación transitoria [8]. Estas han sido estudiadas desde las perspectivas teórico-numérica y experimental. Particularmente, el diseño aquí propuesto recoge ideas y principios de un mecanismo de pinzas de cierre súbito, con el cual es posible generar cavitación hidrodinámica aprovechando el perfil de un tubo Venturi convencional [9].

Este dispositivo está compuesto por dos “pinzas” que cierran súbitamente formando una especie de “tubo”. Cuando el dispositivo se sumerge en un fluido incompresible (como el agua) y se produce el cierre, el fluido entre las pinzas sale expulsado de una forma repentina y a gran velocidad ( $\sim 14$  m/s), como consecuencia se produce una caída de presión generando cavitación, es decir la formación de burbujas.

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El dispositivo mecánico, arriba descrito, no solo es capaz de producir cavitación hidrodinámica; sino también, ha probado ser útil en el estudio experimental (permitiendo mediciones electroquímicas) de la corrosión acelerada por flujo de muestras de materiales metálicos [9].

Sin embargo, el principal problema es que este sistema no está automatizado. Junto con esto, tenemos que no es posible controlar de manera precisa la frecuencia de apertura y cierre de las pinzas del mecanismo.

En el presente trabajo se realizará un diseño de un nuevo dispositivo que dé solución a estos problemas.

Por lo que, el presente trabajo ha tenido como finalidad diseñar un nuevo dispositivo que dé solución a estos problemas. capaz de generar cavitación hidrodinámica, con el objetivo de realizar mediciones electroquímicas en dicho dispositivo así medir la corrosión acelerada en muestras metálicas. Este dispositivo puede quedar ensamblado en un sistema completamente automatizado, con facilidad de regular.

## JUSTIFICACIÓN

El diseño que se presenta en esta tesis pretende aportar una solución práctica para generar cavitación hidrodinámica. El sistema que se plantea resulta una alternativa compacta y de bajo costo (comparada con los circuitos hidráulicos convencionales que implican el uso de sistemas de bombeo, válvulas, tanques de almacenamiento, etc.) que puede ser útil a empresas y/o diseñadores dedicados al desarrollo de dispositivos de medición y control de flujo (tubos Venturi, placas de orificio, etc.) en las etapas tempranas de diseño. Con la presente propuesta, se tiene la posibilidad de variar fácilmente las condiciones y tipos de flujo (cavitantes y no cavitantes, a diferentes números de Reynolds abarcando flujos laminares, transitorios y turbulentos; así como flujos pulsátiles a distintas frecuencias), las geometrías de los ductos generados por el cierre de las pinzas y los materiales con qué estas se construyen.

Así mismo, el presente sistema posee un diseño, que permite realizar estudios sinérgicos de la corrosión/erosión/cavitación de muestras metálicas al ser expuestas a flujos cavitantes. Además existe la posibilidad de estudiar por separado el proceso de erosión (debida a ondas de presión y jets originados por el colapso de las burbujas).

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un dispositivo mecánico y automático de pinzas de cierre súbito para acelerar la corrosión-erosión por cavitación hidrodinámica en muestras metálicas.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Construir un prototipo para realizar pruebas experimentales de concepto.
- Comprobar la generación de cavitación transitoria en agua.
- Comprobar el funcionamiento de manera continua y automatizada.
- Comprobar el control de la frecuencia de apertura y cierre del dispositivo.
- Medir las características del chorro cavitante generado con el modelo.
- Documentar el diseño, generar diagramas esquemáticos y planos de ensamble del dispositivo (este material constituirá parte de la descripción y dibujos de una solicitud de patente).

# CAPÍTULO 1

## PRINCIPIOS BÁSICOS

### 1.1 CORROSIÓN

La corrosión es un término que se utiliza para describir, mediante reacciones químicas y electroquímicas, el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos) [10].

Es importante resaltar que el fenómeno de corrosión es algo que siempre va a estar presente en los materiales metálicos, por eso se debe tener en cuenta que lo único que podemos hacer ante esto es disminuir o retardar el efecto. El fenómeno de la corrosión ocurre debido a que, con el tiempo, dichos materiales tratan de alcanzar su estado natural, el cual constituye un estado energético de menor potencial, lo que les permite estabilizarse termodinámicamente [11].

La mayoría de estos procesos de corrosión incluyen una reacción de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas), en donde es fundamental que existan tres constituyentes para que se lleve a cabo:

- 1) Electrodos ( un ánodo y un cátodo )
- 2) Un electrolito ( medio conductor )
- 3) Conexión eléctrica entre los electrodos



El potencial electroquímico define la susceptibilidad de un material metálico a la corrosión. Cuanto más positivo sea el valor de dicho potencial, más resistente es el material, en el caso contrario cuanto más negativo sea el material sufrirá más corrosión. En la figura 1 se

**FIGURA 1. Serie galvánica para algunos metales y aleaciones comunes [12].**

puede observar el comportamiento de algunos metales utilizados en la ingeniería.

Como resultado del proceso de corrosión, sobre la superficie del material se forman productos (capas) y estos pueden afectar de manera negativa o positiva las propiedades de dicho material, dependiendo de su naturaleza y condiciones a las que está sometido.

Existen varios tipos de corrosión, que se caracterizan por su naturaleza y la manera de cómo se originan. La forma más general para clasificarla es la siguiente:

- Corrosión generalizada (uniforme)
- Corrosión localizada
- Corrosión galvánica
- Otros tipos de corrosión

## 1.2 ELECTROQUÍMICA

La electroquímica es una disciplina, rama de la físico-química, que estudia las reacciones que se llevan a cabo en la interfase formada entre un material conductor (por ejemplo, un metal) y un electrolito (especies químicas con carga y que permiten la conducción de corriente eléctrica) [12].

Las reacciones electroquímicas se llevan a cabo soportadas por una forma de energía que es la fuerza impulsora para el movimiento de los electrones, es decir el potencial eléctrico.

En estructuras o componentes metálicos es común observar el fenómeno de corrosión. Se dice que este es un proceso espontáneo porque no requiere de energía externa para llevarse a cabo; es decir, los metales poseen energía suficiente para degradarse y pasar del estado metálico a estado oxidado.

### 1.3 CAVITACIÓN

La palabra cavitación se refiere a la formación de burbujas, compuestas por gases y/o vapores, en fluidos. En esencia se trata de una ruptura en el líquido que da paso a la formación de burbujas (cavidades) que crecen y posteriormente colapsan (implotan), esto genera como consecuencia que se emitan ondas de choque (ondas de presión abrupta) [13].

Este fenómeno puede ser originado de distintas formas, es entonces como se puede clasificar en cavitación: hidrodinámica, acústica, óptica y de partícula.

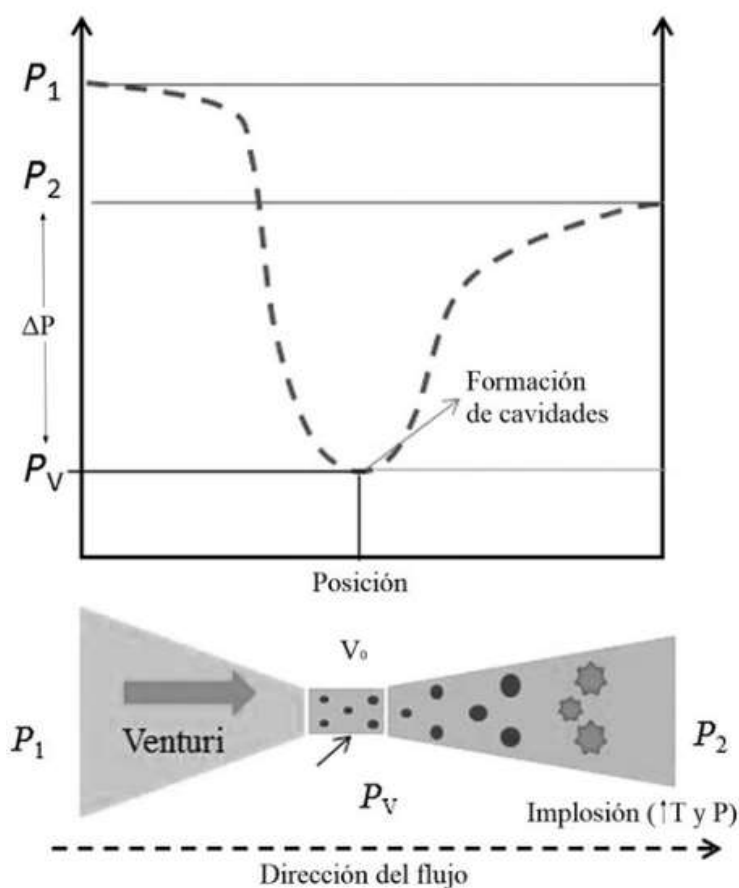
La cavitación hidrodinámica la podemos observar cuando existe una gran diferencia de presión generada junto con el movimiento de un líquido. Está acompañada de efectos físicos, uno de ellos es la erosión.

Las burbujas de cavitación se forman en la región de baja presión, cuando son arrastradas hacia la zona de alta presión colapsan y la superficie o cualquier cuerpo se verá afectada por cargas de presión pulsantes, lo que eventualmente generará una destrucción/deterioro de la superficie.



## 1.4 CAVITACIÓN HIDRODINÁMICA

La cavitación hidrodinámica se define como el fenómeno de formación, desarrollo, crecimiento e implosión de cavidades (burbujas) en un medio líquido. Esto es resultado de una variación de presión existente en un fluido tras aumentar repentinamente su velocidad, como resultado de un cambio abrupto en la geometría y/o área de sección transversal del conducto de transporte [14].



**FIGURA 2.** Variación de la presión, como función de la geometría y la posición, en un dispositivo de cavitación hidrodinámica.

**$P_1$** : presión inicial de entrada,  **$P_2$** : presión de descarga,  **$P_v$** : presión de vapor del líquido a la temperatura del sistema,  **$\Delta p$** : caída de presión,  **$V_o$** : velocidad media del fluido en la garganta; Carpenter, et al. [15].

Los tres parámetros clave para el desarrollo del pulso de presión son: geometría y diseño de la cámara de cavitación (Venturi), presiones de operación y velocidad del líquido.

Durante la implosión de las cavidades, debido a la recuperación súbita de presión, se difunde calor y se presentan altos picos de temperatura en el sistema, tal como se observa en la figura 2. Esto conduce a una reacción termolítica que, en el caso de agua como medio continuo, disocia la partícula en radicales de hidrógeno (H) e hidroxilo (OH), posteriormente esto conduce a una reacción química de oxidación.

La magnitud de caída de presión ( $\Delta P$ ) influye directamente sobre la fuerza de

implosión en las cavidades.

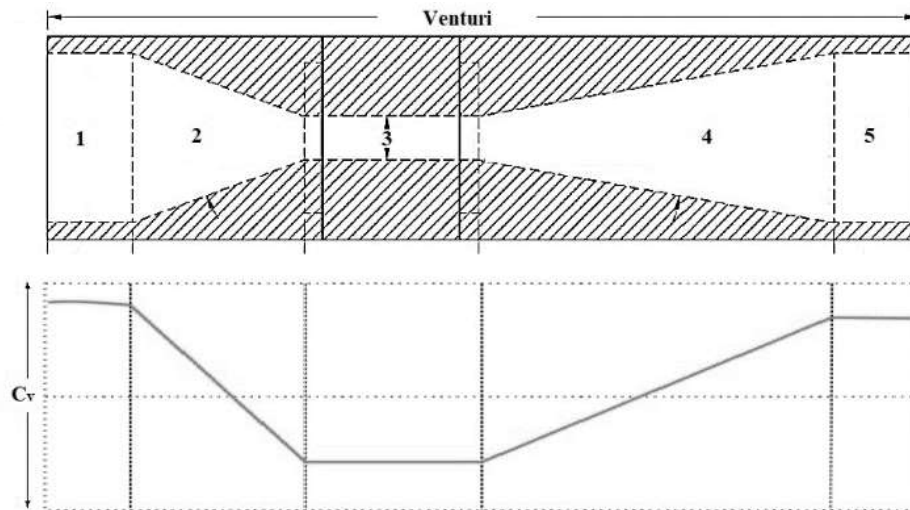
### Número adimensional de cavitación $C_v$

La operación de cavitación hidrodinámica puede estudiarse desde dos enfoques: como una suma de burbujas independientes, o como una nube de cavidades que interactúan entre ellas. Siendo esta última una concepción más realista ya que al tener alta densidad de cavidades es muy probable que exista el fenómeno de efusión burbuja-burbuja [16].

El número de cavitación es un parámetro que permite caracterizar la condición de cavitación al interior de cada dispositivo de estrangulamiento y está definido de la siguiente manera:

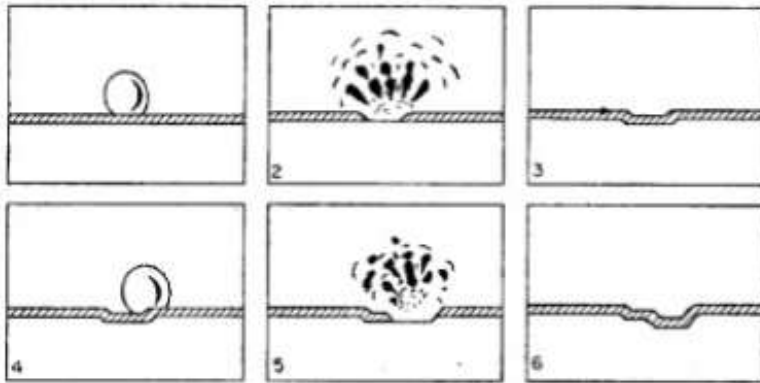
$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad (1)$$

Los autores Wang y Brennen sugieren que la eficiencia y el rendimiento de la operación se optimizan dentro del rango  $0.4 < C_v \text{ óptimo} < 0.65$  [17].



**FIGURA 3. Representación general de un dispositivo Venturi.** Los números corresponden a: 1- Ingreso del fluido, 2- Zona de convergencia, 3- Garganta o constricción, 4- Etapa de expansión y recuperación de presión, 5- Descarga.  $C_v$ : Número de cavitación; Navarrete, et al [18].

## 1.5 CORROSIÓN POR CAVITACIÓN



**FIGURA 4.** Proceso de corrosión por cavitación presente en una superficie, se puede apreciar el contacto de la burbuja con la superficie (1), el momento de la implosión (2), desgaste en la superficie (3) y como se repiten las acciones (4) (5) (6), [29].

La corrosión por cavitación ocurre en sistemas de transporte de líquidos hechos de materiales pasivados donde, por cambios de presión en el sistema, se producen flujos turbulentos que forman burbujas de aire.

Estas implosionan contra el material del sistema, deteriorando la capa de pasivación; facilitando el

desarrollo del proceso de corrosión, de forma similar a la corrosión por picaduras y cuya diferencia se observa en que el efecto de la cavitación es de mayor tamaño. Esto se puede apreciar en la figura 4.

