



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Rediseño de aparato
bioinspirado para desinfectar
agua mediante cavitación
hidrodinámica**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Edwin Hernández Remigio

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Francisco Antonio Godínez Rojano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026

Índice

Agradecimientos.....	4
Resumen.....	5
Capítulo 1.....	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Estado del arte sobre dispositivos bioinspirados para producir cavitación.....	8
1.3 Definición del problema	12
1.4 Justificación	13
1.5 Objetivo general.....	13
1.6 Objetivos particulares	13
Capítulo 2.....	15
2.1 Fluidos, tipos, propiedades y características	15
2.2 Cavitación (Definición y tipos diferentes).....	15
2.2.1 Definición de Cavitación.....	15
2.2.2 Tipos de Cavitación	16
2.2.3 Cavitación hidrodinámica	17
2.3 Mecanismo de la Cavitación Hidrodinámica.....	17
2.4 Efectos de la Cavitación Hidrodinámica	19
2.5 Prevención de la Cavitación Hidrodinámica	19
2.6 Uso de la cavitación para desinfectar agua.....	19
2.7 Mecanismos de Acción	20
2.8 Eficiencia en la Desinfección	20
2.9 Bacterias E. coli, que enfermedades producen	21
Capítulo 3.....	23
3.1 Diseño y características.....	23
3.2 Puntos débiles del sistema actual	29
3.3 Necesidades y restricciones para el rediseño	32
Capítulo 4.....	33
4.1 Descripción general del proceso de rediseño del dispositivo	33

4.1 Metodología de diseño	33
4.2 Diseño de concepto	35
4.3 Propuesta de mejora mediante incorporación de una pieza de contacto adicional	44
4.3.1 Modificaciones requeridas	44
4.3.2 Ventajas y desventajas	45
4.3.3 Evaluación estructural	45
4.4 Propuesta de mejora mediante implementación de amortiguador con resortes helicoidales	48
4.5 Propuesta de mejora mediante Rediseño Elastómero	53
Análisis FEA del amortiguador de PU-HD	59
Capítulo 5	62
Capítulo 6	68
Apéndice A.1	70
A.1.1 Objetivo	70
A.1.2 Preparación del ensamblaje	70
A.1.3 Configuración de la simulación	72
A.1.4 Obtención de resultados	73
A.1.5 Exportación a análisis estructural	75
Referencias	80

Agradecimientos

Me siento profundamente honrado por esta oportunidad y deseo agradecer a las personas que me han dado el privilegio de completar esta tesis. En primer lugar, me corresponde otorgar a mis padres una gratitud profunda y constante. Lo que ha sido la base sobre la cual se ha construido esto es su sacrificio incansable, infinita paciencia y su fe constante en mí. El tiempo que me dedicaron y a mi desarrollo ha tenido el efecto más profundo en mi madurez como artista. Han sabido brindarme amor y fortaleza en cada paso, incluso cuando ellos mismos enfrentaron sus propios problemas. Su ejemplo de perseverancia y dedicación ha servido como la mejor inspiración para mí, y esta obra es también un testimonio de su apoyo inquebrantable.

También expreso mi agradecimiento a mi asesor de tesis, Dr. Francisco Antonio Godínez Rojano, por su apoyo profesional, sus aportes detallados y su ayuda a lo largo del proceso. Su pasión y experiencia también fueron parte de este trabajo y ampliaron mis horizontes intelectuales. Quiero reconocer el invaluable apoyo de mi familia en general, compañeros y maestros, quienes en diferentes momentos brindaron su ayuda, consejo y apoyo. Su colaboración, aunque a veces momentánea, fue significativa para enfrentar los diversos desafíos que este proceso implicó. Por último, pero no menos importante, me gustaría agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México y, especialmente, a la Facultad de Ingeniería, por los recursos, oportunidades y un contexto de apoyo para la investigación que me han proporcionado a lo largo de esta etapa. Gracias a todos por su gratitud y reconocimiento. Este logro también les pertenece a ustedes.

Resumen

El objetivo de esta tesis es rediseñar los aspectos estructurales y funcionales de un dispositivo bioinspirado para cavitación hidrodinámica que se utilizará en la desinfección de agua con altas concentraciones de bacterias. El prototipo original, inspirado en la pinza del camarón de la familia Alpheidae, presentó fallas en el mecanismo de cierre con impactos de alta intensidad, alto nivel de fricción, interferencias entre componentes y tensiones excesivas que eran suficientes para causar desgaste, corrosión, fractura prematura de tornillos y placas.

El enfoque está en hacer que la respuesta del sistema sea más eficiente estructuralmente, cambiando su mecanismo de cierre y añadiendo un mejor sistema de amortiguación. Cada una de estas configuraciones —pieza sólida, resortes, bloque elastomérico, PU-HD— fue examinada utilizando tecnologías de ingeniería asistida por computadora (CAD/CAE) y análisis de elementos finitos (FEA), incluyendo modelos de impacto no lineales y análisis de tensiones y deformaciones. Las alternativas se compararon en función de medidas cuantitativas del comportamiento estructural y dinámico, predominantemente la magnitud de la fuerza de impacto transmitida, las tensiones máximas en algunos miembros estructurales críticos y el grado de distorsión del amortiguador. Bajo estas condiciones, se eligió la configuración que minimizaba las cargas transmitidas, mejoraba el control de deformación y aumentaba la robustez y durabilidad del conjunto sin comprometer la dinámica de cierre necesaria para la generación de cavitación.

Para confirmar el desempeño del diseño propuesto, además de los análisis numéricos se realizó una comparación entre los resultados observados y los obtenidos en simulación. Se observó una reducción aproximada del 50 % en la fuerza máxima de impacto transmitida (del orden de 600 N a 300 N), así como una distribución de cargas más uniforme respecto al diseño original.

Para la estabilidad estructural y dinámica se logró una mejora significativa, pero también es necesario realizar estudios de fatiga de varios niveles y verificación experimental para garantizar la longevidad del sistema bajo condiciones reales de operación. Este estudio, por lo tanto, proporciona una base metodológica general para la generación subsecuente de dispositivos de cavitación controlada y avanza en las tecnologías sostenibles de purificación de agua.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

La desinfección del agua es un proceso fundamental para prevenir la propagación de enfermedades transmitidas por el agua y proteger la salud pública. Es un proceso crítico en el tratamiento de agua potable, ya que tiene como objetivo eliminar o inactivar patógenos que pueden causar enfermedades en la población. Un suministro de agua que no ha sido adecuadamente desinfectado puede ser un vehículo para la transmisión de enfermedades infecciosas.

La importancia de la desinfección del agua no solo radica en su capacidad para salvar vidas, sino también en la reducción de los costos asociados a la atención médica y la mejora en la calidad de vida de las comunidades. A medida que la población mundial sigue creciendo y el acceso al agua limpia sigue siendo un desafío en muchas regiones del planeta, la desinfección adecuada del agua se vuelve una de las medidas más críticas para garantizar la salud pública y la sostenibilidad del entorno.

Desde el trabajo pionero de Robert Koch en 1881, que demostró la efectividad de la cloración para matar bacterias, se han implementado diversas tecnologías de desinfección en el suministro de agua. Estas tecnologías incluyen métodos químicos (como cloro y ozono), térmicos (como la ebullición) y físicos (como la radiación ultravioleta). Sin embargo, las tecnologías convencionales, especialmente la cloración, pueden generar subproductos orgánicos peligrosos, como trihalometanos y ácidos haloacéticos. Estos compuestos pueden tener efectos adversos en la salud humana y en el medio ambiente, lo que ha llevado a la búsqueda de métodos alternativos que minimicen estos riesgos.

En los últimos años, se ha investigado ampliamente el efecto de la cavitación hidrodinámica como método para la desinfección de agua. Esto se basa en el hecho de que cuando las burbujas de cavitación colapsan, producen pequeños chorros y ondas de choque que tienen una cantidad considerable de energía. Este colapso genera condiciones extremas de temperatura y presión localmente. La energía liberada durante el colapso de las burbujas puede ser suficiente para desintegrar o inactivar patógenos presentes en el agua, como bacterias o virus. Este efecto es debido a la combinación de estrés físico y liberación de radicales libres que surgen del colapso de las burbujas. La cavitación para desinfección es considerada ventajosa porque no requiere la adición de productos químicos, lo que la convierte en una opción más ecológica y potencialmente sin residuos tóxicos.

Uno de los estudios que exploraron este campo es el realizado por Kalumuck et al. [1], en el que se presenta la tecnología DYNAJET®, que utiliza chorros de agua cavitantes para oxidar compuestos contaminantes y destruir microorganismos. En la Figura 1 se ilustra un ejemplo de los chorros de cavitación utilizados, mostrando la formación de cavidades en la corriente de agua. Los experimentos realizados en este estudio mostraron reducciones significativas en la concentración de contaminantes como herbicidas y colorantes, así como una notable eficacia en la eliminación de la bacteria *E. coli*, la cual es un indicador común de contaminación fecal en aguas residuales. Los resultados demostraron que la cavitación generada por chorros puede ser una alternativa viable y eficiente a los métodos tradicionales de desinfección, como el uso de cloro, al reducir la dependencia de estos desinfectantes y mejorar la calidad del agua tratada. Este enfoque resaltó la importancia de la cavitación en el

tratamiento de agua, motivando investigaciones orientadas a la optimización de procesos de desinfección y remediación. Entre las investigaciones relevantes se encuentra la realizada por Arrojo et al. [2], quienes propusieron una aproximación basada en la cavitación hidrodinámica para la inactivación de microorganismos, utilizando tubos Venturi, placas de orificio y bombas en circuitos hidráulicos. El estudio se centró en evaluar las condiciones físicas y químicas generadas por las burbujas de cavitación, optimizando parámetros operativos como la potencia aplicada y la geometría del sistema. Los resultados mostraron que la cavitación hidrodinámica puede lograr tasas de inactivación competitivas frente a otros métodos físicos de desinfección. Sin embargo, los autores destacaron que su efectividad es inferior a la de los desinfectantes químicos convencionales, especialmente cuando las concentraciones bacterianas son altas. A pesar de esta limitación, Arrojo et al. [2] señalaron que la cavitación hidrodinámica presenta algunas ventajas, como la reducción de riesgos asociados con la manipulación de productos químicos, lo cual es particularmente relevante en entornos industriales y de tratamiento de aguas. No obstante, la cavitación hidrodinámica puede ser menos eficiente cuando la concentración bacteriana es elevada, ya que la capacidad del proceso para inactivar microorganismos disminuye con el aumento de la carga bacteriana, a diferencia de los métodos químicos, cuya efectividad no se ve tan afectada por la concentración de microorganismos.

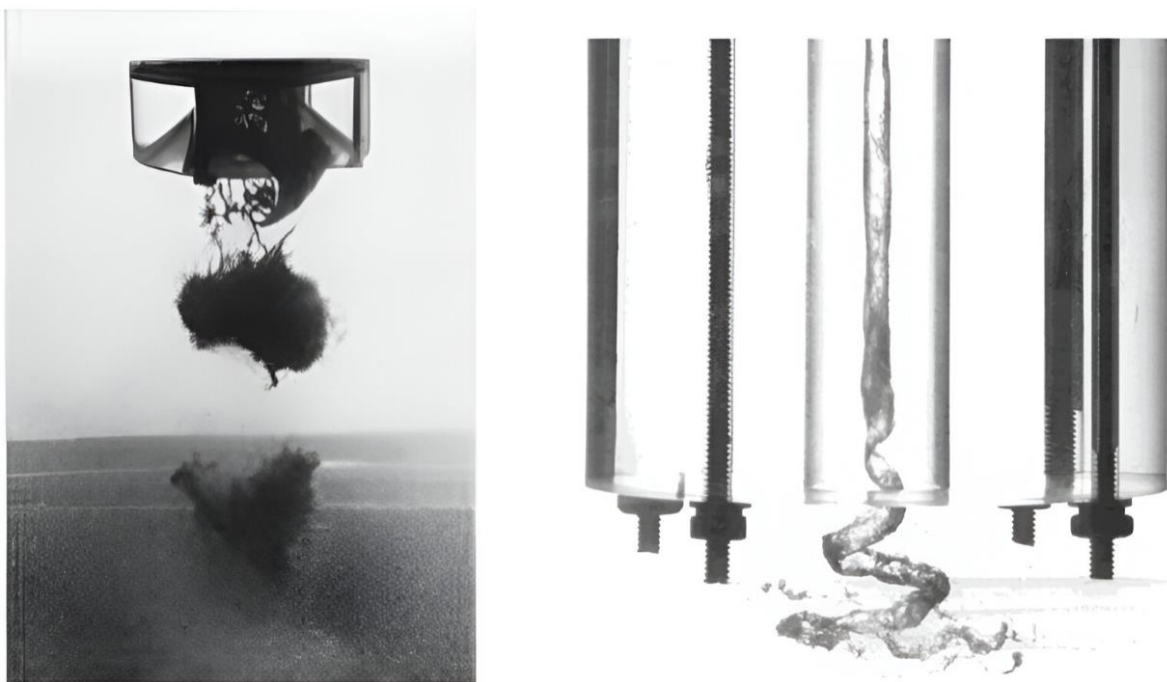


Figura 1. Ejemplos de tecnología DYNAJET® utilizada en la generación de chorros cavitantes de agua. Se ilustran dos configuraciones de chorro: (a) STRATOJET®, que produce cavidades en forma de anillo, y (b) DYNASWIRL™, que genera un vórtice lineal central, ambos diseñados para optimizar el proceso de oxidación y eliminación de microorganismos en el tratamiento de agua. Fuente Kalumuck et al. [1].

El estudio concluyó que, aunque la cavitación hidrodinámica enfrenta desafíos en términos de eficiencia comparada con los métodos químicos, su combinación con biocidas químicos podría ofrecer una alternativa interesante para futuras investigaciones, aprovechando lo mejor de ambos enfoques.

Finalmente, entre los trabajos más recientes en este campo, se destaca el realizado por Esteban Lafuente y Héctor López [3], que examina el efecto de la cavitación con el objetivo de desinfectar

agua, aunque no es el más destacado en términos de relevancia. Los autores presentan un método sobre el tratamiento de aguas contaminadas del Río Santa Clara en Ecuador. Investigaron la efectividad de la cavitación hidrodinámica como un método de desinfección de aguas residuales, destacando su capacidad para eliminar bacterias sin generar subproductos tóxicos. Mediante la implementación de un diseño experimental que utiliza un tubo Venturi para controlar el flujo y la presión del agua, lograron generar diferentes regímenes de cavitación. Este enfoque permite medir la eficiencia del proceso en función de la presión de descarga. Su investigación demostró una reducción significativa de la carga bacteriana, alcanzando una eficiencia de desinfección del 99.5% a presiones de 3 bar. En la Figura 2, se presentan los resultados del proceso de tinción de Gram realizado sobre las muestras de agua antes y después del tratamiento, ilustrando claramente los cambios en la población bacteriana, evidenciando la efectividad del método en la eliminación de bacterias, ya que se observó una predominancia de bacterias grampositivas en comparación con la presencia inicial de gramnegativas.

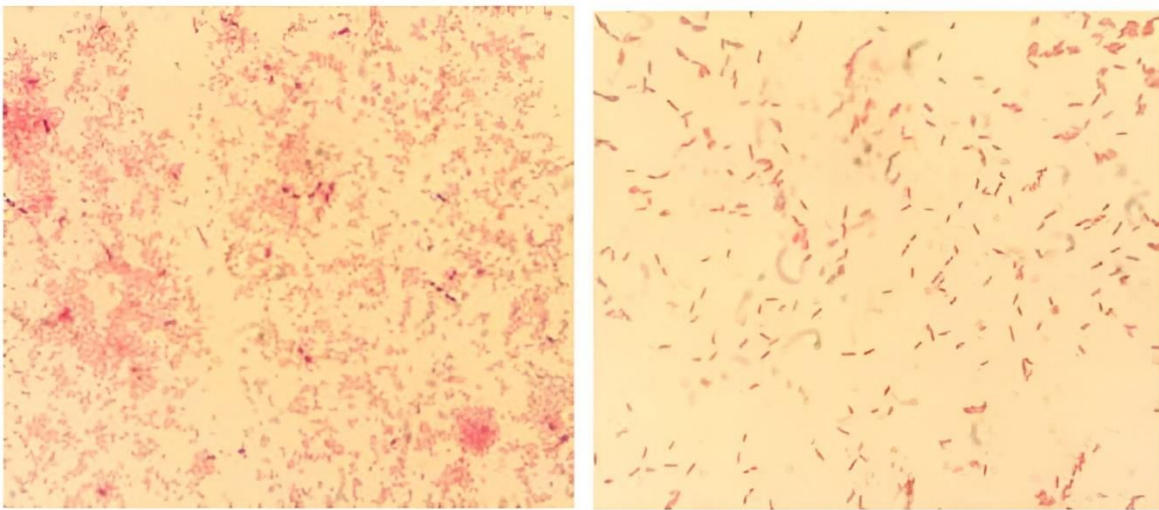


Figura 2. Tinción de Gram de las muestras de agua del Río Santa Clara antes y después del tratamiento con cavitación hidrodinámica. A la izquierda, se observa la presencia significativa de bacterias gramnegativas (color rosa) y grampositivas (color púrpura) en la muestra inicial. A la derecha, la tinción de las colonias sobrevivientes después del proceso de desinfección, mostrando predominantemente bacterias grampositivas, lo que indica la efectividad del tratamiento y las características de resistencia de las bacterias presentes [3].

1.2 Estado del arte sobre dispositivos bioinspirados para producir cavitación

A lo largo de su historia, la humanidad ha buscado soluciones a los desafíos que nos presenta nuestro entorno. Desde el principio de los tiempos, los seres humanos han mirado al mundo natural para encontrar respuestas a sus necesidades. A lo largo de los últimos siglos, esta relación se ha profundizado y transformado, dando lugar a una serie de inventos y avances tecnológicos que, más que productos de la imaginación humana, son verdaderas imitaciones de los procesos, estructuras y comportamientos presentes en la naturaleza. Así, los dispositivos bioinspirados se han convertido en un campo clave de innovación.

Los dispositivos bioinspirados son aquellos que están diseñados imitando o tomando como referencia sistemas biológicos y procesos naturales. La idea es aplicar principios, estructuras, materiales o mecanismos presentes en la naturaleza para desarrollar soluciones tecnológicas innovadoras. Estos dispositivos buscan aprovechar las ventajas que ofrecen los organismos vivos para crear productos más eficientes, sostenibles o inteligentes.

Un ejemplo bien establecido de adaptación biológica es el camarón pistola (*Alpheidae*), un crustáceo que puede crear cavitación hidrodinámica mediante el cierre muy rápido de su pinza (Figura 3). Este mecanismo crea un chorro de agua a gran velocidad, que potencialmente supera los 20–30 m/s, con una oclusión que ocurre en escalas de tiempo que van desde microsegundos hasta milisegundos y conduce a una burbuja de cavitación que colapsa a medida que se libera energía localizada. Ha sido este fenómeno el que le permite cazar y comunicarse, pero también ha impulsado el desarrollo de dispositivos bioinspirados para la ingeniería hidráulica y la desinfección del agua.



Figura 3. Camarón pistola (familia *Alpheidae*). Se observa su característica pinza sobredimensionada, utilizada como herramienta de caza y defensa mediante la generación de ondas de choque [4].

El estudio de Koukouvinis et al. [5] investiga la cavitación en la pinza del camarón pistola utilizando simulaciones numéricas, debido a las limitaciones de los métodos experimentales tradicionales para medir flujos complejos. Se utiliza un modelo geométrico simplificado de la pinza, fundamentado en estudios experimentales previos, lo que permite condiciones de simulación controladas y facilita la comparación con datos históricos. Las técnicas computacionales avanzadas, como el Modelo de Equilibrio Homogéneo y el método de Frontera Inmersa, son clave para describir el movimiento de la pinza y el flujo cavitante. Además, se realizaron estudios paramétricos sobre las dimensiones reales de la pinza para correlacionar la velocidad de cierre del émbolo con el comportamiento de la cavitación, ofreciendo una comprensión más completa del fenómeno en condiciones biológicas reales. Como se ilustra en la Figura 4, que muestra instantes del cierre de la garra a "tamaño real", se puede observar cómo los vórtices se desarrollan y cambian a medida que la garra se va cerrando, proporcionando una visualización clara de la dinámica del flujo.

Los estudios han demostrado que la presión en el núcleo del vórtice puede llegar a niveles de hasta 10^5 Pa, creando un ambiente que no solo aturde a las presas, sino que también genera ruido y cambios en la presión del agua que podrían ser utilizados como mecanismo de comunicación entre

individuos de la especie. Los anillos de cavitación resultantes no son esféricos, como se podría esperar, sino que adoptan una forma toroidal, lo que aporta características únicas al fenómeno.

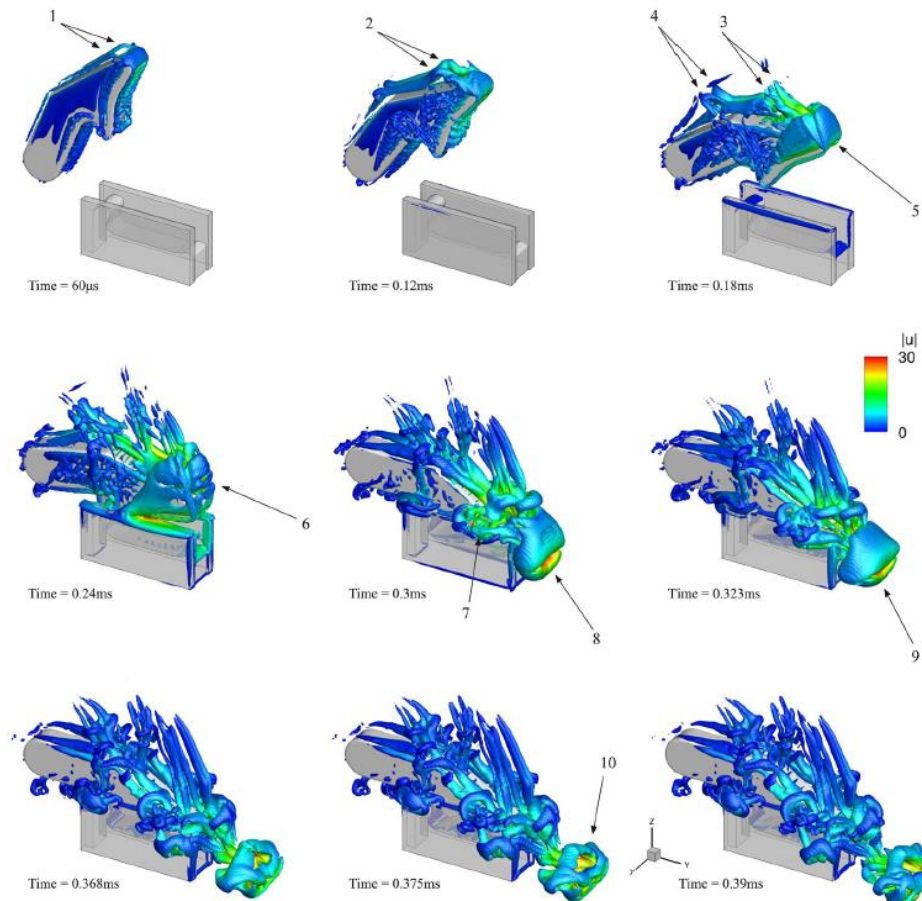


Figura 4. Instantes del cierre de un modelo de garra del camarón pistola. La imagen ilustra el desarrollo y la evolución de los vórtices durante el cierre de la pinza, mostrando la dinámica del flujo y la formación de estructuras cavitantes en diferentes momentos a lo largo del proceso [5].

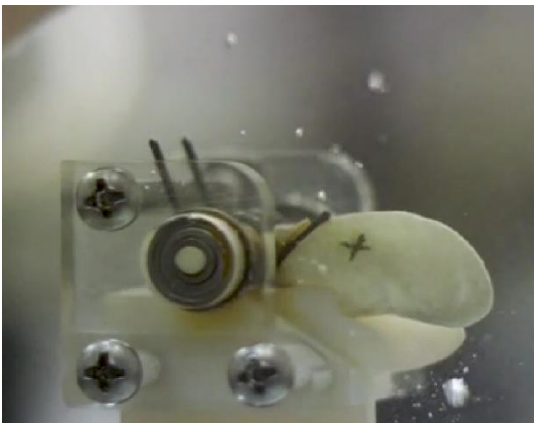


Figura 5. Dispositivo bioinspirado fabricado, que incorpora el mecanismo de plunger, socket y resorte de torsión. Este diseño replicado del camarón chasqueador permite la generación de plasma mediante cavitación [6].

En este contexto, el trabajo de Koukouvinis et al. proporciona una base sólida para comprender la dinámica de la cavitación en la pinza del camarón pistola mediante simulaciones numéricas detalladas. Sin embargo, más allá de los estudios teóricos y simulaciones, las aplicaciones prácticas que exploran la cavitación y sus efectos se han intensificado en años recientes. Un ejemplo destacado de este avance es el estudio realizado por Tang y Staack [6], que expande la investigación sobre la cavitación mediante el desarrollo de un dispositivo bioinspirado [Figura 5]. Además del mecanismo de chasquido de la garra del camarón pistola, este dispositivo genera cavitación y formación de plasma, abriendo así la posibilidad de aplicación tecnológica de este fenómeno. Según los resultados reportados, el dispositivo demostró una eficiencia de conversión de energía de

aproximadamente 36.1%, definida como la relación entre la energía potencial elástica almacenada en el resorte del mecanismo de cierre y la energía estimada asociada con la cavitación generada durante el colapso de la burbuja. Este valor está considerablemente por delante de las eficiencias típicas de los métodos convencionales, en particular la sonoluminiscencia de burbuja única ($\approx 0.014\%$) y la cavitación inducida eléctricamente (hasta $\approx 0.058\%$). Esto indica la posibilidad de desarrollar técnicas bioinspiradas para desarrollar tecnologías que permitan una generación más efectiva de cavitación y plasma. Además, el dispositivo no solo reprodujo la característica de cavitación, sino que también proporcionó la capacidad de ver emisión de luz y ondas de choque, confirmando la generación de plasma bajo circunstancias controladas. Estos resultados son muy significativos, ya que dan esperanza para el desarrollo de nuevas tecnologías que podrían proporcionar beneficios a la tecnología de tratamiento de líquidos y procesamiento químico.

El fenómeno de cavitación, estudiado en el contexto de la pinza del camarón pistola, no solo revela aspectos fundamentales sobre la dinámica de fluidos, sino que también inspira avances en el diseño de dispositivos tecnológicos. En este sentido, el estudio presentado por Godínez et al. [7] explora el desarrollo de un dispositivo bioinspirado, basado en el mecanismo de cavitación de la pinza del camarón pistola. Este dispositivo emula en cierta medida el proceso de cavitación al emplear un sistema de cierre rápido que induce condiciones de presión fluctuante dentro de un líquido, similar a las condiciones observadas en los estudios previos.

El funcionamiento del dispositivo se basa en dos procesos fundamentales: la generación de burbujas y su posterior colapso [Figura 6]. Al activar el émbolo, el flujo de agua experimenta un cambio repentino en presión, permitiendo que se formen burbujas de vapor. Estas burbujas se expanden y colapsan rápidamente, liberando energía en forma de micro-jets y ondas de presión, generando así condiciones extremas que son esenciales para simular el comportamiento de la cavitación.

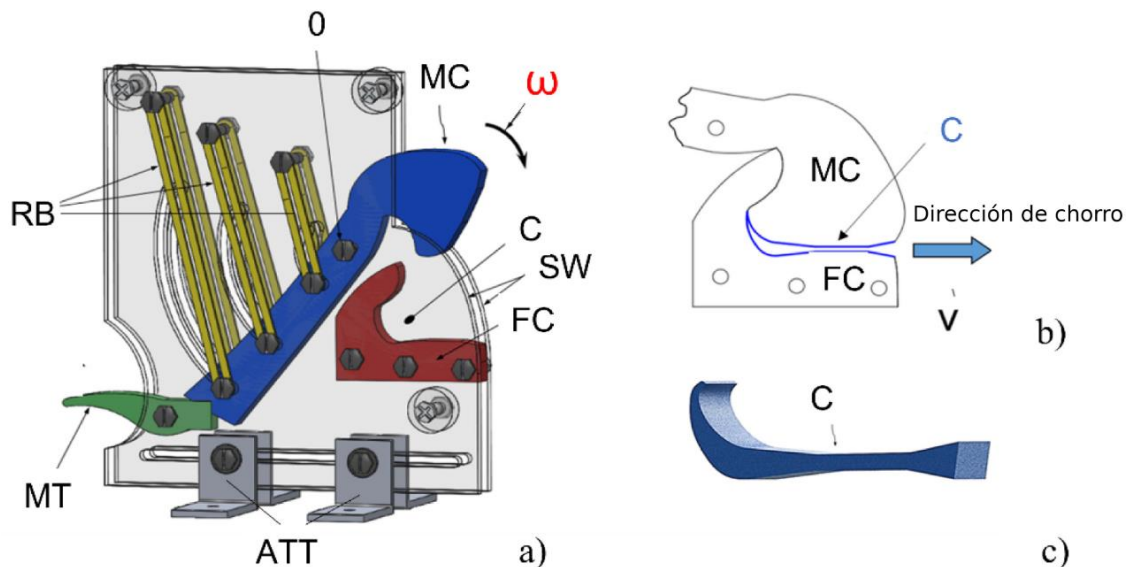


Figura 6. Dispositivo bioinspirado del camarón. (a) Representación gráfica. (b) Posición final de la pinza. (c) Representación tridimensional de la cavidad tipo Venturi. Se muestra el flujo de agua generado por el mecanismo. La interpretación de los colores en la figura se refiere a diferentes aspectos del flujo [7].

