



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Proyecto de dispositivo experimental para el
tratamiento de aguas residuales mediante
cavitación hidrodinámica

(Project of an experimental device for the
treatment of wastewater by hydrodynamic
cavitation)

Autor

Andrés Puerto Madorrán

Directores

Dr. Ing. José Luis Santolaya Sáenz

Dr. Ing. Luis Manuel Cerecedo Figueroa

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero darles las gracias a mis tutores del trabajo, al Dr. José Luis Santolaya por su apoyo, sus opiniones y sus palabras de ánimo y al Dr. Luis Manuel Cerecedo por su conocimiento y por todo el tiempo dedicado en el laboratorio.

Por otro lado, agradecer a mis padres la oportunidad y la confianza depositada en mí a lo largo de todos estos años, sin ellos no hubiera sido posible.

También, a todos los compañeros que me han acompañado desde el inicio, así como los que se incorporaron en el camino, por todo ese tiempo juntos.

RESUMEN

Aunque la cavitación nace en conexión con fenómenos nocivos, las investigaciones sobre este fenómeno han llevado a aprovechar ciertos efectos positivos en determinadas aplicaciones, por ejemplo en la eliminación de microorganismos en el agua y la oxidación de agentes químicos peligrosos, por lo que la caracterización de los fenómenos que intervienen en su desarrollo ha generado un gran interés científico en las últimas décadas.

En este trabajo se ha proyectado un dispositivo experimental para la realización de ensayos de cavitación hidrodinámica y la posterior caracterización del tratamiento logrado en la eliminación de elementos nocivos (químicos y bacteriológicos).

Se han estudiado los factores que intervienen en experimentos relacionados con la cavitación en un dispositivo rotatorio (geometría del rotor y del estator, condiciones de operación, ...) y se ha proyectado un dispositivo que permite realizar ensayos con diferentes configuraciones de geometría y de velocidad de rotación.

El equipo experimental se compone de cuatro partes principales: la estructura que soporta y sitúa convenientemente todos los componentes, la instalación hidráulica que alimenta y descarga el dispositivo cavitador, el dispositivo donde se genera cavitación hidrodinámica y el equipo de potencia y control.

El diseño final realizado pretende lograr modularidad, facilidad en la operación y adecuado control de los ensayos, de manera que pueda ser utilizado en laboratorios de investigación, con muestras de hasta 250 ml, y sin requerimientos de mano de obra especializada.

ÍNDICE

ALCANCE DE LA MEMORIA	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Cavitación hidrodinámica	3
1.2 Formación y desarrollo de burbujas	5
2. ESPECIFICACIONES INICIALES	6
2.1 Consideraciones geométricas	7
2.2 Parámetros de entrada	8
2.3 Ansys Fluent	15
3. CONJUNTO EXPERIMENTAL	21
3.1 Estructura soporte	21
3.2 Instalación hidráulica	23
3.3 Dispositivo cavitador	24
3.4 Equipo de potencia y control	25
3.5 Método de operación	28
3.6 Mantenimiento y cambio de dientes	29
4. DISPOSITIVO CAVITADOR	32
4.1 Rotor, estátor y componentes internos	32
4.2 Componentes mecánicos	35
5. PRESUPUESTO	40
6. CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXO I: Planos	
ANEXO II: Cálculos mecánicos	
ANEXO III: Modelado en Ansys	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama P-T agua [10]	4
Figura 2: Crecimiento y colapso de una burbuja de vapor. Erosión de la pared [14]	5
Figura 3: Conjunto rotor estátor. Diseño basado en el equipo artesanal empleado por el Grupo de Cavitación, EINA, para ensayos de demostración.	6
Figura 4: Vista en planta de la cámara de cavitación. Reducción Secuencia de contracciones y expansiones a lo largo de la sección de paso del fluido.	8
Figura 5: Representación de la sección de un diente en la cámara de cavitación. Esquema ilustrativo del flujo principal.	9
Figura 6: Detalle de velocidades del perfil lineal	12
Figura 7: Comparación de los resultados de la ecuación (Ec. 16) y datos experimentales obtenidos con un equipo similar pero de mayores dimensiones. F1 es el tipo de dientes del estátor que se probaron y que coinciden con los diseñados en el presente proyecto.	13
Figura 8: Configuración de Mixture	16
Figura 9: Muestra de la Geometría de la simulación con Ansys. Pieza que representa la octava parte de la corona total de dientes en el estátor.	17
Figura 10: Detalle del mallado empleado en Ansys	18
Figura 11: Secuencia posiciones en estado transitorio para el cálculo iterativo del par requerido.	18
Figura 12: Evolución temporal del cálculo del par, por unidad de profundidad, durante el cálculo iterativo con ANSYS	19
Figura 13: Partes que conforman el conjunto experimental	21
Figura 14: Elementos que conforman la Estructura soporte	22
Figura 15: Detalle de los pernos de sujeción del estátor a la base de la estructura	22
Figura 16: Componentes instalación hidráulica	23
Figura 17: Detalles de los depósitos para almacenamiento de muestras (sin tratar y tratadas) de la instalación de cavitación.	24
Figura 18: Posición final del Dispositivo cavitador dentro de la estructura soporte.	25
Figura 19: Acoplamiento mecánico. Forma de unir el eje del rotor con el eje del motor eléctrico.	25
Figura 20: Equipo de potencia y control	26
Figura 21: Datos de potencia del dispositivo experimental. Simulaciones con Ansys.	26
Figura 22: Motor Yaskawa de corriente alterna de 3kW. (Par máximo 9,8 Nm y 3.000 rpm)	27
Figura 23: Variador de frecuencia para controlar la velocidad de giro del motor eléctrico y monitorizar los consumos energéticos	27
Figura 24: Esquema del circuito hidráulico	28
Figura 25: Vista lateral del diseño	30
Figura 26: Vista frontal del diseño del Conjunto	30
Figura 27: Dispositivo Cavitador	31
Figura 28: Explosionado del arreglo del dispositivo cavitador. Piezas que conformarán la cámara de cavitación.	32
Figura 29: Explosionado del rotor con 16 paletas de arrastre	33