Los principales factores que influyen el proceso de corrosión son:

- Acidez de la solución
- Sales disueltas
- Capas protectoras
- Concentración de oxígeno
- Temperatura
- Velocidad de flujo

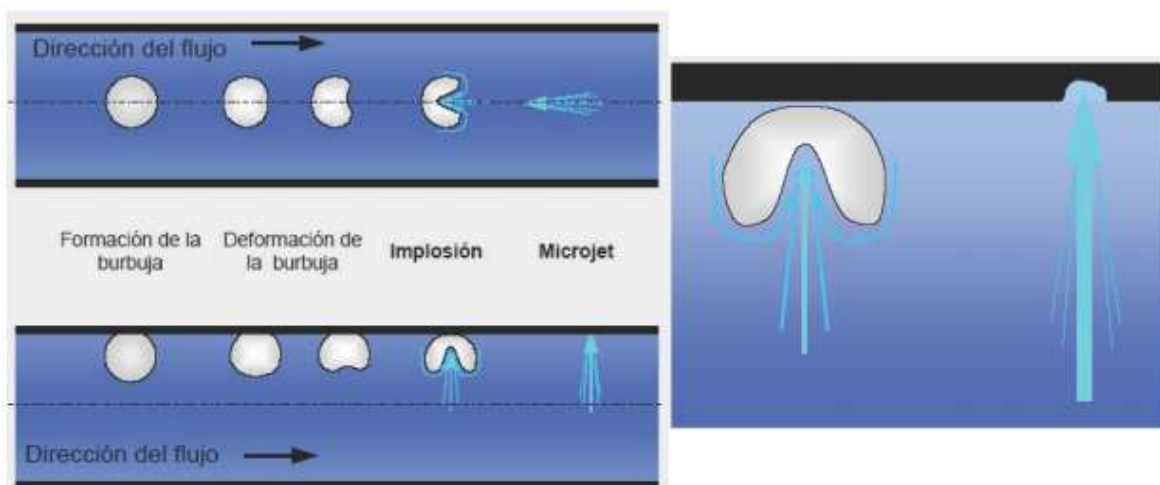
## 1.6 EROSIÓN

La erosión implica que una superficie se desgaste producto de un roce o frotamiento de otro cuerpo sobre éste; es decir, se trata de un fenómeno meramente físico [20]. Para el presente trabajo, la erosión es directamente inducida por la cavitación hidrodinámica. Junto con la erosión tendremos el efecto de corrosión (fenómeno electroquímico), ambos actúan en simultáneo así que se define globalmente el efecto como un proceso de corrosión-erosión.

### Micro-jets

Al tener cavitación también se tendrá un efecto de implosión de burbujas, como la condensación tiene lugar instantáneamente el agua que rodea las burbujas golpea las paredes sin amortiguación alguna.

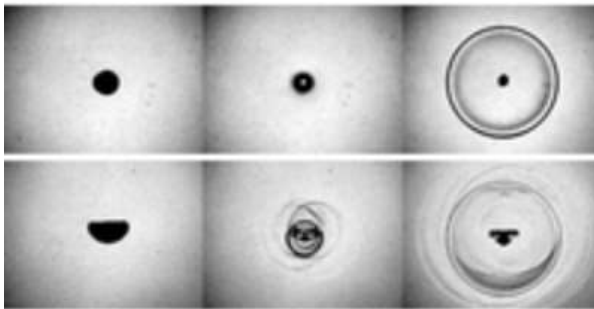
Se ha demostrado que no siempre las cavidades colapsan concéntricamente, sino que en ocasiones (debido a diferentes condiciones como el gradiente de presión, deformación inicial en la burbuja y/o la velocidad del fluido) se forma un micro-jet que choca con la superficie sólida donde transmite un impulso de presión, tal como se muestra en la figura 5, básicamente estos jets son causantes del fenómeno de erosión en la superficie.



**FIGURA 5.** Colapso de una burbuja teniendo como resultado la formación del Jet, a la derecha se observa el efecto que tiene sobre la pared de una tubería [21].

## Ondas de choque

La dinámica de la cavitación de burbujas se produce como resultado de una micro-explosión en una zona focalizada. Anteriormente se describió el proceso desde el inicio hasta el fin, pero algo que es importante mencionar es que durante el colapso de la burbuja, se emite una segunda onda de choque en el espacio.



Cuando no existe solo un punto de ruptura en el líquido, sino varios cercanos, una cavidad muy grande puede resultar del crecimiento de múltiples burbujas. Estas cavidades suelen colapsar con una gran distorsión y como resultado se irradian una multiplicidad de ondas de choque [22]. Las cavidades son las responsables de la erosión de las superficies sólidas cercanas.

**FIGURA 6.** Ejemplo de una onda de choque producida por el colapso de una burbuja [22].

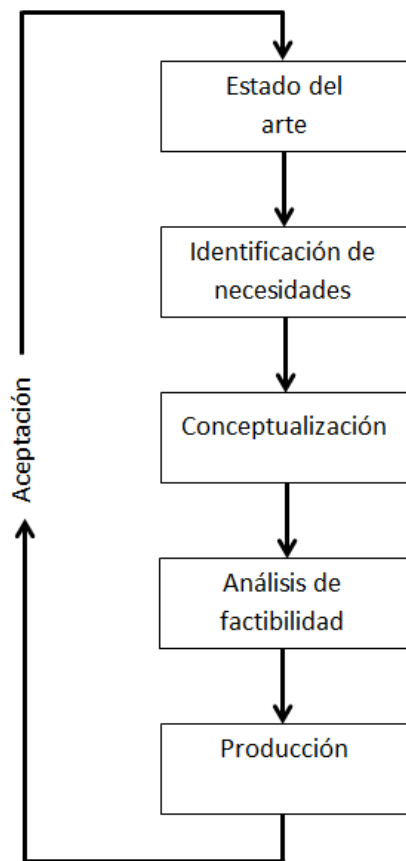
## CAPÍTULO 2

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

### 2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO

La actividad de diseñar consiste en la reflexión y descripción de una estructura que potencialmente incorpora ciertas características deseadas [23].

El diseño es, para la ingeniería, la generación y evaluación sistemática e inteligente de especificaciones para artefactos cuya forma y función alcanzan los objetivos establecidos y satisfacen ciertas restricciones especificadas [24].



**FIGURA 7. Diagrama del método de diseño en la ingeniería [25].**

Existen varios tipos de diseño y variantes en ellos. En nuestro caso por el tipo de problema que se nos presenta utilizaremos lo que es conocido como un “Re-diseño” [3]. Es muy frecuente en la ingeniería y se emplea para mejorar un diseño ya existente, puede ser modificar algún componente o rediseñarlo, lo importante a resaltar es que no se hace cambio alguno en el principio de funcionamiento o concepto del diseño original. Para este trabajo el diseño base, como fue mencionado en el capítulo uno, es el propuesto en [9].

En la figura 7 se muestra un esquema básico de la metodología de diseño

El estado del arte se refiere a realizar una investigación para ver que dispositivos y/o productos ya existen y así poder tomar una orientación hacia lo que se desea diseñar. Este punto se abordó en el capítulo uno en la parte de antecedentes.

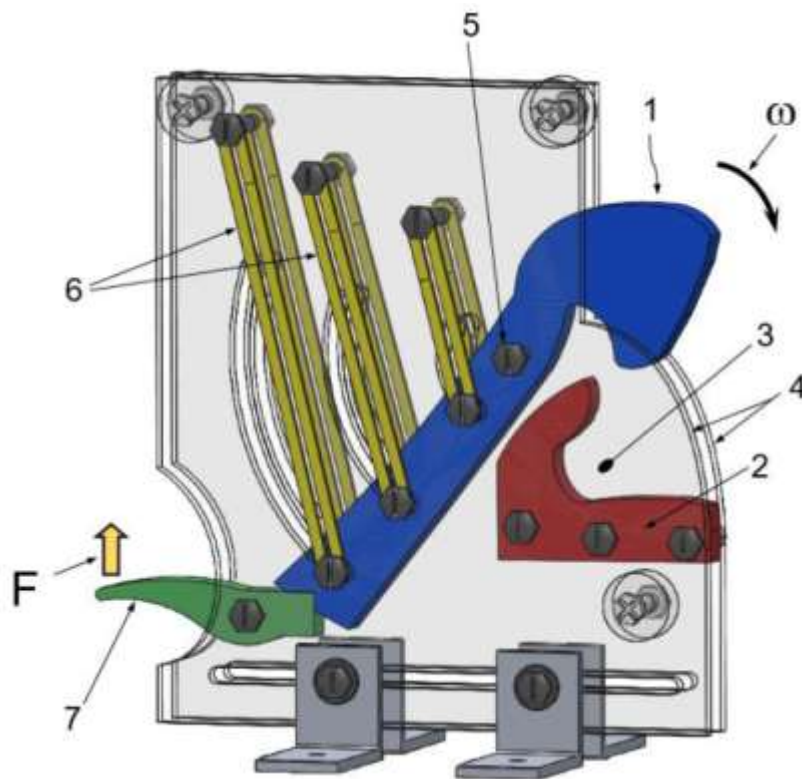
La necesidad identificada fue que el sistema debe

operar de forma automatizada. El diseño debe cumplir con el fin de que se pueda controlar la frecuencia de apertura de las pinzas y una vez planteado este objetivo se procede al siguiente paso.

Este es la conceptualización de la idea, cabe mencionar que se trata de un prototipo funcional, así que en este caso no se realizó un análisis de factibilidad y por el momento no se llegará a la etapa de producción.

## 2.2 DISEÑO DE CONCEPTO

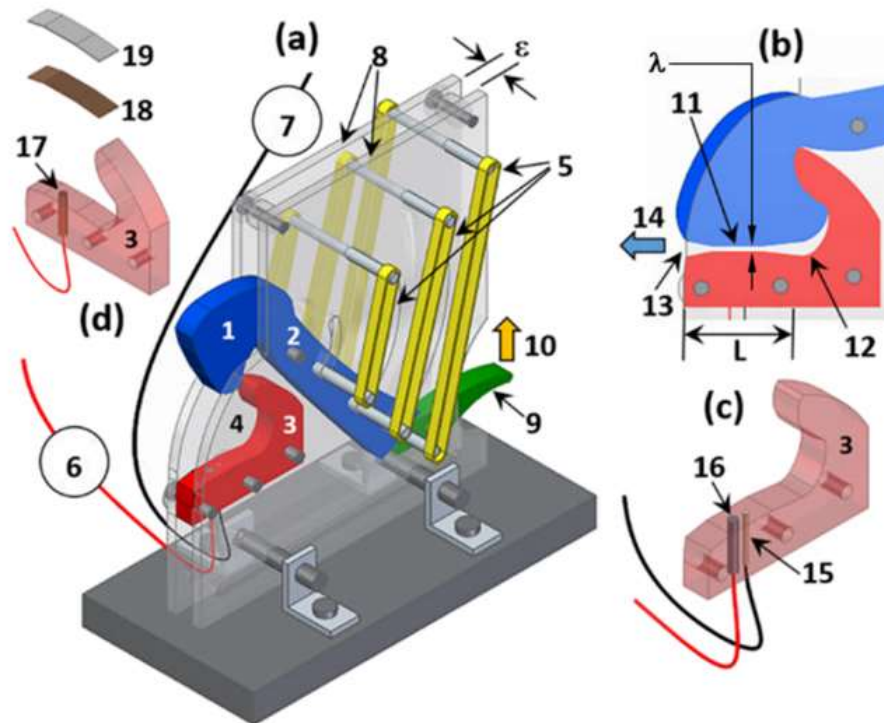
Se comenzó con la forma propuesta en el trabajo desarrollado por Godínez et al. para realizar el diseño conceptual del nuevo dispositivo [9]. A continuación se muestra un esquema del dispositivo:



**FIGURA 8.** Dispositivo mecánico: 1) pinza superior (móvil) , 2) pinza inferior (fija), 3) cuenco, 4) paredes paralelas, 5) pivote, 6) juego de bandas de goma (ligas), 7) gatillo. F representa la fuerza que se ejerce para activar el gatillo y  $\omega$  la velocidad angular que alcanza la misma [9].



También se analizaron los siguientes arreglos en este dispositivo:



**FIGURA 9.** (a) Modelo 3D CAD del dispositivo mecánico para generar cavitación (posición de abertura): 1) pinza superior (móvil), 2) pivote, 3) pinza inferior (fija), 4) cuenco, 5) juego de bandas de goma (ligas), 6) cable de conexión del electrodo de trabajo, 7) cable de conexión del contra-electrodo, 8) paredes paralelas separadas una distancia  $\varepsilon = 5.8$  mm., 9) gatillo, 10) dirección de activación del gatillo. (b) Geometría Venturi: 11) sección de la garganta, 12) extremo cerrado, 13) extremo abierto, 14) dirección del chorro. La longitud característica en el cuello del venturi es  $\lambda = 1$  mm, el número de Reynolds queda definido de la siguiente manera  $Re = u \cdot \lambda \cdot \rho / \mu$ . (c) Pinza fija inferior con un arreglo de: 15) varilla de platino como contra-electrodo. Y 16) varilla de acero como electrodo de trabajo. (d) Pinza inferior con un arreglo de: 17) varilla de cobre y 18) lámina de cobre como conexión entre elementos y 19) una hoja de aluminio como electrodo de trabajo [9].

Este dispositivo funciona cuando está completamente sumergido en un líquido. Los resultados de este estudio arrojaron que se desarrollan diversas estructuras de cavitación, esto quedó reflejado con el método de videografía de alta velocidad.

Los arreglos propuestos tuvieron como finalidad poder estudiar la respuesta electroquímica al flujo de cavitación turbulenta inducida, y se eligió la pinza inferior (fija) para llevar a cabo dichas mediciones

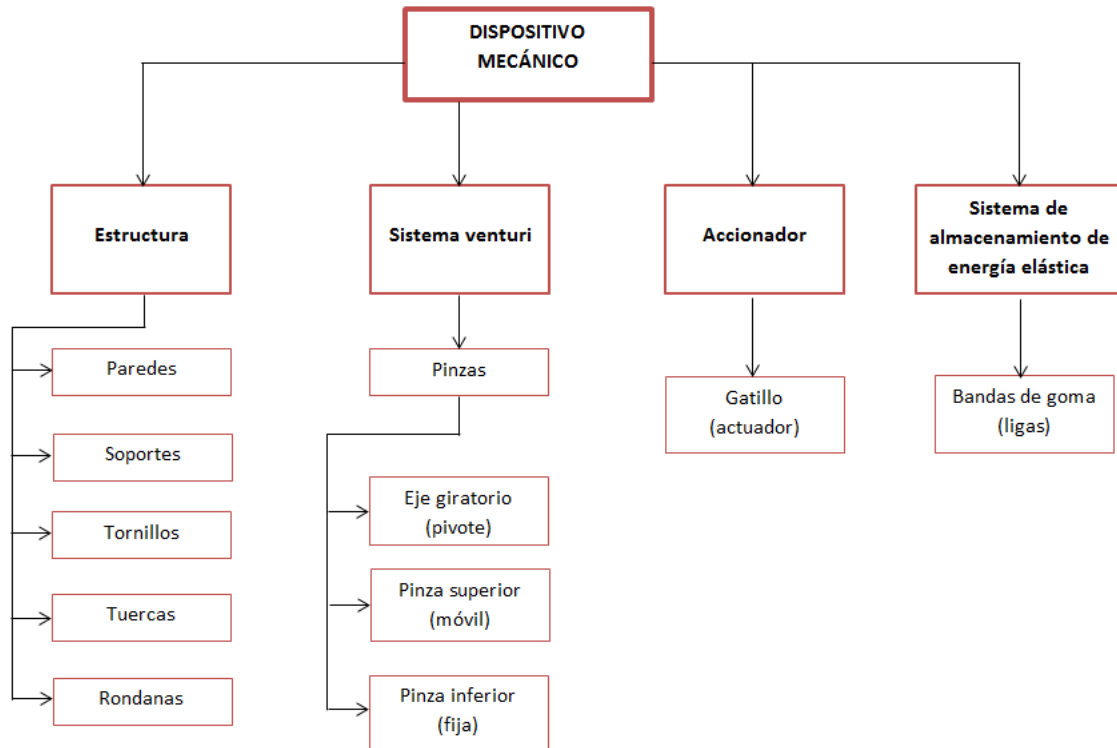


Lo primero será plantear algunas preguntas para saber si el diseño propuesto en el trabajo que se tomó como base cumple con nuestras necesidades y que se puede cambiar y/o mejorar para orientarnos hacia el diseño requerido.