Uno de los aspectos destacados del dispositivo es su capacidad para generar patrones complejos de flujo interno con estructuras cavitantes. Según los autores, se observó que estos patrones juegan un papel crucial en el comportamiento del fluido, ya que influyen en la formación y colapso de burbujas

tanto en la cámara de cavitación como en conducciones similares a un tubo Venturi. Esto resalta la importancia de la configuración geométrica del dispositivo, que permite un acoplamiento dinámico entre el flujo interno y externo. En la Figura 7 se presenta una comparación entre visualizaciones experimentales y simulaciones numéricas, donde se observa cómo el fluido es arrastrado y se forman estructuras turbulentas relacionadas con el proceso de cavitación, lo que ilustra la efectividad del diseño en la generación de estos patrones complejos.

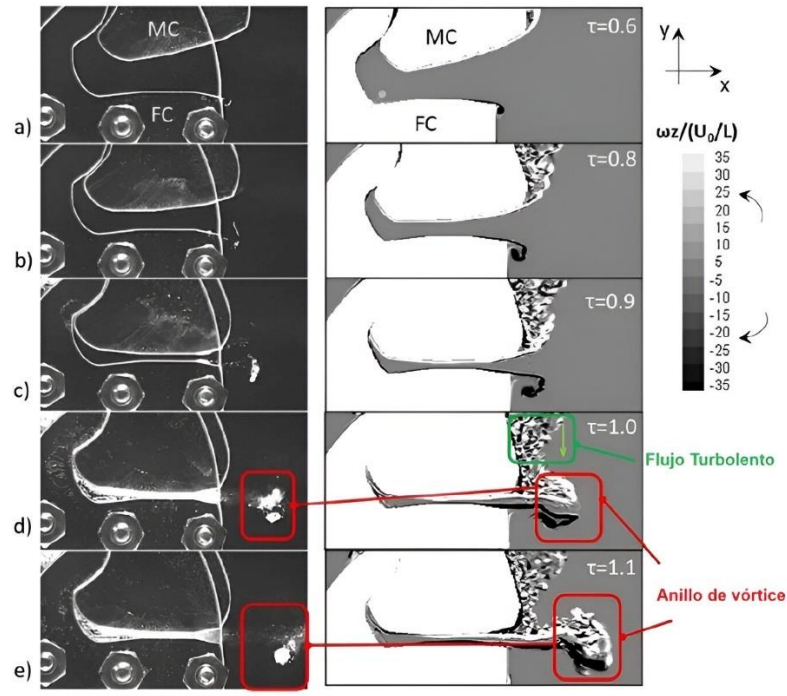


Figura 7. Comparación entre visualizaciones experimentales (columna izquierda) y simulaciones numéricas (columna derecha) del flujo turbulento en el dispositivo bioinspirado. Se ilustran los patrones complejos de flujo y las estructuras cavitantes generadas durante el colapso de burbujas, destacando el acoplamiento dinámico entre el flujo interno y externo. Las áreas de mayor intensidad de vorticidad están representadas por un gradiente de colores, evidenciando la efectividad del diseño en la generación de cavitación [7].

La generación de cavitación mediante este dispositivo bioinspirado presenta múltiples aplicaciones en la industria y el medio ambiente. Como se mencionó previamente, en el tratamiento de agua, la cavitación puede ser una técnica eficaz para desinfectar al destruir patógenos mediante el colapso de burbujas. La capacidad del dispositivo para generar cavitación de manera controlada y eficiente sugiere que podría ser una alternativa atractiva a métodos químicos tradicionales, ofreciendo una solución más sostenible y menos contaminante para la purificación del agua.

1.3 Definición del problema

Esta tesis aborda un problema relacionado con los fallos en un dispositivo de cavitación hidrodinámica bioinspirado, dirigido a purificar agua con alta concentración de bacterias. Aunque el prototipo, modelado a partir de la pinza del camarón Alpheidae, ha sido efectivo en la reducción de bacterias, se ha demostrado que presenta fallos mecánicos en el mecanismo de cierre de la garra. Los

aspectos de los fallos incluyen la incapacidad de producir una fuerza consistente y suave sin fricción excesiva entre los elementos, interferencias, junto con impactos de alta intensidad. Estos inconvenientes conducen a un desgaste acelerado por fricción, corrosión y fatiga prematura de una amplia gama de componentes mecánicos, y en particular de los tornillos de acero inoxidable que sufren fracturas recurrentes por el dispositivo bajo condiciones de trabajo cíclicas, a pesar de estar apretados con el par de torsión recomendado. Es el fallo de estos elementos lo que afecta la operatividad y durabilidad del sistema.

1.4 Justificación

La purificación del agua es fundamental para asegurar su consumo seguro y saludable, siendo crucial la eliminación de bacterias y microorganismos patógenos. Métodos comunes como el uso de cloro y luz ultravioleta presentan limitaciones, como la incapacidad de eliminar ciertos patógenos o contaminantes.

Este trabajo puede abrir nuevas oportunidades para desarrollar soluciones más sostenibles y económicas en el tratamiento del agua, con aplicaciones tanto industriales como ambientales. Además, el uso de herramientas de software de diseño en este proceso permitirá aplicar conocimientos que serán útiles en futuros proyectos académicos y profesionales relacionados con la tecnología de purificación de agua. El rediseño del sistema de pinzas para generar cavitación que se presenta en esta tesis brindará una experiencia invaluable para abordar desafíos complejos en el diseño de tecnologías innovadoras orientadas a la purificación del agua.

1.5 Objetivo general

Rediseñar el dispositivo bioinspirado que produce cavitación destinado a la desinfección de agua con el propósito de hacerlo más robusto y durable.

1.6 Objetivos particulares

- 1) Realizar simulaciones de estrés y deformación del sistema de cierre con herramientas CAD/CAE (Autodesk Inventor e Inventor Nastran) para identificar áreas críticas de concentración de estrés y deformación plástica en componentes metálicos como tornillos, placas base y superficies de impacto.
- 2) Inspeccionar el prototipo físico existente del dispositivo de cavitación, enfocándose en el mecanismo de cierre y sus elementos estructurales, para documentar defectos de diseño como deformaciones plásticas, desgaste por fricción, corrosión y fracturas en componentes sometidos a impacto repetitivo.
- 3) Evaluar cualitativamente el comportamiento a la fatiga del sistema de amortiguación de impactos basado en los niveles de estrés alternante obtenidos en las simulaciones FEA, con el fin de identificar componentes susceptibles a fallos debido a cargas cíclicas dentro del mecanismo de cierre.

4) Desarrollar y comparar propuestas de rediseño para el sistema de amortiguación de impactos, basándose en la reducción de tensiones críticas obtenidas a través de la simulación, seleccionando la configuración.

5) Proponer y validar a través de simulaciones el cambio de diseño seleccionado, evaluando su desempeño estructural bajo condiciones de impacto equivalentes a las de la operación del dispositivo, con el propósito de verificar la mejora en la resistencia a las tensiones y en la integridad del sistema de cierre.

Capítulo 2

Principios básicos

2.1 Fluidos, tipos, propiedades y características

Los fluidos son sustancias que pueden fluir y adaptarse a la forma de su contenedor. Se clasifican principalmente en dos categorías: fluidos líquidos y gaseosos. Los líquidos son incompresibles en su mayoría, lo que significa que su densidad no cambia significativamente con la presión, mientras que los gases son compresibles, lo que les permite cambiar de volumen y densidad bajo variaciones de presión y temperatura. Esta clasificación es fundamental en la mecánica de fluidos, ya que las propiedades y comportamientos de los fluidos varían considerablemente entre estas dos categorías.

Las propiedades de los fluidos son esenciales para entender su comportamiento en diversas aplicaciones de ingeniería. Entre las propiedades más relevantes se encuentran la densidad, la viscosidad, la presión de vapor y la tensión superficial. La densidad es la masa por unidad de volumen y juega un papel crucial en la flotación y el comportamiento de los fluidos en movimiento. La viscosidad, por otro lado, es una medida de la resistencia de un fluido a fluir; los fluidos con alta viscosidad, como el aceite, fluyen más lentamente que los fluidos de baja viscosidad, como el agua. Estas propiedades son fundamentales para el diseño y análisis de sistemas que involucran fluidos, como tuberías, bombas y aeronaves.

Además de las propiedades físicas, los fluidos también se caracterizan por su comportamiento bajo diferentes condiciones de flujo. Se pueden clasificar en flujo laminar y turbulento. El flujo laminar se caracteriza por un movimiento suave y ordenado de las partículas del fluido, mientras que el flujo turbulento presenta un movimiento caótico y desordenado. Esta distinción es crucial en la mecánica de fluidos, ya que afecta la resistencia al flujo y la transferencia de energía en sistemas de fluidos. La transición entre estos dos tipos de flujo depende de factores como la velocidad del fluido, la viscosidad y las dimensiones del conducto por el que fluye.

Finalmente, la comprensión de los fluidos y sus propiedades es vital en diversas aplicaciones de ingeniería, desde la hidráulica hasta la aerodinámica. La mecánica de fluidos no solo se centra en el estudio de los fluidos en reposo, sino también en aquellos en movimiento, lo que incluye el análisis de fuerzas, presiones y energías involucradas en el flujo. Este conocimiento permite a los ingenieros diseñar sistemas más eficientes y seguros, optimizando el rendimiento de máquinas y estructuras que interactúan con fluidos. En resumen, el estudio de los fluidos, sus tipos, propiedades y características es fundamental para el avance de la ingeniería y la tecnología moderna [8].

2.2 Cavitación (Definición y tipos diferentes)

2.2.1 Definición de Cavitación

La cavitación se define como la ruptura de un líquido o de una interfaz fluido-sólido, causada por una reducción de la presión estática local. Este fenómeno se manifiesta a través de la formación de

burbujas visibles que se generan en regiones donde la presión es suficientemente baja, como se muestra en la figura 8. En líquidos como el agua, la presencia de vacíos microscópicos actúa como núcleos de cavitación, que pueden crecer hasta un tamaño significativo cuando se dan las condiciones adecuadas.

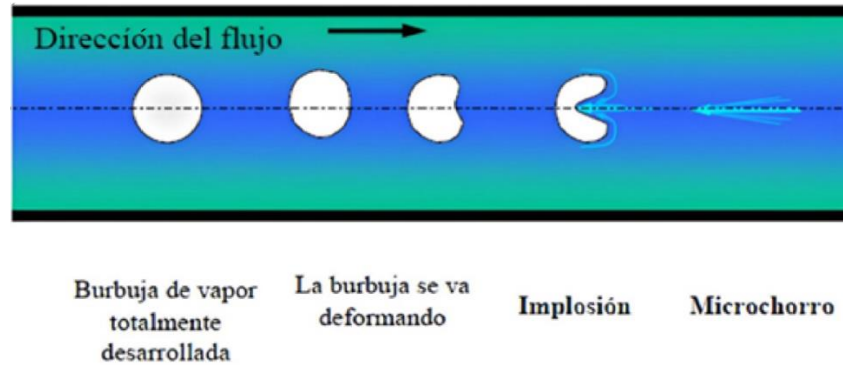


Figura 8: Colapso de una burbuja y posterior formación de un microchorro [9].

En esencia, la cavitación inicia cuando un fluido experimenta una disminución significativa de presión, lo que genera un entorno propicio para que se formen burbujas de vapor. Este proceso se puede observar frecuentemente en situaciones donde hay un aumento brusco de la velocidad del fluido, como al pasar por un estrechamiento en una tubería o en los impulsos de las palas de una bomba o turbina. La dinámica de la cavitación es fundamental para comprender cómo estas burbujas de vapor se comportan en el flujo, incluyendo su crecimiento, colapso y la posterior interacción con el fluido circundante.

Al colapsar, las burbujas de vapor liberan una gran cantidad de energía, creando ondas de choque que pueden causar daños significativos en las superficies de los componentes del sistema, como erosión y fatiga del material. Este daño no solo afecta la durabilidad y eficiencia operativa de los equipos, sino que también puede provocar interrupciones en su funcionamiento, aumentando los costos de mantenimiento y reparación. Por lo tanto, la cavitación se considera un fenómeno devastador en la ingeniería de fluidos y en el diseño de equipos hidráulicos.

La cavitación no se limita únicamente a la erosión física; también puede influir en el rendimiento hidrodinámico, como la reducción del caudal y la eficiencia de las bombas, especialmente en aplicaciones donde se requiere un manejo preciso de fluidos. Por esta razón, es crucial desarrollar métodos de diseño y operación que minimicen el riesgo de cavitación, implementando técnicas como el control de la velocidad del fluido, la selección adecuada de geometrías de equipos y el uso de materiales resistentes a la erosión.

2.2.2 Tipos de Cavitación

Cavitación por Ebullición: Ocurre cuando la presión estática local en un fluido cae por debajo de la presión de vapor del líquido. Este tipo de cavitación es común en sistemas donde se producen cambios bruscos de presión, como en las aspas de las bombas o en las hélices de los barcos. Las burbujas de vapor formadas en este proceso pueden colapsar violentamente al ser arrastradas hacia áreas de mayor presión, generando ondas de choque que pueden causar erosión y daño a las superficies cercanas.

Cavitación Gaseosa: La cavitación gaseosa se produce en líquidos que contienen gases disueltos. En este caso, las burbujas de cavitación se llenan predominantemente con los gases atrapados en el líquido. Este tipo de cavitación puede ser menos destructivo que la cavitación vaporosa, pero aún puede afectar el rendimiento de los sistemas hidráulicos. La presencia de núcleos de gas en el líquido puede facilitar la formación de burbujas a presiones más altas y velocidades más bajas.

Cavitación por Ebullición: Aunque a menudo se confunde con la cavitación, la ebullición es un fenómeno distinto que se produce debido a un aumento en la temperatura del líquido, en lugar de una reducción en la presión. En la ebullición, las burbujas se forman en todo el líquido y no están necesariamente relacionadas con la dinámica del flujo. Sin embargo, en ciertas condiciones, la ebullición puede coexistir con la cavitación, especialmente en sistemas donde se producen cambios de temperatura y presión simultáneamente.

Cavitación Hidráulica: Ocurre en situaciones donde hay un flujo de fluido que se acelera a través de un estrechamiento, como en una válvula o un orificio. La reducción de presión en el área de construcción puede llevar a la formación de burbujas, que luego colapsan al salir de la zona de baja presión. Este tipo de cavitación es común en sistemas de tuberías y puede ser un indicador de problemas en el diseño del sistema.

Cavitación de Superficie: Este tipo se produce en la superficie de un objeto sumergido en un fluido, como una hélice o un ala. La presión en la superficie puede caer por debajo de la presión de vapor, formando burbujas que pueden colapsar y causar erosión en la superficie del objeto.

La cavitación es un fenómeno intrincado que puede impactar negativamente el rendimiento de los sistemas hidráulicos. Es fundamental entender los distintos tipos de cavitación y sus mecanismos para lograr un diseño eficiente de los equipos y prevenir posibles daños. La investigación constante en este campo es vital para mejorar la eficiencia y la longevidad de las máquinas que funcionan en condiciones de flujo multifase [10].

2.2.3 Cavitación hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica es un fenómeno que se presenta en sistemas de flujo de líquidos, especialmente en dispositivos como los tubos Venturi, donde se producen cambios significativos en la velocidad y presión del fluido. Este tipo de cavitación se origina debido a la dinámica del flujo y se caracteriza por la formación de burbujas de vapor en áreas donde la presión local cae por debajo de la presión de vapor del líquido [11].

2.3 Mecanismo de la Cavitación Hidrodinámica

En un tubo Venturi, el fluido experimenta una aceleración al pasar a través de una sección de menor diámetro. Según el principio de Bernoulli, esta aceleración provoca una disminución en la presión estática del fluido. Si la presión estática cae por debajo de la presión de vapor del líquido, se inicia la formación de burbujas de vapor. Este fenómeno es crítico en aplicaciones donde se requiere un control preciso del flujo, como en sistemas de bombeo y en la industria de procesos. La variación de la presión, en función de la geometría y la posición, en un dispositivo sujeto a cavitación hidrodinámica, puede observarse en la Figura 9, que ilustra cómo la presión cambia a lo largo del flujo del fluido en relación con los cambios en la geometría del dispositivo.

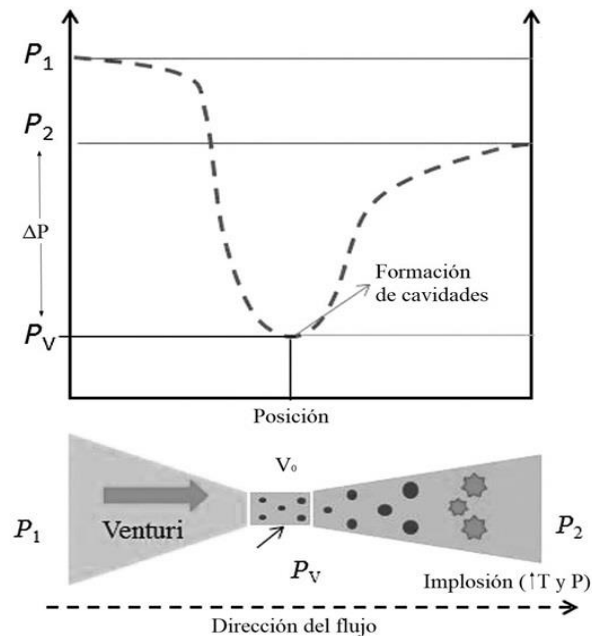


Figura 9: Variación de la presión, como función de la geometría y la posición, en un dispositivo por cavitación hidrodinámica. P_1 : presión inicial o de entrada, P_2 : presión de descarga o recuperación, P_v : presión de vapor del líquido a la temperatura del sistema, ΔP : caída de presión, V_0 : velocidad media del fluido en la garganta [12].

El mecanismo de la cavitación hidrodinámica se describe de la siguiente manera:

1. **Disminución de presión:** La cavitación inicia con una caída abrupta de presión en el fluido, que puede ser causada por las condiciones de flujo o la configuración geométrica del sistema.
2. **Formación de burbujas:** Cuando la presión del líquido se reduce por debajo de su presión crítica de vapor a la temperatura del líquido, se forman burbujas en la zona de baja presión.
3. **Crecimiento de burbujas:** Estas burbujas crecen hasta alcanzar su tamaño máximo, en un proceso que se caracteriza por condiciones de expansión isotérmica.
4. **Colapso de burbujas:** Finalmente, cuando la presión se recupera en el sistema, las burbujas colapsan de manera adiabática, generando un estado local de alta temperatura y presión, conocido como "punto caliente". Este colapso produce radicales libres altamente reactivos y genera chorros de gran velocidad, aumentando la turbulencia en el fluido.

En el caso de los dispositivos de tipo venturi, se recomienda su uso para transformaciones de tipo físico, ya que favorecen la formación de un mayor número de burbujas, lo que resulta en una implosión menos abrupta y la generación de chorros de presión y ondas de choque más uniformes dentro del líquido [13].

2.4 Efectos de la Cavitación Hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica puede tener efectos tanto positivos como negativos [7]. Por un lado, puede ser utilizada de manera beneficiosa en aplicaciones como la limpieza ultrasónica y en procesos de mezcla. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la cavitación es indeseable, ya que puede causar:

1. **Erosión de superficies:** El colapso de las burbujas de vapor genera ondas de choque que pueden erosionar las superficies de los componentes del sistema, como las aspas de las bombas y las paredes de los tubos.
2. **Pérdida de rendimiento:** La presencia de burbujas de vapor puede reducir la eficiencia del flujo, causando pérdidas de carga y disminuyendo el rendimiento general del sistema.
3. **Ruido y vibraciones:** La cavitación produce un sonido característico y puede generar vibraciones que afectan la estabilidad y la operación de los equipos.

2.5 Prevención de la Cavitación Hidrodinámica

Para evitar la cavitación hidrodinámica en sistemas de flujo, es fundamental diseñar adecuadamente los componentes del sistema, considerando factores como la velocidad del fluido, la presión de vapor del líquido y la geometría del sistema. Algunas estrategias incluyen:

- Control de la Velocidad del Fluido: Mantener la velocidad del fluido dentro de límites que eviten caídas de presión excesivas.
- Optimización de la Geometría: Diseñar secciones de flujo que minimicen las caídas de presión, como en el caso de los tubos Venturi, donde se debe prestar atención a la transición entre diámetros.
- Uso de Aditivos: En algunos casos, se pueden utilizar aditivos para modificar las propiedades del líquido y reducir la tendencia a la cavitación.

La comprensión de la cavitación hidrodinámica es crucial para el diseño y operación de sistemas que utilizan dispositivos Venturi. Es necesario considerar factores como la geometría del Venturi, las propiedades del fluido y las condiciones de operación para minimizar el riesgo de cavitación y sus efectos adversos. La investigación en este campo busca optimizar el diseño de estos dispositivos y mejorar su rendimiento en condiciones de flujo multifásico, garantizando así una operación más eficiente y duradera [8].

2.6 Uso de la cavitación para desinfectar agua

La cavitación se ha consolidado como una técnica efectiva para la desinfección de agua, ofreciendo una alternativa prometedora a los métodos convencionales que dependen de productos químicos. Este proceso se basa en la nucleación, crecimiento y colapso de burbujas de vapor en un líquido, generando

condiciones extremas de temperatura y presión que son altamente efectivas para inactivar microorganismos [2].

2.7 Mecanismos de Acción

Durante el colapso de las burbujas de cavitación, se generan temperaturas que pueden alcanzar hasta 5000-6000 [K] y presiones de 4000-5000 atmósferas, creando un ambiente propicio para diversas transformaciones físicas y químicas. Estas condiciones extremas producen ondas de choque, microchorros y tensiones de cizallamiento que pueden romper las paredes celulares de los microorganismos, facilitando su inactivación.

Las ondas de choque son perturbaciones rápidas que se propagan a través del líquido y pueden causar daños significativos a las estructuras celulares. Los microchorros son flujos de líquido que se generan durante el colapso de las burbujas y pueden alcanzar velocidades muy altas, lo que les permite penetrar y romper las paredes celulares de los microorganismos. Las tensiones de cizallamiento se refieren a las fuerzas que actúan en direcciones opuestas en diferentes partes de un líquido, lo que también puede contribuir a la ruptura de las células microbianas. Todo esto facilita la inactivación de los microorganismos, haciendo que la cavitación sea un método efectivo para la desinfección del agua [14].

2.8 Eficiencia en la Desinfección

La desinfección de agua mediante cavitación es un proceso innovador que se fundamenta en la generación y colapso de burbujas en un líquido, produciendo condiciones extremas que son efectivas para la eliminación de microorganismos. Este método, reconocido por su eficiencia y sostenibilidad, ha obtenido cada vez más atención en la investigación científica y su aplicación en tecnologías de tratamiento de agua.

El principio básico de la cavitación radica en la creación de burbujas de vapor cuando un líquido se ve sometido a una disminución de presión. En el contexto de la cavitación hidrodinámica, esta disminución de presión se logra a través del flujo del agua a través de un diseño específico del reactor, como un orificio o un venturi. A medida que el líquido pasa por estas estructuras, se generan zonas donde la presión cae por debajo de la presión de vapor del líquido, facilitando la formación de burbujas.

Una vez que estas burbujas se han formado, el siguiente paso crucial en el proceso es su colapso. El colapso de las burbujas ocurre de manera extremadamente rápida, creando fenómenos de alta temperatura y presión en su entorno inmediato. Este evento no solo da lugar a altas temperaturas, sino que también resulta en la generación de microchorros y ondas de choque, como puede observarse en la Figura 10. Estos fenómenos físicos son fundamentales, ya que generan fuerzas intensas que pueden romper las estructuras celulares de los microorganismos presentes en el agua. La combinación de estrés mecánico y condiciones extremas es lo que permite a la cavitación ser tan eficaz en la inactivación de patógenos.

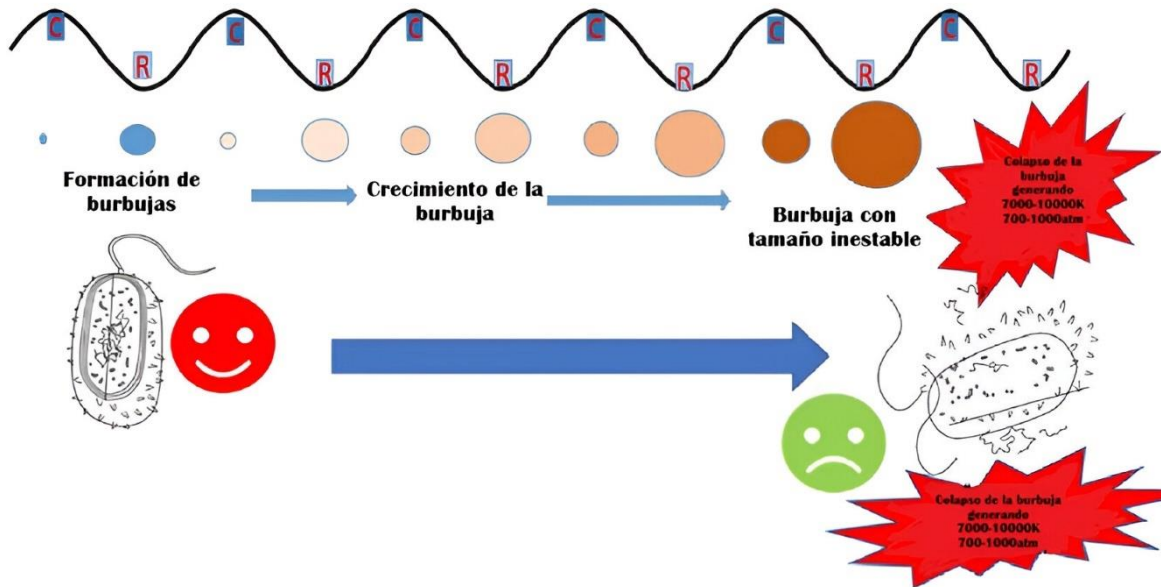


Figura 10: Representación visual de cómo al colapsar las burbujas dan lugar a condiciones extremas que facilitan la inactivación de microorganismos, lo que es esencial para el proceso de desinfección del agua [14].

Además de los efectos mecánicos, la cavitación produce especies químicamente reactivas, como los radicales hidroxilo, que son conocidos por su alta capacidad oxidante. Estas especies son cruciales en la desinfección, ya que pueden atacar las membranas celulares de bacterias y otros microorganismos, llevando a su destrucción. Por lo tanto, el proceso engloba tanto la inactivación física como la química de los patógenos en el agua [14].

2.9 Bacterias E. coli, que enfermedades producen

Escherichia coli (E. coli) es una bacteria que forma parte de la flora intestinal normal de los seres humanos y otros animales. Sin embargo, algunas cepas de E. coli son patógenas y pueden causar diversas enfermedades, que van desde infecciones gastrointestinales hasta complicaciones más graves. A continuación, se describen las principales enfermedades asociadas con las cepas patógenas de E. coli:

1. Gastroenteritis: Esta es la manifestación más común de infecciones por E. coli, especialmente por cepas como E. coli enterotoxigénica (ETEC) y E. coli enteroinvasiva (EIEC). Estas cepas pueden causar diarrea acuosa, cólicos abdominales y, en algunos casos, fiebre. La gastroenteritis por E. coli es a menudo adquirida a través de la ingestión de alimentos o agua contaminados.

2. Infecciones por E. coli productoras de toxina Shiga (STEC): Una de las cepas más conocidas de E. coli es E. coli O157:H7, que produce la toxina Shiga. Esta bacteria puede causar diarrea sanguinolenta,

cólicos abdominales severos y, en casos graves, síndrome urémico hemolítico (SUH), que puede llevar a insuficiencia renal y complicaciones potencialmente mortales.

3. Infecciones del tracto urinario (ITU): *E. coli* es la causa más común de infecciones del tracto urinario, especialmente en mujeres. Las cepas uropatogénicas de *E. coli* (UPEC) pueden adherirse a las células del tracto urinario, causando cistitis y pielonefritis. Estas infecciones pueden ser recurrentes y, si no se tratan adecuadamente, pueden llevar a complicaciones más serias.

4. Meningitis: Algunas cepas de *E. coli*, especialmente en neonatos, pueden causar meningitis. La *E. coli* K1 es una de las cepas asociadas con esta enfermedad, que puede resultar en inflamación del cerebro y la médula espinal, con consecuencias potencialmente graves.

5. Sepsis: *E. coli* también puede ser responsable de infecciones sistémicas, como la sepsis, que es una respuesta inflamatoria grave a la infección. Esto puede ocurrir cuando la bacteria entra en el torrente sanguíneo, lo que puede llevar a un fallo multiorgánico y, en última instancia, a la muerte si no se trata de manera oportuna.