Figura 30: Vista superior e inferior del estátor diseñado	34
Figura 31: Flecha del rotor.	35
Figura 32: Configuración general de los Ddientes del estátor. La grapas, o amarres, permitirán sujetarlos a la superficie interna del estátor, y retirarlos en caso necesario...	36
Figura 33: Sección de la pared dentada (pieza independiente del estátor)	36
Figura 34: Tapa en posición de montaje	37
Figura 35: Vista seccionada de la ubicación del rodamiento	38
Figura 36: Disposición de las chavetas en el eje	38
Figura 37: Junta de labio	38

ALCANCE DE LA MEMORIA

El agua es un bien común que no se debe desperdiciar. La presencia de bacterias y virus en ella supone la necesidad de tratamientos que la hagan apta para el consumo humano, y que sean accesibles para toda la población. El hecho de usar agua contaminada puede suponer un riesgo, incluso en usos no destinados al consumo como puede ser la limpieza doméstica.

El Grupo de Cavitación de la EINA (de la Universidad de Zaragoza), ha demostrado, a través de un equipo artesano, la capacidad de depurar aguas por medios hidrodinámicos. El equipo se basa en el fenómeno de cavitación, que es un fenómeno en el que se producen unas microimplosiones efectivas de burbujas, y con las cuales se logra la eliminación de microorganismos patógenos.

A lo largo de la presente memoria, se desarrollarán las etapas en que consistió este proyecto.

En el *Capítulo II: Especificaciones*, se exponen los requerimientos que ha solicitado el Grupo de Cavitación y el desarrollo seguido para obtener parámetros de diseño como la potencia necesaria para funcionar. Se ha utilizado el software de elementos finitos Ansys Fluent, para tener las primeras aproximaciones al diseño final.

Durante el *Capítulo III: Conjunto Experimental. Diseño Conceptual*, se dan las dimensiones del conjunto, cuyo objetivo será el proponer un equipo de dimensiones adecuadas para realizar estudios microbiológicos en el Departamento de Microbiología, Medicina Preventiva y Salud Pública de la propia Universidad de Zaragoza.

A lo largo del *Capítulo IV: Detalles del Rotor y del Estátor* se especifican las dimensiones, materiales y detalles del interior del dispositivo. Detalles de los rodamientos, eje, juntas, rotor y estátor son el objetivo principal de este capítulo.

El lector podrá observar el coste estimado de todo el conjunto en el Capítulo V: Presupuesto.

Finalmente, en el Capítulo VI se plasman las conclusiones obtenidas al final de todo el trabajo y se proponen los trabajos futuros que se consideran importantes llevar a cabo para detallar equipos de estas prestaciones que puedan ser construidos en función de las necesidades del usuario final.

1. INTRODUCCIÓN

Siendo un bien escaso, y con una demanda cada vez mayor, el agua ha sido una de las materias primas más importante de las que se dispone. Tanto su papel fundamental para la vida de la población mundial en crecimiento exponencial (necesidades biológicas), como a su papel en la producción de energía y la elaboración de diversos bienes de consumo hacen de ella una necesidad en prácticamente cualquier elemento de nuestra vida cotidiana [1]. Sin embargo, el mal uso que se hace de ella y la presencia de microorganismos cada vez más resistentes a los métodos convencionales de eliminación y a la presencia de agentes químicos peligrosos hacen que su depuración (e incluso potabilización para consumo humano) sea una tarea en constante evolución.

A día de hoy, el método más ampliamente extendido en la depuración de aguas residuales es la cloración. A finales del siglo XIX o principios del XX, solamente se utilizaba la cloración cuando había algún brote de enfermedades diarreicas, pero nunca de forma habitual [2]. Fue en 1902, cerca de Ostende, Bélgica, cuando se construyó la primera instalación de cloración que funcionaría de manera permanente, proporcionando desinfección al agua para el consumo humano [2]. A partir de ese momento, su uso se ha ido extendiendo y la incidencia de enfermedades gastrointestinales se ha reducido o extinguido por completo en algunas regiones. Sin embargo, se han detectado varios problemas derivados de la utilización de cloro, entre ellos: el sabor y el olor característicos, la producción de compuestos halogenados al reaccionar el cloro con la materia orgánica disuelta en el agua, y el hecho de que algunos microorganismos pueden ser resistentes a la cloración [2] e incluso a la temperatura [3].

Aquí aparece la necesidad de encontrar un sistema que resuelva el problema, para poder depurar el agua, incluso para consumo humano, y que no implique el uso de sustancias químicas (o, en la medida de lo posible, que se empleen cantidades mínimas) que pudieran reaccionar en compuestos más peligrosos (contaminantes emergentes), pero que aseguren la eliminación de microorganismos persistentes y dañinos para la salud. Dichos requisitos pueden ser satisfechos por el sistema de tratamiento de aguas mediante cavitación [4] (objetivo de este trabajo).