- ¿Se puede controlar la velocidad de apertura y cierre? No, se necesita implementar un elemento que permita la acción de apertura y cierre y que dicha acción conserve sus características a lo largo de muchos ciclos de trabajo. Las ligas también tienen que ver en esta acción.
- ¿Es posible controlar la frecuencia con la que se genera el chorro? No, esto está directamente relacionado con lo anterior, una vez que se tenga el elemento actuador este tendrá que operar en forma continua para provocar impulsos cada determinado tiempo.
- ¿Las ligas tienen un correcto desempeño a la hora de hacer el movimiento retráctil? Cumplen en cuanto a funcionalidad, pero si se usaran resortes se podrían controlar la velocidad con las que las pinzas regresan a su posición original. Los resortes tendrían una vida útil más prolongada.
- ¿Es un diseño fácil de manufacturar y ensamblar? Sí, la idea es tener dos placas y unir las mediante elementos mecánicos (tornillos, tuercas y arandelas), lo que resulta bastante sencillo.
- ¿Los arreglos propuestos lograron mediciones electroquímicas exitosas? Según los resultados sí, por eso los arreglos realizados en el nuevo dispositivo serán dispuestos de la misma manera.

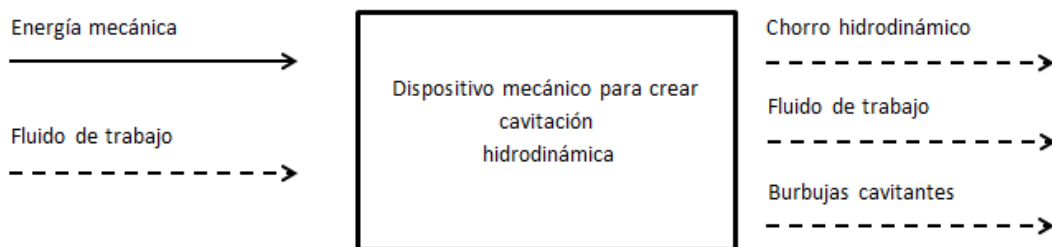
Una vez analizado esto se llegó a determinar que ciertos elementos como: parte de la estructura, la manufactura y el ensamble cumplen perfectamente con su función. Sin embargo, hay ciertas características que deberán ser modificadas, entre las más importantes se encuentran; el impulso de la pinza, es decir las ligas, y como se va a controlar la velocidad y frecuencia de la apertura y cierre de las pinzas.

Para el análisis de qué componentes modificar y cuáles pueden ser útiles, del diseño original, se realizó una descomposición funcional, misma que se muestra en la figura 10.



**FIGURA 10.** Descomposición funcional del dispositivo mecánico. *Elaboración propia.*

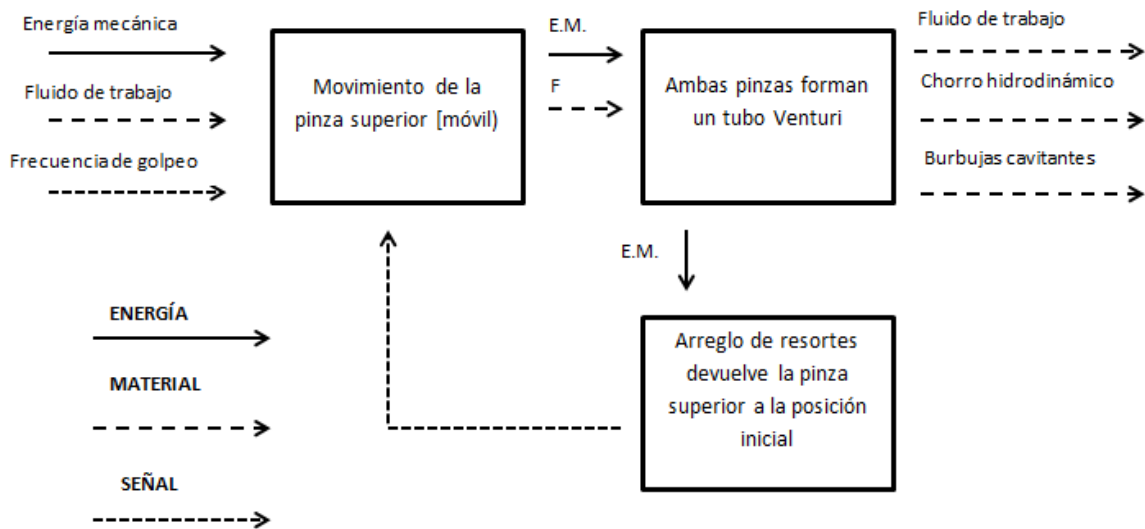
También se realizó el modelo de caja negra (figura 11) del funcionamiento del dispositivo mecánico, la idea es que la energía motriz esté suministrada por un motor eléctrico y que esta se transforme en energía mecánica para así comenzar el funcionamiento de las pinzas.



**FIGURA 11.** Diagrama de caja negra del dispositivo mecánico. *Elaboración propia.*

Una vez realizado el análisis se procedió a realizar los nuevos bosquejos y planos para la creación del nuevo dispositivo. Para optimizar, se decidió eliminar el gatillo, ahora la pinza móvil será directamente impulsada por la fuerza motriz, esta será producida por un par de discos giratorios con un arreglo simétrico de cuatro barras.

Con las modificaciones y teniendo en cuenta los requerimientos de diseño se obtuvo un diagrama de la estructura del funcionamiento del dispositivo (figura 12).



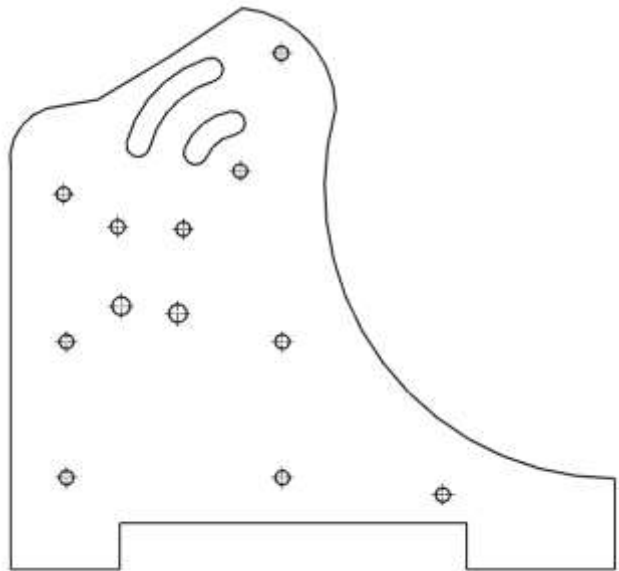
**FIGURA 12. Estructura funcional del nuevo dispositivo mecánico.**  
E.M. (Energía mecánica), F (Fluido de trabajo). *Elaboración propia.*

### 2.3 DISEÑO DE DETALLE

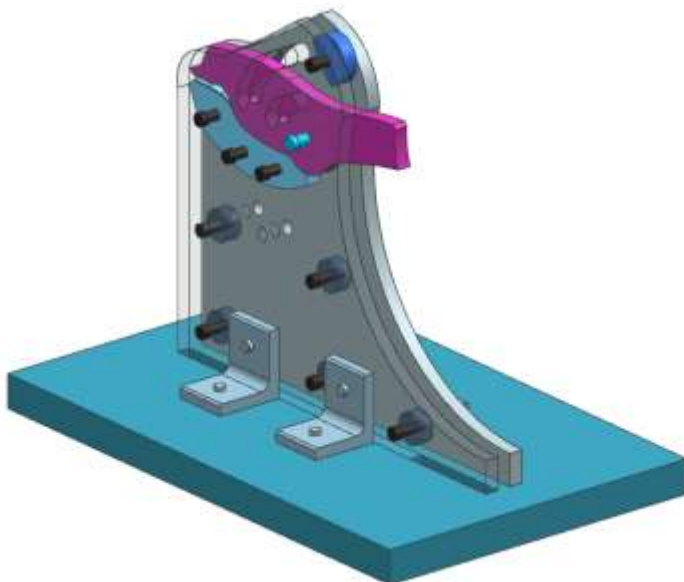
Se determinó que la estructura (de las paredes y la base) cumple perfectamente con lo requerido así que lo único que se modifica es un cambio en su geometría, tenemos la siguiente forma propuesta (figura 13).

Tendrá únicamente dos ranuras curvas para los postes de la pinza móvil.

Se trata de dos paredes que estarán colocadas en “espejo”, serán sujetadas entre sí por medio de 5 pernos y para dar soporte entre ellas se colocarán, en medio, arandelas acrílicas.



**FIGURA 13. Dibujo de la nueva geometría para las paredes del dispositivo. Elaboración propia.**

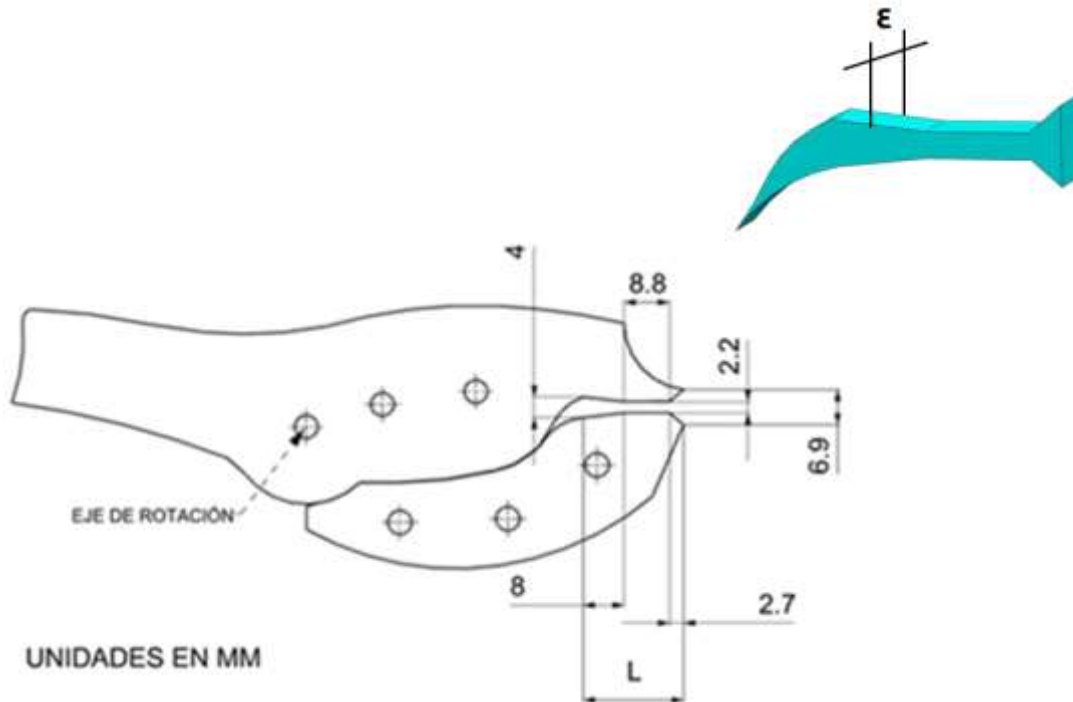


**FIGURA 14. Ensamble de la estructura del dispositivo mecánico. Elaboración propia.**

Se colocarán las paredes sobre una base rectangular y serán sujetadas mediante cuatro soportes tipo “L”, de 90°, el ensamble es mostrado en la figura 14.

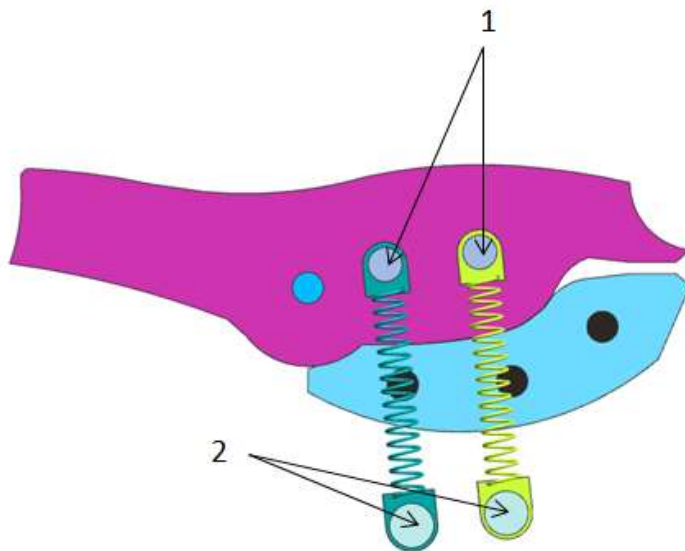
El espesor de las paredes y de las pinzas es de 6.2 [mm], algo importante es que la fricción y el arrastre seguirán presentes, ya que son fenómenos inevitables, en un trabajo posterior se podría hacer un estudio para conocer si disminuyeron y en caso contrario encontrar cómo hacer que eso suceda.

Por su parte el venturi, formado entre ambas pinzas, queda de la siguiente manera (figura 15).



**FIGURA 15.** Características geométricas del tubo venturi formado por las pinzas cuando están completamente cerradas. La longitud total del tubo es  $L= 19.5$  mm, la sección transversal formada tiene una longitud de pared de  $\varepsilon= 6.2$  mm. *Elaboración propia.*

El sistema de almacenamiento de energía constará de cuatro resortes, cada uno sujetado en la parte superior a los postes que contiene la pinza móvil y por la parte inferior a un perno en las paredes.

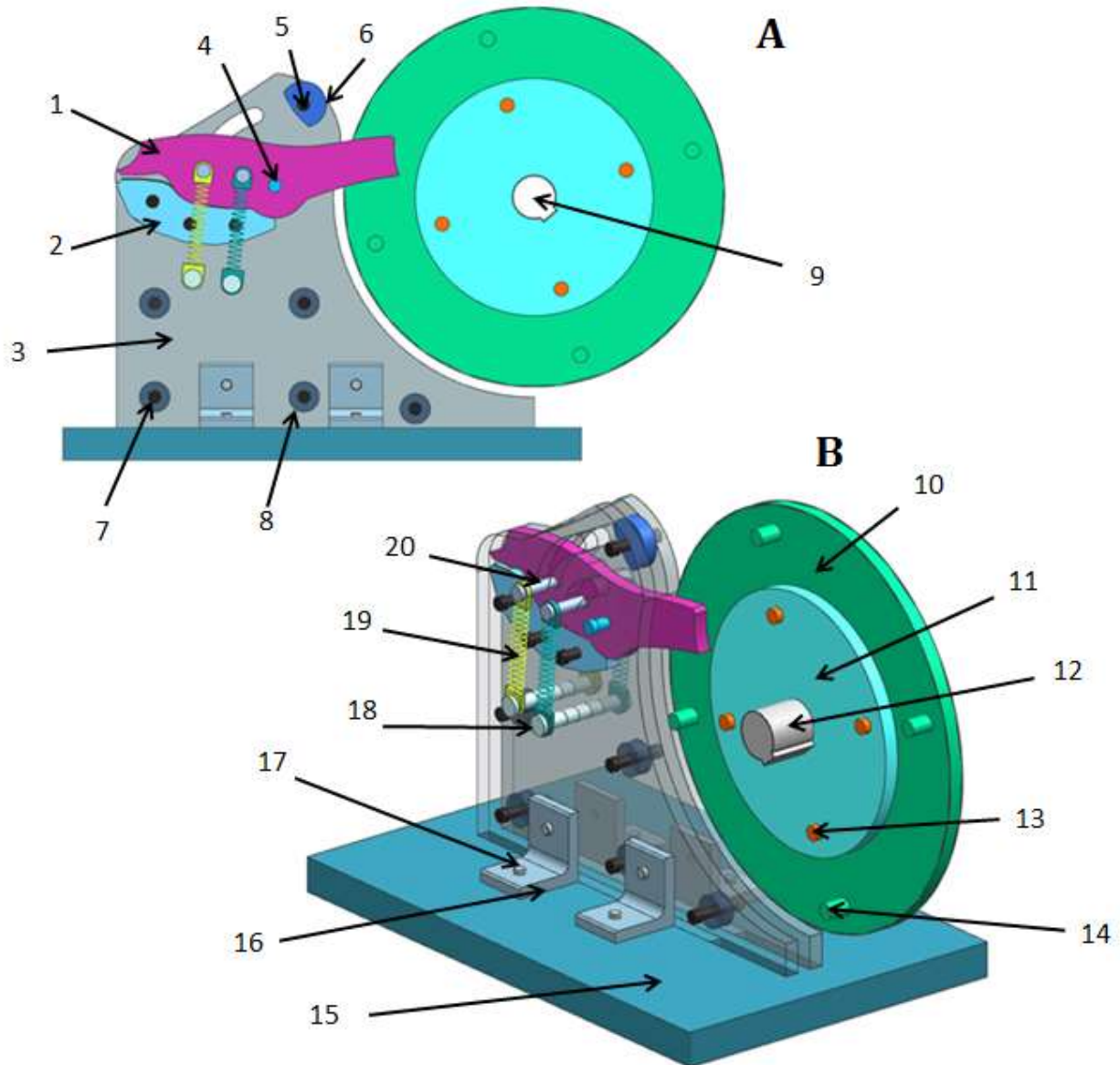


**FIGURA 16.** Sistema de almacenamiento de energía del dispositivo mecánico.

- 1) Pernos sujetos a la pinza móvil.
- 2) Pernos fijos a las placas paralelas.