6. Otras infecciones: Además de las enfermedades mencionadas, *E. coli* puede estar implicada en otras infecciones, como infecciones de heridas y neumonía, especialmente en pacientes inmunocomprometidos o en entornos hospitalarios.

Aunque *E. coli* es una parte normal del microbiota intestinal, ciertas cepas patógenas pueden causar una variedad de enfermedades que representan un desafío significativo para la salud pública. La contaminación de fuentes de agua, especialmente en áreas con infraestructura deficiente de saneamiento, es una vía común de propagación de estas cepas peligrosas. La comprensión de las características de estas cepas y su capacidad para causar enfermedades es crucial para el desarrollo de estrategias de prevención y tratamiento efectivas. La investigación continua en este campo, como se detalla en estudios recientes, es esencial para abordar las implicaciones de la colonización y persistencia de estas bacterias en el tracto gastrointestinal [15].

Capítulo 3

Aparato de pinzas para producir cavitación hidrodinámica

3.1 Diseño y características

El dispositivo de cavitación está basado en la morfología y función de la garra del camarón pistola, para reproducir su forma y la velocidad de su cierre en un intento de crear un método para la simulación de cavitación. El estudio de Godínez et al. [6] mostró que el mecanismo de cierre y el fenómeno de cavitación pueden reproducirse de manera efectiva. Sin embargo, la longitud del dispositivo desarrollado es de mm y la apertura máxima de la pinza es de mm, y su tamaño supera significativamente a la garra natural del camarón, y el efecto máximo de cavitación producido es mucho menor que el inducido biológicamente.

El sistema actual permite la apertura y cierre cíclico de la pinza generadora de cavitación mediante el uso de un motor eléctrico de 1 HP con una velocidad nominal de 1750 rpm, y lleva una rotación continua al eje central del sistema, a través de un reductor de ángulo recto con una relación de transmisión de 1:10. En combinación, este eje traduce el movimiento rotatorio en el movimiento angular de la garra generando el cierre repentino responsable de la cavitación.

El dispositivo tiene una estructura principal que consiste en placas metálicas de acero inoxidable AISI 316 con un grosor de un cuarto de pulgada. El par de apriete aplicado al conjunto llegó a 9 N·m, un valor determinado para mantener todo estable sin ejercer un esfuerzo excesivo en la fijación de los elementos.

Todo el conjunto mecánico está sumergido en un tanque de peces lleno de agua donde se realizan pruebas de cavitación y se observa la formación y colapso de burbujas en el mecanismo de cierre cíclico de la garra (Figura 11). Este montaje experimental imita las condiciones de operación del dispositivo y permite el cálculo de su rendimiento hidrodinámico y estructural cuando se somete a cargas repetitivas.

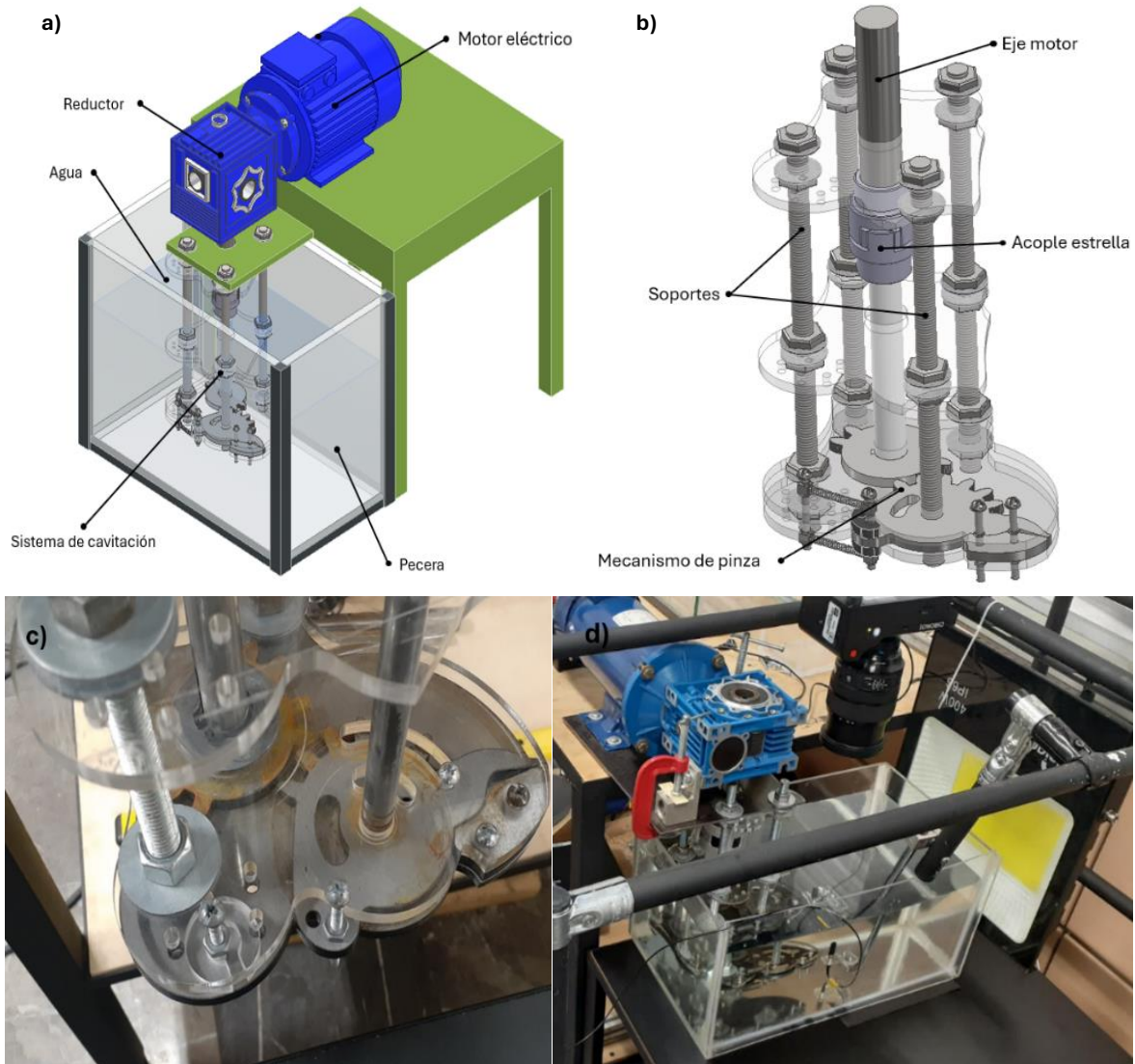


Figura 11: Sistema bio-inspirado de cavitación para purificación de agua a) Modelo CAD en 3D del sistema de cavitación b) mecanismo de cavitación aislado c) mecanismo de pinza fotografía real d) sistema de cavitación bio-inspirado fotografía real.

La operación de la pinza de cavitación se basa en un sistema de dos engranajes, ver Figura 12. El primero de ellos, denominado “engrane accionador”, está directamente acoplado al eje motriz conectado al motor. El segundo engranaje, modificado estructuralmente, actúa como el componente móvil del sistema de pinzas y se denomina “pinza-engrane”. Cabe destacar que el engrane accionador presenta un diseño particular: se encuentra recortado (“mocho”) para permitir la utilización de uno, dos o hasta tres dientes, lo cual posibilita la generación de distintos ángulos de apertura de la pinza.

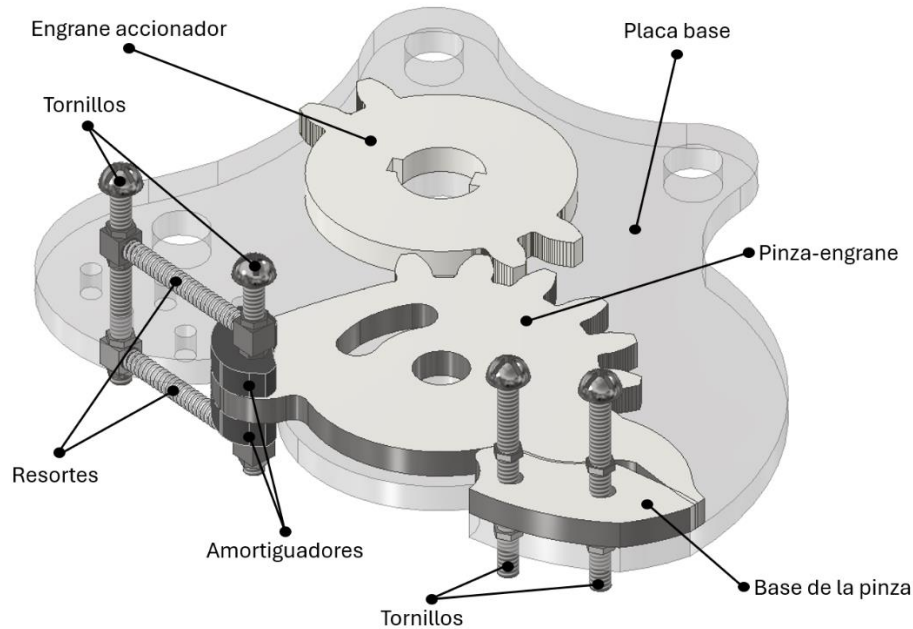


Figura 12: Modelo CAD en 3D del mecanismo de pinza generadora de cavitación.

Como se muestra en la Figura 2, el mecanismo de cierre de la pinza se fundamenta en un sistema de tensado mediante dos resortes, cada uno de los cuales está asegurado mediante tornillos en sus respectivos extremos: uno fijado en las placas base (elementos fijos del sistema) y el otro en la pinza-engranaje. Además, la pinza-engranaje funciona como soporte para los amortiguadores integrados en el sistema.

Como se ilustra en la Figura 13, el funcionamiento del mecanismo puede describirse en cuatro etapas:

- En la posición inicial, el engranaje accionador comienza a girar, como lo indica la flecha de rotación, mientras la pinza-engranaje permanece completamente cerrada gracias a la tensión ejercida por los resortes.
- A medida que el engranaje accionador continúa su rotación en sentido horario entra en contacto con la pinza-engranaje, forzándola a abrirse de manera progresiva. Durante esta fase, los resortes se estiran, acumulando energía elástica, mientras el volumen de agua entre las pinzas y las placas base del sistema aumenta.
- El movimiento de rotación prosigue hasta que el engranaje accionador alcanza el punto en el que está a punto de liberar la pinza-engranaje. En este instante, los resortes han alcanzado su máxima extensión y han almacenado la mayor cantidad de energía posible, estando el sistema preparado para el cierre súbito.
- Finalmente, el engranaje accionador deja de ejercer fuerza sobre la pinza-engranaje, permitiendo su cierre inmediato impulsado por la energía acumulada en los resortes. Las flechas rojas ilustran el movimiento rápido de cierre de la pinza, mientras que la flecha verde indica la zona de impacto entre los amortiguadores y las placas base. Adicionalmente, las

flechas azules muestran la dirección del chorro de agua de cavitación generado por el cierre repentino.

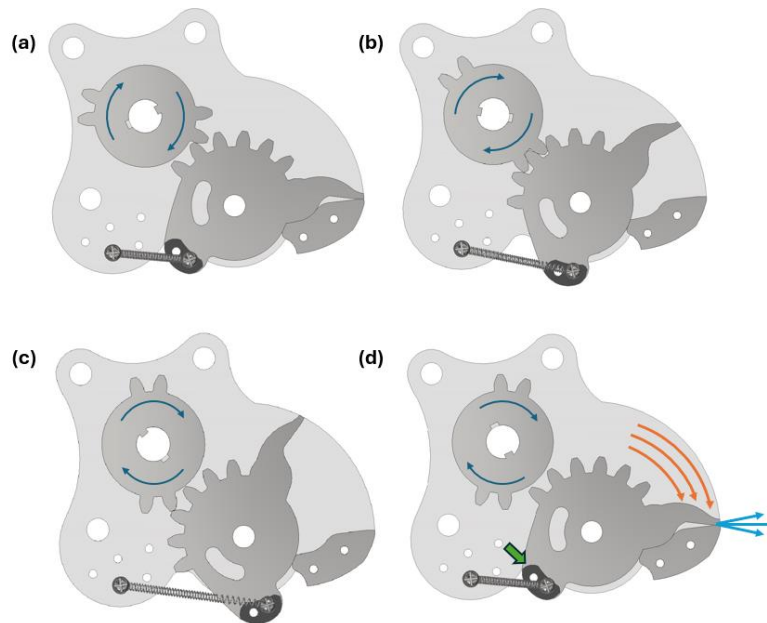


Figura 13: Vista superior del mecanismo de apertura y cierre de la pinza-engrane, aislado del resto del sistema. Se ilustran las distintas fases del ciclo de funcionamiento: (a) pinza completamente cerrada; (b) apertura progresiva de la pinza-engrane por acción del engranaje accionador; (c) estado previo a la liberación de la pinza, con los resortes en máxima tensión; (d) liberación de la pinza, la cual se cierra rápidamente retornando a la posición inicial. Es visible la contracción y extensión de los resortes a lo largo del ciclo.

Desempeño

Se llevó a cabo una prueba de concepto para revisar el rendimiento de la herramienta generadora de cavitación bioinspirada para la desinfección del agua. El experimento se realizó utilizando un prototipo de laboratorio que se sumergió a una profundidad de 12 cm en un recipiente lleno con 8 L de agua del grifo que contenía 7×10^2 UFC/mL de *Escherichia coli* (cepa K-12 MG1655).

La concentración bacteriana elegida en el experimento fue intencionalmente pequeña en comparación con la concentración estándar de prueba microbiológica (10^5 – 10^8 UFC/mL), ya que toda esta etapa debía validar la capacidad de proporcionar una inactivación detectable del crecimiento bacteriano para el dispositivo en la operación real del sistema prototipo bajo un amplio volumen de agua. Esta forma de trabajar fue para simular escenarios de contaminación moderada en el uso doméstico del agua, no para describir las condiciones altamente de laboratorio.

El experimento duró 80 minutos en condiciones ambientales (aproximadamente de 25 °C y presión atmosférica). El montaje mecánico de la prueba funcionó continuamente en el sistema de accionamiento descrito anteriormente utilizando cuatro resortes helicoidales tensados (dos a cada lado de las placas base) para permitir el cierre cíclico de la abrazadera. El recipiente permaneció en reposo, sin agitación activa ni control térmico, y fue iluminado por la luz ambiental del laboratorio.

El análisis cinemático del dispositivo durante el cierre de las placas reveló la formación de chorros de cavitación y cúmulos de burbujas dentro de la cámara cilíndrica. La secuencia de fotogramas capturada muestra que dichas burbujas colapsaban rápidamente, lo que sugiere la posible ocurrencia de fenómenos físicos asociados como la formación de plasmas, emisión de luz ultravioleta y generación de radicales hidroxilo por disociación térmica del agua. Estos efectos, junto con la aparición potencial de ondas de choque, habrían contribuido de manera sinérgica al proceso de inactivación bacteriana.

El comportamiento dinámico del cierre del dispositivo se analizó mediante una secuencia de fotogramas de alta velocidad, mostrada en la Figura 14, donde se observa la formación de cúmulos de burbujas y chorros de cavitación al momento del cierre de la pinza-engrane. La Figura 15 presenta la gráfica de la velocidad de cierre de la pinza en función del tiempo, obtenida gracias al análisis del video.

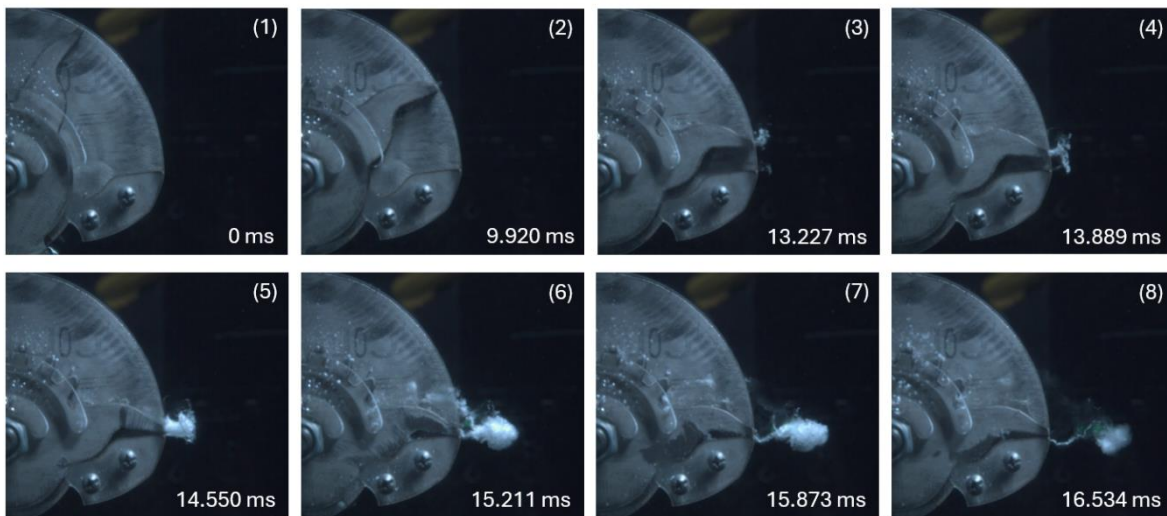


Figura 14: Secuencia de ocho fotogramas del cierre del dispositivo bioinspirado, desde 0 ms hasta 16.534 ms. Se observa el movimiento de cierre progresivo de la pinza-engrane, la formación de un chorro de agua y la generación de cavitación tras el impacto. El chorro alcanza su máxima intensidad alrededor de los 15.211 ms y posteriormente pierde fuerza.

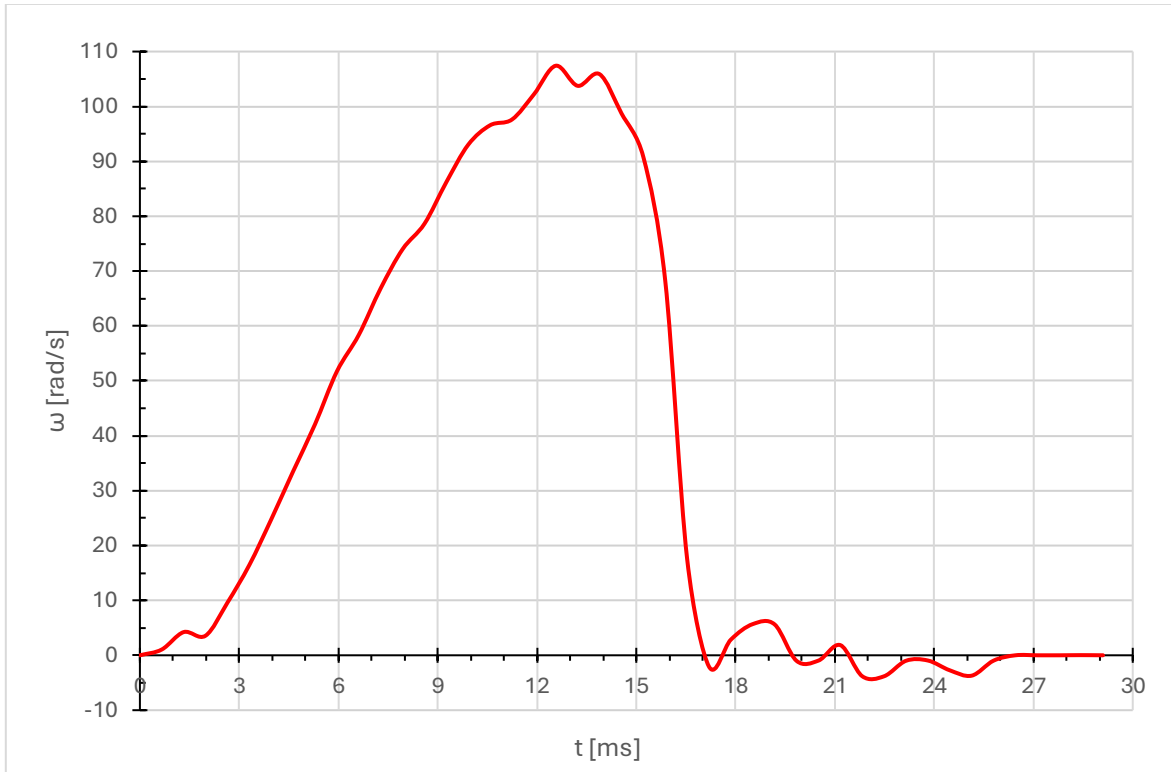


Figura 15: Velocidad angular de cierre (ω) del dispositivo bioinspirado en función del tiempo (t). Se observa un incremento progresivo de la velocidad hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 110 rad/s alrededor de los 12 ms, seguido de una caída abrupta asociada al impacto de cierre de la pinza-engrane y a la formación de cavitación.

Durante el ensayo, se tomaron muestras de agua cada 20 minutos para su análisis microbiológico. Estas muestras fueron sembradas en cajas de Petri y posteriormente incubadas a 37 °C durante 24 horas. La Figura 16a muestra la evolución visual del crecimiento bacteriano en las placas a lo largo del tiempo. Por su parte, la Figura 16b presenta la disminución de Unidades Formadoras de Colonias (UFC/ml) en función del tiempo de exposición, evidenciando un comportamiento de decaimiento exponencial característico de procesos de desinfección mediante cavitación hidrodinámica, similar a los reportados en sistemas convencionales de bombas y tubos Venturi.

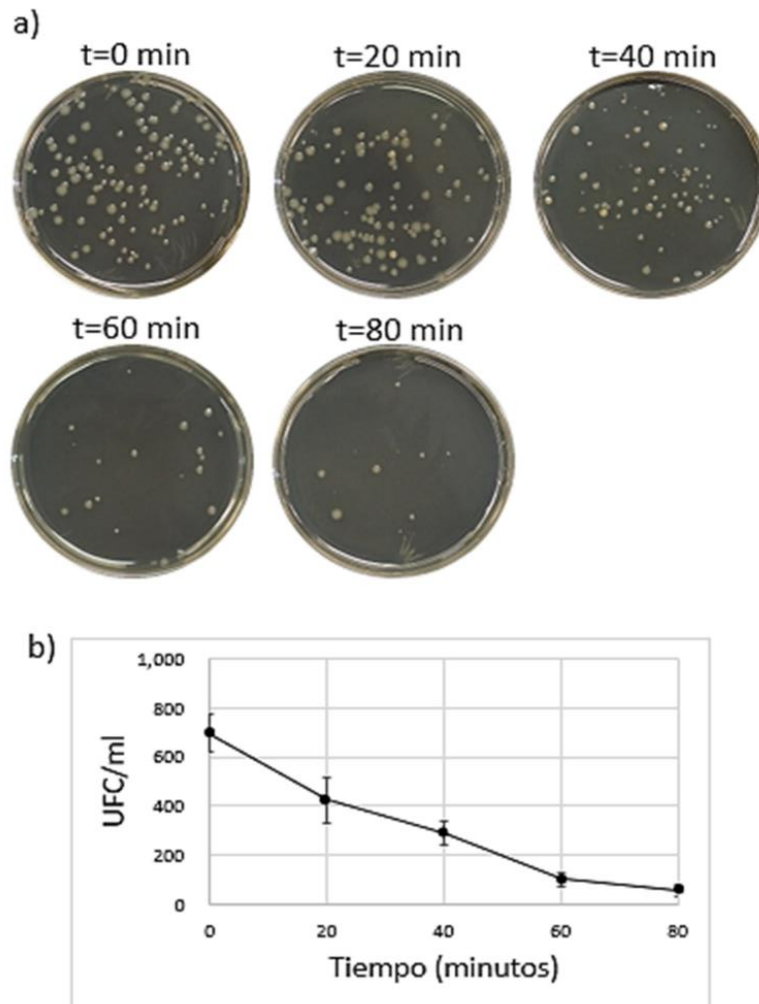


Figura 16: a) Secuencia fotográfica de muestras de agua contaminada con *E. coli* (K-12 MG1655), sembradas en cajas de Petri e incubadas a 37 °C durante 24 horas. Las muestras fueron tomadas cada 20 minutos durante una prueba de desinfección de 80 minutos utilizando el dispositivo bioinspirado de cavitación. b) Conteo de Unidades Formadoras de Colonias (UFC/ml) en función del tiempo, correspondiente a las muestras de la figura 6a. La gráfica muestra una disminución exponencial típica de procesos de desinfección por cavitación hidrodinámica.

En conjunto, estos hallazgos demuestran que el dispositivo bioinspirado constituye una alternativa tecnológica novedosa y efectiva para la desinfección de cuerpos de agua contaminada, utilizando cavitación generada mecánicamente como principal mecanismo de acción.

3.2 Puntos débiles del sistema actual

A pesar de que el sistema de cavitación bio-inspirado mostró un desempeño satisfactorio y cumplió con las expectativas en cuanto a su capacidad para generar burbujas de cavitación, el diseño no estuvo exento de limitaciones. Como era previsible al escalar el mecanismo del cierre súbito de la pinza del

camarón pistola, surgieron desafíos relacionados con la integridad estructural y la durabilidad de los materiales empleados. La replicación a mayor escala de un fenómeno natural tan dinámico implicó esfuerzos mecánicos considerables que comprometieron, en algunos casos, la resistencia y vida útil de los componentes del sistema.

Uno de los principales inconvenientes identificados fue el impacto brusco generado durante el cierre de la pinza-engrane, el cual afectó tanto a los amortiguadores como a las placas base. Inicialmente, los amortiguadores fueron fabricados en hule; sin embargo, debido a su baja resistencia a los esfuerzos repetidos, tendían a romperse con facilidad. Para mejorar la durabilidad del sistema, se optó por reemplazar los elementos de hule por amortiguadores y placas base de acero. A pesar de esta mejora, el impacto repetitivo continuó generando problemas, ya que los amortiguadores de acero mostraron signos de desgaste por fatiga del material, manifestándose a través de deformaciones plásticas tanto en los propios amortiguadores como en las áreas de contacto de las placas base. La Figura 17 ilustra claramente estas deformaciones, evidenciando los efectos del cierre repetido sobre los componentes metálicos del sistema.



Figura 17: Fotografías que muestran el desgaste y diferentes tipos de fallos de ciertos elementos del sistema de-pinzas de cavitación después de un largo periodo de pruebas: (a) vista general de la pinza-engrane, la placa base y los amortiguadores; (b) zona de impacto entre los amortiguadores y la placa base; (c) punta de la pinza engrane; (d) base de la pinza; (e) los pares de amortiguadores; (f) tornillos donde se apoyan los resortes.

Tal como se mencionó anteriormente, los amortiguadores no son capaces de absorber por completo la energía generada por el cierre de la pinza; en consecuencia, parte de esta energía se transmite a la estructura de la base. Esta transmisión de energía, lejos de ser totalmente perjudicial, ayuda a alargar

la vida útil de los amortiguadores, ya que disminuye la cantidad de energía que estos deben disipar individualmente.

Otro aspecto crítico derivado de los impactos repetitivos es el efecto sobre los tornillos encargados de fijar tanto los resortes como los amortiguadores en la parte posterior de la pinza-engrane. Aunque el desgaste y la fatiga del material son evidentes, el problema más crítico observado es la falla por ruptura de los tornillos, considerando que estos elementos son esenciales para permitir y controlar el cierre adecuado de la pinza.

3.3 Necesidades y restricciones para el rediseño

La principal necesidad que se busca atender en el sistema actual es mitigar el impacto generado durante el cierre de la pinza, con el fin de prolongar la vida útil de los componentes mecánicos involucrados. Esta mejora debe alcanzarse sin comprometer, y preferentemente potenciando, el fenómeno de cavitación hidrodinámica, que constituye el objetivo central del diseño bioinspirado. Por lo tanto, cualquier modificación destinada a reducir el impacto debe equilibrarse cuidadosamente con la necesidad de mantener una dinámica de cierre suficientemente rápida y enérgica para inducir cavitación de manera efectiva.

Una de las soluciones propuestas consiste en rediseñar los amortiguadores actuales para mejorar su capacidad de absorción de energía durante el impacto. Este rediseño busca evitar la aparición de deformaciones plásticas en los amortiguadores y en las zonas estructurales de contacto, reduciendo así los efectos de fatiga acumulada. Una absorción más eficiente también contribuiría a preservar la integridad de elementos críticos como los tornillos de sujeción, cuya falla por ruptura ha sido identificada como uno de los problemas más severos del sistema.

Adicionalmente, se propone la incorporación de un nuevo componente que funcione como un sistema de absorción secundaria o complementaria del impacto. Este elemento deberá diseñarse de manera que interfiera mínimamente con el comportamiento dinámico y funcional del mecanismo. Para ello, se podrían emplear materiales con propiedades viscoelásticas o configuraciones cinemáticas específicas que permitan disipar parte de la energía del cierre, sin afectar significativamente la rapidez ni la sincronización necesarias para la generación de cavitación.