Cabe la aclaración de que el método de depuración por cavitación no intenta (ni puede) competir con el coste por depuración con cloro, en sus diferentes formas (cloro (gas), hipoclorito de calcio y/o de sodio, cloraminas y algunos métodos para la generación de desinfectantes *in situ*). Sin embargo, y dada la larga lista de contaminantes emergentes, el método por cavitación se presenta como viable [4].

El mecanismo de acción en el que se basan las técnicas que emplean cavitación es el de aprovechar las implosiones generadas durante la cavitación. Desde que Lord Rayleigh [5] en 1917 explicara las elevadas presiones (de centenares a miles de bar) y temperaturas (de miles de °C) alcanzadas en la implosión de una burbuja, se ha utilizado la cavitación en múltiples aplicaciones en química, medicina, biología, y procesado de materiales [6, 8, 10].

Richard y Loomis, y Wood y Loomis (citados en Suslick [6]) demostraron, respectivamente, los efectos químicos y biológicos que se pueden inducir mediante cavitación ultrasónica, aunque generalmente no son deseables por su implicación en el deterioro de los equipos hidráulicos mediante picaduras y corrosión. En este caso se tratarán como un efecto ventajoso en vista de su alta efectividad en la eliminación de algas o microorganismos como puede ser la bacteria *legionella pneumophila*, o los protozoos como las amebas de vida libre *Giardia Cryptosporidium*. También se ha demostrado su eficacia en la neutralización del pH de las aguas a tratar, y su relación positiva en la precipitación de metales y cationes como el calcio [7].

Estas características permiten, además, un gran abanico de aplicaciones, como en el tratamiento de hidrocarburos líquidos, como son el petróleo crudo, asfalto y biocombustibles entre otros [8,9]. Con esta técnica se consigue el denominado craqueo, que es un proceso químico empleado para la rotura de las largas cadenas moleculares de hidrocarburos, por lo que las cadenas resultantes, de menor tamaño, presentan un punto de ebullición inferior. Esto produce un aumento de los saturados, de los aromáticos y de las resinas, disminuyendo el contenido de los asfaltenos [8]. De acuerdo a los resultados obtenidos experimentalmente por Daniel Torres [8], se puede llegar a una mejora de hasta el 53% en función del tipo de crudo. Actualmente se sigue trabajando en este tema; por ejemplo, en la Universidad de Ciencias y Tecnologías de Irán, se están realizando simulaciones con CFD (fluidodinámica computacional, por sus siglas en inglés) para predecir la efectividad del craqueo en el petróleo mediante técnicas de cavitación acústica [9]. Las conclusiones son alentadoras.

Existen diferentes vías para lograr la cavitación, como puede ser sometiendo el fluido a ultrasonidos (cavitación ultrasónica o acústica, ampliamente utilizada en la industria alimentaria), por la alta concentración de energía (por un haz láser o por el paso de una corriente eléctrica de alta intensidad), o simplemente haciendo circular el fluido a través de un cambio brusco de sección (cavitación hidrodinámica), a través del que experimenta un cambio de presión, explicado por el Principio de Bernoulli, pudiéndose lograr la presión necesaria para que se dé el cambio de fase (presión de vapor).

Por su fiabilidad, y menores consumos respecto a otras formas de generar el fenómeno de cavitación [4,13], en el presente trabajo se hace el diseño conceptual de un equipo de cavitación hidrodinámica, y cuya modularidad permitirá continuar los ensayos paramétricos ya iniciados y contrastados por el Grupo de Cavitación de la EINA.

1.1 Cavitación hidrodinámica

La cavitación es un fenómeno físico que se produce cuando un fluido, de apariencia homogénea, se somete a gradientes importantes de presión. Como ya se mencionó anteriormente, estos gradientes se pueden producir a través de ultrasonidos y/o hidrodinámicamente (los métodos por concentración de energía quedan fuera de los alcances de este trabajo). De acuerdo con recientes investigaciones [4,10,13], la cavitación hidrodinámica llega a ser hasta dos órdenes de magnitud más eficiente que la cavitación

ultrasónica, por ello, a los largo del presente trabajo, se enfocarán los estudios por medios hidrodinámicos.

De forma sencilla, para generar los gradientes de presión por medios hidrodinámicos, basta con hacer circular un flujo de líquido a través de cambios bruscos de sección para obligar a que determinadas zonas en el interior de un fluido alcancen una presión similar a la presión de vapor local. De esta manera, y similar a la ebullición, esto supone un cambio de fase localizado, manifestado por la formación de burbujas de vapor en el interior del fluido, pero a temperatura constante.

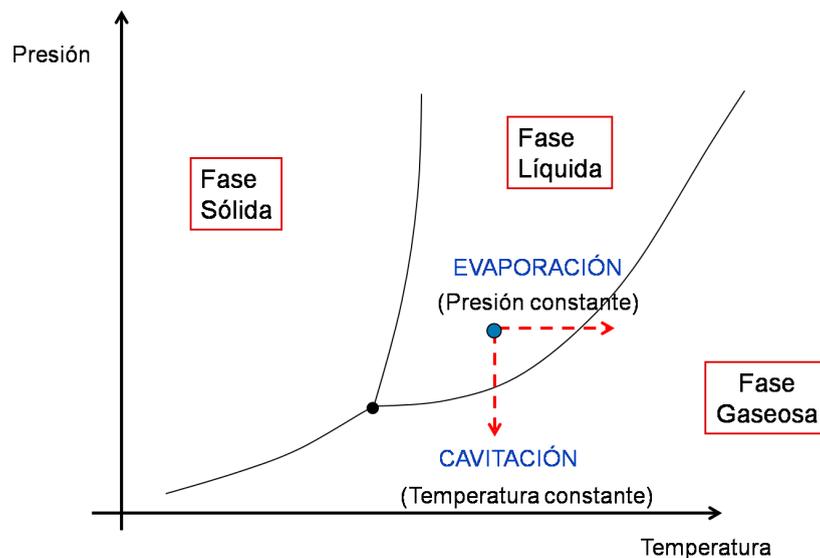


Figura 1: Diagrama P-T agua [10]