*Elaboración propia.*

Teniendo como resultado el dispositivo mecánico y el sistema completo de la siguiente manera:



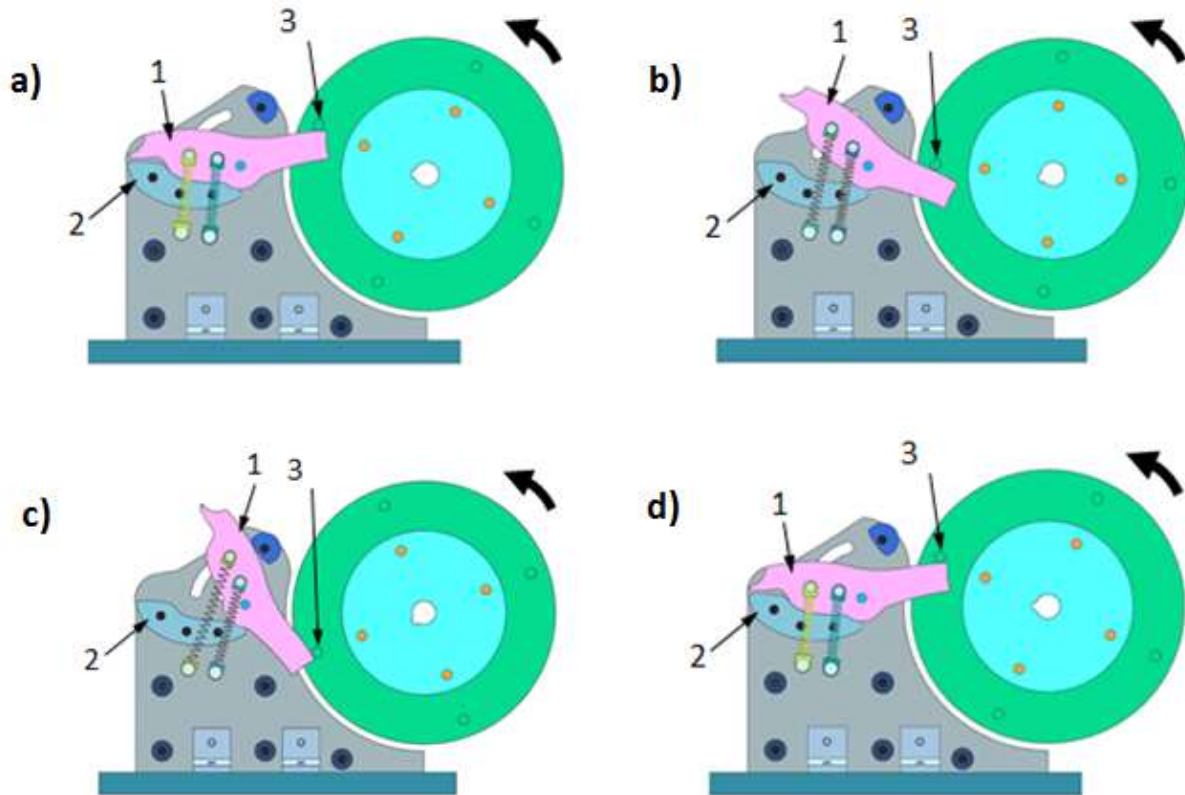
**FIGURA 17.** Dispositivo mecánico A) Vista lateral, B) Vista isométrica. Dónde: 1) pinza superior (móvil), 2) pinza inferior (fija), 3) pared (x2), 4) eje de rotación, 5) perno, 6) arandela superior, 7) perno para paredes (x5), 8) arandelas (x5), 9) perforación para eje de motor, 10) disco (principal), 11) disco (secundario), 12) eje de motor, 13) perno para discos (x4), 14) postes (x4), 15) base, 16) soportes tipo "L" (x4), 17) tornillo (x8), 18) poste fijo (x2), 19) resorte (x4), 20) poste móvil (x2). *Elaboración propia.*

Este es el diseño final obtenido que responde a los requerimientos planteados, como mejoras tenemos los resortes y una forma con un diseño más atractivo. Por otro lado se eliminó el gatillo. Al centro de los discos se encuentra el espacio para que sea conectado a una flecha de motor eléctrico. El disco de mayor tamaño tiene 4 barras, esto podría ser modificado de acuerdo a los requerimientos, pero el número de barras está directamente relacionado con la frecuencia de impulsos que recibirá la pinza superior (móvil).

Otro beneficio es que podemos controlar la velocidad de giro de los discos, lo cual se ve reflejado en la frecuencia de impulsos recibidos y la fuerza de golpeo.

## 2.4 DINÁMICA DEL CIERRE SÚBITO

El movimiento de la pinza se trata de un movimiento oscilatorio y armónico entre una posición inicial /final (pinzas cerradas) y una posición crítica (pinzas abiertas). La secuencia de este movimiento puede ser apreciada en la siguiente figura:



**FIGURA 18.** Funcionamiento del mecanismo de pinzas de cierre súbito. 1 pinza móvil, 2 pinza fija, 3 poste del disco. a) Posición inicial/final, es aquí donde recibe el impulso (fuerza) por parte del disco giratorio. b) En esta posición se refleja el efecto provocado, las pinzas se abren y los resortes comienzan a elongarse. c) Posición crítica, los resortes alcanzan la elongación máxima. d) Se presenta el efecto de contracción súbita de los resortes para así llevar la pinza a su posición original y que comience un nuevo ciclo. *Elaboración propia.*



Los parámetros que influyen sobre la magnitud de la fuerza impulsora son el peso del disco giratorio y la velocidad angular ( $\omega$ ) que tenga. Esta velocidad está directamente relacionada con las RPM a las que esté operando el motor eléctrico.

Por otra parte la frecuencia de golpeo (impulsos) está gobernada por la misma velocidad angular y el número de postes que se tengan en el arreglo circular del disco. Esto quiere decir que finalmente la fuerza y la frecuencia pueden ser controladas mediante la potencia a la que trabaje el motor.

En cuanto a las pinzas tenemos que la pinza superior (móvil) tendrá como características dinámicas lo siguiente:

- Velocidad angular ( $\omega_p$ )
- Energía cinética
- Fuerza de impacto (al contactar con la terminación de las ranuras)
- Velocidad de cierre (tangencial)

Y estará sujeta a los siguientes fenómenos:

- Esfuerzos y deformaciones
- Fricción
- Impactos

La pinza inferior (fija) también sufrirá de los fenómenos arriba mencionados, pero con menor intensidad y de carácter diferente.

Por otro lado, los resortes también son elementos de especial interés, teniendo las siguientes características:

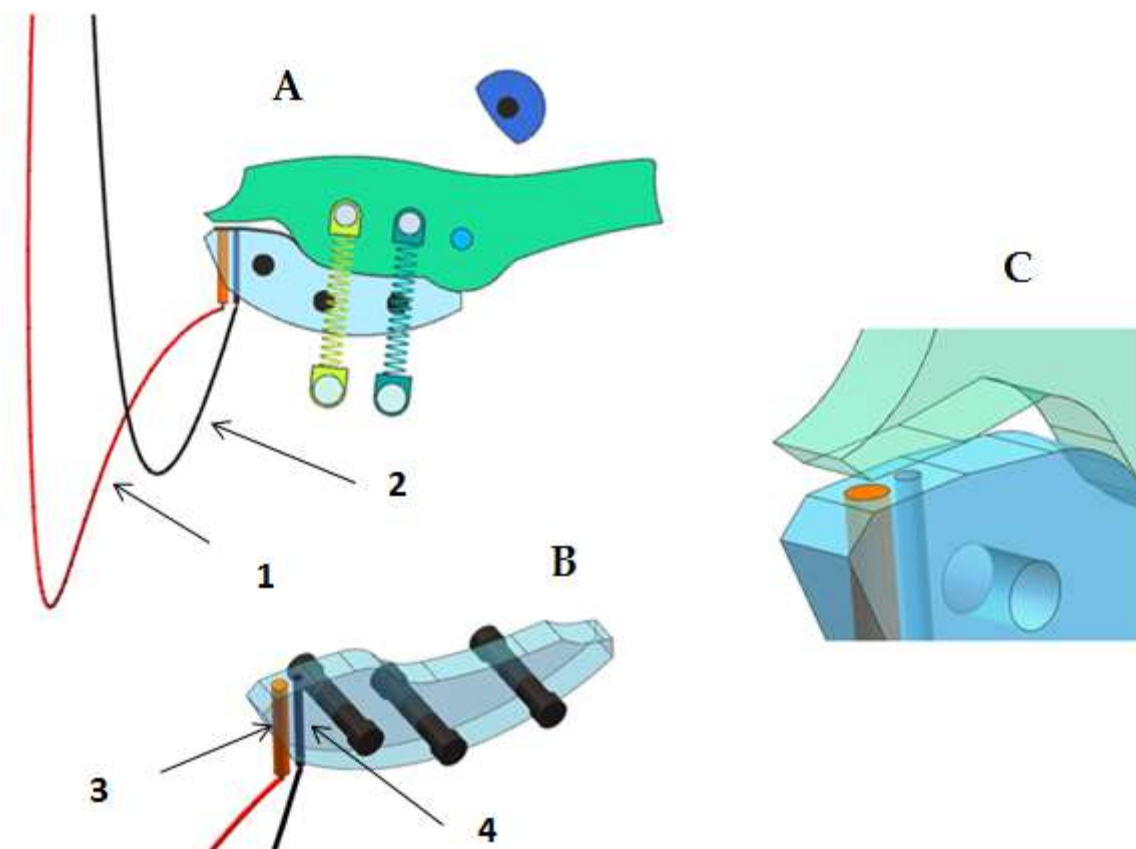
- Constante de elasticidad ( $k$ )
- Velocidad de desplazamiento de los extremos.
- Fuerza de elongación, está regida por la ley de Hooke ya que se trata de un resorte con comportamiento lineal.

Como fenómenos estarán presentes esfuerzos y deformaciones. Es importante mencionar que también son un factor para la velocidad de cierre de las pinzas. Y condicionan la fuerza necesaria para llevar a cabo el movimiento de la pinza superior.

Estos elementos al estar operando dentro de un fluido sufrirán el efecto de la presión hidrodinámica que este ejerce sobre ellos y a la hora del movimiento estará presente el fenómeno de arrastre. Complementario con estos fenómenos los elementos también sufrirán de corrosión y fatiga por trabajar durante varios ciclos.

## 2.5 ARREGLOS ELECTROQUÍMICOS

Los resultados obtenidos en el trabajo base del Dr. Francisco arrojaron datos aceptables sobre las mediciones electroquímicas [9]. Teniendo esto en cuenta, se utilizará el mismo arreglo para el nuevo diseño. Quedando de la siguiente manera:



**FIGURA 19.** A) Vista lateral del arreglo en las pinzas, 1) cable de conexión del electrodo de trabajo, 2) cable de conexión del contra-electrodo. B) Pinza inferior (fija), 3) varilla de acero como electrodo de trabajo, 4) varilla de platino como contra-electrodo de trabajo. C) Acercamiento, en esta zona del venturi es donde estarán colocados exactamente el electrodo y contra-electrodo. *Elaboración propia.*

Por otro lado también se propondrá un segundo arreglo para la medición electroquímica, la idea de esto es tener dos maneras prácticas de realizar mediciones. El arreglo mencionado servirá como base para analizar como son los resultados que arroja este arreglo propuesto en comparación con el primero.

El segundo arreglo tiene como características que solo cuenta con un electrodo (el de trabajo) y con dos placas (laminillas) que están colocadas sobre la pinza inferior. Queda conformado de la siguiente manera:

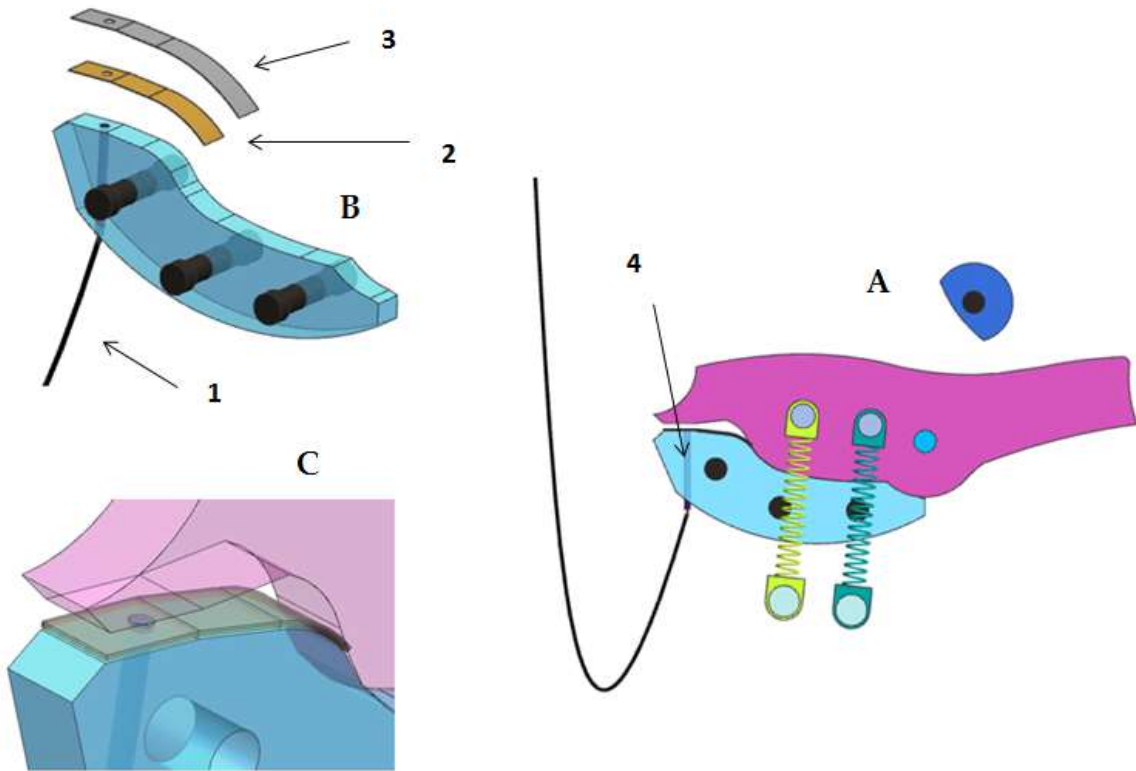


FIGURA 20. A) Vista lateral del arreglo en las pinzas. B) Pinza inferior (fija) 1) cable de conexión, 2), laminilla rectangular de cobre 3) electrodo de trabajo, 4) poste cilíndrico de conexión (cobre). C) Acercamiento, en esta zona es donde se ubicaran las dos laminillas. *Elaboración propia.*