Finalmente, como una alternativa de mejora más profunda, se plantea el rediseño integral del mecanismo de la pinza, incorporando desde la etapa conceptual un sistema de amortiguamiento innovador. Esta estrategia permitiría optimizar tanto la transmisión de movimiento como la distribución de esfuerzos internos, favoreciendo una mayor durabilidad de los componentes críticos y un mejor control sobre el cierre súbito. A través de estas acciones, se busca lograr un balance óptimo entre la eficiencia del fenómeno de cavitación y la robustez mecánica del sistema.

Capítulo 4

Diseño y construcción del nuevo aparato de pinzas

4.1 Descripción general del proceso de rediseño del dispositivo

El desarrollo de un sistema de cavitación bio-inspirado requiere un enfoque integral que aborde desde la conceptualización inicial hasta la manufactura final, de modo que garantice no solo su funcionalidad hidrodinámica, sino también su resistencia estructural y durabilidad. En este capítulo, se presenta el rediseño y construcción del nuevo aparato de pinzas, abordando cada etapa del proceso mediante herramientas de ingeniería asistida por computadora (CAD/CAE).

Posteriormente, mediante análisis de esfuerzos y deformaciones por elementos finitos (FEA), se evalúa el comportamiento estructural del sistema bajo cargas realistas, identificando zonas críticas que requieren refuerzos o modificaciones. Adicionalmente, se realiza un análisis de fatiga para predecir la vida útil de ciertos elementos que integran el dispositivo y asegurar su confiabilidad en operaciones repetitivas.

Finalmente, se detalla la metodología de manufactura y ensamble, seleccionando materiales, procesos de fabricación y técnicas de unión que equilibren costo, resistencia y facilidad de construcción. La integración de estas etapas (desde el modelado computacional hasta la fabricación) permite obtener un diseño optimizado, listo para su implementación en pruebas reales de cavitación.

Este capítulo no solo demuestra la viabilidad técnica del nuevo aparato de pinzas, sino que también establece un marco metodológico replicable para futuros desarrollos en sistemas de cavitación controlada.

4.1 Metodología de diseño

La metodología se estructuró en cuatro fases principales, conforme a un enfoque iterativo de diseño basado en simulación:

1. Modelado del sistema actual

Se inició con el diseño dimensional y funcional detallado del sistema original de pinzas para cavitación. Para ello, se desensamblaron y documentaron todas las piezas que conforman el sistema. Con esta información, se elaboró un modelo CAD 3D detallado en Autodesk Inventor 2024, que representó fielmente tanto la geometría de cada componente como los mecanismos de movimiento, ensamblaje y acción de la pinza.

Este modelo no solo facilitó la visualización del sistema, sino que fue la base fundamental para los análisis posteriores, permitiendo la identificación de zonas críticas y la definición adecuada de condiciones de frontera para los estudios computacionales.

2. Simulación cinemática/dinámica del sistema original

Se llevó a cabo una simulación cinemática/dinámica del cierre súbito de la pinza, considerando cargas inerciales equivalentes. Para obtener un parámetro clave, se midió la velocidad angular de cierre a través del análisis de video del sistema funcionando, lo que permitió capturar la cinemática real del proceso.

En la simulación, no se consideró fricción entre piezas móviles ni arrastre para simplificar el modelo, pero se mantuvo la fidelidad a la dinámica global del sistema. El análisis dinámico se realizó en Autodesk Inventor, aprovechando las capacidades de simulación dinámica.

Para la simulación por elementos finitos (FEA), el modelo 3D fue restringido adecuadamente: la base y los tornillos de fijación se definieron como cuerpos fijos, mientras que la pinza engrane fue habilitada para rotar sobre su eje principal. Además, se implementaron restricciones de contacto entre piezas móviles, permitiendo simular y cuantificar las fuerzas de impacto en las zonas de contacto.

Se añadieron resortes virtuales en las posiciones correspondientes a los mecanismos de activación del cierre. La constante de rigidez de estos resortes fue ajustada a la rigidez real de los resortes utilizados en el sistema, la cual fue medida experimentalmente y aplicada directamente en las condiciones de carga sin iteraciones posteriores.

3. Análisis de Esfuerzos, Deformaciones y Fatiga

Utilizando el mismo modelo, se efectuaron análisis FEA para evaluar los esfuerzos, deformaciones y zonas de concentración de esfuerzos. Se complementó con un análisis de fatiga para estimar la vida útil de elementos críticos como los tornillos, considerando la operación repetitiva del sistema.

Estos estudios permitieron identificar zonas estructurales críticas que requieren refuerzos o modificaciones en el diseño, analizando alternativas para mejorar la durabilidad y confiabilidad del dispositivo.

4. Rediseño Iterativo con Mejoras Estructurales y Funcionales

Con base en los resultados del modelo original, se propusieron modificaciones geométricas para redistribuir esfuerzos y zonas de concentración de tensión, así como la introducción de elementos que mejoren la capacidad de amortiguamiento del impacto mecánico en el cierre de la pinza. Tales modificaciones incluyen:

- Incorporación de zonas de deformación acotada o uso de materiales con mayor capacidad para absorber energía de impacto.
- Evaluación de mecanismos elásticos o amortiguadores integrados, utilizando resortes y materiales especializados.
- **Procesos de manufactura** compatibles con la infraestructura del taller (impresión 3D, corte CNC, fresado, etc.)
- **Técnicas de unión** (atornillado, adhesivos, encastrados mecánicos) que simplifiquen el ensamble, mantengan la precisión geométrica y permitan mantenimiento o reemplazo.

4.2 Diseño de concepto

Antes de plantear propuestas de rediseño enfocadas en mejorar la capacidad de amortiguamiento del sistema (particularmente en la reducción de las fuerzas de impacto) fue indispensable validar que el modelo computacional reproducía con aceptable aproximación el comportamiento observado experimentalmente. Para ello, se desarrolló un modelo 3D detallado del mecanismo en Autodesk Inventor, que representa con precisión la geometría y las condiciones de ensamblaje de los componentes principales, incluyendo la pinza, los tornillos de fijación, la base y los mecanismos de cierre mediante resortes internos.

La simulación dinámica se llevó a cabo bajo condiciones idealizadas (sin fricción entre elementos y sin arrastre) que reflejaran representativamente la cinemática real del cierre de la pinza. Uno de los parámetros críticos utilizados como referencia fue la velocidad angular de cierre, obtenida mediante análisis de video del sistema físico en operación. Este parámetro es fundamental, ya que determina directamente la magnitud de las fuerzas de impacto generadas en los puntos de contacto entre componentes. Igualmente, se establecieron restricciones de contacto entre componentes, específicamente amortiguadores y placas base (Figura 18), dado que dichos contactos son fundamentales para obtener los datos de fuerza resultante que actúan sobre los demás componentes en la simulación dinámica.

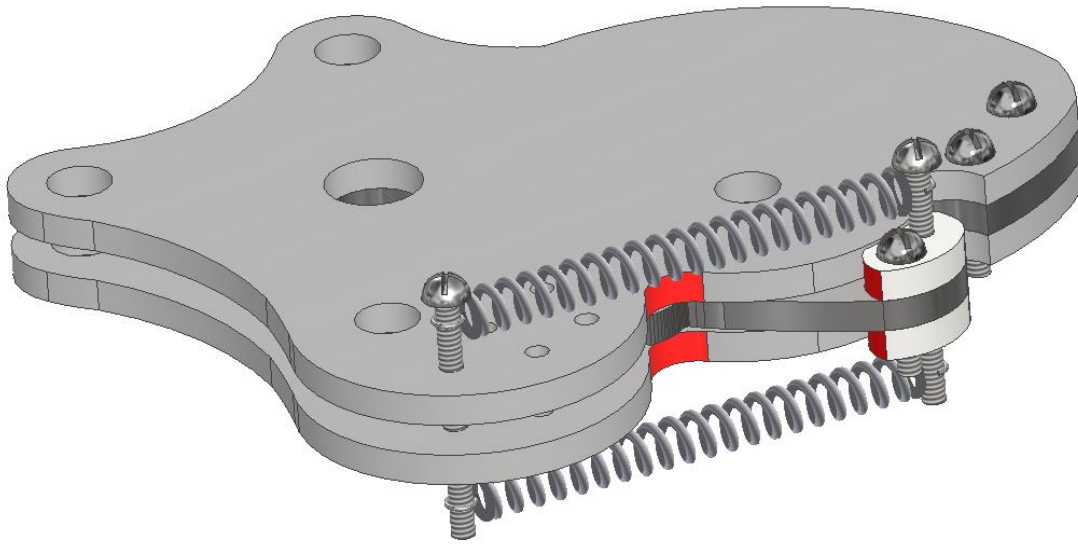


Figura 18: Mecanismo de pinza en estado previo al cierre. Se destacan en rojo las zonas de contacto amortiguador-placa base. Los resortes tensados (fijados mediante tornillos en la pinza y placa base fija) mantienen el sistema en configuración de pre-carga.

Para las simulaciones, se utilizó la rigidez real de los resortes, determinada experimentalmente y aplicada directamente al modelo, sin requerir ajustes iterativos. Esta aproximación permitió simular la dinámica del sistema, reflejando adecuadamente tanto la tendencia como el orden de magnitud de la velocidad angular, así como la magnitud y duración de las fuerzas de contacto entre componentes.

Como se observa en la figura 19, la simulación se realizó solo tomando en cuenta las partes principales que involucran el golpe del cierre súbito de la pinza y también se observan el resorte tensado al inicio del movimiento y posteriormente retrayéndose junto con la pinza-engrane hasta el cierre.

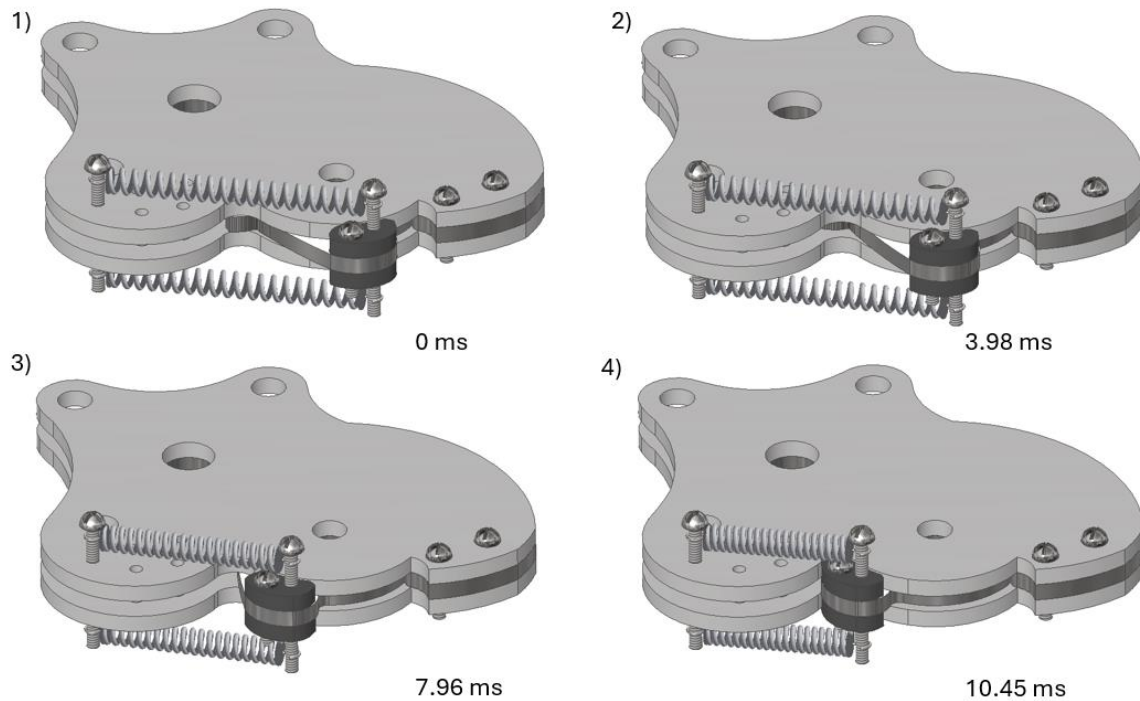


Figura 19: Secuencia temporal de la simulación dinámica del cierre de una pinza tensada por resortes, mostrando el movimiento de los componentes internos y la acción de los amortiguadores de acero contra las placas durante el proceso de impacto. Tiempo indicado en milisegundo.

La validez de la simulación se confirmó mediante la comparación contra los resultados obtenidos a partir del análisis de video. Se observa en la Figura 20 que las dos curvas presentan una similitud significativa en la tendencia general y en los valores máximos alcanzados, lo cual indica que la simulación captura adecuadamente la cinemática del cierre súbito de la pinza. Esta similitud es clave, ya que la velocidad angular influye directamente en la magnitud de las fuerzas de impacto que serán evaluadas en el análisis estructural (FEA).

A pesar de estas simplificaciones, la curva simulada (curva azul) resulta especialmente útil para el análisis estructural, ya que introduce de manera intrínseca un margen de sobreestimación en las fuerzas de impacto. Esto actúa como un factor de seguridad en el rediseño, permitiendo que las simulaciones de esfuerzos (FEA) trabajen con condiciones más exigentes que las reales. Como resultado, el sistema se evalúa bajo un rango de seguridad amplio, típicamente entre 1 y 10, lo que fortalece la robustez del diseño final al garantizar que las propuestas de mejora serán efectivas incluso en escenarios más críticos de carga.

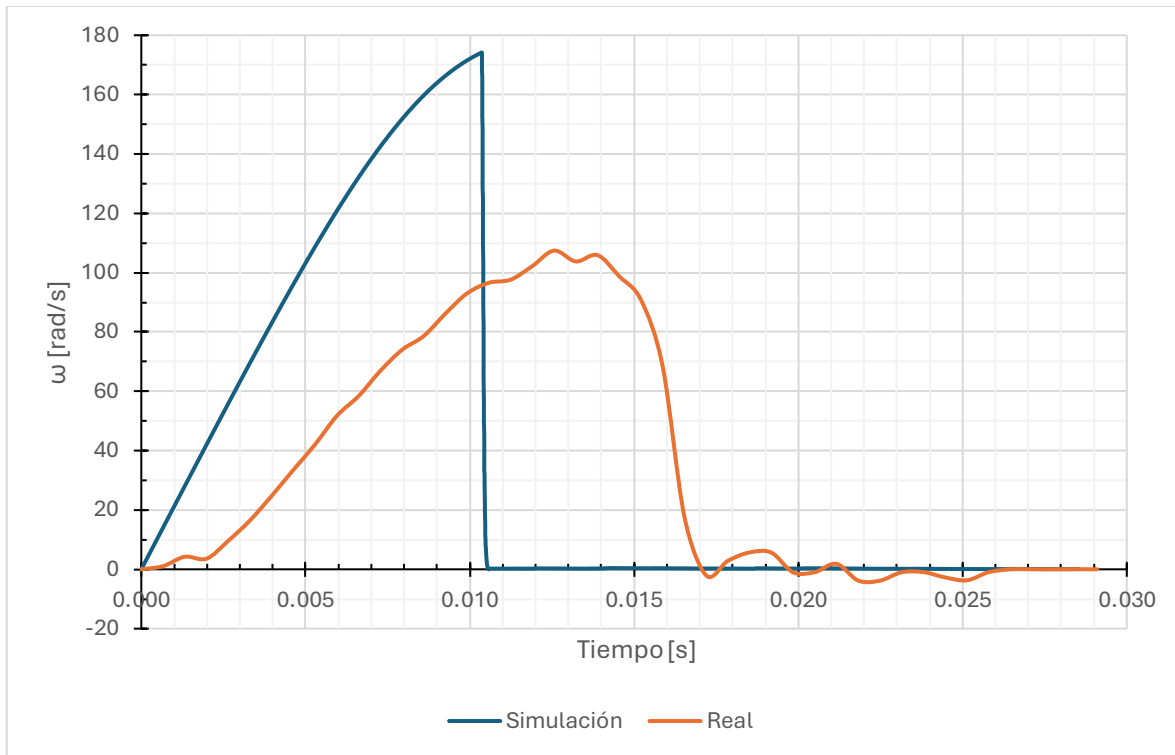


Figura 20: Gráfica velocidad angular contra tiempo. Comparación entre la simulación numérica y la curva experimental del sistema real.

A partir de la Figura 20, se observa que:

- La curva azul (simulación) alcanza una velocidad angular máxima de aproximadamente $\omega_{sim} \approx 175 \left[\frac{rad}{s} \right]$.
- La curva naranja (experimental) alcanza un valor máximo de $\omega_{real} \approx 105 \left[\frac{rad}{s} \right]$.
- Como la energía cinética depende del cuadrado de la velocidad angular, la relación entre las energías cinéticas máximas es:

$$\frac{E_{real}}{E_{sim}} = \left(\frac{\omega_{real}}{\omega_{sim}} \right)^2 = \left(\frac{105}{175} \right)^2 \approx 0.36$$

El análisis muestra que la energía cinética rotacional observada en el sistema real corresponde aproximadamente al 36% de la que se predice en la simulación. Por lo tanto, se estima que alrededor del 64% de la energía total se disipa en el sistema físico debido a efectos no considerados en el modelo computacional, tales como fricción entre componentes móviles, pérdidas por arrastre debido a la operación bajo agua, flexiones locales, pequeñas deformaciones elásticas y vibraciones, irregularidades geométricas o tolerancias de ensamblaje.

Este resultado tiene implicaciones importantes para el análisis estructural posterior, ya que la curva simulada introduce de forma intrínseca un factor de seguridad conservador. Al trabajar con una

energía rotacional mayor, las simulaciones por elementos finitos (FEA) consideran condiciones de carga más exigentes que las reales. Este enfoque permite realizar el rediseño del sistema bajo un rango de seguridad que puede variar aproximadamente entre 1 y 10, incrementando así la confiabilidad estructural del nuevo diseño.

El procedimiento completo de modelado, configuración de resortes, contactos, obtención de velocidad angular y exportación de cargas desde la simulación dinámica se encuentra descrito en el **Apéndice A.1**.

La forma de la curva indica que la fuerza de impacto se desarrolla de manera rápida y alcanza un valor pico en un intervalo de tiempo muy corto, propio de eventos dinámicos de impacto (Figura 3). Esta caracterización temporal de la carga es esencial para seleccionar las condiciones de entrada en los análisis estructurales subsecuentes, particularmente en los estudios por elementos finitos (FEA).

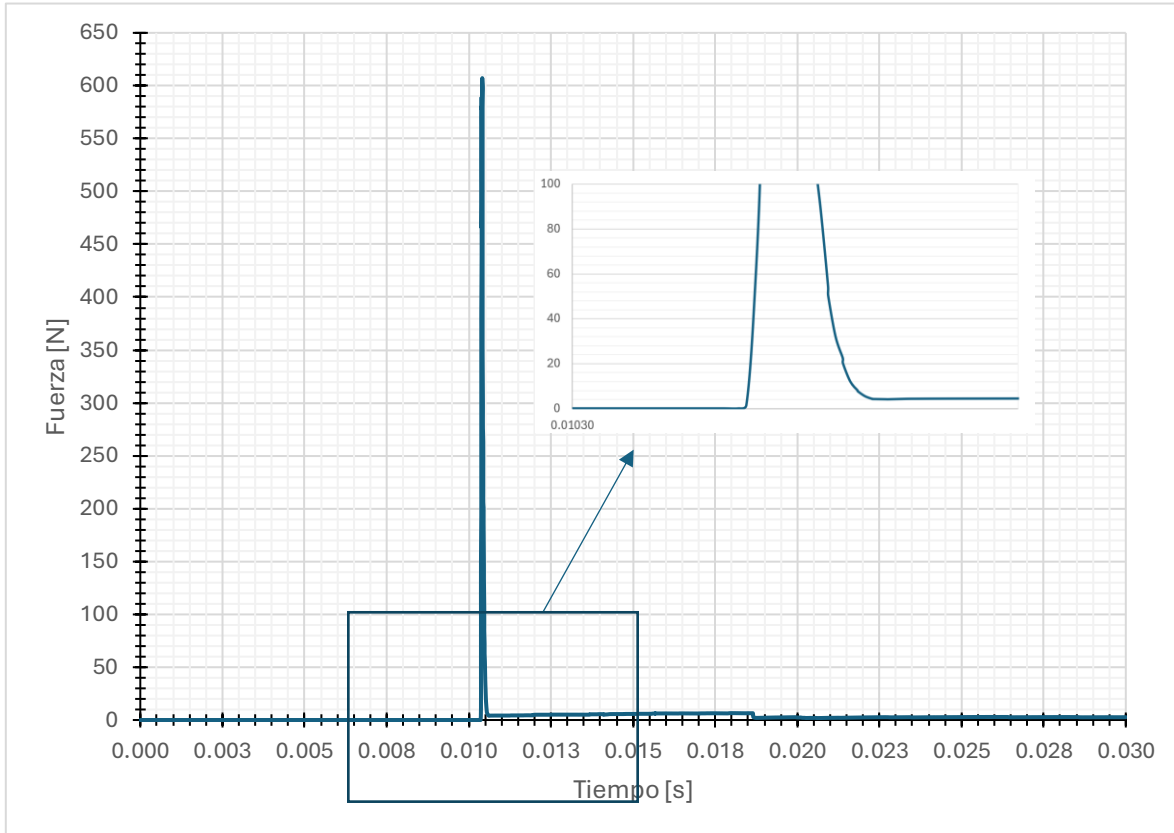


Figura 21: Fuerza de impacto generada entre los amortiguadores de la pinza y las placas base en función del tiempo, a partir de la simulación dinámica del cierre súbito. Se observa un acercamiento donde se observa el corto intervalo de tiempo en el que alcanza el pico de fuerza.

La información cuantitativa y cualitativa obtenida a partir de esta gráfica se vincula directamente con el comportamiento mecánico del sistema: la magnitud del pico y su tiempo de ocurrencia determinan

el nivel de esfuerzo al que están sometidos tanto el amortiguador como la placa base. Por ende, esta curva de fuerza es un punto de partida para evaluar la respuesta estructural y para considerar posibles modificaciones orientadas a mejorar la capacidad de absorción y distribución de energía.

Este análisis es complementario a la observación visual de la Figura 18, donde se señala el lugar exacto del impacto; conjuntamente, ambos aportan un panorama integral para el estudio dinámico y estructural del mecanismo.

El análisis por elementos finitos (FEA) efectuado sobre el amortiguador con la carga resultante durante la simulación del impacto (vea Figura 22) por el cierre súbito de la pinza permitió identificar la distribución espacial de los esfuerzos de Von Mises en el componente. Las zonas de mayor concentración de esfuerzos se localizan en la región próxima al orificio derecho del amortiguador, donde se alcanzan valores máximos de aproximadamente 27 MPa. Esta concentración de esfuerzos indica que dicha área es crítica, ya que está sometida a la máxima sollicitación mecánica durante el impacto, lo que podría incrementar la probabilidad de falla por fatiga o deformación plástica localizada con el uso repetido.

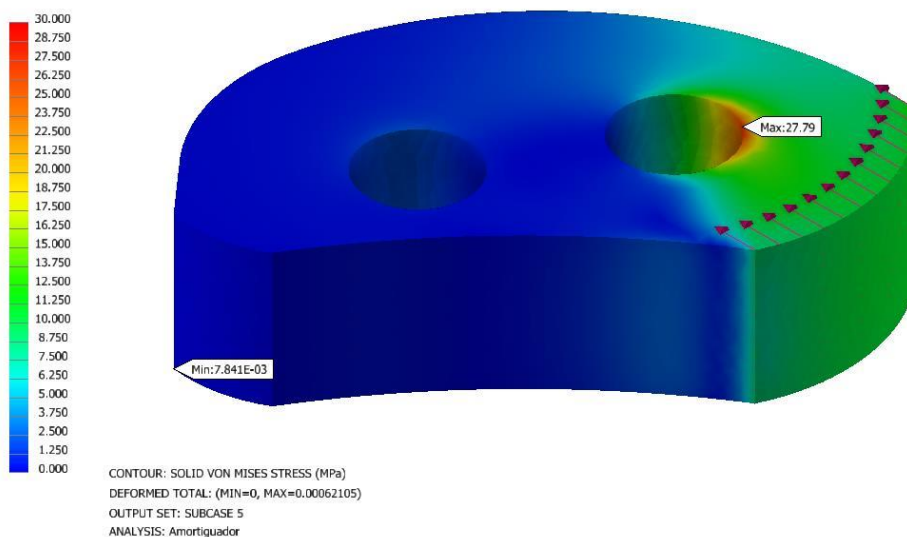


Figura 22: Distribución de esfuerzos de Von Mises en el amortiguador por la carga de impacto generada durante el cierre súbito de la pinza, estimada mediante análisis FEA en Autodesk Inventor Nastran 2024. Las flechas rojas señalan la dirección de la fuerza aplicada. Se evidencia una concentración de tensiones en la zona de contacto correspondiente a la placa base, alcanzando niveles máximos coherentes con la fuerza de impacto previamente calculada.

Del mismo modo, se realizó un análisis por elementos finitos de la placa base, aplicando la misma carga de impacto en el área de contacto con el amortiguador. Las condiciones de frontera restringieron

completamente el movimiento en los puntos de sujeción a la estructura externa, simulando un anclaje rígido como en el sistema real.

El análisis por elementos finitos (FEA) de la placa base ante el impacto generado por el cierre súbito de la pinza muestra que los esfuerzos de Von Mises alcanzan un valor máximo de aproximadamente 10 MPa, ver Figura 23. Este nivel de esfuerzo es significativamente menor, de solo 10 MPa al registrado en el amortiguador, lo que se explica por la mayor rigidez y resistencia estructural de la placa base. La baja concentración de tensiones indica que la placa está dentro de límites seguros, disminuyendo la probabilidad de fallo o deformación permanente bajo las condiciones de carga evaluadas.

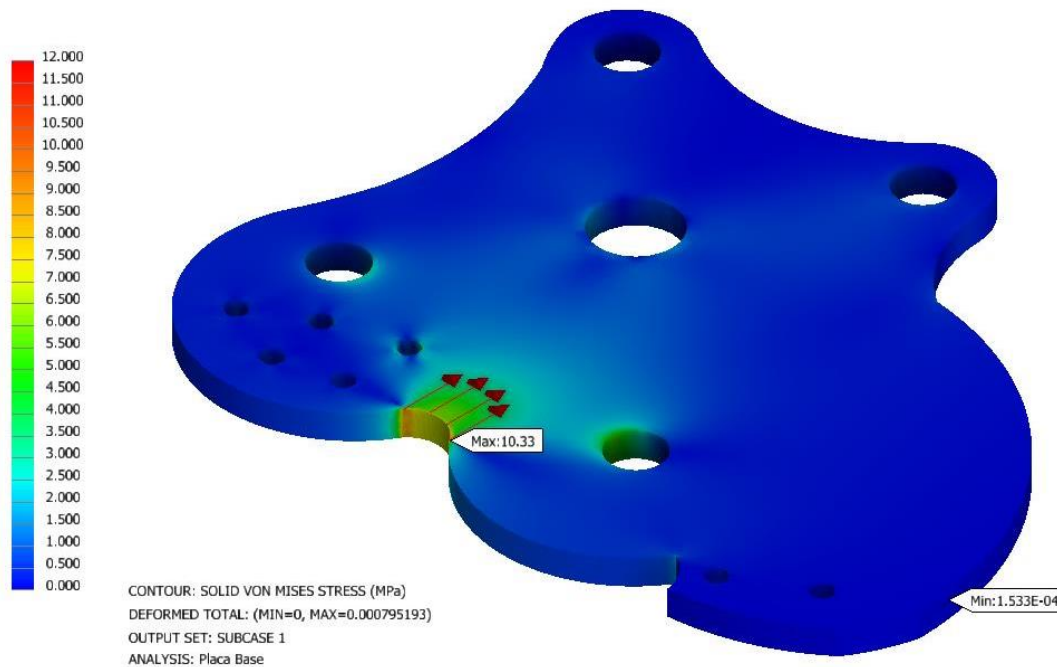


Figura 23: Distribución de esfuerzos de Von Mises en la placa base provocada por la carga de impacto generada durante el cierre súbito de la pinza, estimada mediante análisis FEA en Autodesk Inventor Nastran 2024. Se evidencia una concentración de tensiones en la zona de contacto correspondiente al amortiguador, alcanzando niveles máximos coherentes con la fuerza de impacto previamente calculada.

Asimismo, la distribución de esfuerzos permite comprender cómo se reparte la energía del impacto en el sistema, mostrando así que la placa base funciona como un soporte firme capaz de absorber y distribuir las fuerzas generadas sin comprometer su integridad. Esta información es clave para futuras mejoras en el diseño, ya sea mediante cambios en la geometría o la selección de materiales, con el objetivo de optimizar la capacidad de absorción de energía y el desempeño general del sistema de pinzas.

Por último, se realizó el estudio FEA del tornillo de sujeción que fija los resortes del lado de la pinza- engrane. La función principal de este tornillo es mantener el resorte firmemente colocado para asegurar el correcto accionamiento de la pinza, así como sujetar el amortiguador. En la Figura 24 se presenta el análisis de esfuerzos de Von Mises y su factor de seguridad en el cual es sometido directamente a las cargas originadas por el impacto durante el cierre súbito del mecanismo en el momento de máximo esfuerzo. Esto se logra exportando directamente el tornillo a un FEA desde la simulación dinámica, y generando una serie de tiempos donde se pueda seleccionar el momento preciso de la simulación que se pretende estudiar.