Cuando, instantes después, el flujo recupera la presión, estas burbujas implosionan, momento en el que el líquido que las rodea colisiona consigo mismo provocando, durante un breve periodo de tiempo, temperaturas y presiones del orden de cientos de grados y miles de pascales, respectivamente [5,6,10]. En estas condiciones, las burbujas se convierten en “puntos calientes”, que generan, por disociación del vapor de agua, radicales OH, y que convierten aquéllas en micro-reactores ideales para oxidar contaminantes, aumentar las velocidades de las reacciones químicas y someter organismos a condiciones termodinámicas que puede inactivarlos o destruirlos [10]. Además de las altas presiones y temperaturas locales, la rotura asimétrica de una burbuja genera un microchorro de diámetro del orden de micras con velocidades superiores a 100 m/s [10,11]; también se pueden alcanzar velocidades importantes en los flujos acústicos (acoustic-streaming), consecuencia de los gradientes de presión impuestos externamente con generadores de ultrasonidos [6]. Como resultado de estos fenómenos, los esfuerzos cortantes sobre estructuras de tamaños del orden de micras pueden ser altísimos (velocidades de deformación de son comunes), destruyendo coágulos y macromoléculas, disgregando colonias de organismos unicelulares o virus de tamaños comparables [10,12,13,18]. Estas características, además, hacen que la implosión de las burbujas cerca de paredes sólidas “piquen”, “escarben” y hagan pequeñas “cavidades”, arrancando material por lo que,

inicialmente, la cavitación fuese vista como un fenómeno nocivo en las turbomáquinas, y se buscase eludirla por los resultados de corrosión y picaduras [14].

En la siguiente imagen (Figura 2) se muestran las fases que atraviesa la burbuja desde su formación hasta su colapso, pudiéndose apreciar notables diferencias si esto último sucede en el seno del fluido, o si por el contrario, la implosión ocurre en las cercanías de una superficie sólida.

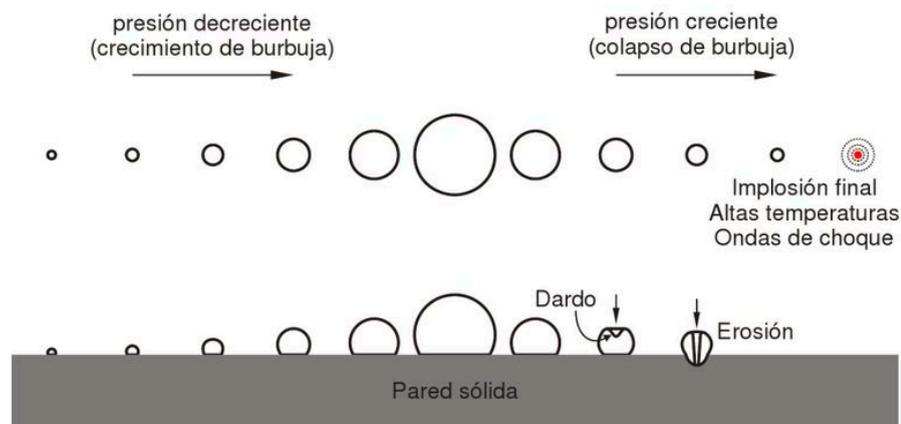


Figura 2: Crecimiento y colapso de una burbuja de vapor. Erosión de la pared [14]

1.2 Formación y desarrollo de burbujas

Como ya se ha explicado, la formación de burbujas se inicia en zonas donde la presión disminuye acusadamente. La aparición de éstas no es uniforme, si no que varía dependiendo de diversos factores como son la zona de máxima presión en cada región, la presión exterior, el tipo de fluido y la temperatura de trabajo, o si se encuentran partículas sólidas suspendidas en el seno del fluido, es decir, la presencia de impurezas en forma de partículas sólidas también favorece la formación de burbujas. Si las partículas van suspendidas en el líquido en cuestión, el aire atrapado en ellas puede desencadenar el fenómeno incluso a presiones mayores que la presión de vapor. También existen impurezas que suelen ser partículas de cal o de óxido procedente de las propias paredes del conducto. Debido a que estas impurezas suelen poseer propiedades distintas a la del líquido, éstas actúan como núcleos de cavitación y pueden llegar a fomentarlo [15].

Un aspecto a tener en cuenta es que podría darse el caso de que la burbuja de vapor crezca a un tamaño superior al determinado por Blake (citado en Young [16]), y en ese caso su crecimiento iría en aumento hasta explotar en lugar de implosionar. Por ello, debe tenerse cuidado, pues si bien con el posterior aumento de la presión debería generarse la implosión de las burbujas, las condiciones de generación del fenómeno (tamaño y número de burbujas, presión de trabajo, tiempo de pervivencia) podrían tener como consecuencia el que parte de ellas no lleguen nunca a implosionar, bien porque el tiempo de duración (pervivencia) es insuficiente, o bien por la coalescencia entre ellas (número grande de burbujas generadas).

2. ESPECIFICACIONES INICIALES

Dados los objetivos del presente trabajo, a continuación se presentan los planteamientos necesarios y las bases tenidas en cuenta para la adecuada culminación del proyecto.