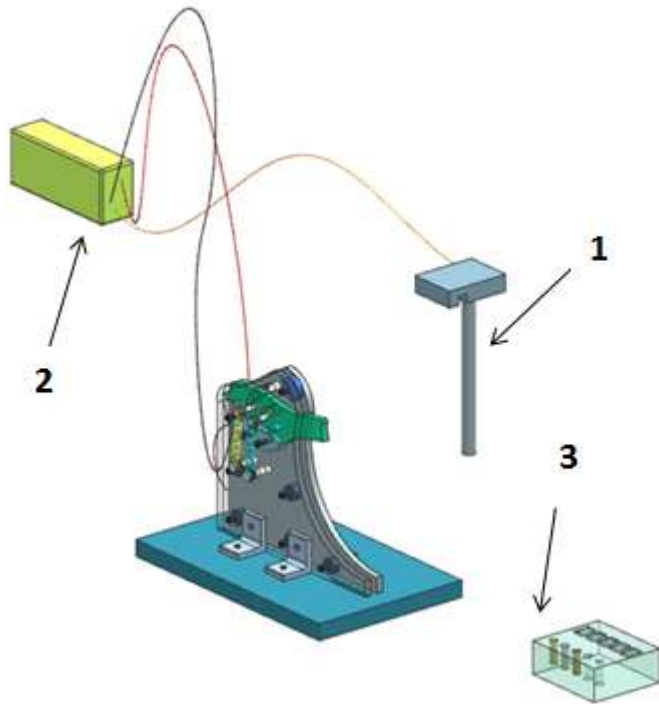
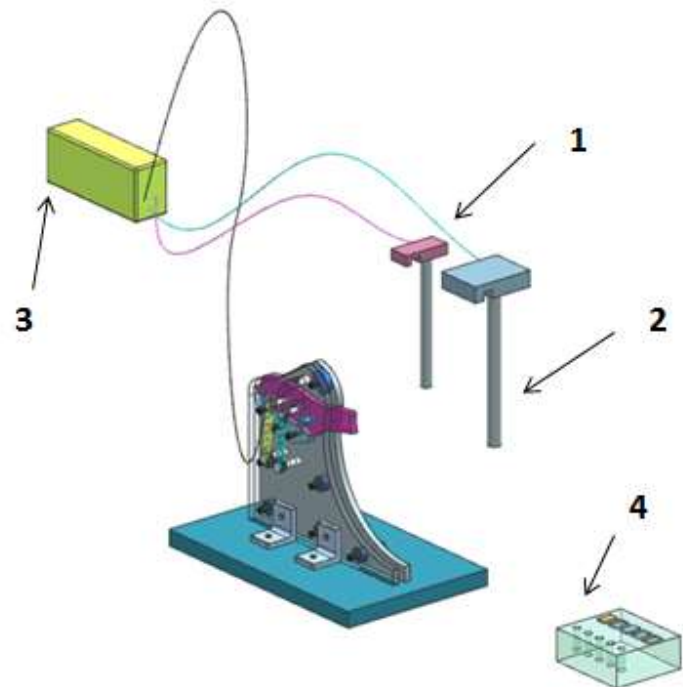


FIGURA 21. Arreglo electroquímico completo, donde se aprecian los cables de conexión. Existe también electrodo de referencia (1). Estas tres conexiones libres van dirigidas a un electrómetro de alta sensibilidad (2). Se coloca un portamuestras (3) para comparar la corrosión que sufre contra la que se da en la pieza de trabajo que sufrirá corrosión acelerada.

*Elaboración propia.*

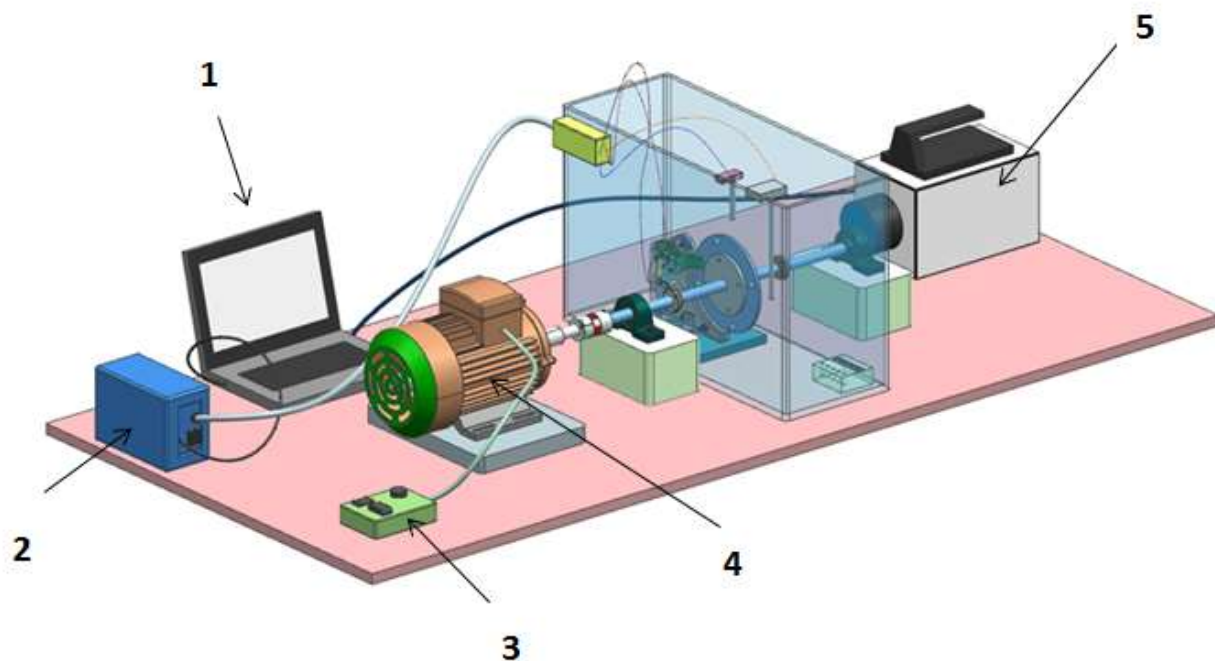
FIGURA 22. Arreglo electroquímico para laminillas. Existe un contra-electrodo (1) y también un electrodo de referencia (2). Estas tres conexiones libres van dirigidas a un electrómetro de alta sensibilidad (3). Se coloca un portamuestras (4) para comparar la corrosión que sufre contra la que se da en la pieza de trabajo que sufrirá corrosión acelerada.



*Elaboración propia.*

## ENSAMBLE COMPLETO

La idea es que al final se obtenga un ensamble como el que se muestra a continuación (figura 23), donde se podrá estudiar tanto la cavitación hidrodinámica como la corrosión acelerada que sufren las muestras de trabajo.



**FIGURA 23.** El ensamble final incluirá una computadora (1). El dispositivo estará siendo impulsado por un motor eléctrico (4), que a su vez estará bajo el mando de un controlador de velocidad angular (3). Por otra parte el electrómetro estará conectado a un potenciómetro, mismo que a su vez mandará información a la computadora para ser procesada. Todo esto estará siendo monitoreado por una cámara de video de alta velocidad (5). *Elaboración propia.*

## CAPÍTULO 3

### MANUFACTURA Y ENSAMBLE

#### 4.1 METODOLOGÍA DE MANUFACTURA

Un prototipo es una aproximación al producto en una o más dimensiones de interés [26]. Al tratarse del ámbito de ingeniería lo que obtuvimos fue un modelo de pruebas (prototipo funcional) del diseño antes mencionado. El prototipo que se busca desarrollar es del tipo integral ya que se trata de una versión a escala 1:1 y completamente operacional del dispositivo.

Para el modelo de pruebas tenemos lo siguiente:

<b>Componente</b>	<b>Proceso de manufactura</b>	<b>Material</b>
Pinzas	Corte láser	Acrílico
Paredes	Corte láser	Acrílico
Rondanas	Corte láser	Acrílico
Discos giratorios	Corte láser	Acrílico

Todos los elementos para ensamble (tornillos, tuercas, soportes, pernos y postes) están fabricados en acero y son de dimensiones estandarizadas. Los resortes también son de acero y con una constante de rigidez bien definida.

Para el prototipo integral sería conveniente utilizar materiales más resistentes que el acrílico, aunque materiales alternativos como el acero u otros metales sufrirían corrosión acelerada y también interferirían con las mediciones electroquímicas.

En el mejor de los casos, optar por Nylon sería una buena alternativa, ya que a pesar de deteriorarse con los líquidos, su tiempo de vida es más largo que el del acrílico, para esta opción se tendría que emplear la técnica de corte en CNC o corte con chorro de agua y así obtener los componentes que antes estaban fabricados con acrílico.

Otra alternativa podría ser la impresión 3D, empleando materiales que tengan una buena resistencia mecánica y también sean resistentes a los fluidos. Un ejemplo de este material es el filamento ASA, que es utilizado para piezas de maquinaria por sus propiedades mecánicas.

## 4.2 PROTOTIPO FUNCIONAL

El prototipo funcional fue maquinado en acrílico (genérico) mediante la técnica de corte láser, se eligió este material porque de realizarse las mediciones electroquímicas el metal iba a representar un problema a la hora de trabajar con dichos arreglos experimentales.

La fabricación se basó en los planos y modelos 3D CAM, generados de conformidad con lo presentado en el capítulo anterior.

Las piezas obtenidas después del proceso de manufactura fueron:

- Pinza superior (1 pieza)
- Pinza inferior (1 pieza)
- Pared (2 piezas)
- Arandelas (6 piezas)
- Disco giratorio principal (1 pieza)
- Disco giratorio secundario (1 pieza)
- Base (1 pieza)

Se realizó un ensamble con turecas y tornillos (los cuales se planea recubrir con pintura de esmalte acrílico) y se montó el sistema para que girarán los discos, básicamente consistió en colocar un eje que estuviera sostenido, lateralmente, por dos rodamientos de tipo fijo (chumaceras), quedando el sistema mostrado en la figura 24.





**FIGURA 24. Primer ensamble del dispositivo mecánico.**

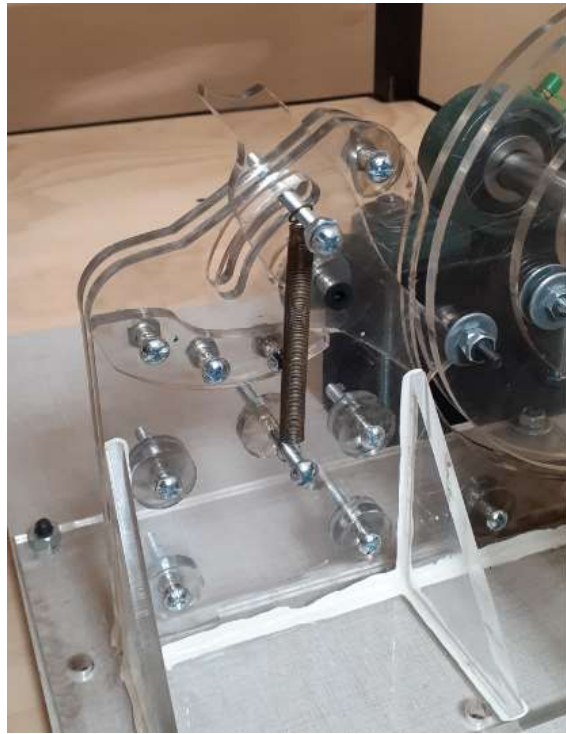


La idea de este primer ensamble fue verificar el correcto funcionamiento del movimiento giratorio del dispositivo, a lo que el dispositivo respondió de manera satisfactoria.

Cabe mencionar que en este ensamble no se utilizaron los soportes y se fijó mediante tornillos a una base de madera.

**FIGURA 25. Vista aérea del primer ensamble**

Posteriormente se hizo el ensamble de los resortes, para ellos primero se colocó un poste en la pinza superior y se ensamblo el resorte con un poste fijo, esto fue para comprobar la correcta apertura y cierre de las pinzas.



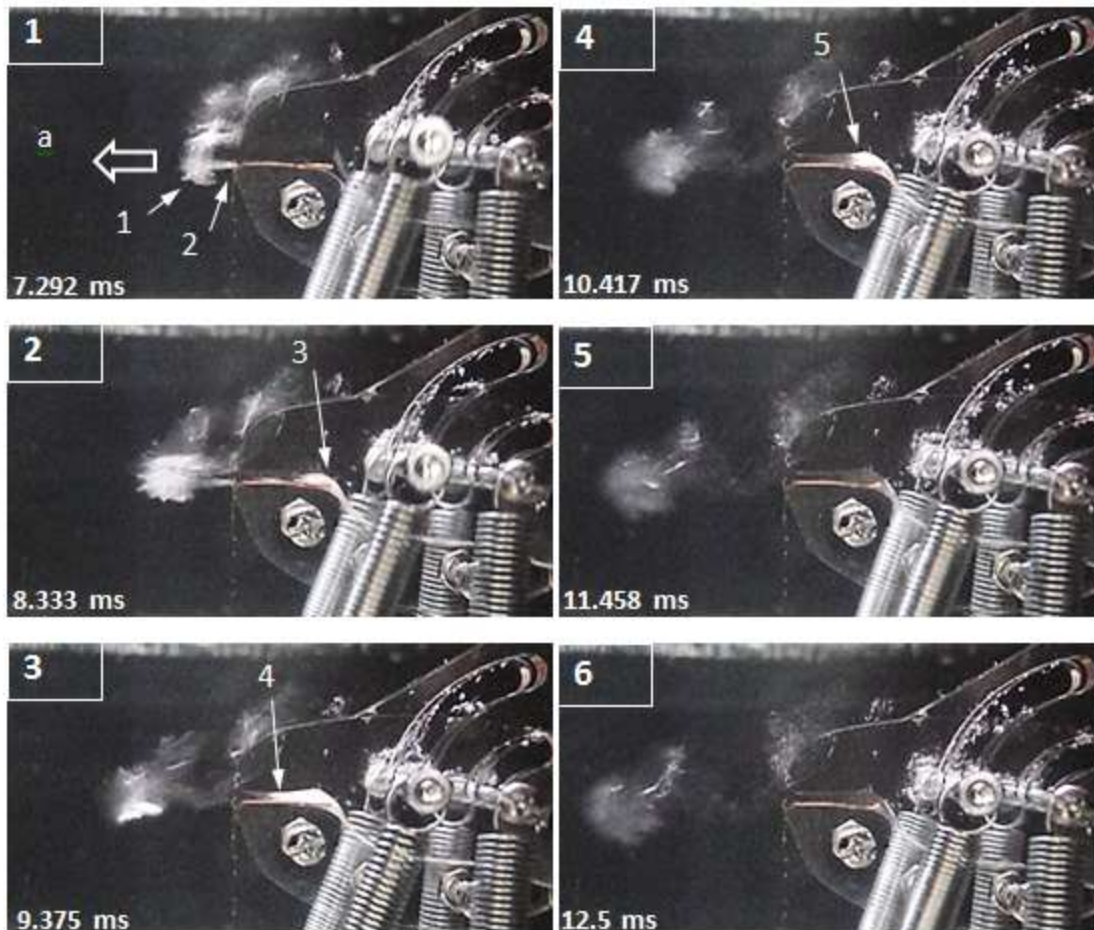
**FIGURA 26. Ensamble de los resortes en el mecanismo.**

## CAPITULO 4

### EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

#### 4.1 EXPERIMENTO DE CAVITACIÓN HIDRODINAMICA

Una vez completamente ensamblado el dispositivo mecánico el primer arreglo de experimentación que se planteó fue para comprobar el correcto funcionamiento y la generación de cavitación hidrodinámica. En este caso el dispositivo fue sumergido en agua y fue activado manualmente para generar el chorro



**FIGURA 27.** Secuencia de la formación de cavitación hidrodinámica, podemos notar que desde el inicio hasta el final transcurren 5.208 ms. Cada cuadro tiene una diferencia de 1.042 ms. La prueba fue realizada a condiciones estándar de presión y temperatura. a) representa la dirección del chorro cavitante. El tiempo de 7.292 ms indica el tiempo transcurrido desde que la pinza superior fue liberada, es decir desde que inicio el experimento. *Elaboración propia.*

La secuencia anterior muestra como es el desarrollo de la cavitación hidrodinámica.