Los resultados muestran que este tornillo alcanza esfuerzos máximos de hasta 152 MPa y un factor de seguridad de mínimo de 1.7 bajo las condiciones de carga dinámicas simuladas. Cabe destacar que este mismo tornillo es el que, en la realidad, ha presentado fallas tras cierto número de ciclos de operación, lo cual confirma que los esfuerzos calculados coinciden con el comportamiento observado en campo. Este análisis es fundamental para entender el origen de la fatiga en el sistema, ya que el tornillo se encuentra bajo cargas repetitivas elevadas debido a la naturaleza súbita del cierre y la fuerza transmitida por los resortes.

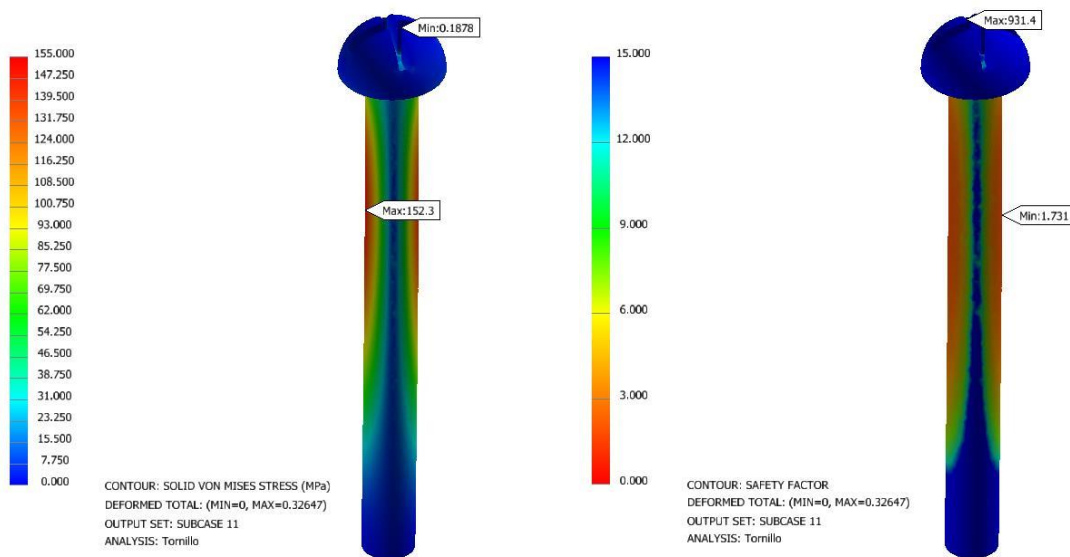


Figura 24: Análisis de esfuerzos de Von Mises (MPa) y factor de seguridad en el tornillo de sujeción del resorte del lado de la pinza-engrane, componente crítico sometido a carga de impacto durante el cierre súbito. Los resultados muestran que los esfuerzos de Von Mises generados en el tornillo alcanzan valores máximos de 152 MPa.

Como complemento al análisis de esfuerzos estáticos, se procedió a evaluar la vida a fatiga del mismo tornillo mediante un estudio de carga multiaxial en Inventor Nastran, utilizando como entrada las condiciones dinámicas previamente simuladas.

En la Figura 25, se muestra la distribución de vida útil estimada (en número de ciclos) a lo largo del tornillo, expresada mediante una escala de colores. Las zonas en tonos cálidos indican regiones con menor expectativa de vida, concentrándose principalmente en el área roscada inferior del vástago.

Este resultado respalda la hipótesis de falla por fatiga observada en la práctica, ya que coincide con la localización real de las fracturas detectadas tras múltiples ciclos de operación. La configuración detallada de este análisis (incluyendo el criterio de daño, propiedades del material y parámetros de carga cíclica) se describe en el Apéndice A.2.

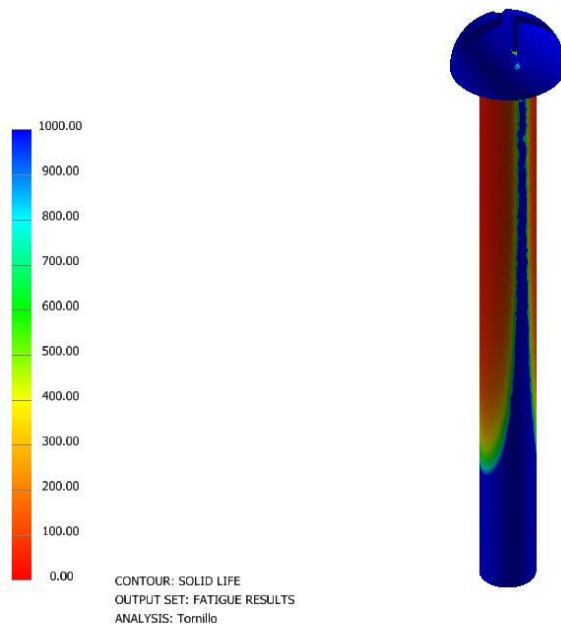


Figura 25: Resultados de vida por fatiga del tornillo bajo cargas cíclicas. Los valores indicados (en unidades de ciclos) representan el número estimado de ciclos hasta la falla. Análisis realizado mediante simulación de fatiga, mostrando la distribución de vida residual en el componente.

4.3 Propuesta de mejora mediante incorporación de una pieza de contacto adicional

Con el objetivo de reducir los esfuerzos sobre los componentes más vulnerables del sistema, se propone una solución simple que preserve el diseño actual: incorporar una pieza adicional que aumente el área de contacto durante el cierre súbito de la pinza. Esta intervención busca redistribuir parte de la carga de impacto y mejorar la capacidad de absorción manteniendo intacta la arquitectura existente.

Para garantizar que la nueva pieza no interfiriera con el movimiento de cierre del mecanismo, su diseño se basó directamente sobre el boceto del sistema completamente cerrado. Esta estrategia permitió obtener mediciones precisas de los espacios disponibles entre la pinza-engrane y las placas base, asegurando que la pieza entrara en contacto únicamente en el instante deseado del cierre.

Un diseño inadecuado podría haber provocado que la pieza interfiriera prematuramente con la trayectoria de la pinza, afectando así la operación del sistema. Por ello, el modelado se llevó a cabo cuidando especialmente la posición final de la pinza durante el impacto, respetando sus grados de libertad y evitando colisiones indeseadas.

4.3.1 Modificaciones requeridas

Los cambios al diseño original son mínimos:

- Se eliminó uno de los dientes del extremo del **engranaje de la pinza-engrane**, el cual no intervenía funcionalmente en el acoplamiento con el engrane accionador. Esta modificación fue necesaria para permitir el espacio de inserción de la nueva pieza (ver Figura 25).

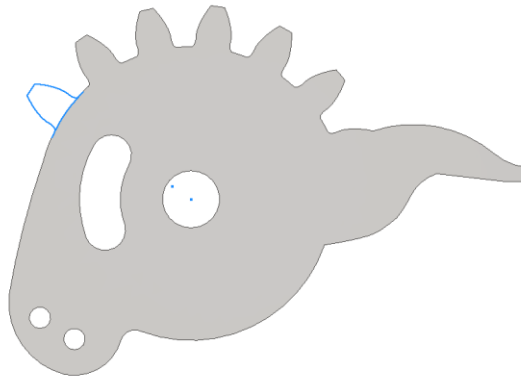


Figura 25: Modelo CAD de la pinza-engrane modificada.

- La nueva pieza se diseñó para **montarse directamente en los orificios ya existentes** en las placas base, evitando la necesidad de perforaciones o fijaciones adicionales (Ver Figura 26).

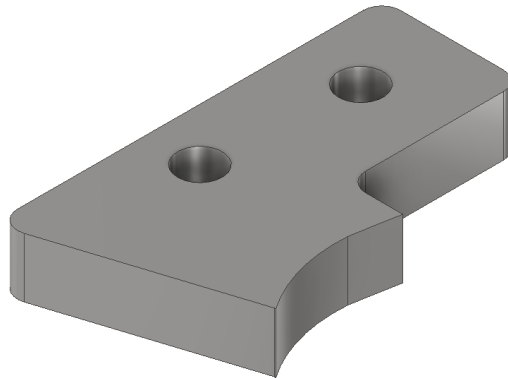


Figura 26: Pieza adicional de amortiguamiento



Figura 27: vista superior, isométrica de la integración de la pieza en el sistema en el sistema.

4.3.2 Ventajas y desventajas

La principal ventaja de esta propuesta radica en su simplicidad y rápida implementación. La pieza puede ser fabricada utilizando los mismos procesos y materiales que el resto del sistema, y su instalación no requiere una modificación sustancial del ensamble.

Como limitación, se reconoce que esta solución no reduce directamente los problemas de vibración, ni actúa como un elemento de amortiguamiento elástico. Su función principal es incrementar el área de impacto para la pinza-engrane, redistribuyendo parte de la energía del cierre.

4.3.3 Evaluación estructural

La efectividad de esta modificación se puede observar en la reducción de la fuerza de impacto máxima entre la pinza y los elementos amortiguadores. En la Figura 28, se comparan las curvas de fuerza en

función del tiempo obtenidas en la simulación dinámica del sistema original y del sistema modificado con la nueva pieza de contacto.

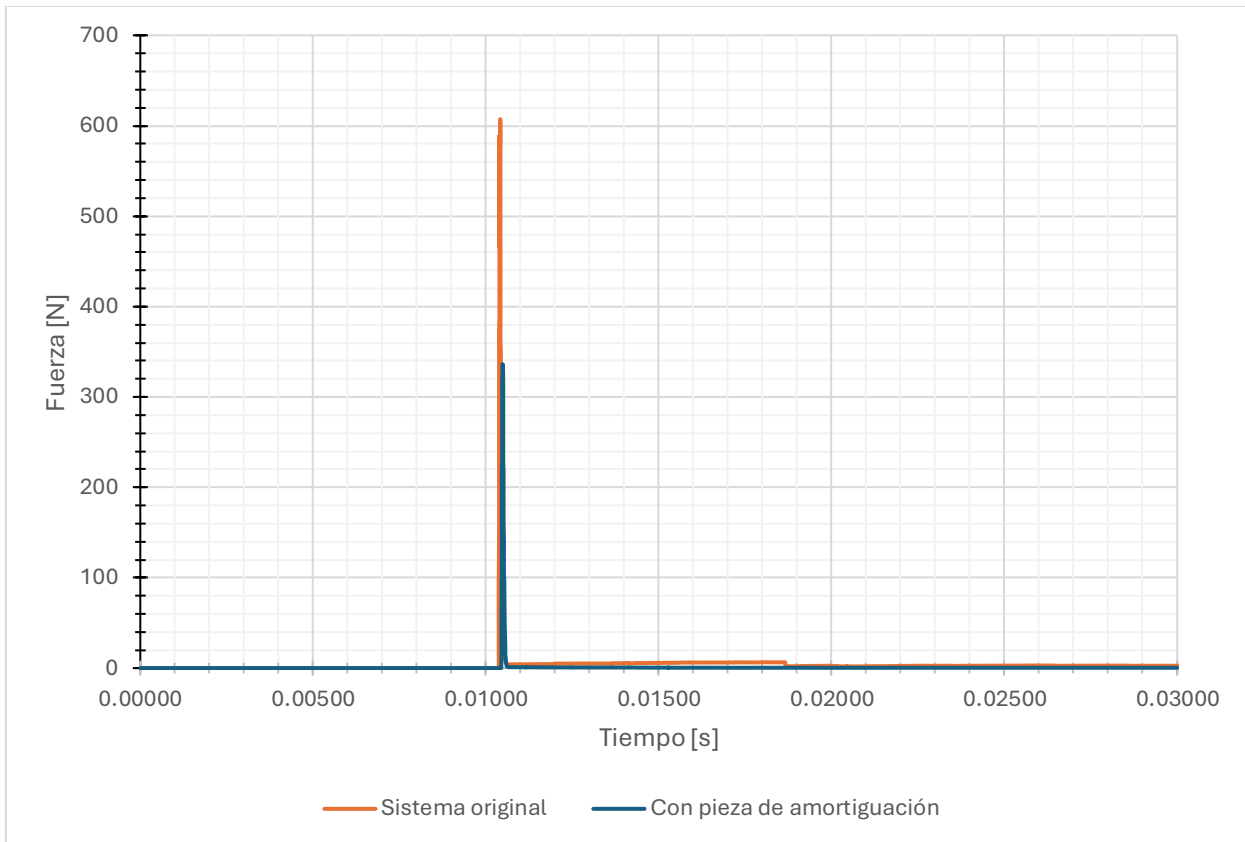


Figura 28: Comparación de la fuerza de impacto entre los amortiguadores y la placa-base entre el diseño original y el rediseñado. Curvas obtenidas a partir de simulaciones dinámicas en Autodesk Inventor. Se observa una reducción significativa en la fuerza máxima de impacto al incorporar la pieza adicional de contacto.

La simulación muestra que el pico de fuerza se reduce de aproximadamente 600 N en el diseño original a 336 N en el rediseño propuesto, lo que representa una disminución del 44 % en la carga de impacto transmitida al sistema. Esta reducción tiene implicaciones directas sobre la integridad estructural de los componentes.

Los resultados del análisis FEA del tornillo de sujeción muestran una mejora significativa respecto al diseño original. En la nueva configuración:

- El esfuerzo máximo sobre el tornillo fue de 108.5 MPa, comparado con los 152 MPa del sistema original.
- El factor de seguridad mínimo se incrementó de 1.731 a 2.479, como se muestra en la Figura 29.

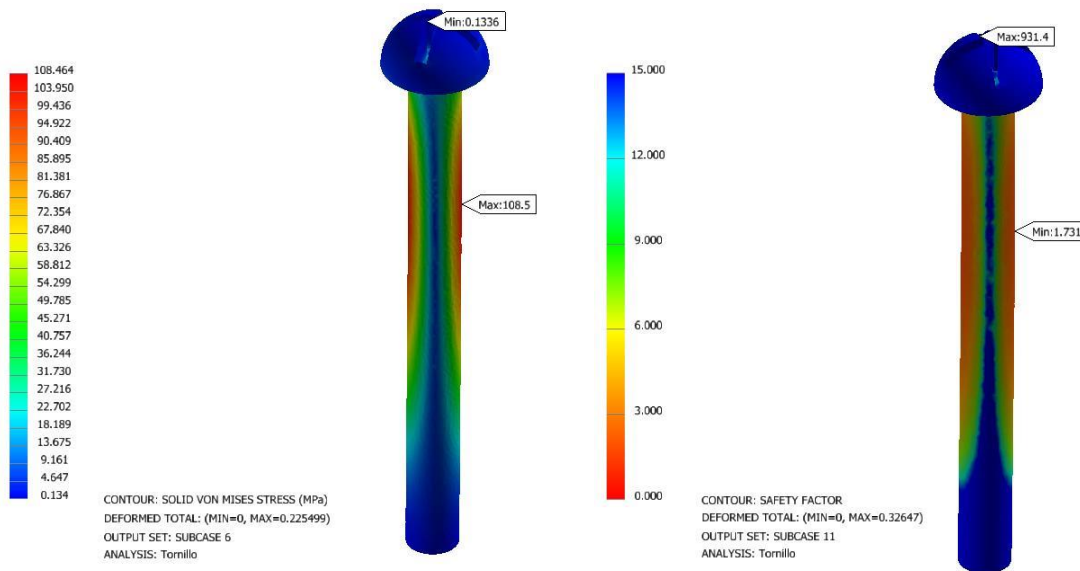


Figura 29: Análisis de esfuerzos de Von Mises (MPa) y factor de seguridad en el tornillo de sujeción del resorte del lado de la pinza-engrane, con la integración de la nueva pieza.

No obstante, los resultados del análisis de fatiga multiaxial indican una reducción en la vida útil estimada del tornillo bajo cargas repetitivas. Este comportamiento se atribuye a una posible redistribución de esfuerzos hacia zonas críticas. La Figura 30 ilustra los ciclos de vida obtenidos en esta simulación.

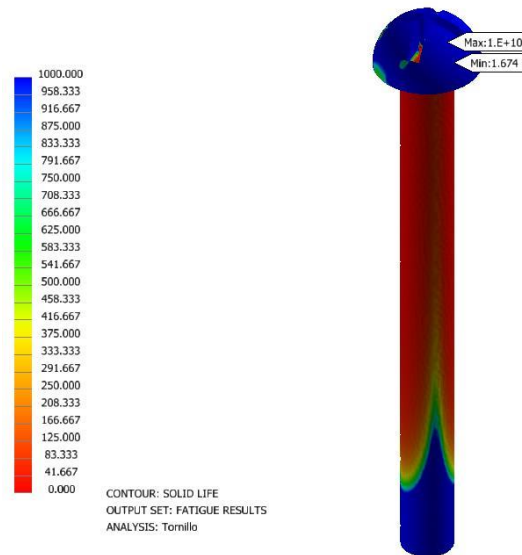


Figura 30: Resultados de vida por fatiga del tornillo bajo cargas cíclicas.

Ante este resultado, se recomienda considerar una actualización del material del tornillo, seleccionando una aleación de mayor resistencia a la fatiga, lo cual permitiría conservar los beneficios estructurales sin comprometer su durabilidad.

Si bien la nueva pieza absorbe parte significativa del impacto durante el cierre, esta también se convierte en un componente sometido a carga repetitiva, así como la propia pinza-engrane, que ahora colisiona contra dos superficies en lugar de una. Por tanto, en futuros análisis, sería pertinente evaluar también el comportamiento estructural y a fatiga de estos dos elementos bajo la nueva configuración.

4.4 Propuesta de mejora mediante implementación de amortiguador con resortes helicoidales

Como parte del proceso de rediseño del sistema de cierre de la pinza de cavitación, se propuso reemplazar la pieza de contacto adicional (implementada en una primera etapa de rediseño) por un componente amortiguador. Esta nueva propuesta busca reducir de manera más eficiente la transmisión de fuerzas de impacto hacia los componentes más críticos del sistema, particularmente el tornillo de sujeción de los resortes.

El diseño conceptual del nuevo componente amortiguador parte de un ensamble sencillo compuesto por dos placas metálicas entre las cuales se disponen un par de resortes helicoidales comprimibles. En la simulación dinámica realizada en Autodesk Inventor, este ensamble fue representado mediante

dos cuerpos sólidos simples sin especificación de material, conectados a través de uniones de tipo "muelle/amortiguador", lo que permitió modelar la respuesta mecánica bajo impacto sin necesidad de definir un cuerpo deformable complejo.

Como se observa en la Figura 31, el nuevo componente amortiguador consta de una placa que se fija directamente a los orificios existentes en la placa-base original del sistema (del mismo modo como la propuesta anterior del amortiguador rígido) así como de una placa de contacto, que será la superficie que reciba el impacto generado por la pinza-engrane durante el cierre. Y entre ambas se encuentran colocados los resortes helicoidales de compresión que permiten el desplazamiento controlado y la absorción de energía durante el contacto.

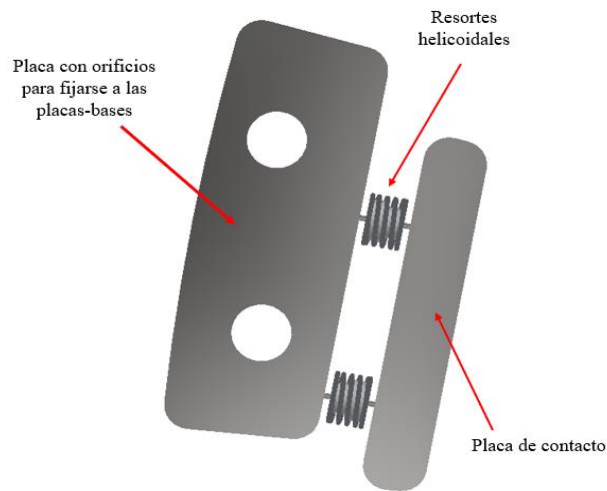


Figura 31: Esquema conceptual del componente amortiguador con resortes helicoidales propuesto para el sistema de cierre de la pinza de cavitación. El diseño se compone de una placa base con orificios para su fijación, dos resortes helicoidales de compresión y una placa de contacto que recibe el impacto durante el cierre. Elaboración propia con base en el modelo simulado en Autodesk Inventor (2025).

Una vez finalizado el diseño, el componente amortiguador fue integrado al sistema completo para llevar a cabo una nueva serie de simulaciones (Figura 32). Durante este proceso, se definió una rigidez para los resortes helicoidales de 1.6 N/mm, valor determinado mediante un procedimiento iterativo con el fin de obtener una respuesta de amortiguación adecuada frente al impacto.

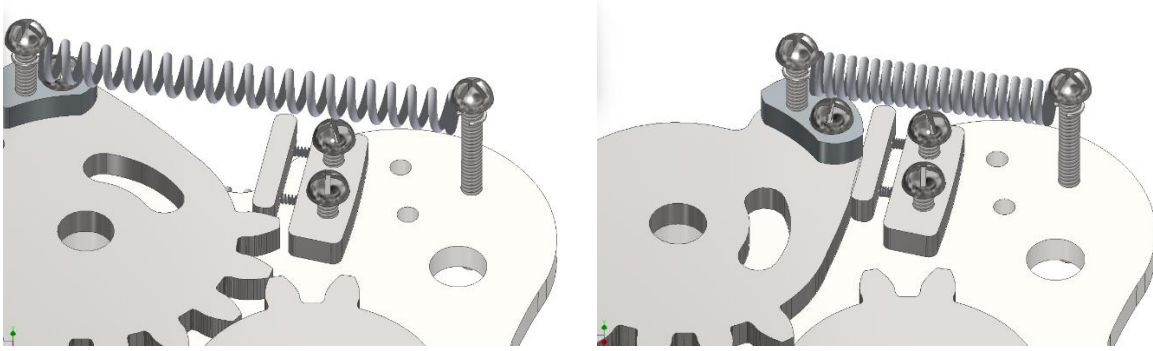


Figura 32: Vista superior e isométrica del ensamblaje con el nuevo amortiguador integrado al sistema.

En esta configuración, y como era de esperarse, la mayor parte de la fuerza del impacto es absorbida por el amortiguador, como se observa en la Figura 33, donde el pico de fuerza en el contacto directo alcanza los 963 [N]. El comportamiento de la fuerza durante el contacto muestra una transición más suave y controlada, como se evidencia en la forma de la curva a través del tiempo. Esto indica que el amortiguador permite disipar energía progresivamente, a diferencia del contacto rígido que genera un pico abrupto de fuerza, mientras que las fuerzas transmitidas a los amortiguadores originales del sistema se reducen a hasta los 50 [N] como se muestra en la Figura 34.

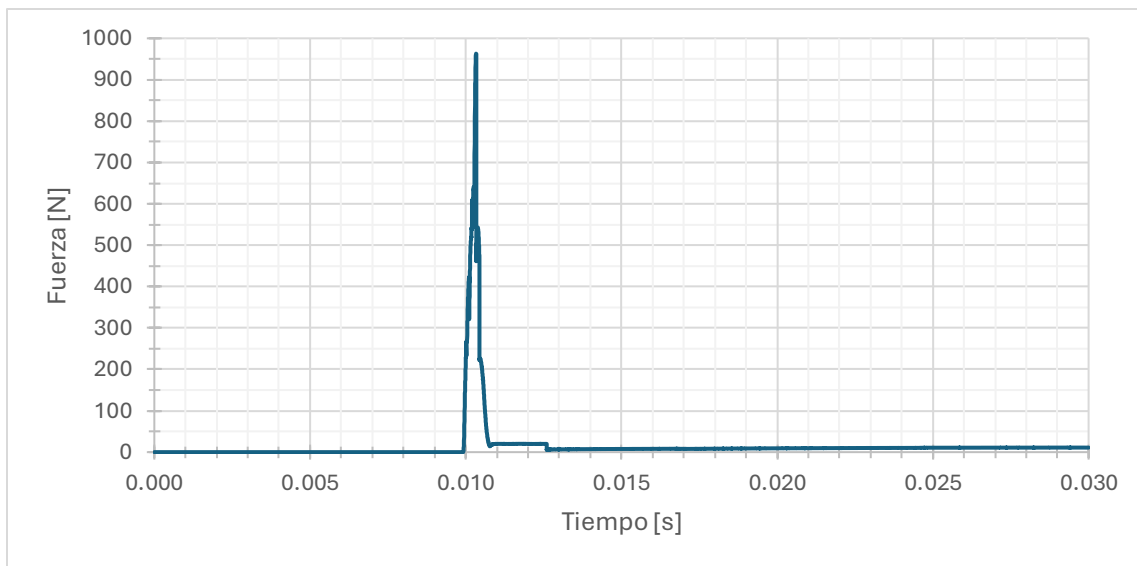


Figura 33: Fuerza de impacto registrada entre la pinza-engrane y el nuevo componente amortiguador durante la simulación dinámica.

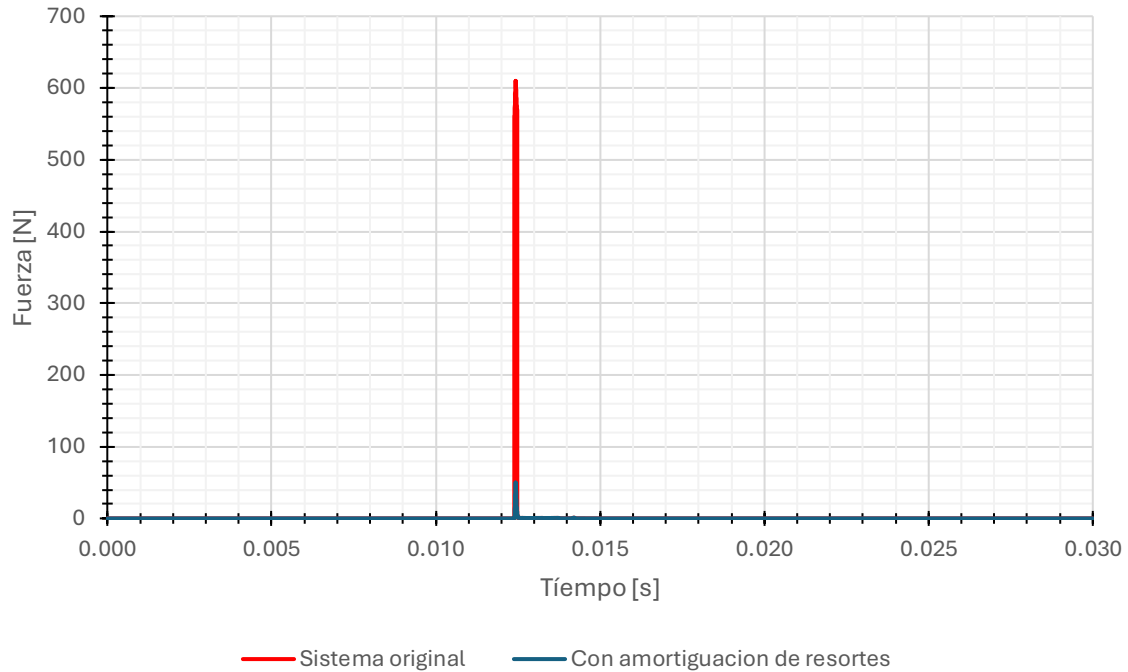


Figura 34: Comparación de la fuerza de impacto entre el diseño original y el que implementa la amortiguación con resortes helicoidales. Curvas obtenidas a partir de simulaciones dinámicas en Autodesk Inventor.

Para evaluar los efectos estructurales de esta modificación, se realizó un nuevo análisis FEA del tornillo de sujeción. Los resultados del estudio (Figura 35) muestran un esfuerzo de Von Mises máximo de apenas 24.9 MPa y un factor de seguridad mínimo de 10.3, valores que representan una mejora notable respecto al diseño original. Por su parte, el estudio de fatiga multiaxial (Figura 6) revela una vida mínima estimada de 168 ciclos, lo cual, es una mejora respecto al sistema original.

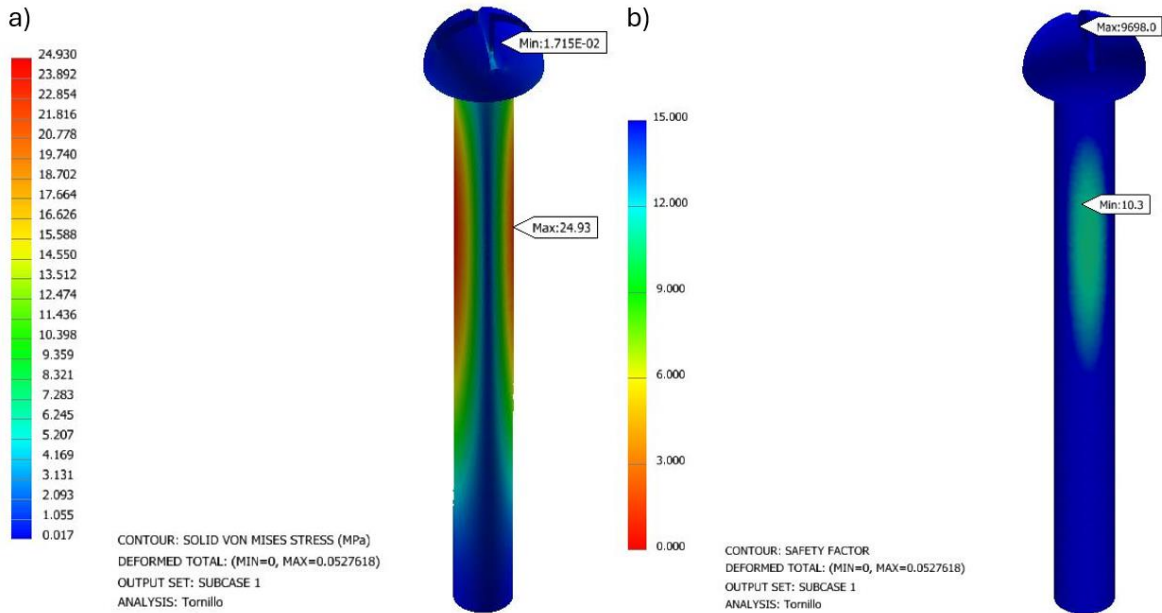


Figura 35: Análisis FEA estático lineal del tornillo bajo el rediseño con amortiguador helicoidal: (a) esfuerzos de Von Mises y (b) factor de seguridad.