Los requerimientos que se tuvieron en cuenta fueron estipulados con el Grupo de Cavitación de la EINA (GC-EINA), Universidad de Zaragoza, con base en su experiencia. Estos fueron:

- Debe diseñarse un equipo compacto para realizar ensayos microbiológicos. Es importante tener en cuenta que el manejo del equipo no debe requerir de formación especializada.
- El diseño debe basarse en un arreglo de rotor/estator.
- El equipo debe considerar un número modular de expansiones y contracciones, tanto en forma como en número. Esto debe permitir parametrizar los tiempos de proceso.
- La potencia del motor de accionamiento del equipo debe ser adecuada. Con base en las ecuaciones de conservación se pudo obtener una función que permite determinar este parámetro. Esta ecuación fue contrastada con datos experimentales.
- Es importante contar con un sistema de recirculación para el estudio de un método de funcionamiento en continuo.

Solicitados estos requisitos, se dispondrá de un cilindro llamado rotor, que impulsará en movimiento rotacional al fluido. Concéntrico al rotor, guardando una distancia donde se alojará el líquido (volumen de muestra albergada), se encontrará el estator. Para simular las contracciones y expansiones, se decidió colocar en el estator unas pequeñas inclusiones a modo de paletas (de diferentes geometrías y número), así, durante el movimiento rotativo del cilindro central, además de arrastrar al flujo, la sección por la que circula el fluido sufrirá las variaciones requeridas a modo de Venturi (Figura 3)

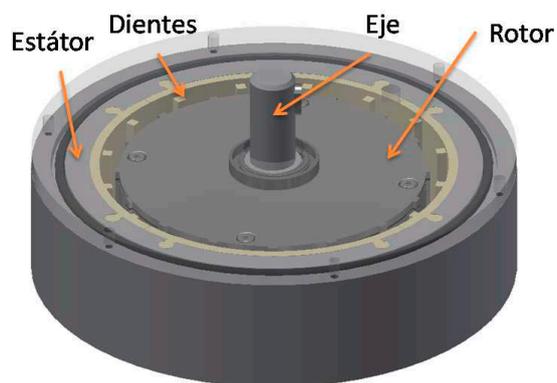


Figura 3: Conjunto rotor estátor. Diseño basado en el equipo artesanal empleado por el Grupo de Cavitación, EINA, para ensayos de demostración.

Para determinar la velocidad mínima de rotación del equipo se ha recurrido a la ecuación de Bernoulli como primera aproximación (apartado: Velocidad angular del rotor).

2.1 Consideraciones geométricas

Capacidad

Puesto que se trata del diseño de un dispositivo experimental, se elige una geometría capaz de tratar hasta 250 mL de líquido por vez. De esta forma, y considerando que:

$$Vol = 250 \text{ cm}^3 = \frac{\pi}{4} \cdot h \cdot (D_{est}^2 - D_{rot}^2) \quad (\text{Ec. 1})$$

con $D_{est} \approx 18 \text{ cm}$ y $h \approx 5 \text{ cm}$ (lo que se consideró un tamaño adecuado), entonces el diámetro del rotor debería ser de $D_{rot} \approx 16,1 \text{ cm}$. Con estos datos, además se cumple con los requisitos de “portabilidad”. Así, para completar los requisitos indicados por el GC-EINA, se decidió que la cámara de cavitación (volumen entre rotor y estátor) tuviera una geometría tal que:

- Diámetro del estátor: $D_{est} \approx 180 \text{ mm}$
- Diámetro del rotor: $D_{rot} \approx 160 \text{ mm}$
- Altura de profundidad: $h \approx 5 \text{ cm}$

Dientes

Son los apéndices del estátor que generarán reducciones periódicas en el área de paso del fluido. Como primera aproximación, y por sencillez, se optó por prismas cuadrados (5 x 5 mm) con la misma altura que el rotor ($h \approx 5 \text{ cm}$). Para sujeción, una de sus caras estará adherida a la superficie cilíndrica interna del estátor, y se encontrarán repartidos de forma equidistante a lo largo de esa cara. En función del tipo de material que se escoja, por mecanizado se podrían generar directamente, sin necesidad de emplear pegamentos especiales. Respecto a la equidistancia tangencial, ésta fue la primera aportación del presente proyecto, puesto que, inicialmente, la equidistancia generará una frecuencia única de eventos de cavitación en función de la velocidad de giro:

$$f_{cav} \approx \frac{N}{60} \cdot (\text{número de dientes}) \quad (\text{Ec. 2})$$

donde N es la velocidad de giro en rpm's. El diseño quedará abierto por si se requirieran generar diferentes frecuencias de generación de cavitación.

Debido a que el flujo tendrá dirección tangencial preferentemente, la sección de paso del flujo se definirá como el área cuya normal es el vector tangencial, es decir, el área

transversal al movimiento del fluido, y delimitada por las superficies del rotor y del estátor. A continuación se puede ver una imagen (Figura 4) del contorno en planta, donde se aprecia la diferencia de secciones por donde circulará el fluido.

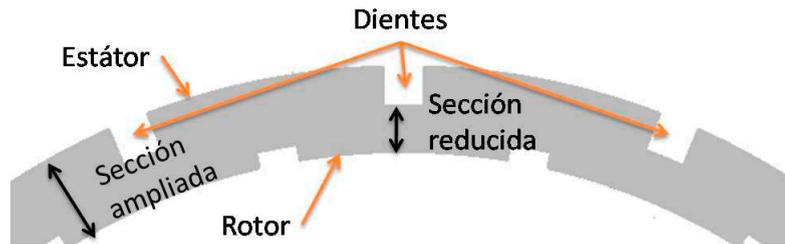


Figura 4: Vista en planta de la cámara de cavitación. Reducción Secuencia de contracciones y expansiones a lo largo de la sección de paso del fluido.