El cuadro inicial es el momento justo cuando las pinzas (superior e inferior) se cierran y forman así una geometría venturi, de aquí podemos observar cual es la dirección en la que se moverá el fluido y los cúmulos formados, (2) representa el jet formado y (1) señala las burbujas que se crean.

En el segundo cuadro podemos ver como las burbujas comienzan a desplazarse, y (3) nos indica que dentro de la geometría se crearon pequeñas burbujas, cuya tendencia será dirigirse hacia la salida del tubo venturi.

Para el tercer cuadro notamos que la cantidad de burbujas va disminuyendo en el exterior del tubo, esto es porque se mezclan con el fluido (agua), y (4) nos indica que las burbujas al interior de la geometría venturi siguen avanzando hacia la salida del mismo.

En el cuarto cuadro notamos que las burbujas en el exterior del tubo ya disminuyeron de manera considerable y de desplazaron un poco más. Las burbujas al interior de la geometría también disminuyeron en un movimiento de retroceso (5).

Para el quinto cuadro se puede apreciar como prácticamente ya van desapareciendo todas las burbujas.

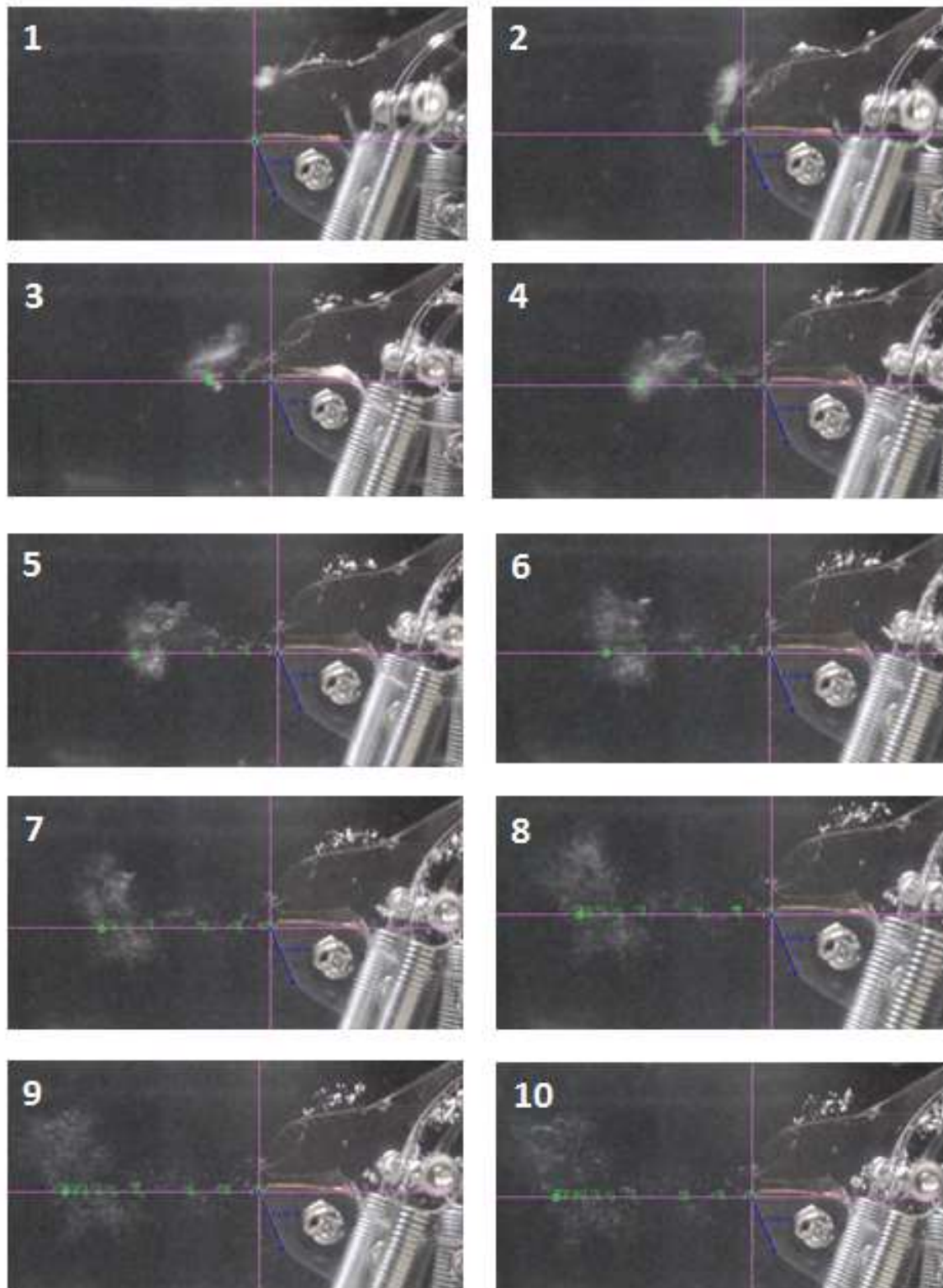
En el cuadro final se puede observar cómo quedan apenas algunas cuantas burbujas, que por su movimiento cada vez van perdiendo velocidad, no falta mucho para que acaben mezclándose por completo con el medio. Este es el final de un ciclo, las pinzas ya comienzan a abrirse y están listas para recibir otro impulso para generar nuevamente otro chorro cavitante.

## 4.2 ANÁLISIS DEL CHORRO CAVITANTE

Se realizó un análisis para determinar la naturaleza del movimiento y la velocidad que presenta una partícula en el frente del chorro cavitante, desde que sale de la boca de las pinzas ( $t=0$ ), hasta algunos instantes después. Este análisis se hizo con ayuda del software TRACKER, el material base fue un video tomado con una cámara de alta velocidad, donde la velocidad de adquisición fue de 959.04 cuadros por segundo.

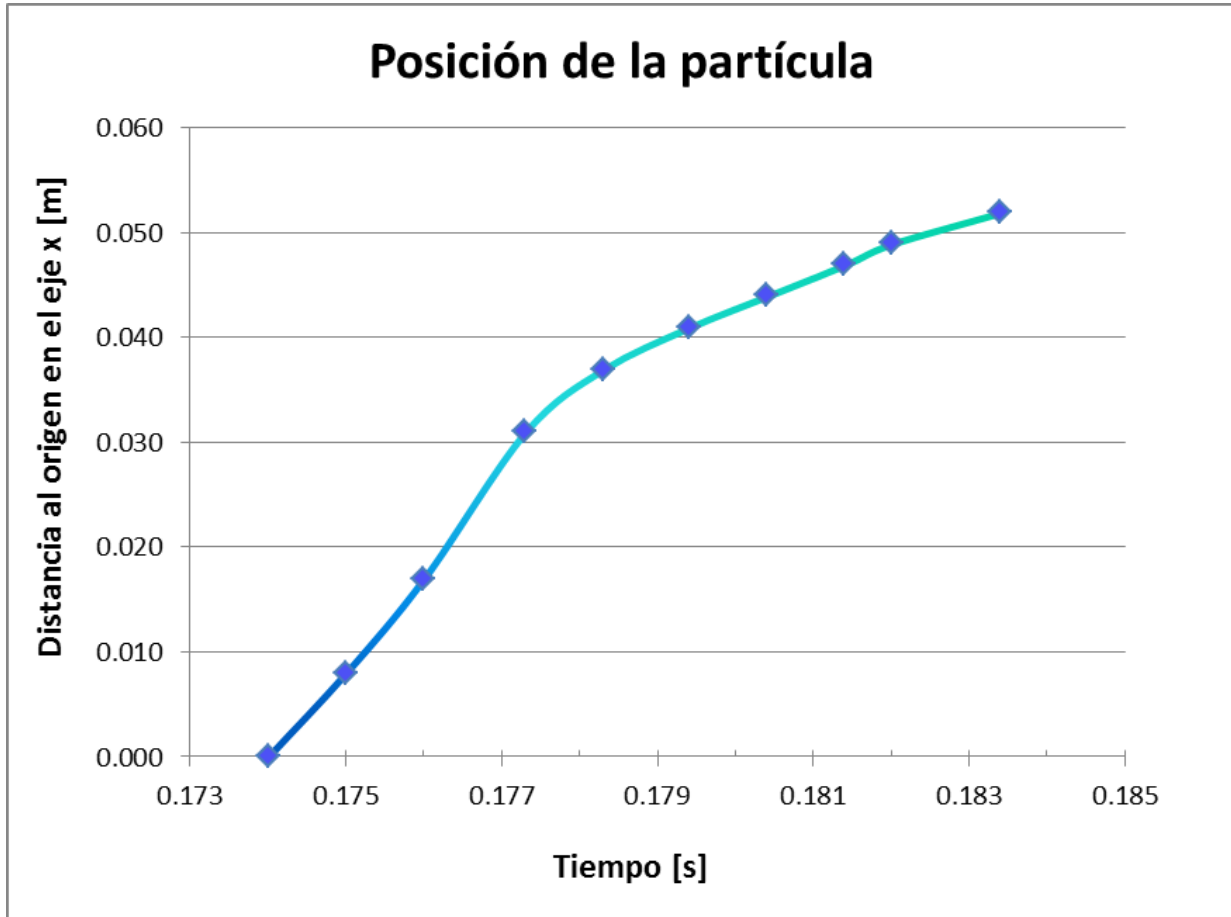
Se tomaron diez posiciones diferentes para realizar los estudios cinemáticos.





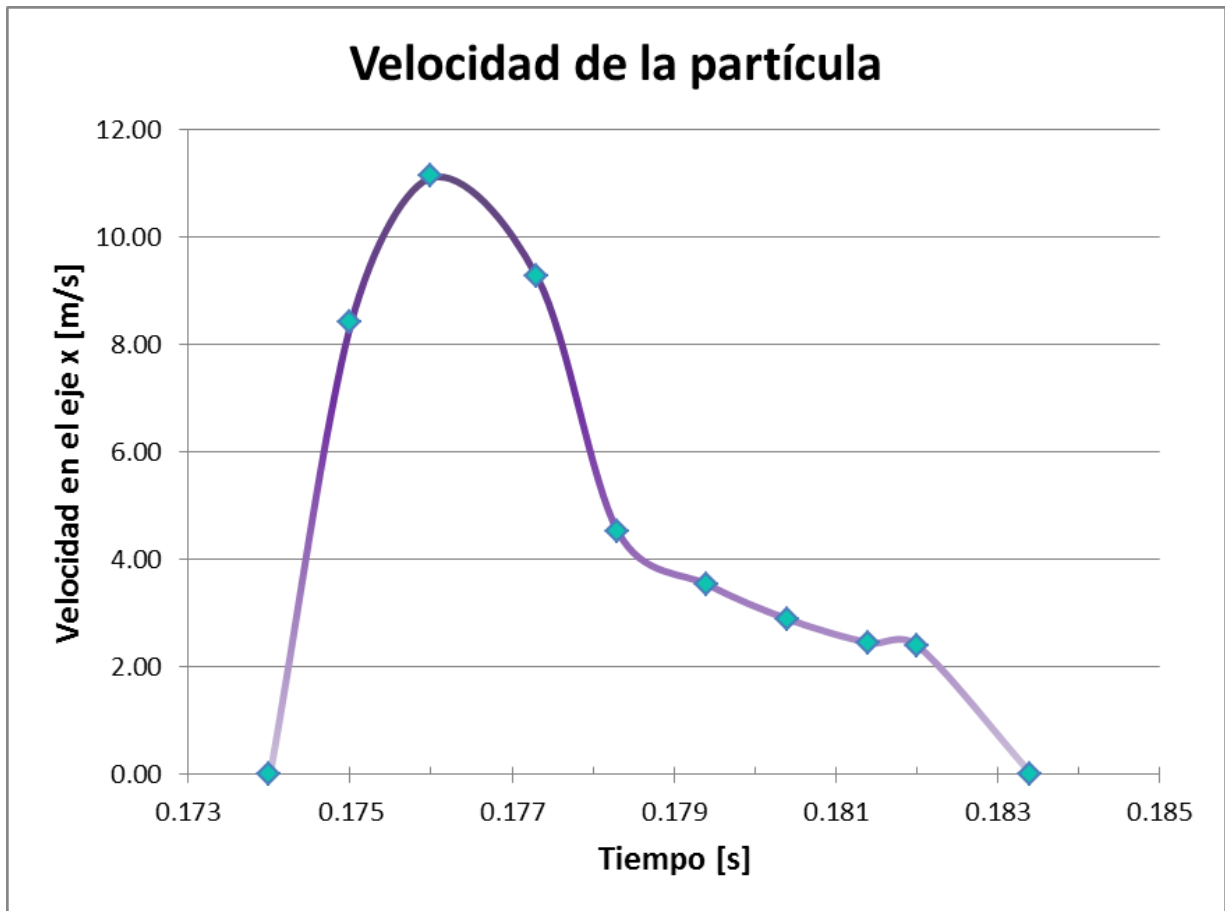
**FIGURA 28.** Secuencia del movimiento de una partícula (puntual) que se ubica en el frente del chorro cavitante y que tiene un desplazamiento en el eje x. El estudio de esta partícula se puede considerar como la velocidad promedio del frente formado por la cavitación hidrodinámica. *Elaboración propia.*

Esto permitió obtener las siguientes graficas experimentales:



**GRAFICA 1.** Posición de la partícula de estudio (en el frente del chorro cavitante), el movimiento comienza hasta que se genera la cavitación en el tubo venturi, es decir a los 0.174 segundos.