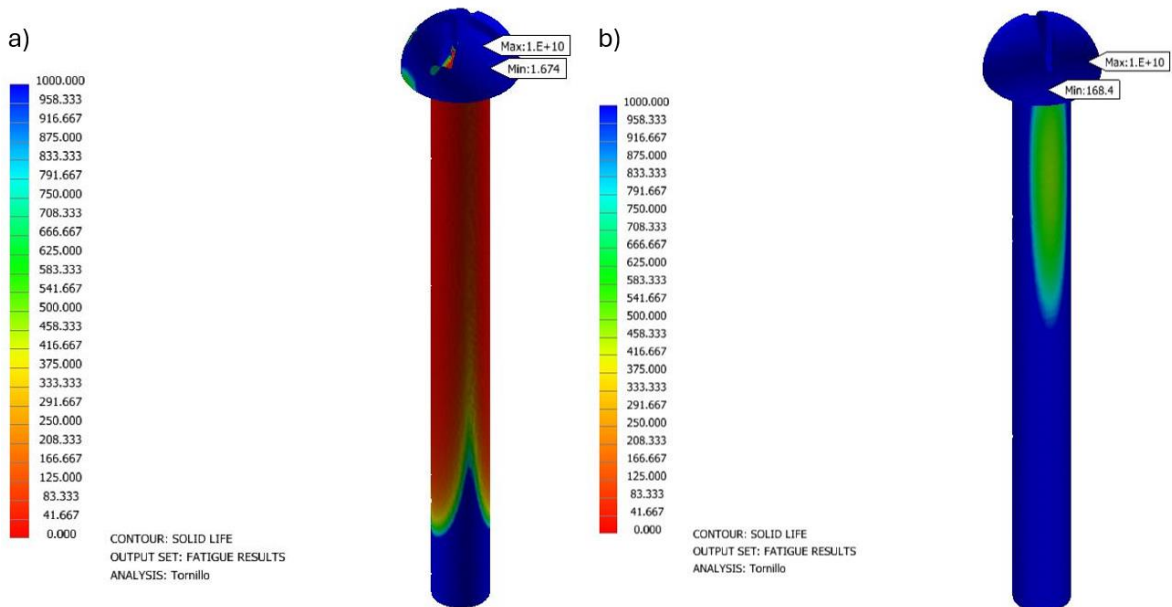


Figura 36: Comparación de fatiga multiaxial del tornillo entre el sistema original (a) contra la propuesta de amortiguación con resortes helicoidales (b).

Los resultados obtenidos en esta propuesta podrían representar una opción viable para futuros estudios, dado que ofrece un desempeño prometedor en la absorción de energía y la reducción de esfuerzos transmitidos. No obstante, su implementación práctica plantea desafíos significativos, principalmente por la complejidad mecánica asociada al uso de resortes helicoidales y las posibles complicaciones derivadas de su operación en un entorno sumergido, como la corrosión y el mantenimiento. Por estas razones, aunque se reconoce su potencial, este enfoque se dejó de lado en

la presente etapa del estudio para centrarse en la exploración de alternativas más compactas y resistentes, como el uso de materiales elastómeros.

4.5 Propuesta de mejora mediante Rediseño Elastómero

En este capítulo se analizará la propuesta de la integración de un material elastómero que permita disipar parte de la energía de impacto, reduciendo los esfuerzos transmitidos y prolongando la vida útil del sistema.

El material utilizado para el elemento de amortiguación fue poliuretano de alta densidad (PU-HD). La decisión se tomó de acuerdo con la función del sistema de amortiguación de impacto del mecanismo de cierre, que debía cumplir simultáneamente con:

- 1) Capacidad de deformación elástica moderada para absorber la energía del impacto sin transmitir picos de fuerza elevados
- 2) Recuperación geométrica rápida después de cargas cíclicas repetitivas.
- 3) Resistencia al desgaste y a la abrasión debido al contacto metálico
- 4) Estabilidad en un entorno acuoso durante la operación sumergida.

Entre los materiales elastoméricos disponibles, el PU-HD proporciona un rango de módulo de elasticidad y dureza (Shore A–D) intermedio entre elastómeros blandos (caucho natural, etc.) y polímeros rígidos (nylon, polietileno de alta densidad), lo que le ayuda a soportar deformaciones elásticas significativas sin colapso estructural o deformación permanente. Además, tiene alta resistencia a la fatiga por compresión y buena resistencia al desgaste, lo que lo hace aplicable para aplicaciones de amortiguación con impactos frecuentes. Además, el poliuretano es altamente prevalente como material industrial para aplicaciones de absorción de impactos y aislamiento de vibraciones en muchos tipos de equipos mecánicos (bujes, topes y recubrimientos) y es útil para aplicaciones prácticas considerando su practicidad y comercialización en tamaños y formas apropiadas para la aplicación prevista. Según tales criterios funcionales y comparativos, el PU-HD se consideró el material más aplicable para el amortiguador del sistema de cierre del dispositivo de cavitación.

La primera aproximación consistió en adherir un bloque de PU-HD sobre la superficie del amortiguador metálico existente (ver Figuras 37 y 38). Este diseño buscaba generar una capa intermedia de absorción de impacto sin modificar la geometría principal del sistema.

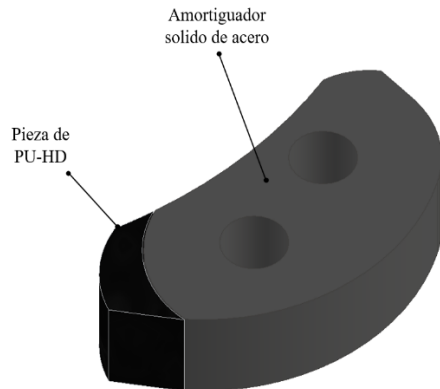


Figura 37: Vista inicial del amortiguador de acero con recubrimiento de PU-HD.

Los resultados preliminares demostraron que el material llegaba a absorber una gran cantidad del impacto del cierre de la pinza, como se puede observar en el estudio FEA del tornillo. Sin embargo, presentaba limitaciones relacionadas con la transferencia de carga y la adherencia del material en condiciones de impacto repetitivo puesto que según el estudio FEA de la pieza de PU-HD, la carga transmitida desde el primer impacto resultaba crítica, en un factor de seguridad de 0.2 y una deformación igual de crítica.

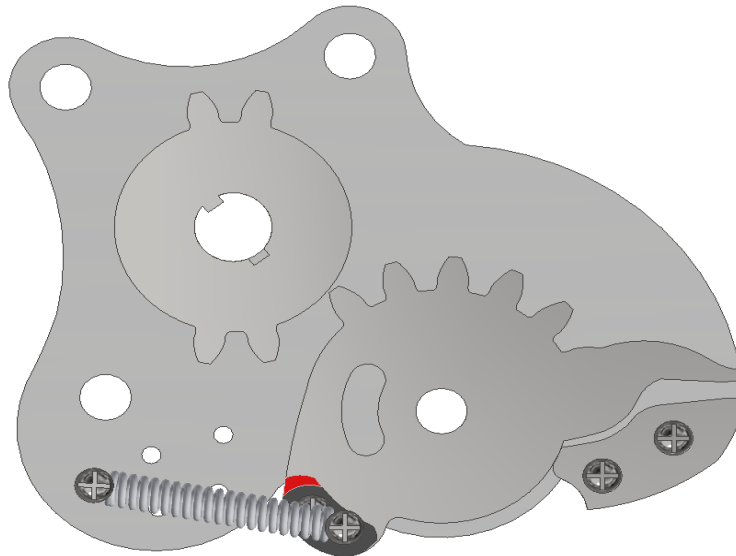


Figura 38: Ensamble del sistema con la pieza adherida (en rojo).

El diseño se optimizó posteriormente mediante el corte parcial de la placa base y el relleno de dicho espacio con PU-HD. Esta modificación permitió integrar de forma más robusta el material elastómero, mejorando el contacto y la transmisión de cargas. La geometría final del amortiguador respondió a un balance entre el espacio disponible en la placa base, el área de contacto necesaria para la disipación de energía y el volumen de material absorbente requerido como se muestra en la Figura 39. Durante la etapa de modelado se generaron diversas iteraciones hasta obtener una forma que pudiera integrarse sin debilitar la rigidez de la estructura principal.

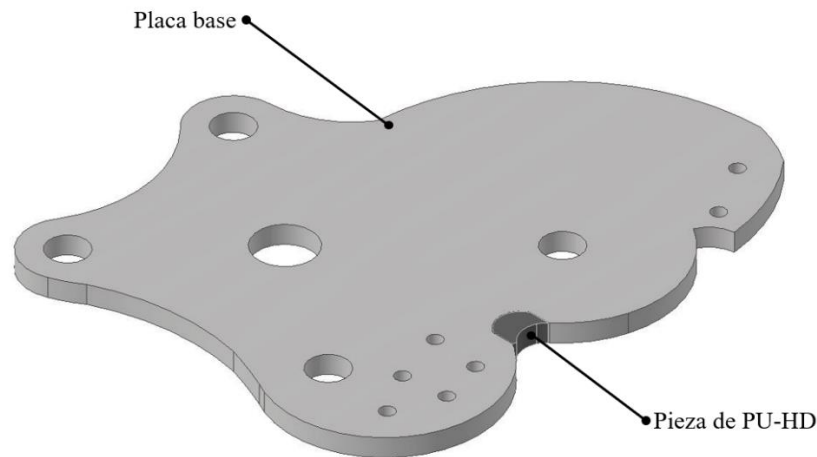


Figura 39: Vista del ensamble con el inserto de PU-HD en la placa base.

Además de las modificaciones geométricas, se ajustó la interacción de contacto entre el PU-HD y la placa base. Para representar la condición de unión más realista entre ambos cuerpos, se definió un contacto con parámetros de rigidez (150 N/mm) y amortiguamiento (0.1 N·s/mm), manteniendo fricción nula. Estos valores se seleccionaron dentro de los rangos reportados en la literatura para poliuretanos de alta densidad, donde se documentan módulos de rigidez y coeficientes de disipación dinámicos similares [16,17].

La validación numérica del diseño se llevó a cabo mediante análisis por FEA, empleando como carga de entrada la curva de fuerza-tiempo obtenida de la simulación dinámica del cierre de la pinza (ver Figura 40). En una primera configuración se simuló el amortiguador de PU-HD adherido directamente a la placa base. En una segunda iteración, considerada más representativa, se modeló la inserción del elastómero en un corte practicado en la placa base, reproduciendo de manera más precisa la condición de trabajo.

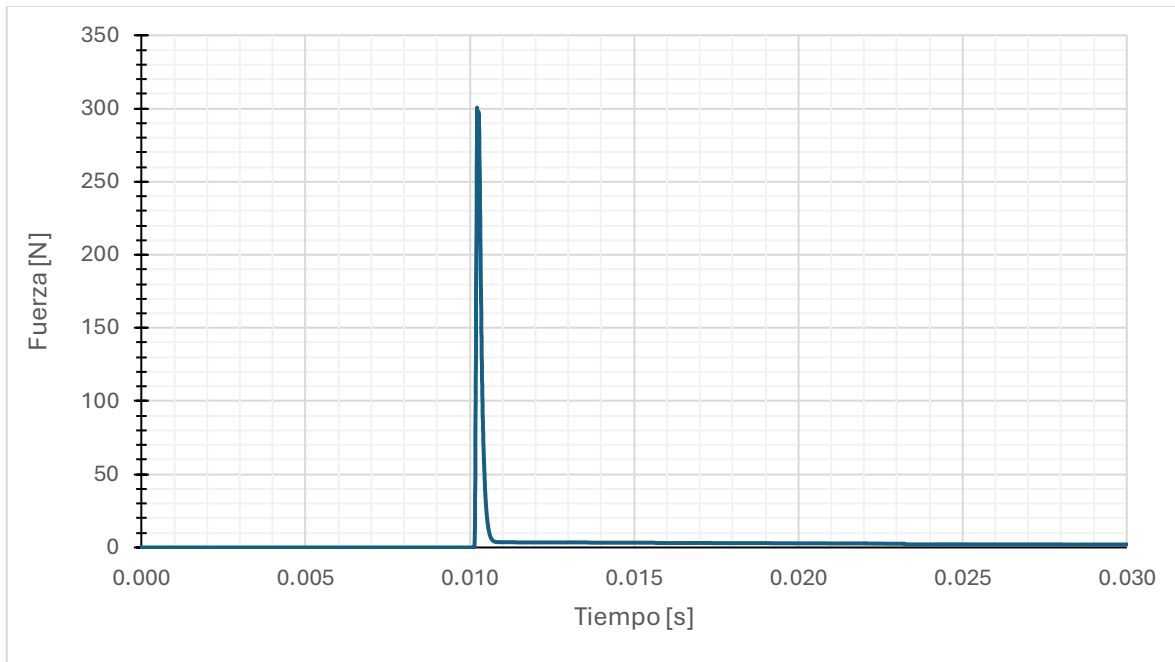


Figura 40: Curva de fuerza contra tiempo obtenida en la simulación dinámica para el cierre de la pinza con amortiguador de PU-HD.

Con la integración del amortiguador de PU-HD se observa una reducción significativa en los esfuerzos de Von Mises, acompañada de un incremento en el factor de seguridad del tornillo. En la Figura 41 se comparan los resultados entre el sistema original (a) y el rediseño con amortiguador (b). Los resultados de Von Mises muestran que, en el diseño original, los tornillos alcanzaban valores máximos cercanos a 152 MPa, con una clara concentración de esfuerzos en la zona de unión con la placa base. Tras la incorporación del amortiguador, este valor máximo se redujo a aproximadamente 36 MPa, lo que representa una disminución superior al 75 %. Además, se observa una redistribución más uniforme de las tensiones, evitando picos críticos en los bordes de contacto.

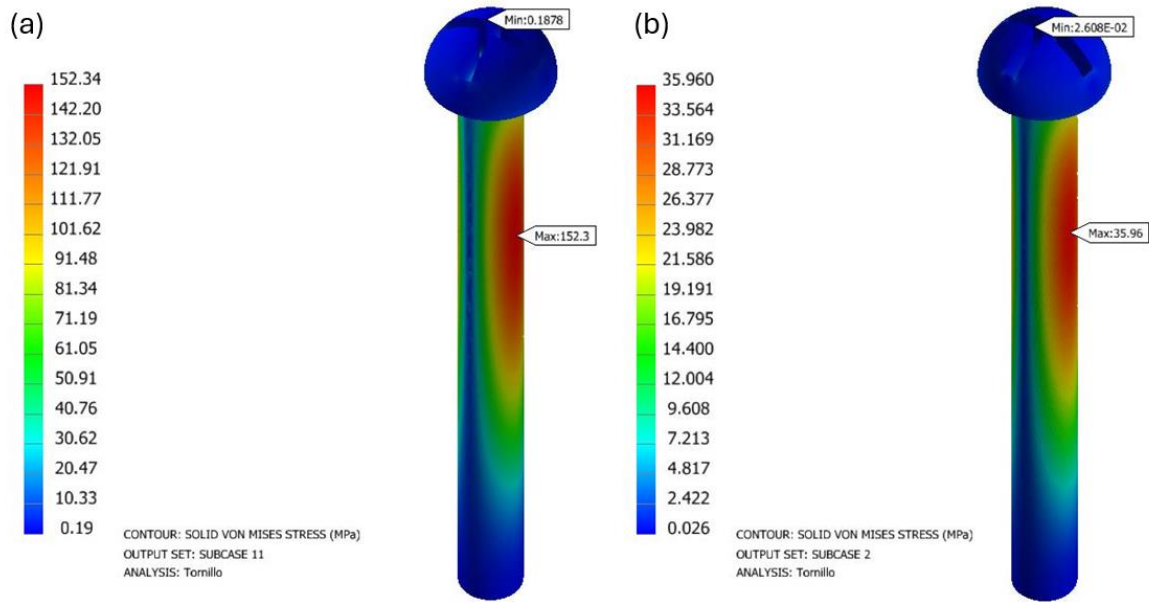


Figura 41; Comparación de la distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises entre la configuración original (a) y con amortiguador (b).

De manera complementaria, el análisis de factor de seguridad evidencia la mejora obtenida con la modificación. En la Figura 42 se comparan los resultados entre el sistema original (a) y el rediseño con amortiguador (b). Mientras que en la configuración sin amortiguador los valores mínimos alcanzaban niveles riesgosos, en el diseño final se mantiene un factor de seguridad mínimo superior a 5, lo cual garantiza la integridad estructural del tornillo bajo las condiciones de carga de impacto simuladas.

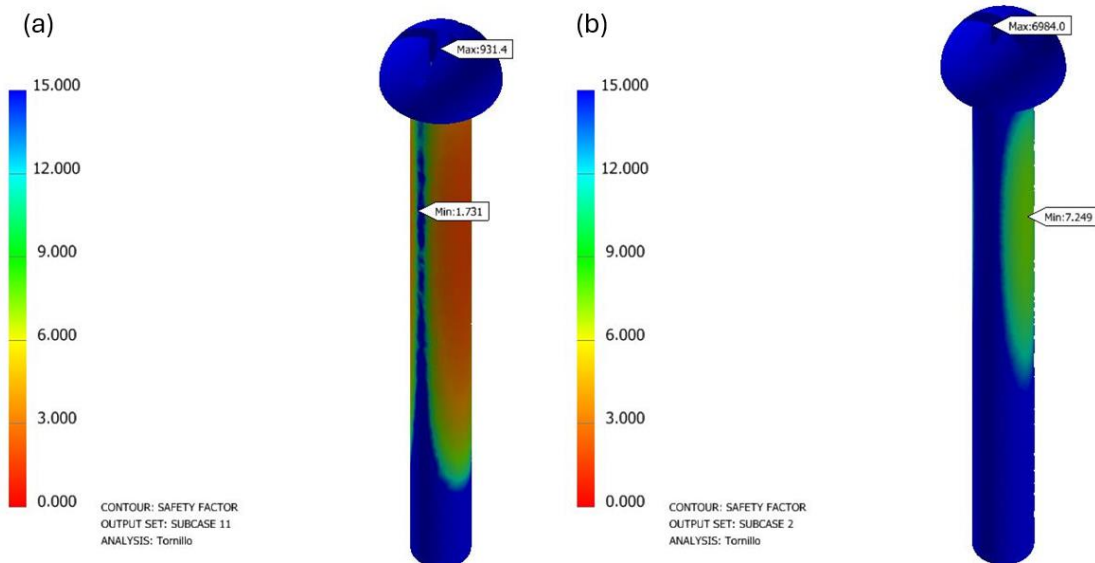


Figura 42: Comparación del factor de seguridad del tornillo entre la configuración original (a) y con amortiguador (b).

Finalmente, se evaluó la vida de fatiga del tornillo de sujeción, dado que este componente constituye el punto más susceptible a fallas bajo cargas cíclicas. La Figura 43 muestra la comparación entre la vida útil estimada en el sistema original (a) y en el sistema modificado con el amortiguador de PU-HD (b).

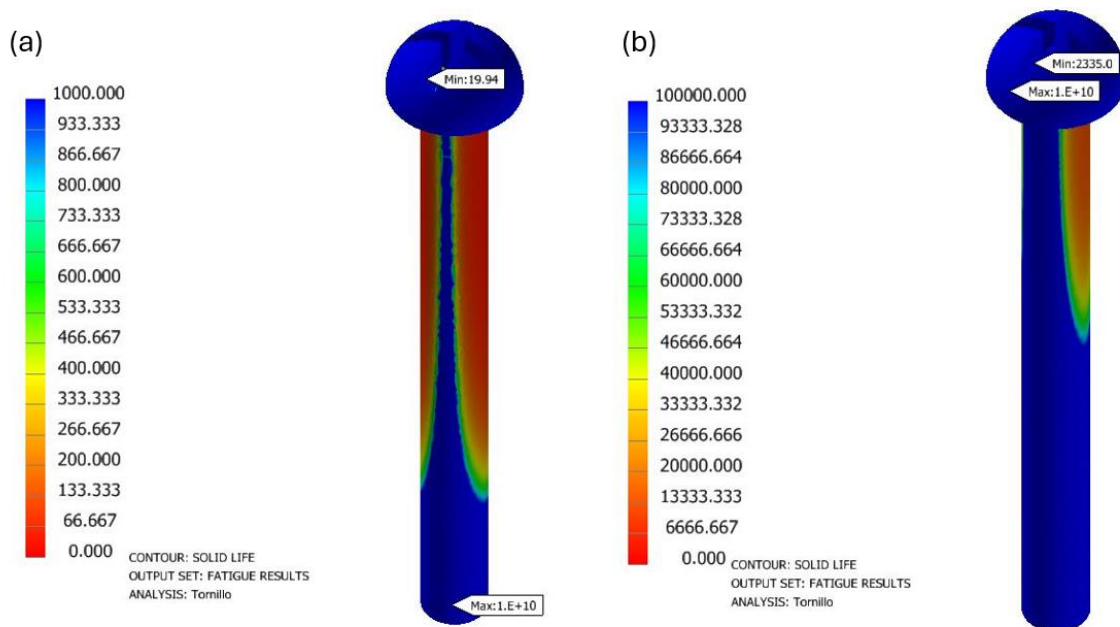


Figura 43: Resultados de vida a fatiga del tornillo: (a) sistema original sin amortiguador, (b) sistema modificado con amortiguador de PU-HD.

En el caso del diseño original, los resultados indican una vida mínima de aproximadamente 20 ciclos en la zona crítica (un valor extremadamente bajo que evidencia riesgo de falla prematura), mientras que con la integración del amortiguador la vida mínima se incrementa hasta 2,335 ciclos, con amplias regiones donde la vida excede 10^{10} ciclos, es decir, por encima del rango considerado como infinito en análisis de fatiga.

Esta mejora se debe a la disipación de energía del impacto que ofrece el PU-HD, lo que reduce de forma considerable las tensiones alternantes transmitidas al tornillo. De este modo, se demuestra que el rediseño no solo contribuye a disminuir los esfuerzos instantáneos (como se validó en los análisis de Von Mises y factor de seguridad), sino que además prolonga de manera significativa la vida en servicio del sistema.

Análisis FEA del amortiguador de PU-HD

Para la simulación del comportamiento del elastómero se asignaron propiedades mecánicas aproximadas de PU-HD. Dado que los elastómeros presentan variaciones significativas según formulación y fabricante, recopiladas de literatura técnica y fichas de materiales de fabricantes especializados. Los valores empleados se resumen en la Tabla 1.

La elección de este rango de propiedades se justifica en función de la disponibilidad de datos experimentales reportados para poliuretanos rígidos y semirrígidos empleados en aplicaciones de absorción de impacto y recubrimientos industriales [16,17].

PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
MÓDULO DE YOUNG (E)	1500 – 2000	MPa
LÍMITE ELÁSTICO	25 – 30	MPa
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	35 – 55	MPa
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	250 – 350	%
COEFICIENTE DE POISSON (N)	0.45 – 0.49	–
DENSIDAD	1100 – 1250	kg/m ³
DUREZA (SHORE D)	65 – 75	–
COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO	0.05 – 0.15	–

Tabla 1: Propiedades mecánicas del poliuretano de alta densidad empleadas en FEA

Aunque en la teoría de materiales hiperelásticos sería más apropiado el uso de un modelo constitutivo no lineal, como el de Mooney–Rivlin, la ausencia de datos específicos de ensayo para el PU-HD empleado limitó esta posibilidad. Por ello, se optó por un análisis estático no lineal (Nonlinear Static) con grandes deformaciones, utilizando los valores de la Tabla 1. Esta decisión permitió representar

de forma suficientemente confiable el efecto amortiguador del material, manteniendo la coherencia con los alcances de la tesis.

Cabe señalar que el uso de este modelo no sustituye una caracterización experimental ni un modelo hiperelástico dedicado, pero constituye una aproximación válida para validar la viabilidad estructural de la propuesta y deja abierta la posibilidad de un estudio más profundo en trabajos futuros.

La elección de este rango de propiedades se justifica en función de la disponibilidad de datos experimentales reportados para poliuretanos rígidos y semirrígidos empleados en aplicaciones de absorción de impacto y recubrimientos industriales [17,18].

Aunque en la teoría de materiales hiperelásticos sería más apropiado el uso de un modelo constitutivo no lineal, como el de Mooney–Rivlin, la ausencia de datos específicos de ensayo para el PU-HD empleado limitó esta posibilidad. Por ello, se optó por un análisis estático no lineal (Nonlinear Static) con grandes deformaciones, utilizando los valores de la Tabla 1. Esta decisión permitió representar de forma suficientemente confiable el efecto amortiguador del material, manteniendo la coherencia con los alcances de la tesis.

El análisis por elementos finitos del amortiguador de PU-HD permitió evaluar el comportamiento del material bajo la carga de impacto simulada (300 N). Los resultados de esfuerzos de Von Mises (Figura 44a) muestran que la pieza trabaja en un rango de tensiones muy por debajo de sus límites de falla, alcanzando un esfuerzo máximo de 9.8 MPa, distribuido principalmente en las zonas cercanas al contacto con la placa base.

De manera complementaria, el estudio del factor de seguridad (Figura 44b) indicó que el valor mínimo se mantiene en torno a 7, con un promedio aún mayor en el resto del volumen del amortiguador. Esto confirma que, bajo las condiciones de operación simuladas, el material no presenta riesgo de falla plástica ni de sobrecarga localizada, validando su viabilidad para la función de absorción de impactos.

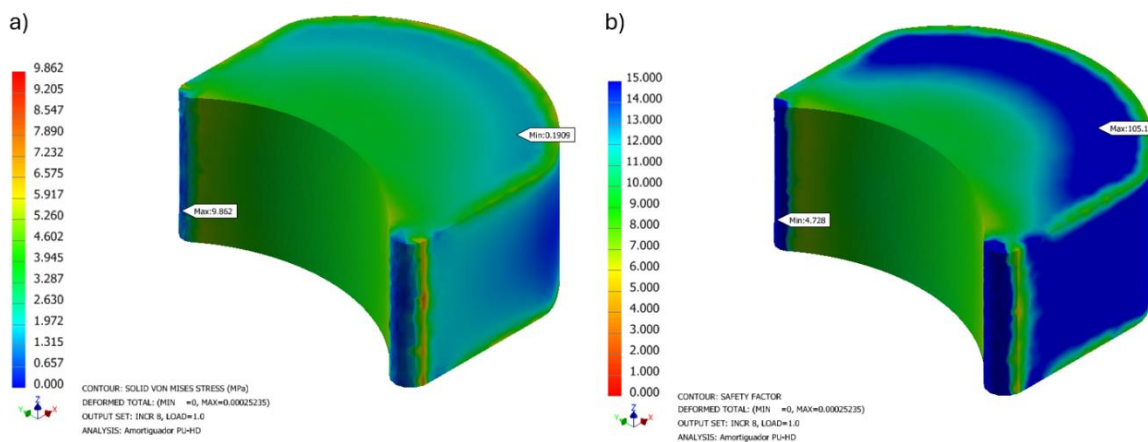


Figura 44: a) Resultados de esfuerzos de Von Mises y b) factor de seguridad en el amortiguador de PU-HD bajo la carga de impacto simulada.

Aunque no se incluyó un análisis de fatiga específico del material PU-HD debido a la ausencia de curvas S-N representativas para este tipo de elastómeros, los resultados permiten inferir una mejora indirecta en el comportamiento a fatiga de los elementos metálicos. La reducción en la magnitud de los esfuerzos transmitidos a los tornillos y a la placa base implica menores tensiones alternantes en estos componentes, lo que, de acuerdo con la teoría clásica de fatiga, favorece una mayor resistencia frente a la propagación de grietas y fallas prematuras. Como trabajo futuro se sugiere la caracterización experimental del PU-HD en condiciones de impacto repetitivo, lo cual permitiría extender los resultados hacia una evaluación de vida útil más completa.