Con motivo de poder estudiar distintos casos que se puedan dar debido a la trayectoria de las líneas de corriente y los vórtices formados entre un diente y el siguiente, se considerará estudiar diferentes formas y números de dientes (geometrías de expansión y contracción). Aunque en este trabajo se precisó un tipo de diente cuadrado, se elaboró un diseño que permite el fácil intercambio de dichas secciones, como se explicará más adelante.

Geometría bidimensional

Se va a considerar un fluido en movimiento entre dos paredes cilíndricas concéntricas (flujo unidireccional tangencial) donde la pared interna (rotor) posee movimiento rotacional ($V_{\theta} = \Omega \cdot r_{rot}$) mientras que la externa (estátor) permanece inmóvil ($V_{\theta} = 0$). En esta geometría se desprecia la componente axial de las velocidades, lo que simplifica el problema al plantear un modelo en dos dimensiones.

2.2 Parámetros de entrada

En este apartado se realizan una serie de cálculos, partiendo de los siguientes datos (ver el apartado "Capacidad"):

- $R_1 = 0,08$ m (radio del rotor)
- $R_2 = 0,091$ m (radio del estátor)
- $b = 0,05$ m (altura de profundidad)
- $N = 1.800$ rpm (vel. angular)

Caudal puramente tangencial

Se considera que dentro de la cámara de cavitación no hay componente radial de la velocidad (Figura 5), por lo que principalmente ésta es tangencial. La base, que se va a seguir es la ecuación de Euler, puesto que este arreglo de rotor y estátor siguen el mismo principio que cualquier turbomáquina hidráulica [14]:

$$H = \frac{1}{g} \cdot (u_2 V_{\theta 2} - u_1 V_{\theta 1}) \quad (\text{Ec. 3})$$

donde u es la velocidad de arrastre, V_{θ} es la componente tangencial de la velocidad absoluta del fluido, y los subíndices 1 y 2 indican las secciones de entrada y salida del rodete (en nuestro caso del rotor), respectivamente.

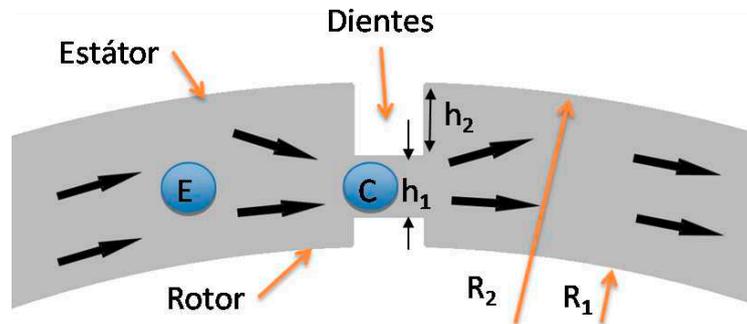


Figura 5: Representación de la sección de un diente en la cámara de cavitación. Esquema ilustrativo del flujo principal.

Velocidad angular del rotor

Uno de los datos más determinantes es la velocidad a la que debe girar el rotor, ya que incidirá directamente en la velocidad a la que circula el fluido dentro de la cámara de cavitación. La importancia de la velocidad del fluido se fundamenta en el Principio de Bernoulli, donde se demuestra que en fluidos incompresibles la velocidad guarda una relación inversa a la presión a lo largo de una línea de corriente. Si consideramos esta premisa, obviamos las pérdidas, y aplicamos la ecuación de Bernoulli entre una contracción (C) y una expansión (E), tal y como se han definido en la Figura 5:

$$\frac{P_E}{\rho g} + z_E + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{P_C}{\rho g} + z_C + \frac{v_C^2}{2g} \quad (\text{Ec. 4})$$

La primera consideración es que, a lo largo de la línea de corriente: $z_E = z_C$. Así, la carga de presión se relaciona con el caudal y con la relación de áreas:

$$H_p = \frac{P_E - P_C}{\rho g} = \frac{v_C^2 - v_E^2}{2g} \Rightarrow Q = \sqrt{\frac{2(P_E - P_C)}{\rho \left(\frac{1}{S_C^2} - \frac{1}{S_E^2} \right)}} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde p es la energía de presión, V es la velocidad del fluido, ρ es la densidad del fluido de trabajo (consideraré agua en todo momento) y es el área de la sección en cuestión (Figura 5):

$$S_E = b(R_2 - R_1) = 0,05m(0,091m - 0,08m) = 5,5 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$S_C = b((R_2 - h_2) - (R_1 + h_1)) = 0,05m \cdot (0,086m - 0,082m) = 2 \cdot 10^{-4} m^2 \quad (\text{Ec. 6})$$

Al tomar en cuenta los valores propuesto (ver apartado Parámetros de entrada), y habiendo llegado a la decisión de que $h_1 = 2$ mm (porque únicamente se requieren para arrastrar al flujo) y (por consenso con GC-EINA (ver apartado Dientes), entonces

$$Q = \sqrt{\frac{2(100.000 \text{ Pa})}{1.000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{1}{S_C^2} - \frac{1}{S_E^2} \right)}} = 0,003 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{Ec. 7})$$

Al evaluar la velocidad en la periferia del rotor, en la sección de la contracción que es donde se esperaba producir la cavitación

$$V_\theta = \Omega \cdot R_1 = \frac{Q}{S_C} = \frac{0,003 \text{ (m}^3/\text{s)}}{2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 15 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 8})$$