*Elaboración propia.*

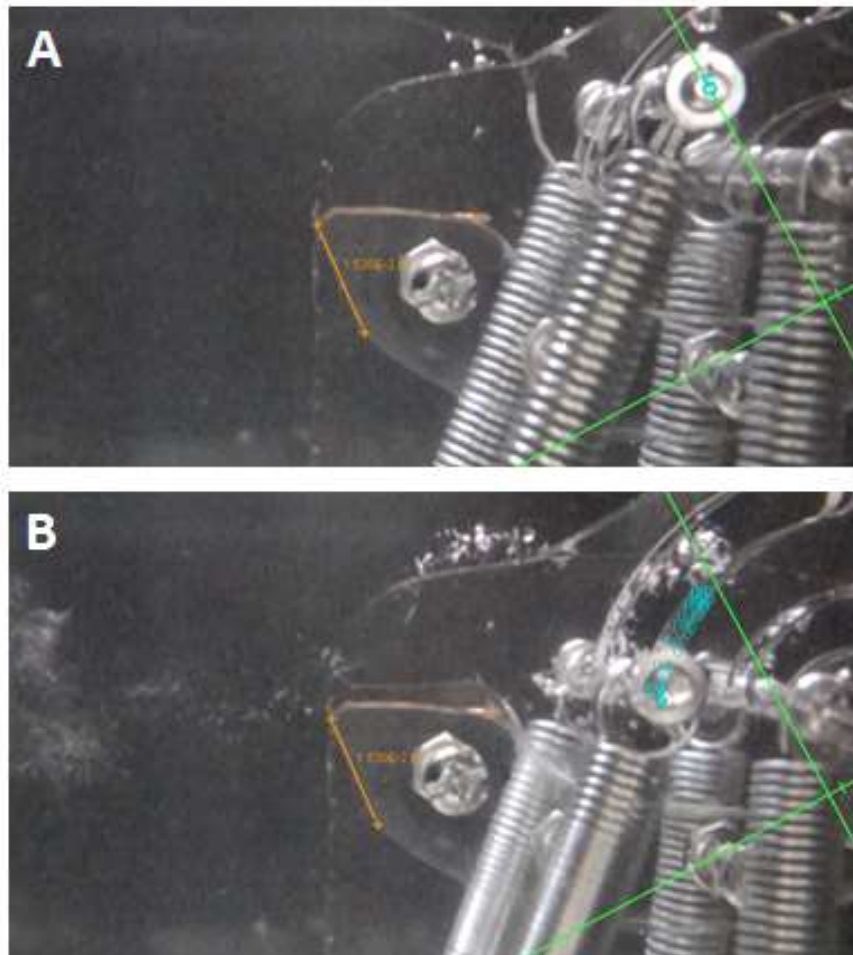


**GRAFICA 2. Magnitud de la velocidad (componente x).** Podemos notar que durante los primeros instantes la velocidad aumenta de manera repentina, alcanzando una velocidad máxima ~ 11.14 [m/s], para posteriormente ir disminuyendo hasta alcanzar el reposo.

*Elaboración propia.*

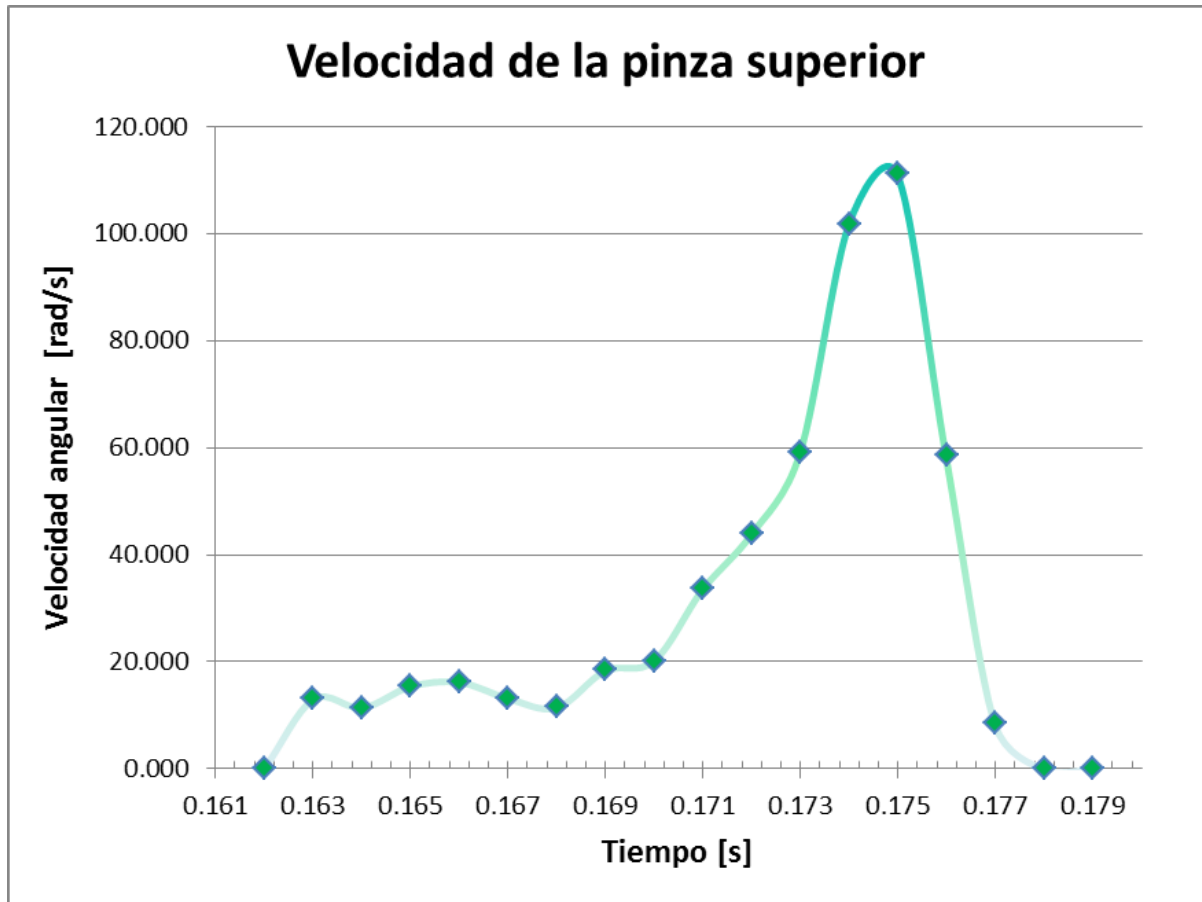


### 4.3 ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DE CIERRE DE LA PINZA



**Figura 29.** A) Posición inicial para el análisis de la velocidad angular  $t=0.162$ . B) Posición final para el análisis,  $t=0.179$ , la secuencia completa para el análisis fue realizada con 16 fotogramas. En la figura B podemos observar los puntos marcados para dicho análisis.

*Elaboración propia.*

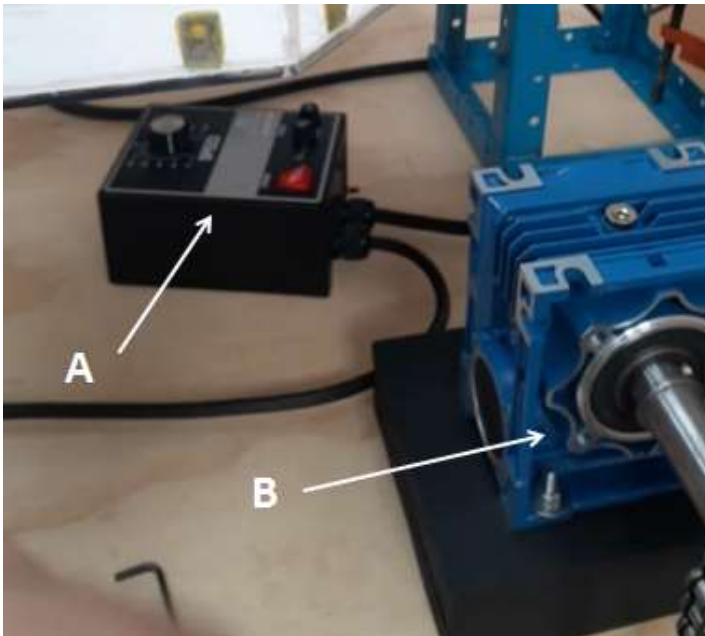


**GRAFICA 3.** Comportamiento de la velocidad que sufre la pinza (cuerpo rígido). Se observa que la velocidad angular máxima alcanzada es  $\sim 111.2$  [rad/s], instantes después esta velocidad cae repentinamente, es decir se sufre una desaceleración, justo es este momento cuando la pinza cierra para formar el tubo venturi y producir la cavitación (segundos 0.174-0.177)

*Elaboración propia.*

#### 4.4 EXPERIMENTO DE FUNCIONAMIENTO AUTOMÁTICO

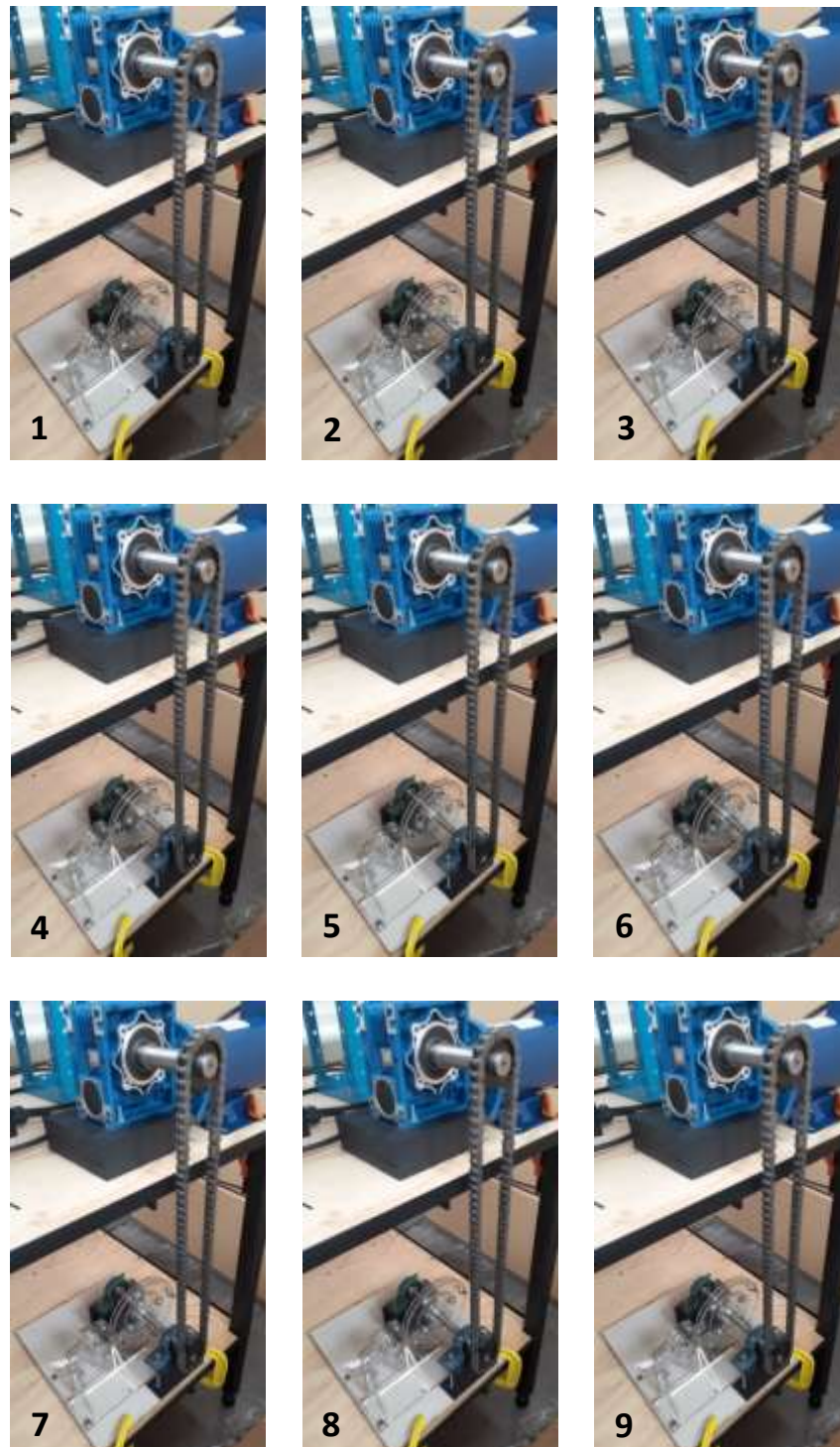
El segundo fue un arreglo para determinar el correcto funcionamiento de manera automatizada, en este caso el dispositivo no se sumergió en ningún fluido. A continuación se muestra una secuencia del funcionamiento.



**FIGURA 30. A) Controlador de velocidad del motor eléctrico. B) Reductor de velocidad.**

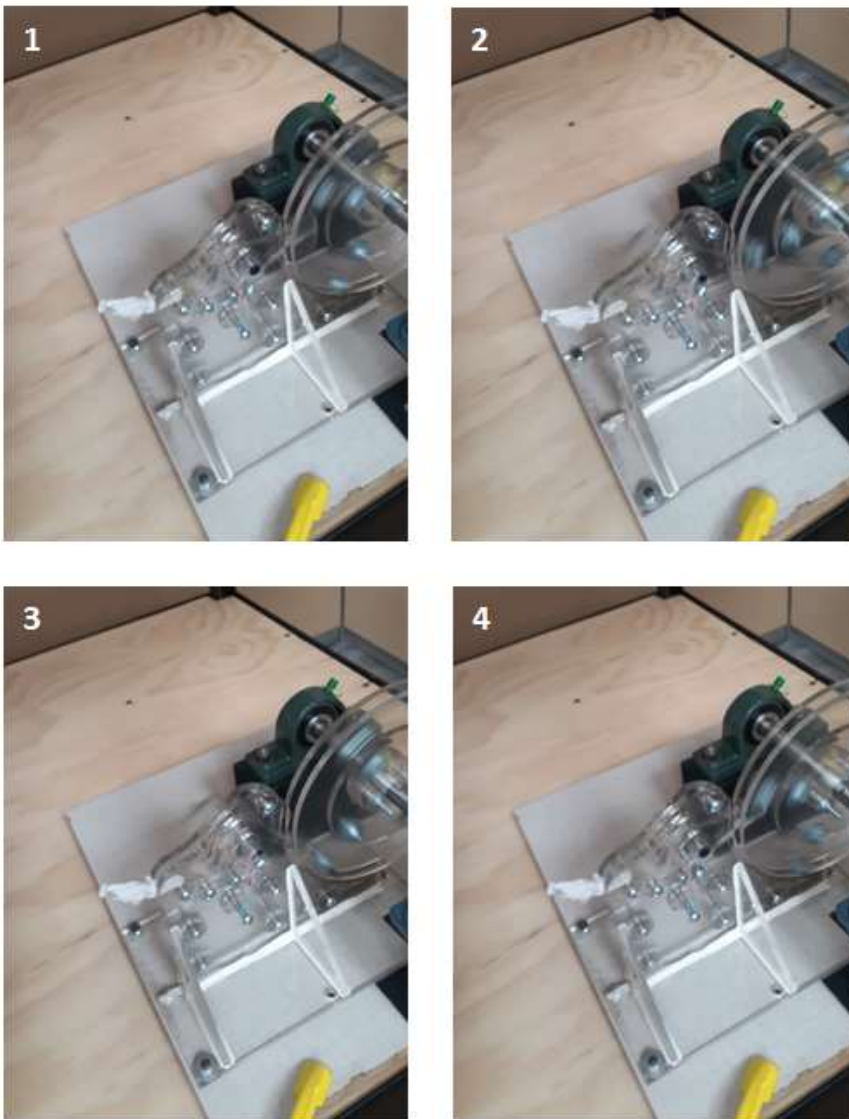
Básicamente el arreglo consta de un motor eléctrico de corriente directa conectado a un reductor de velocidad, este a su vez está conectado al eje del dispositivo mediante un sistema de catarinas (mismo diámetro) y una cadena.

Por su parte el reductor de velocidad mantiene una relación de 10:1.



**FIGURA 31.** Secuencia del funcionamiento automático del dispositivo para generar cavitación hidrodinámica. La velocidad angular ( $\omega$ ) de trabajo fue de 27.6 [rpm].

En una segunda prueba, realizando ajustes en el controlador de velocidad se obtuvo como resultado que la velocidad ( $\omega$ ) angular con la que se mueve el disco giratorio del dispositivo fue de 82.2 [rpm].



**FIGURA 32.** Secuencia de giro del dispositivo mecánico, podemos apreciar las diversas posiciones que toma la pinza en las figuras (1-4).



## CONCLUSIONES

El planteamiento principal del presente trabajo fue diseñar un dispositivo capaz de generar cavitación hidrodinámica y operar de forma automatizada.

Para el concepto de la generación de cavitación se tomó como base el mecanismo desarrollado por el Dr., Francisco Godínez, cuyo fundamento es aprovechar el perfil de un tubo Venturi convencional. Con apoyo en los campos del conocimiento tales como mecánica, cinemática, hidrodinámica, dibujo, entre otros, y aplicando ingeniería de diseño y después procesos de manufactura se desarrolló el presente trabajo.