La evolución del diseño, desde la propuesta inicial con adhesión superficial hasta la configuración final con inserción en la placa base, refleja un proceso de refinamiento en el que se buscó incrementar la realismo y confiabilidad de las simulaciones. Si bien los análisis FEA no sustituyen pruebas experimentales, constituyen una herramienta útil para estimar de manera preliminar el comportamiento estructural del sistema y descartar configuraciones poco eficientes.

Los resultados confirman que el rediseño del amortiguador cumple con el objetivo de reducir la magnitud de los esfuerzos transmitidos, al mismo tiempo que incrementa el factor de seguridad global del ensamble. Este avance, aunque se mantenga en el nivel de simulación, aporta una mejora sustancial en la concepción del sistema y abre la puerta a validaciones experimentales futuras.

Capítulo 5

Comparación de alternativas y Selección final del rediseño del amortiguador de PU-HD

A lo largo del proceso de rediseño del sistema de pinza se desarrollaron y evaluaron diversas configuraciones orientadas a reducir las cargas de impacto generadas durante el cierre. Estas propuestas surgieron de un análisis iterativo en el que se buscó equilibrar absorción de energía, facilidad de manufactura y compatibilidad estructural con el diseño inicial del mecanismo.

5.1 Alternativas exploradas

En la etapa de exploración de alternativas de rediseño se consideró, en primer lugar, la inserción de una pieza sólida rígida, fabricada en acero, al igual que los demás componentes, entre las placas base. Esta opción ofrecía simplicidad en la manufactura, sin embargo, transmitía prácticamente la totalidad del impacto a la estructura, sin capacidad efectiva de disipar energía. Por esta razón, fue descartada al no reducir el impacto del cierre de la pinza.

Posteriormente, se evaluó la alternativa de incorporar un amortiguador basado en resortes helicoidales, colocado entre las placas base, de manera análoga a la propuesta anterior. Esta configuración ofrecía la ventaja de una respuesta elástica ajustable mediante la selección de la rigidez de los resortes, además de garantizar una recuperación efectiva del sistema tras cada cierre.

Sin embargo, su integración resultó compleja debido al espacio limitado disponible, además de presentar riesgos de desalineación y generar un comportamiento oscilatorio no deseado, asociado a vibraciones bajo condiciones dinámicas. Por lo tanto, aunque se consideró una alternativa teóricamente viable, se descartó por su ineficiencia en términos de compacidad y control dinámico de la respuesta.

Finalmente, se planteó el uso de un bloque de poliuretano de alta densidad (PU-HD) como medio de amortiguación. Esta solución demostró una elevada capacidad de disipación de energía, deformaciones controladas y un bajo requerimiento de mantenimiento. Pese a que inicialmente surgieron dudas respecto a su desempeño bajo grandes deformaciones y a la adherencia del material sobre la superficie metálica, dichas limitaciones se abordaron mediante un rediseño de la placa base que permitió alojar el elastómero en un corte practicado en la misma. De esta manera, el PU-HD fue seleccionado para su desarrollo posterior, al ofrecer el mejor balance entre flexibilidad, absorción de

impacto y simplicidad constructiva. En la Figura 45 se presenta la comparación de las soluciones analizadas durante el proceso de rediseño.

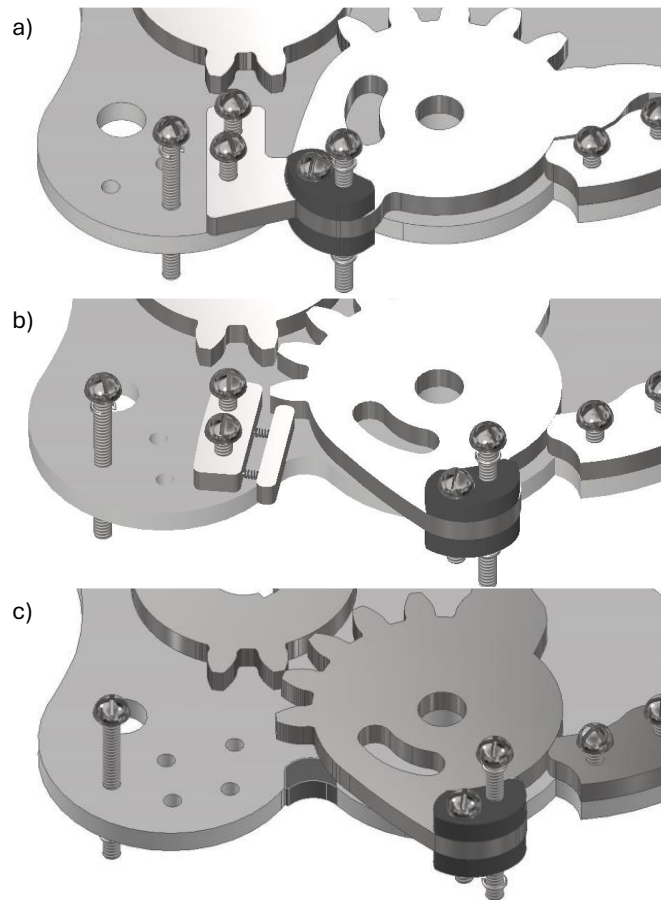


Figura 45: Comparación de las alternativas exploradas: (a) pieza sólida, (b) amortiguador con resortes y (c) bloque de PU-HD.

De esta manera, tras comparar las diferentes alternativas estudiadas, se determinó que la solución más viable consiste en la incorporación del PU-HD insertado en la placa base. Esta opción no solo responde al objetivo de mejorar la robustez y durabilidad del dispositivo bioinspirado, sino que también abre la posibilidad de un desarrollo práctico y escalable, manteniendo un margen para futuras mejoras experimentales y de manufactura.

5.2 Solución final y consideraciones de implementación

La Figura 46 presenta el diseño final adoptado, en el cual el bloque de poliuretano de alta densidad (PU-HD) se inserta dentro de un corte practicado en la placa base, asegurando un contacto más firme y una transmisión de cargas más uniforme. Esta configuración permitió superar las limitaciones observadas en el modelo previo con adhesión superficial, logrando una representación más cercana a las condiciones reales de operación. El análisis por elementos finitos (FEA) evidenció una deformación máxima de 0.25 mm bajo la carga de impacto equivalente, localizada principalmente en la región central del elastómero. Este resultado valida la capacidad del material para disipar energía de impacto sin inducir concentraciones de esfuerzo críticas en la estructura metálica.

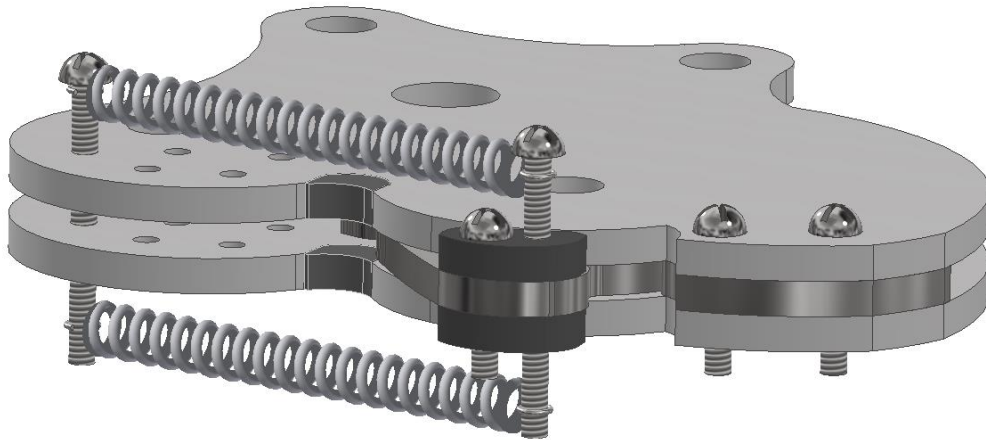


Figura 46: Modelo CAD del amortiguador de PU-HD insertado en la placa base.

No obstante, durante las simulaciones FEA, se observó un fenómeno relevante: el material elastómero tendía a presentar una deformación vertical hacia arriba bajo cargas de impacto, como se aprecia en la Figura 47. Este comportamiento, aunque esperado en materiales con alta deformabilidad, representa un desafío para el diseño práctico del sistema.

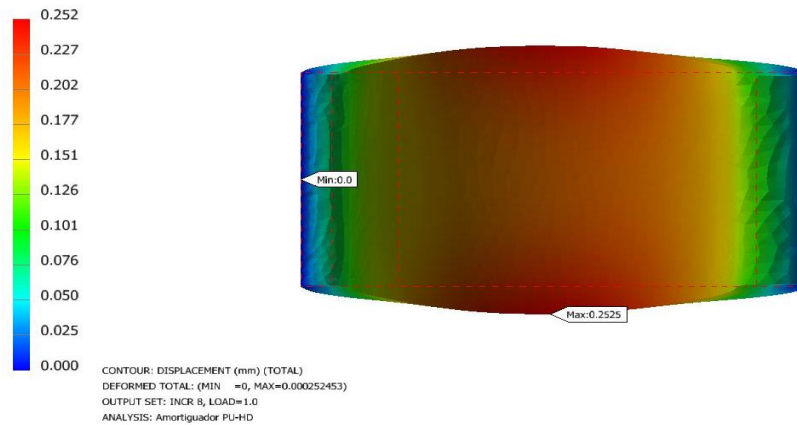


Figura 47: Mapa de deformación vertical del PU-HD bajo carga de impacto (doblado hacia arriba).

Como respuesta a esta limitación, se propone la incorporación de una tapa metálica superior única que funcione como elemento de contención parcial del elastómero, tal como se muestra en la Figura 48. Esta configuración permite restringir el desplazamiento lateral del bloque de PU-HD sin impedir completamente su deformación vertical, lo que contribuye a mantener su capacidad de absorción de energía durante el impacto. Además de controlar la deformación, la tapa superior facilitaría el montaje y desmontaje del amortiguador, permitiendo su sustitución periódica sin modificar la placa base. Este enfoque se inspira en soluciones industriales de amortiguación, como los topes de goma con arandelas de retención o los bump stops modulares desmontables utilizados en sistemas de suspensión, los cuales combinan eficiencia mecánica, durabilidad y mantenimiento sencillo.

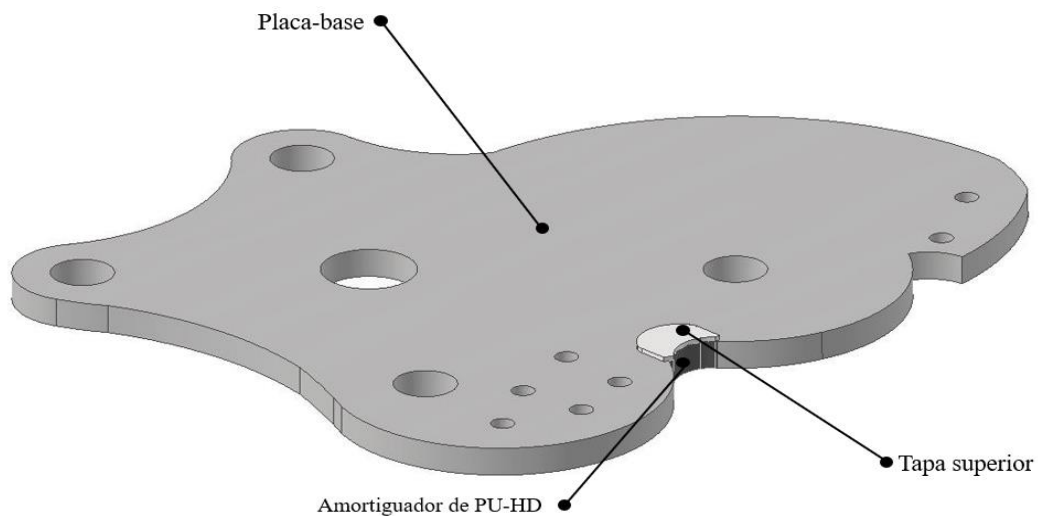


Figura 48: Propuesta esquemática de tapa superior para contener la deformación y permitir el reemplazo del amortiguador.



Figura 49: Ejemplo de bujes de poliuretano utilizados en sistemas de suspensión automotriz, empleados como elementos de absorción de impactos y vibraciones [19].

Tal como se muestra en la Figura 49, los bujes de poliuretano se emplean ampliamente en sistemas de suspensión para absorber vibraciones e impactos, incrementando la durabilidad de los componentes mecánicos [19]. Este ejemplo práctico demuestra que el uso de elastómeros en condiciones de impacto y carga cíclica no solo es viable, sino que también ha sido probado en entornos exigentes, lo que refuerza la pertinencia del rediseño planteado en esta tesis.

Asimismo, para garantizar la facilidad de mantenimiento y reemplazo, se recomienda un sistema de fijación mecánica desmontable entre el amortiguador y la placa base, evitando adhesivos permanentes. Una opción

viable serían placas intermedias atornilladas, que actúan como elemento de sujeción y facilitan el cambio de módulo de amortiguación según el tipo de impacto.

La incorporación de estos sistemas permitiría prototipar versiones intercambiables y realizar ensayos experimentales de fatiga o impacto con diferentes rigideces del PU-HD, optimizando la respuesta dinámica de la pinza en futuros estudios.

5.3 Relevancia y proyección del diseño

En la Figura 50 se presenta la comparación de las curvas de fuerza en función del tiempo obtenidas para las distintas configuraciones del sistema. Se observa que el diseño con amortiguador de PU-HD (curva roja) presenta una fuerza máxima de impacto significativamente menor que las demás configuraciones, reduciendo el pico de aproximadamente 600 N a cerca de 300 N.

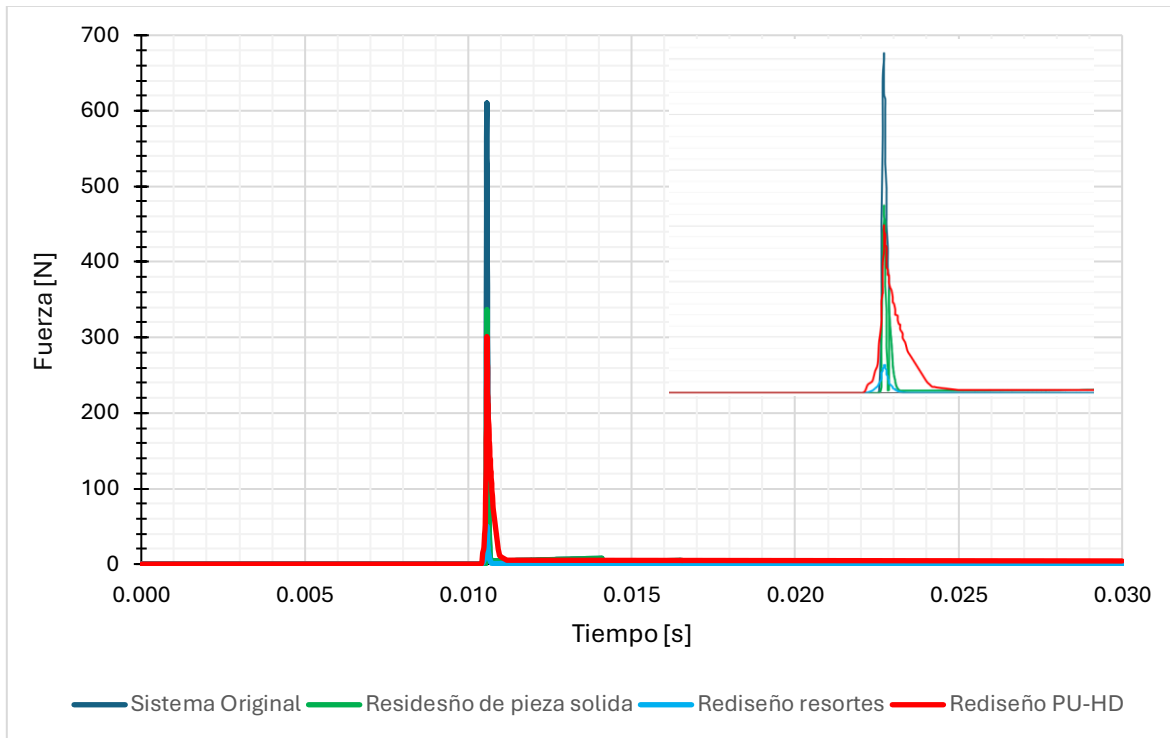


Figura 50: Comparativa de la fuerza de impacto para distintas configuraciones del sistema: original, rediseño con pieza sólida, rediseño con resortes y rediseño con inserción de PU-HD.

El rediseño con inserción de PU-HD representa un avance significativo en la integración de elementos amortiguadores dentro de sistemas mecánicos sometidos a impacto, al proporcionar una solución simple, económica y funcional. Aunque la simulación realizada se mantuvo dentro de los alcances de un estudio preliminar, los resultados validan la factibilidad de esta implementación y sientan las bases para futuras pruebas experimentales orientadas a caracterizar la respuesta real del material bajo impactos repetitivos.

Asimismo, el enfoque metodológico seguido durante el presente estudio permite extender esta estrategia de diseño a otros componentes donde la absorción de energía y la durabilidad estructural sean factores determinantes. El análisis comparativo demuestra que la configuración con inserción parcial del PU-HD ofrece el mejor equilibrio entre desempeño estructural, amortiguación efectiva y mantenimiento práctico. Si bien presenta ciertos desafíos en la manufactura y el control dimensional, su comportamiento en las simulaciones numéricas confirma una mejora sustancial en la absorción del impacto y en la integridad global del sistema.

Con base en esta comparación, el rediseño con PU-HD se considera la alternativa más eficiente para la mitigación de impactos, y se propone como la configuración base para la siguiente etapa de validación experimental. Las recomendaciones de implementación derivadas de este análisis sientan la base para el desarrollo de una versión funcional con potencial de aplicación real.

Capítulo 6

Conclusión

6.1 Conclusiones por objetivo

El objetivo general de este estudio fue rediseñar un dispositivo de cavitación bioinspirado para la desinfección de agua, haciéndolo más robusto y duradero. Durante este desarrollo, este objetivo se logró parcialmente, con avances significativos en la validación estructural mediante simulación y la propuesta de mejoras para aumentar la durabilidad del sistema. Sin embargo, también se identificaron limitaciones, principalmente relacionadas con la validación experimental y la caracterización completa de los materiales.

En relación con los objetivos particulares, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. **Realizar simulaciones de esfuerzo y deformación utilizando software especializado:** este objetivo se alcanzó satisfactoriamente. Se aplicaron análisis por Elementos Finitos (FEA) tanto lineales como no lineales, los cuales se especificaron en los apartados correspondientes del desarrollo del estudio. Los análisis lineales se emplearon en la evaluación inicial del sistema original y de las configuraciones rígidas, con el fin de identificar las zonas críticas de concentración de esfuerzos en los tornillos, la placa base y la zona de impacto. Posteriormente, se recurrió a un análisis no lineal para el estudio del amortiguador de PU-HD, a fin de considerar las grandes deformaciones asociadas al comportamiento del material elastómero. Los resultados obtenidos confirmaron que las cargas dinámicas del cierre generaban deformaciones plásticas en los componentes originales, validando así la necesidad del rediseño.
2. **Inspeccionar el prototipo para detectar defectos de diseño:** este objetivo se logró mediante la revisión física del modelo inicial. Se detectaron problemas de oxidación en tornillería, deformaciones permanentes en la placa base y desgaste prematuro en uniones. Dichos hallazgos coincidieron con lo predicho en las simulaciones, reforzando la coherencia entre el análisis numérico y la observación experimental.
3. **Realizar un análisis de fatiga del modelo del prototipo:** Este objetivo no se alcanzó completamente. El estudio se enfocó específicamente en el sistema de amortiguación de impacto, con el propósito de evaluar su influencia en la vida a fatiga de los componentes metálicos, en particular los tornillos y la placa base. Si bien se discutió la mejora indirecta del comportamiento a fatiga como resultado de la reducción de esfuerzos alternantes obtenida con el rediseño, no se llevó a cabo un análisis de fatiga formal. Esto se debió a la falta de curvas S-N (esfuerzo alternante–número de ciclos) específicas para el material elastómero empleado (PU-HD) y a las limitaciones de tiempo en el desarrollo del proyecto. Se recomienda abordar este punto en trabajos futuros mediante ensayos experimentales controlados que permitan validar la durabilidad del sistema amortiguador.

4. ***Desarrollar un nuevo diseño del prototipo basado en cálculos de esfuerzos críticos y análisis de fatiga:*** Este objetivo se cumplió parcialmente. El proceso de rediseño se centró en el sistema de amortiguación de impacto, evaluando diversas configuraciones (pieza sólida, resortes y bloque elastómero) con base en los resultados obtenidos de los análisis de esfuerzo y deformación. Tras un proceso comparativo, se seleccionó la opción de amortiguador de PU-HD insertado en la placa base, la cual mostró una reducción significativa en los esfuerzos transmitidos, mejorando la robustez y durabilidad del conjunto. No obstante, el análisis de fatiga no se incluyó de manera cuantitativa, por lo que la validación de la vida útil del sistema quedó pendiente para futuros estudios experimentales.
5. ***Proponer un cambio en el diseño validado mediante pruebas en software:*** este objetivo se alcanzó plenamente. El rediseño final se sometió a simulaciones numéricas no lineales de impacto, obteniendo resultados que validan su efectividad frente al modelo original. Además, se plantearon consideraciones de implementación práctica, como el uso de un sistema de unión mecánica desmontable y tapas de contención para controlar deformaciones, lo que fortalece la viabilidad de su aplicación real.

6.2 Conclusión general

En general, los resultados de este estudio demuestran que el rediseño del dispositivo, particularmente del sistema de amortiguación de impacto, puede mejorar la rigidez estructural y la fiabilidad del conjunto, aunque persisten desafíos en cuanto a la caracterización experimental y la evaluación de la fatiga. La metodología desarrollada permitirá la construcción de modelos más precisos y ha sentado una base sólida para futuros estudios orientados a la validación experimental y optimización del sistema de amortiguación empleado en el dispositivo de pinzas para producir cavitación.

Si bien este trabajo cumplió en buena medida con los objetivos planteados, también abrió nuevas líneas de investigación y mejoras que podrían desarrollarse en proyectos posteriores. Entre ellas se destacan:

1. **Caracterización experimental del PU-HD:** realizar ensayos de compresión, tracción y fatiga para obtener curvas S–N del material, lo que permitiría un análisis más preciso de la vida útil bajo condiciones de carga cíclica y de impacto repetitivo.
2. **Validación experimental del rediseño:** fabricar un prototipo físico del sistema con el amortiguador de PU-HD insertado en la placa base, a fin de comparar los resultados de simulación con mediciones reales de deformación, esfuerzos y vida útil por fatiga.
3. **Optimización geométrica del amortiguador:** explorar variaciones en la forma y volumen del elastómero para controlar mejor las deformaciones laterales observadas en la simulación. En particular, estudiar el uso de tapas de contención o refuerzos laterales que limiten el pandeo del material sin afectar su capacidad de amortiguación.

Apéndice A.1

Simulación dinámica del cierre de la pinza en Autodesk Inventor

A.1.1 Objetivo

El objetivo de esta simulación fue modelar el cierre súbito del sistema de pinza tensada por resortes, con el fin de obtener parámetros clave como la velocidad angular y las fuerzas de impacto. Estos resultados permiten evaluar posteriormente los esfuerzos estructurales de los componentes críticos mediante análisis FEA y validar la fidelidad cinemática del sistema frente al comportamiento experimental.

A.1.2 Preparación del ensamblaje

El ensamblaje del sistema se realizó directamente en Autodesk Inventor, utilizando las partes principales que intervienen en el movimiento de cierre. Para optimizar el tiempo de cómputo, se incluyeron únicamente aquellos componentes cuya masa participa activamente en la dinámica del sistema. Los materiales de cada pieza se asignaron a partir de la biblioteca de Inventor, utilizando propiedades estándar.

Se aplicaron restricciones que replican las condiciones reales: los cuerpos fijos como la base (ver Figura 51), y los tornillos de fijación fueron definidos como inmóviles, mientras que la pinza se dejó libre para rotar alrededor de su eje (ver Figura 52). Esta configuración buscó reflejar lo mejor posible la cinemática del cierre en condiciones reales.

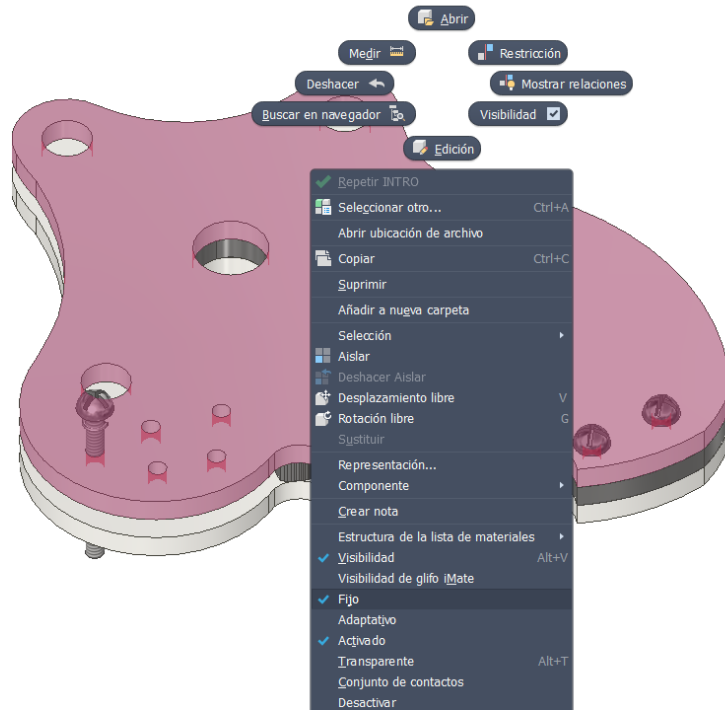


Figura 51: Aplicación de restricciones de movimiento en la placa base, definiendo condiciones fijas para simular el comportamiento real del sistema.

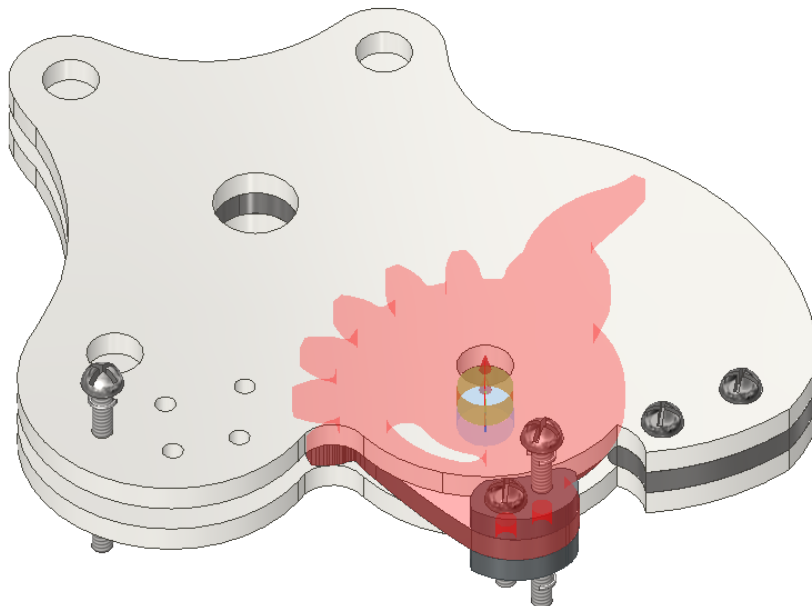


Figura 52: Restricciones de rotación permitidas sobre la pinza-engrane, asegurando su giro únicamente en el eje correspondiente.

A.1.3 Configuración de la simulación

Una vez completado el ensamblaje, se ingresó al entorno de simulación dinámica de Inventor. Ahí se definieron:

- Contactos 3D entre las superficies relevantes, especialmente entre las placas base y los amortiguadores, utilizando la herramienta “Insertar unión”.
- Resortes (muelles helicoidales) conectados en los puntos donde en el sistema real se encuentran los resortes físicos. Estos fueron configurados como “Muelle/Amortiguador/Conector”, con rigidez real de 1.6 N/mm y dimensiones obtenidas de mediciones (ver Figura 53).