En concreto, en el estudio experimental sobre la concentración de burbujas de vapor en cavitación hidrodinámica mediante análisis de imágenes, de Ricardo Loriente Vadillo [17] se estudia un dispositivo con el mismo arreglo, y asumiendo unas condiciones de trabajo similares. El autor determina que el fluido debe circular a no menos de 14,14 m/s. Esto coincide con el resultado obtenido en la ecuación (Ec.8). De esta manera

$$\Omega = \frac{v}{r} = \frac{15 \text{ m/s}}{0,08 \text{ m}} = 187,5 \text{ rad/s}$$

$$\Omega = 187,5 \text{ rad/s} \approx 1800 \text{ rpm}$$

Potencia

Para realizar una primera estimación de la potencia que consumirá el dispositivo, se trabaja con las mismas hipótesis que se usaría en el rodete de una turbomáquina [14], es decir, del teorema de Euler, que parte de la ecuación de la conservación del momento angular en el rodete:

$$M_{Rz} = \frac{dH}{dt} \quad (\text{Ec. 9})$$

siendo H el momento angular generado por la cantidad de movimiento ($m\vec{v}$) de las partículas fluidas alrededor de un punto a una distancia \vec{r} . Para realizar este ejercicio, es conveniente recordar que partimos de que (en coordenadas cilíndricas) el vector velocidad dentro de la cámara de cavitación tiene componente exclusivamente tangencial: $\vec{V} = (0, 0, rV_\theta)$. Por ello, el producto vectorial, para el caso de esta máquina de flujo incompresible tiene como solución:

$$\vec{r} \times \vec{v} = (0, 0, rV_\theta)$$

Al integrarlo en todo el volumen de control,

$$M_z = \frac{dH}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho r V_\theta dV + \int_{S_c} \rho r V_\theta (\vec{V} \cdot \hat{n}) dS \quad (\text{Ec. 10})$$

y que bajo las hipótesis de flujo estacionario ($\frac{d}{dt} = 0$), incompresible ($\rho = cte$), sin transferencia de calor, las fuerzas gravitatorias como únicas fuerzas másicas, y para una sustancia pura:

$$M_z = \frac{dH}{dt} = \int_{S_c} \rho r V_\theta (\vec{V} \cdot \hat{n}) dS = \rho Q (r V_\theta) \Big|_{S_c} \quad (\text{Ec. 11})$$

y la potencia requerida

$$\dot{W} = M_z \cdot \Omega = \rho Q \Omega (r V_\theta) \Big|_{S_c} = \rho Q (u V_\theta) \quad (\text{Ec. 12})$$

donde V_θ es la velocidad media del flujo, y Q el caudal de flujo.

Caudal

Para calcular la potencia requerida que hará falta para mover el rotor es necesario calcular el caudal (Ec.12) ya que el perfil de velocidades, dentro de la cámara de cavitación, no es constante (uniforme). Para un flujo incompresible, el caudal se calcula como la suma infinitesimal del producto del campo de velocidades por el área o sección de paso (cuya normal es el vector tangencial para el caso en cuestión):

$$Q = \int (\vec{V} \cdot \hat{n}) dS$$

Respecto a dicho campo, surgen dos posibilidades según el tipo de perfil de velocidad de las que partir, expuestas a continuación.

a) Perfil de velocidades lineal

Una primera simplificación es suponer un perfil lineal, con valor máximo en la pared del rotor ($r = R_1$) y llegando a velocidad nula en la zona más próxima a la pared del estátor ($r = R_2$), como se aprecia en la siguiente imagen (Figura 6).

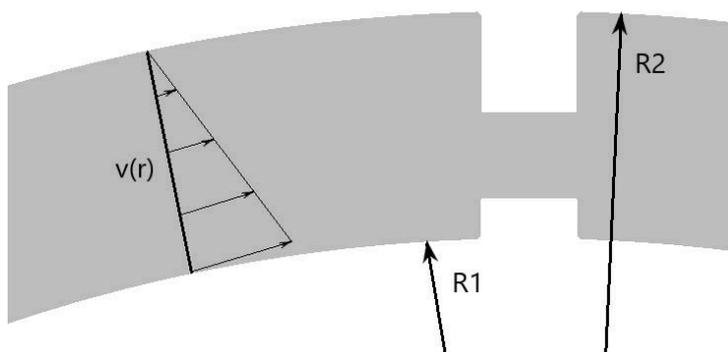


Figura 6: Detalle de velocidades del perfil lineal

cuya función $v(r)$ es la siguiente:

$$V(r) = \frac{r-R_2}{R_1-R_2} \Omega R_1 \quad (\text{Ec. 13})$$

Función que si se integra respecto del área (por ejemplo en la sección E, de la Figura 5) se obtiene el caudal:

$$Q = \int_{R_1}^{R_2} V dA = \int_0^b \int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{r-R_2}{R_1-R_2} \right) \Omega R_1 dr dz = \frac{\Omega R_1}{2} b (R_2 - R_1) \quad (\text{Ec. 14})$$

(donde b es la profundidad en el eje z).

Es interesante observar que en la ecuación (Ec. 13) el término $b(R_2 - R_1)$ representa la sección de paso, por lo que:

$$V_{\theta} = \frac{1}{2}V_{\theta\text{máx}} \Rightarrow Q = (V_{\theta}S)_E = \frac{\Omega R_1}{2}b(R_2 - R_1) \quad (\text{Ec. 15})$$

que es un resultado típico de este tipo de flujos.