Conforme a lo expuesto en los capítulos de esta tesis en primera instancia se puede concluir que se alcanzó el objetivo general, ya que en el capítulo de experimentación está sustentando que efectivamente el dispositivo diseñado es capaz de generar la cavitación hidrodinámica y operar de forma automática. En un trabajo posterior se podría probar su operación continúa al estar inmerso en agua.

Respecto a los objetivos específicos tenemos que se cumplieron los siguientes:

- Construcción de un modelo para realizar pruebas de concepto.  
Este es el modelo descrito en el capítulo tres, que operó conforme al desempeño esperado. El modelo fue capaz de realizar las pruebas propuestas.
- Comprobar la generación de cavitación.  
Esto queda sustentado en los resultados experimentales descritos en el capítulo cuatro, concluyendo entonces que en efecto la generación de cavitación se logra, obteniendo así el resultado esperado.

- Comprobar el funcionamiento de forma automatizada.  
El resultado fue exitoso, quedando abierta la posibilidad de probar en otra investigación el dispositivo bajo condiciones de inmersión. De realizarlo se esperaría que también funcionara de manera adecuada, evidentemente tomando algunos efectos como el arrastre del fluido, que repercutiría en su operación.
- Documentar el diseño y generar planos de ensamble del dispositivo.  
Este objetivo se logró de manera adecuada. Esto permitió, como se había planteado en un principio, que este material tuviera la posibilidad de formar parte de la solicitud de una patente que actualmente se encuentra en trámite.

Los objetivos no alcanzados dados el tiempo y condiciones son:

- Comprobar el control de la frecuencia de apertura y cierre.  
Esto no fue posible debido a la falta de tiempo, ya que no existió la posibilidad de realizar más experimentación para obtener videos que permitieran analizar la frecuencia durante el funcionamiento del dispositivo.
- Medir las características hidrodinámicas del chorro cavitante.  
Si bien se midió la velocidad del frente del chorro, no fue posible realizar un análisis más detallado, como aplicar el modelo matemático para la dinámica de la formación de burbujas, o realizar una simulación numérica de la dinámica del flujo. Este tema podría ser abordado en un trabajo a futuro.

Por otra parte este trabajo sienta las bases para que el dispositivo pueda ser mejorado/rediseñado en un futuro a fin de obtener nuevos objetivos en cuanto a la generación de cavitación.

Este dispositivo permitirá estudiar la corrosión acelerada por cavitación hidrodinámica, siendo así una alternativa de bajo costo para ser utilizada por empresas y/o diseñadores.

Por último, el más grande aporte de esta tesis es que todo el trabajo realizado en ella está reflejado en una solicitud de patente que actualmente se encuentra en trámite.



## REFERENCIAS

- [1] Salazar-Jiménez, J. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Tecnología en Marcha*, Vol. 28, N° 3, Julio-Septiembre, Pág. 127-136.
- [2] Método para la determinación de la corrosión de tuberías o tuberías internas, US4419892.
- [3] Aparato de monitoreo de tuberías, US4514730.
- [4] Monitor de alta resolución de corrosión ultrasónica in situ, US4539846.
- [5] Dispositivo y método de detección de corrosión en tuberías, US4541278.
- [6] Dispositivo de prueba de corrosión acelerada por flujo bifásico vapor-líquido, CN101900664B.
- [7] Un método para medir la tasa de corrosión acelerada, US3694324A.
- [8] P. Koukouvinis, et al. Unveiling the physical mechanism behind pistol shrimp cavitation. *Sci Rep* 7, 13994 (2017); D. Hess, et al. Vortex Formation with a Snapping Shrimp Claw. *PLOS ONE* 8, 10 (2013).
- [9] F. A. Godínez, et al. *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018)*, edited by J. Katz (ASME Press, Baltimore, 2018).
- [10] Revie, R.W. and Uhlig, H.H. (2008) *Corrosion and Corrosion Control. An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. 4th Edition, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [11] ECCA (2011). *The Basics of Corrosion*. Technical Paper. Obtenido desde: <http://www.prepaintedmetal.eu/repository/Annina/Basic%20of%20corrosion%20021211.pdf>.
- [12] *Introducción a la electroquímica*, Gonzáles. S. Jorge Antonio. , Dzib. P. Luis Román
- [13] Jean-Pierre Franc and Jean-Marie Michel (2006) *Fundamentals of Cavitation*, Kluwer Academic Publishers.

- [14] E. F. Gandolfo, E. Franco, F. H. Moll, M. G. Coussirat, A. Fontanals, A. Guardo, "Validación/calibración de modelos para flujos cavitantes, aplicación al diseño en ingeniería," *Mecánica computacional*, pp. 1135-1153, 2013.
- [15] Carpenter, M. Badve, S. Rajoriya, S. George, V. K. Saharan, A. B. Pundit, "Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry." *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 32, pp. 433-470, 2016. DOI: 10.1515/revce-2016-0032.
- [16] S. Arrojo, Y. Benito, "A theoretical study of hydrodynamic cavitation," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 15, pp. 203-211, 2008. DOI:10.1016/j.ultsonch.2007.03.007.
- [17] Y. C. Wang, C. E. Brennen, "Numerical computation of shock waves in spherical clouds of cavitation," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 121, pp. 872-880, 1999. DOI: 10.1115/1.2823549.
- [18] M. Navarrete, A. Vargas, D. Esquivel, J. L. Naude, F. Méndez, M. Villagrán, et al., "Rompimiento de la viscosidad en líquidos por cavitación hidrodinámica y acústica," in *SOMI Congreso de Instrumentación*, Puerto Vallarta, México, 2014, p. 10.
- [19] P. ángeles Ch., Presentación "Corrosión por cavitación", Universidad Nacional "Pedro Ruiz Gallo", obtenida de:  
<https://es.slideshare.net/JhonatanVasquezBenav/corrosion-por-cavitacion>
- [20] Javaherdashti R. (2008). *Microbiologically Influenced Corrosion - An Engineering Insight*. Springer London.
- [21] Ariel R. Marchengiani, *CAVITACIÓN*, Universidad Nacional del Comahue, Departamento de Mecánica Aplicada, 2006.
- [22] Outi Supponne, Philippe Kobel, Marc Tinguely, et al. , *Shock waves from non-spherical cavitation bubbles*, University of Western Australia , 2017.
- [23] Alcaide, J., Diego, J. y Artacho, M. (2001a). *Diseño de producto. El proceso de diseño*. Valencia, España. Ediciones UPV.
- [24] Dyn, C. y Little, P. (2002). *El Proceso de Diseño en Ingeniería, Cómo desarrollar soluciones efectivas*. México, Limusa Wiley.

[25] George E. Dieter, Linda C. Schmidt., Engineering design, fourth edition. 2009, McGraw-Hill. New York.

[26] [Karl T. Ulrich & Steven D. Eppinger, Product Design and Development, McGraw-hill, 5 edition, 2012.

## APÉNDICE

 <b>IMPI</b> INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL	 MXE/0000025396	MX/a/2020/006376
<b>DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES.</b> <b>SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES.</b>  <b>COORDINACIÓN DEPARTAMENTAL DE RECEPCIÓN Y CONTROL DE DOCUMENTOS.</b>	<b>EXPEDIENTE:</b> MX/a/2020/006376 <b>FOLIO DE RECEPCIÓN:</b> MX/E/2020/025396 <b>IDENTIFICADOR DE LA SOLICITUD:</b> 32212 <b>LUGAR, FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN DE LA SOLICITUD:</b> CIUDAD DE MÉXICO 17/06/2020 12:58:53	

**ACUSE DE RECIBO DE LA SOLICITUD DE:**

Patente

**SOLICITANTE(S)**

DANIEL QUESTO MARTINEZ PORCAYO

**REPRESENTANTE LEGAL:**
**DOCUMENTOS DE LA SOLICITUD:**

DOCUMENTO	NOMBRE ARCHIVO	TAMAÑO	HOJA(S)
SOLICITUD	Solicitud_000032212_17_06_2020.pdf	435.52 KB	6
COMPROBANTE DE PAGO	Pago.pdf	24.24 KB	1
HOJA DE DESCUENTO	HOJA DE DESCUENTO.pdf	25.26 KB	1
CONSTANCIA RGP	RGP-DOAJ-14782.pdf	41.45 KB	1
DOCUMENTO COMPROBATORIO DE DIVULGACIÓN PREVIA	TRES ARTICULOS.pdf	2902.15 KB	17
MEMORIA TECNICA	MEMORIA TECNICA.pdf	299.72 KB	54
DIBUJOS	DIBUJOS.pdf	1206.11 KB	20
OTROS	DESCUENTO.pdf	69.65 KB	1
OTROS	DIVULGACION PREVIA.pdf	130.04 KB	1
OTROS	1 FA Godinez R.pdf	23.64 KB	1
OTROS	2 R Montoya.pdf	77.38 KB	1
OTROS	3 OA CHAVEZ.pdf	240.6 KB	1
OTROS	4 JE Guzm.pdf	512.95 KB	1
OTROS	5 JR Valdes H.pdf	22.55 KB	1
OTROS	6 F Ramirez C.pdf	22.98 KB	1

TOTAL DE HOJAS: 108 (No se incluyen hoja(s) del acuse)

Bajo protesta de decir verdad declaró, que se encuentra en el supuesto con respecto al beneficio señalado en la Cuarta Disposición General de la Tarifa por los servicios que presta este Instituto, por lo que solicitó el 50% de descuento de la tarifa establecida, para los artículos que aplique dicho descuento. Se hace la presente declaración en cumplimiento de dicha disposición, según el acuerdo por el que se da a conocer la tarifa por los servicios que presta el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, publicado en el Diario Oficial de la Federación con fecha 23 de agosto de 1995.

Los documentos adjuntos están sujetos al estudio correspondiente que el Instituto realice de conformidad con la Ley de la Propiedad Industrial y su Reglamento.

La presente solicitud se recibe en términos del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, en los trámites que se indican; por lo tanto, previo a su presentación, el usuario aceptó lo siguiente:

- I.- Que el trámite se efectúe, desde su inicio hasta su conclusión, a través de medios de comunicación electrónica;
- II.- Bajo protesta de decir verdad, que revisó en la vista previa la información capturada y los anexos a la solicitud y que éstos son correctos; así mismo que, una vez concluido el proceso, no podría editar o variar la información o sus anexos;
- III.- Bajo protesta de decir verdad, indicó que la información capturada es cierta;



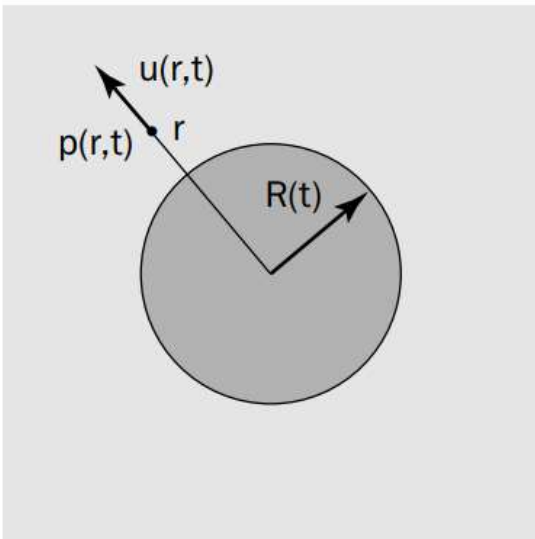
## MODELOS MATEMÁTICOS PARA SIMULAR LA DINÁMICA DE CÚMULOS DE BURBUJAS

Es posible, mediante ecuaciones básicas, poder modelar el comportamiento de la dinámica de burbujas esféricas.

En realidad hay muchas situaciones y condiciones más complicadas en el movimiento de burbujas, así que bajo ciertas restricciones el modelo de RAYLEIGH – PLESSET [15] sirve para estudiar con buena aproximación el comportamiento de las burbujas, del cual podemos obtener casos prácticos como el colapso de una burbuja, formación de burbujas a partir de un núcleo, oscilaciones de las mismas, entre otras.

Para aplicar este modelo tenemos las siguientes restricciones:

- El líquido es incompresible , newtoniano y/o no viscoso
- Se desprecia la gravedad
- El contenido de aire de la burbuja es constante (adiabático)
- La burbuja está saturada de vapor cuya presión parcial es la presión de vapor en la mayoría del líquido con esa temperatura



La función está determinada, en el dominio del líquido  $r \geq R(t)$ , se tienen la velocidad  $u(r,t)$  y la presión  $p(r,t)$ , inducidas por el comportamiento de la burbuja. En la siguiente figura se muestra el modelado de una burbuja.

**FIGURA 1.** Esquema del modelado físico de una burbuja con los componentes de la misma [15].

Ecuación de RAYLEIGH-  
PLESSET para burbujas  
esféricas

Debido a la simetría esférica, el flujo es de tipo fuente y por tanto irrotacional. También tenemos de la conservación de masa que para un fluido incompresible no existe divergencia,  $\text{div } V = 0$ , y el campo de velocidad está definido de la siguiente manera

$$u(r, t) = \dot{R} \frac{R^2}{r^2} \quad (2)$$

Para este caso en particular el término de la viscosidad en la ecuación de NAVIER-STOKES es cero. Por lo tanto para un fluido no viscoso la ecuación del momento queda así

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (3)$$

Sustituyendo en la ecuación (3), tomando en cuenta la ecuación (2)

$$\ddot{R} \frac{R^2}{r^2} + 2\dot{R}^2 \left[ \frac{R}{r^2} - \frac{R^4}{r^5} \right] = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (4)$$

Integrando respecto a  $r$  y considerando condiciones en el infinito, se obtiene:

$$\frac{p(r, t) - p_{\infty}(t)}{\rho} = \ddot{R} \frac{R^2}{r^2} + 2\dot{R}^2 \left[ \frac{R}{r} - \frac{R^4}{4r^4} \right] \quad (5)$$

Esta ecuación es equivalente a la ecuación de BERNOULLI para un flujo variable e inestable de líquido no viscoso. En la interfase donde  $r = R$ , nuestra ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{p(r, t) - p_{\infty}(t)}{\rho} = R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \quad (6)$$

Por otro lado tenemos la siguiente expresión:

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} = - \frac{2\dot{R}}{R} \quad (7)$$

La presión en la interfase de la cavidad queda definida de la siguiente manera

$$p(R, t) = p_v + p_{g0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2S}{R} + 2\mu \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (8)$$



Combinando con la ecuación (6), se obtiene que la ecuación finalmente quede así:

$$\rho \left[ R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right] = p_v - p_\infty(t) + p_{g0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2S}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \quad (9)$$

Esta ecuación, conocida como la ecuación de RAYLEIGH-PLESSET, nos permite determinar la evolución temporal del radio de una burbuja esférica debido al campo de presión al que el fluido está sometido [28]. Se trata de una ecuación diferencial no lineal, debido a los términos inerciales, la tensión superficial, la viscosidad y la presión del gas.

## SIMBOLOS

$C_v$	Número adimensional de cavitación		
$p$	Presión de cavidad	Pa	$ML^{-1}T^{-2}$
$P_2$	Presión de descarga	Pa	$ML^{-1}T^{-2}$
$P_v$	Presión de vapor	Pa	$ML^{-1}T^{-2}$
$r$	Coordenada radial	m	L
$R$	Radio esférico de la burbuja	m	L
$t$	Tiempo	s	T
$u$	Componente radial de la velocidad	m/s	$LT^{-1}$
$V_0$	Velocidad media de la garganta	m/s	$LT^{-1}$

## SIMBOLOS GRIEGOS

$\gamma$	Relación de capacidad de calor		
$\varrho$	Densidad	$Kg/m^3$	$ML^{-3}$