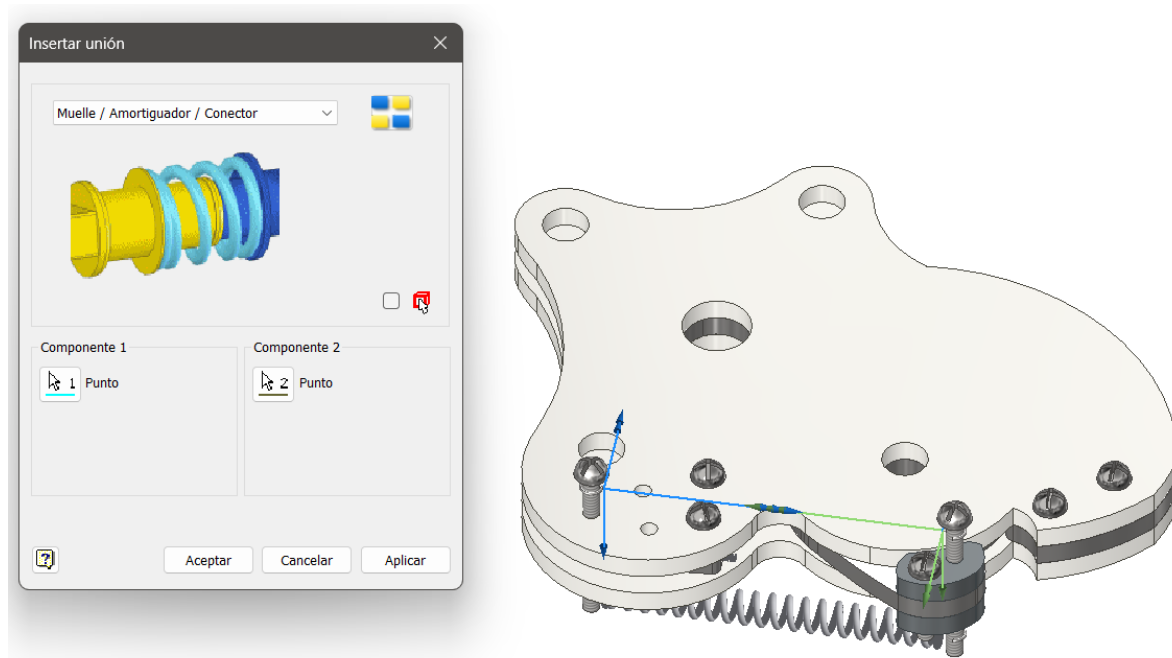


Figura 53: Ventana de configuración de la rigidez del resorte en Inventor; mostrando la inserción del valor de 1.6 N/mm obtenido experimentalmente.

Durante la simulación dinámica del cierre de la pinza, configurada para un tiempo total de 0.030 segundos (ver Figura 54), se monitorizó cuidadosamente el comportamiento del sistema para detectar posibles anomalías o comportamientos inusuales. No se identificaron irregularidades, lo que permitió avanzar con el análisis detallado de los datos generados.

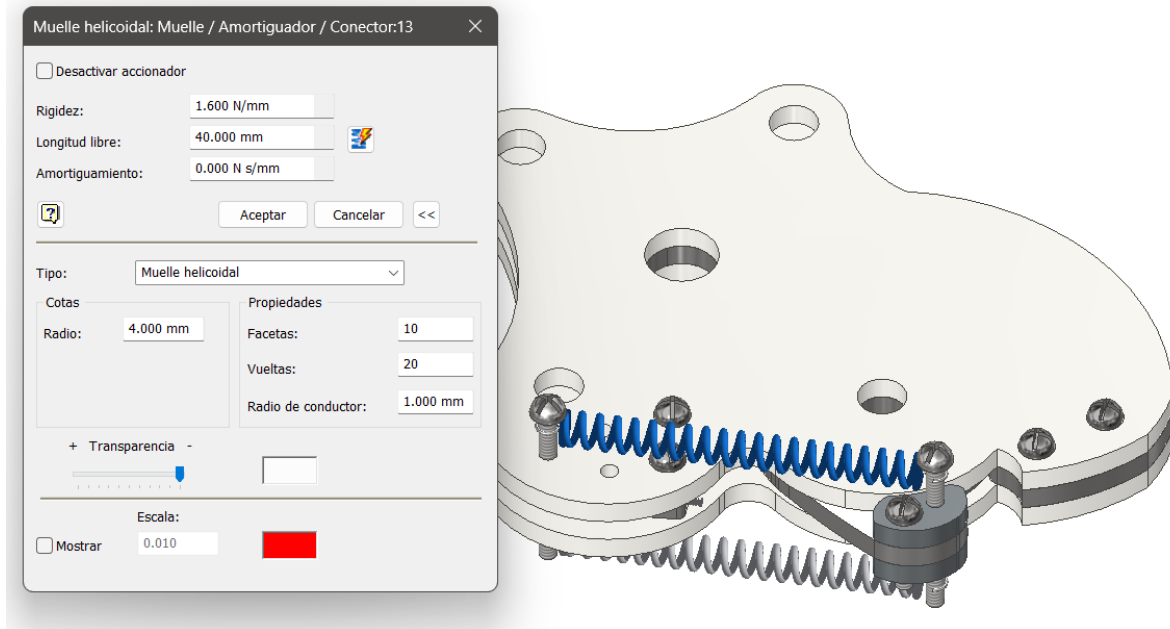


Figura 54: Configuración inicial y parámetros de los resortes utilizados para simular la tensión en la pinza durante el cierre.

A.1.4 Obtención de resultados

Se seleccionó específicamente la unión de contacto entre el amortiguador y la placa base para extraer la gráfica de fuerza versus tiempo, observada en la sección de “Gráficos de salida”. En esta gráfica se identificó un pico máximo de aproximadamente 600 N en el punto crítico de impacto, valor que corresponde a cada uno de los dos amortiguadores presentes en el sistema. Esta información es fundamental para caracterizar las cargas dinámicas que deben soportar dichos componentes.

Posteriormente, debido a la imposibilidad de exportar directamente los elementos sometidos a contacto (como las placas base y amortiguadores) para análisis estructural en Inventor, se realizó una exportación selectiva hacia el análisis FEA del tornillo de sujeción (ver Figura 55), que en la práctica mostró indicios de falla por fractura. Este procedimiento facilitó el análisis detallado de las tensiones y cálculo del factor de seguridad en el tornillo bajo las condiciones dinámicas reales simuladas, permitiendo así una evaluación más precisa de su desempeño estructural.

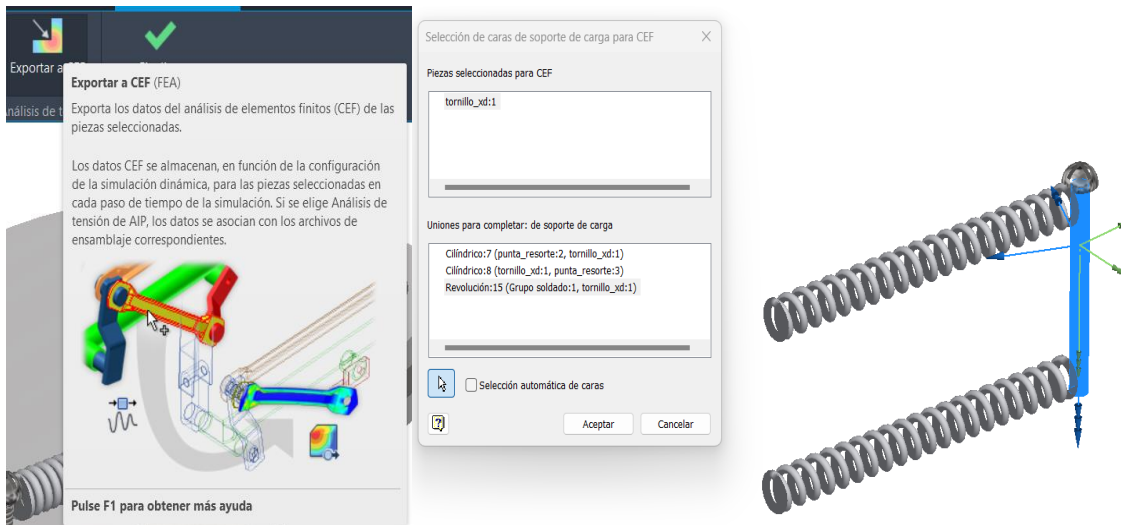


Figura 55: Exportación del resorte de sujeción desde el entorno dinámico a análisis FEA para evaluación estructural.

Para medir la velocidad angular durante el cierre de la pinza, se realizó la inserción de un trazo o marcador de movimiento en la punta de la pinza-engrane, tal como se muestra en la Figura 56. Este procedimiento permitió registrar el desplazamiento y movimiento puntual necesario para el análisis cinemático.

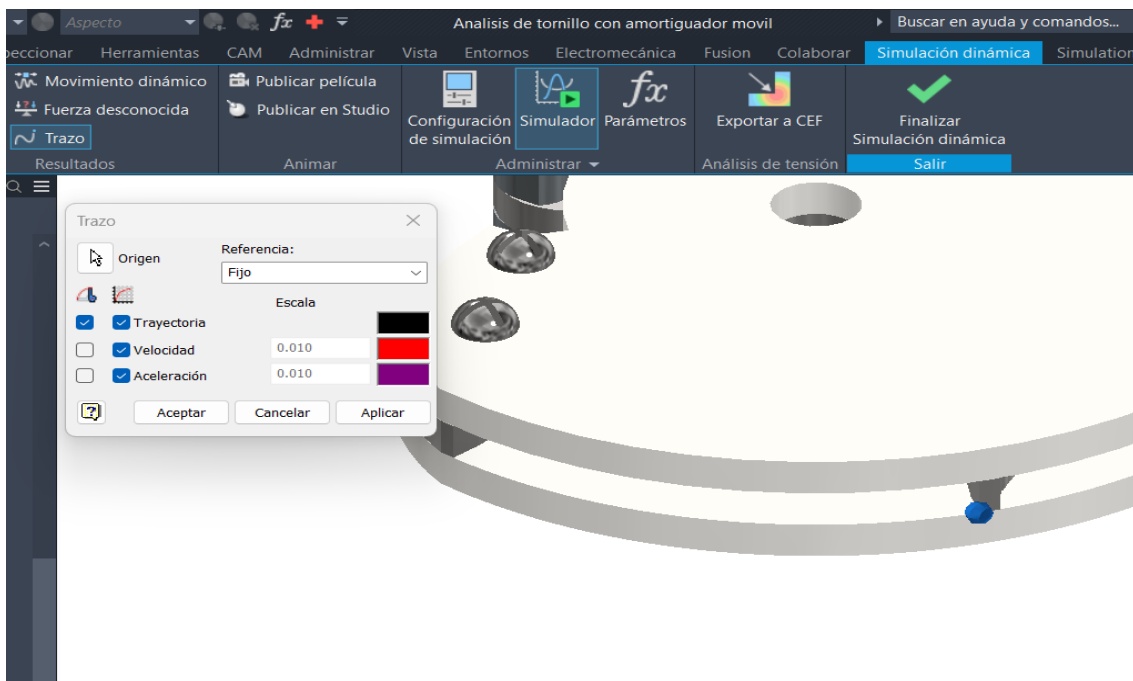


Figura 56: Trazo insertado en la punta de la pinza-engrane que permite medir el movimiento y obtener la curva de velocidad.

Posteriormente, se obtuvo una curva del movimiento angular a partir del desplazamiento registrado por dicho trazo durante la simulación dinámica. Esta curva, que describe la evolución temporal del movimiento de la pinza-engrane, se presenta en la Figura 57.

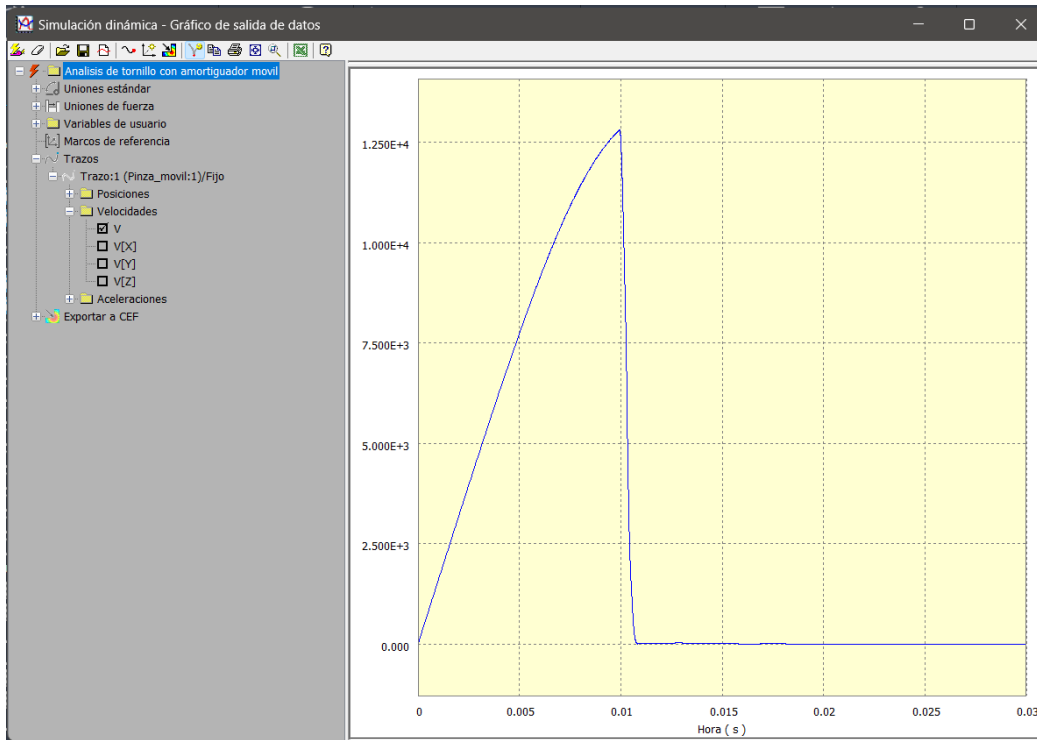


Figura 57: Curva de velocidad angular obtenida a partir de la simulación dinámica.

La obtención de esta gráfica fue clave para validar la fidelidad del modelo con respecto al comportamiento experimental y para el cálculo posterior de la velocidad angular, la cual se derivó dividiendo la velocidad tangencial obtenida entre el radio desde el eje de giro hasta la punta del trazo.

A.1.5 Exportación a análisis estructural

En la fase final de la simulación dinámica, se generó una serie temporal dividiendo el intervalo total de 0.030 s en varios pasos discretos. Esto permitió seleccionar y analizar momentos específicos dentro de la evolución del movimiento, especialmente el instante crítico de impacto que fue identificado en 0.01048 s, de acuerdo con la gráfica de fuerza obtenida.

La configuración para la generación de esta serie temporal se detalla en la Figura 58, donde se muestra cómo se establecen los tiempos específicos para la exportación de los resultados dinámicos al entorno de análisis estructural.

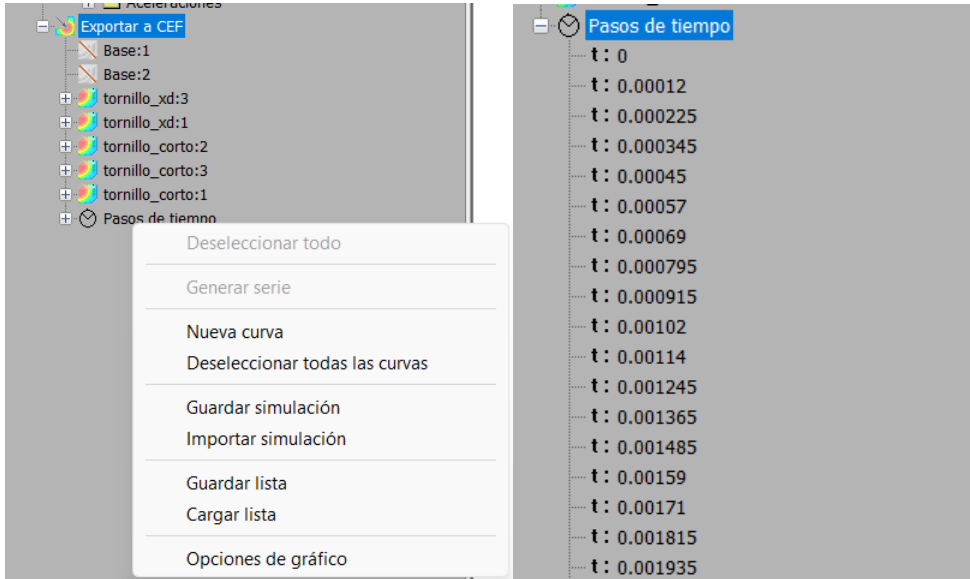


Figura 58: Configuración de la generación de la serie de los momentos de la simulación.

Una vez definida esta serie, se configuró un análisis estático con base en los datos del estudio dinámico exportado. En la Figura 59 se visualiza la configuración del análisis estático, que utiliza las fuerzas y momentos recuperados automáticamente desde la simulación dinámica para evaluar el estado de esfuerzo en los componentes que se eligieron previamente a exportar.

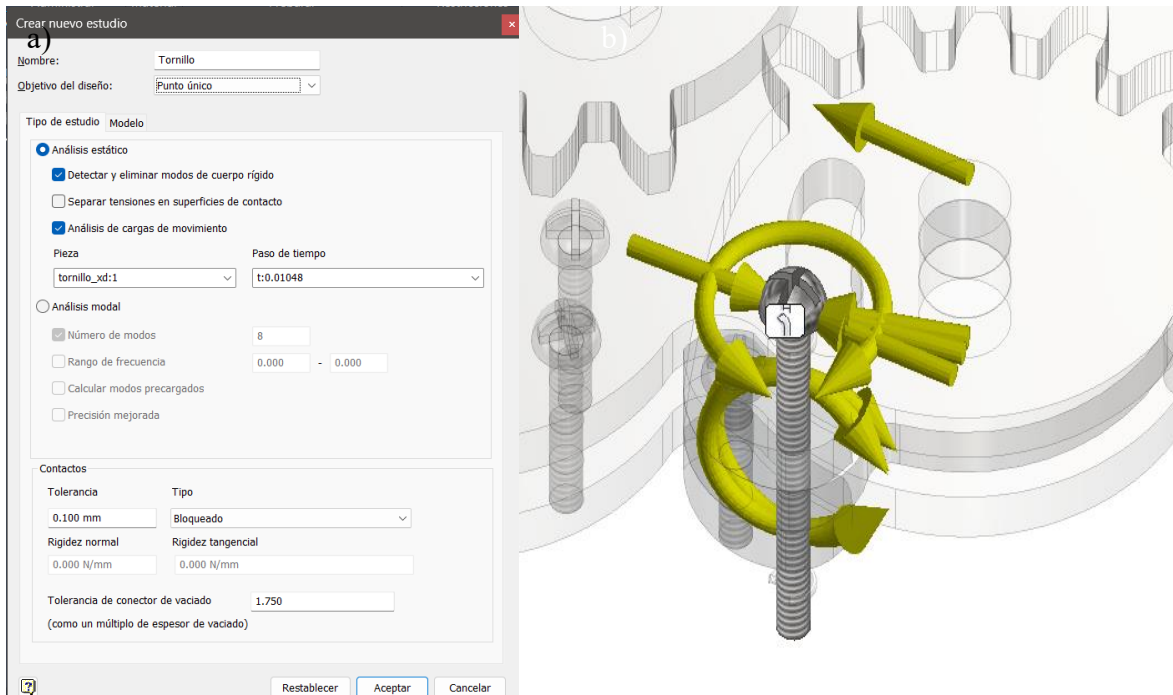


Figura 59: a) Configuración del análisis estático del análisis y b) esfuerzos resultantes en el momento seleccionado.

Este proceso permite obtener mapas de esfuerzos y factores de seguridad en puntos críticos, facilitando el diseño y validación estructural del sistema.

Se exportó el tornillo a un nuevo estudio en el entorno de análisis FEA de Inventor Nastran, como se muestra en la Figura 60. Luego se aplicaron las restricciones fijas necesarias al tornillo, se generó el mallado y se corrió la simulación estructural, obteniendo el mapa de esfuerzos de Von Mises junto con el factor de seguridad. Este procedimiento fue repetido para otros componentes como los amortiguadores y las placas base, aunque en esos casos los esfuerzos obtenidos en la simulación dinámica debieron aplicarse manualmente sobre las piezas individuales en estudios separados.

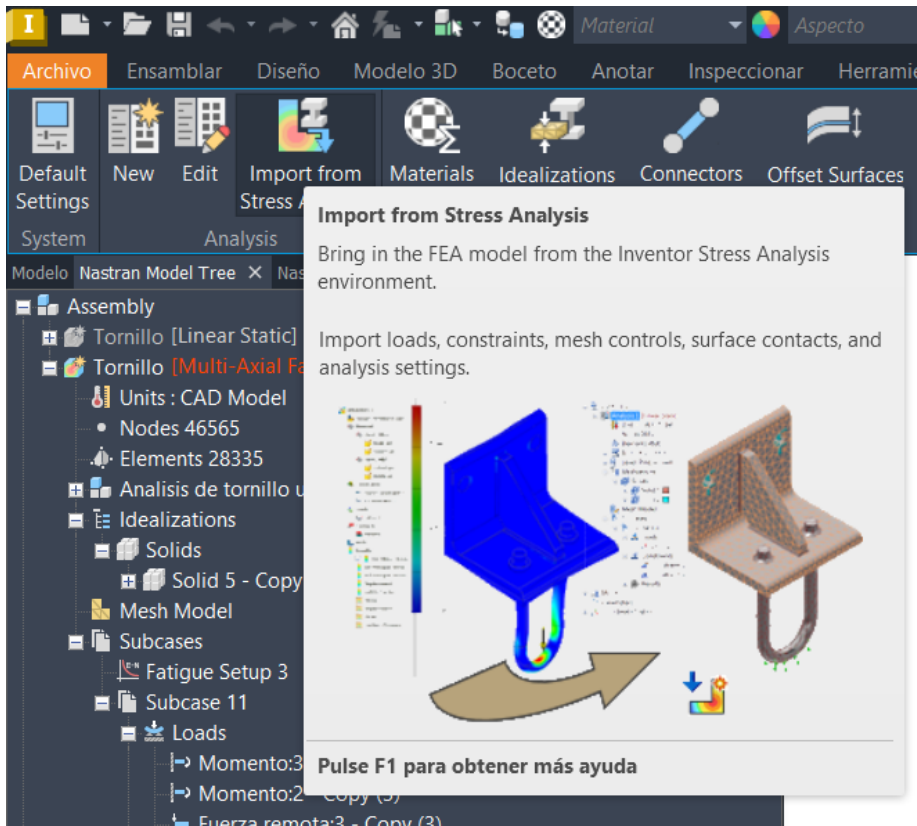


Figura 60: Interfaz de importación del análisis dinámico hacia Inventor Nastran para realizar el análisis de esfuerzos FEA.

Posteriormente, se definieron las restricciones fijas necesarias para replicar las condiciones reales de sujeción y se generó un mallado adecuado que permitiera capturar los detalles mecánicos relevantes sin sacrificar tiempos de cómputo excesivos. La configuración del mallado se enfocó en refinar las zonas alrededor de cabezas y roscas, donde se concentran los mayores esfuerzos. La Figura 61 ilustra esta configuración de mallado aplicada al tornillo, mostrando el tamaño y tipo de elementos utilizados para garantizar una buena precisión en el cálculo de tensiones.

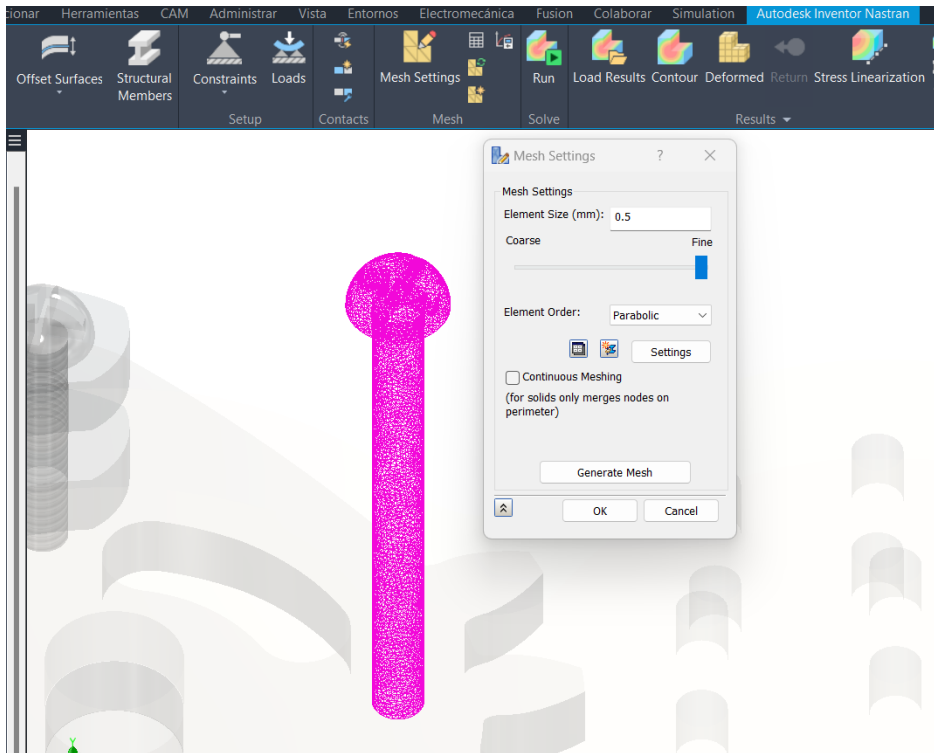


Figura 3: Configuración detallada del mallado aplicado al tornillo para el análisis estructural, mostrando refinamiento local en áreas críticas.

La simulación subsiguiente facilitó la construcción del mapa de tensiones equivalentes de Von Mises, que sirvió para identificar las regiones clave y evaluar el factor de seguridad del tornillo bajo condiciones dinámicas (ver resultados en el Capítulo 4, Figuras 22–25). Este proceso proporciona validación de la integridad estructural del componente contra las cargas de impacto consideradas. Se aplicaron las restricciones fijas necesarias al tornillo, se generó la malla y se ejecutó la simulación.

Como resultado, se obtuvo un mapa de tensiones equivalentes de Von Mises y se calculó el factor de seguridad del componente. Este proceso se repitió luego con otras partes del sistema, en este caso amortiguadores y placas base. Las condiciones de carga no se derivaron directamente a través de un enfoque de modelo dinámico individual, sino que se aplicaron manualmente basándose en las fuerzas y reacciones extraídas de la simulación del ensamblaje global para evaluar la respuesta estructural de forma aislada.

Referencias

- [1] Kalumuck, K. M., Chahine, G. L., Hsiao, C. T., & Choi, J. K. (2003). *Remediation and disinfection of water using jet generated cavitation*. En *Proceedings of the Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003)*. Osaka, Japón. DYNAFLOW, INC.
- [2] Arrojo, S., Benito, Y., & Martínez Tarifa, A. (2008). A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(6), 903-908.
- [3] Lafuente, E., & López, H. (2023). Desinfección bacteriana de aguas residuales utilizando cavitación hidrodinámica a través de un tubo Venturi. *Revista de Ciencias de la Energía y Mecánica*, 13(1), 77-80.
- [4] Arthur Anker / Oxford University Museum of Natural History, en Anker (2017)
- [5] Koukouvinis, P., Bruecker, C., & Gavaises, M. (2017). Unveiling the physical mechanism behind pistol shrimp cavitation. *Scientific Reports*, 7(1), 13994.
- [6] Tang, X., & Staack, D. (2019). *Bioinspired mechanical device generates plasma in water via cavitation*. *Science Advances*, 5(3), eaau7765.
- [7] Godínez, F.A., Salinas-Vázquez, M., Vicente, W., Guzmán, J.E.V., Valdés, R., & Palacios-Morales, C.A. (2022). Numerical simulation of a flow induced by the high-speed closure of a bioinspired claw. *Journal of Fluids and Structures*, 113, 103654
- [8] Lauchle, G. C., & Billet, M. L. (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial Mc Graw Hill.
- [9] Vela Carrillo, A. Z. (2019). *Estudios orientados para el desarrollo de una tecnología de cavitación-electro-Fenton de tratamiento de aguas* [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C.]. Santiago de Querétaro, México.
- [10] Smith, J., & Doe, A. (2023). *Fundamentals of Multiphase Flow*. Academic Press.
- [11] Darly J., & Harleman D. (1975). *Dinámica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. Editorial Trillas.
- [12] J. Carpenter, M. Badve, S. Rajoriya, S. George, V. K. Saharan, A. B. Pandit. 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.
- [13] Gutiérrez F., Arias S., & Cardona D. F. (2019). Cavitación hidrodinámica: un enfoque desde la ingeniería y la agroindustria. *Scientia et Technica*, 24(2), 283-301. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [14] Yadav, M., et al. (2021). Hydrodynamic cavitation for water disinfection: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 41, 102097.

[15] Gillor, O., Etzion, A., & Riley, M. A. (2009). Persistence of colicinogenic *Escherichia coli*. *BMC Microbiology*, 9, 165.

[16] Rodríguez, J., & Martínez, L. (2019). Caracterización mecánica de espumas de poliuretano rígido para aplicaciones estructurales. *Revista Iberoamericana de Polímeros*.

[17] Torres, A., & Herrera, P. (2018). Estudio de las propiedades dinámico-mecánicas de poliuretanos elastoméricos. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*.

[18] Gómez, L., Ramírez, J., & Ortega, P. (2018). Caracterización mecánica y análisis dinámico de poliuretanos elastoméricos sometidos a cargas cíclicas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*.

[19] Moog Parts. (2023). Bushings. Recuperado de <https://www.moogparts.com/es-mx/suspension/vehicle-bushings/bushings.html>

OpenAI. (2025). ChatGPT (versión GPT-5) [Modelo de lenguaje]. <https://chat.openai.com>

ChatPDF. (2025). ChatPDF [Herramienta de análisis de documentos mediante inteligencia artificial]. <https://www.chatpdf.com>

Ought. (2025). Elicit [Herramienta de revisión de literatura científica basada en inteligencia artificial]. <https://elicit.org>