Al sustituir la ecuación (Ec.14) en la ecuación de la potencia (Ec.12), y teniendo en cuenta que la velocidad tangencial se considera igual a la velocidad de arrastre, u , porque no hay deslizamiento:

$$\dot{W} = \rho Q(uV_{\theta}) = \rho \frac{\Omega^3 R_{rot}^3}{2} b(R_{est} - R_{rot}) \quad (\text{Ec. 16})$$

Para probar esta relación, se tuvieron que obtener datos experimentales sobre otra instalación similar, pero de mayores dimensiones. En la Figura 7 se muestra dicha comparación. Al comprobar experimentalmente esta ecuación con el tipo de diente similar a los diseñados en el presente trabajo (cuadrados), se observó que para valores altos de la velocidad de giro, el porcentaje de desviación fue muy razonable (12%); sin embargo, para valores pequeños de la velocidad de giro esta desviación llegó a ser, por ejemplo, mayor del 60% para . Dado que se trabajarán con velocidades de giro muy altas ($\Omega \geq 1.800 \text{ rpm}$), se confía en que el pronóstico sea suficientemente adecuado.

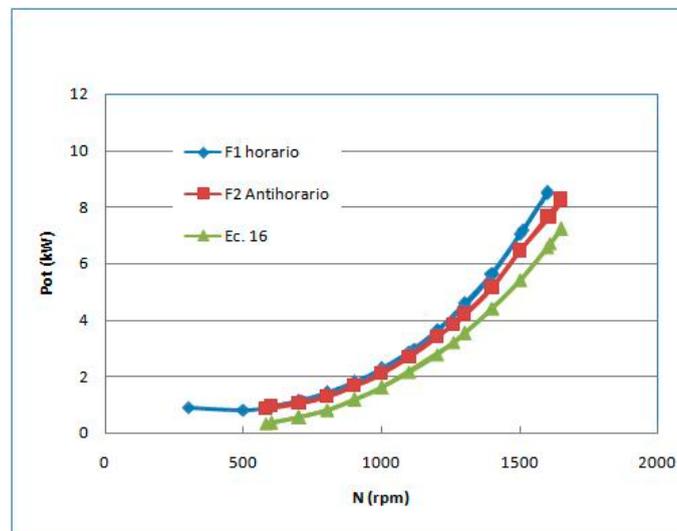


Figura 7: Comparación de los resultados de la ecuación (Ec. 16) y datos experimentales obtenidos con un equipo similar pero de mayores dimensiones. F1 es el tipo de dientes del estátor que se probaron y que coinciden con los diseñados en el presente proyecto.

Finalmente, considerando los datos geométricos hasta ahora expuestos, y para una velocidad de 1.800 rpm:

$$\dot{W} = \rho \frac{\Omega^3 R_{rot}^3}{2} b (R_{est} - R_{rot}) = 943 \text{ W}$$

b) Perfil de velocidades mixto

Una forma más completa del perfil de velocidades consiste en considerar una mezcla de movimientos del flujo del tipo vórtice forzado ($v(r) = C_1 \cdot r$, estudiado en el apartado anterior) y un vórtice libre ($v(r) = C_2/r$). De esta forma, el perfil completo tendrá una forma del tipo [18]:

$$V(r) = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad (\text{Ec. 18})$$

Ahora, aplicando las condiciones de contorno de no deslizamiento, es decir:

- $V_\theta(r = R_1) = C_1 R_1 + \frac{C_2}{R_1} = \Omega R_1$
- $V_\theta(r = R_2) = C_1 R_2 + \frac{C_2}{R_2} = 0$

se obtiene el siguiente perfil de velocidades:

$$V(r) = \frac{\Omega R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right) \quad (\text{Ec. 19})$$

que, integrando igual que en el caso a):

$$Q = \int_{R_1}^{R_2} V dA = \int_0^b \int_{R_1}^{R_2} \frac{\Omega R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \left(\frac{R_2^2}{r} - r \right) dr dz = \Omega R_1^2 b \left(\frac{R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) - \frac{1}{2} \right) \quad (\text{Ec. 20})$$

Al sustituir este resultado en la ecuación (Ec.10) para calcular la potencia resulta:

$$\dot{W}_H = \rho b \frac{\Omega^3 R_1^4}{R_2^2 - R_1^2} \left(R_2^2 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \right) = M_z \cdot \Omega = 921,45 \text{ W} \quad (\text{Ec. 21})$$

Si se comparan los resultados al usar ambos perfiles de velocidad (Ec. 17 vs Ec. 21) no se obtiene diferencia significativa. Estos resultados fueron empleados para observar desviaciones al realizar simulaciones numéricas.

2.3 Ansys Fluent

Ya conocidos los parámetros del diseño de este dispositivo, y orientados sobre los órdenes de magnitud esperados, se decidió emplear un software de elementos finitos para modelar el comportamiento del fluido en el interior, dando así una mayor solidez a los resultados al usar otro enfoque.

Por su gran potencial se decidió emplear una versión básica (con licencia gratuita para estudiantes) de Ansys Fluent, que viene de un conjunto de programas CAE (ingeniería asistida por ordenador, por sus siglas en inglés) capaz de resolver mediante elementos finitos problemas mecánicos, como análisis de estructuras, análisis de transferencias de calor y fluidodinámica, o problemas de acústica y electromagnetismo entre ellos. Aunque dentro de la fluidodinámica computacional existen dos variantes, CFX y CFD, para este trabajo se ha utilizado CFD debido a su mejor desempeño en geometrías bidimensionales. A continuación se describe un resumen de los procedimientos seguidos.

Planteamiento físico

La fluidodinámica computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que parte de la ecuación de conservación de la masa y del movimiento para resolver problemas físicos mediante las ecuaciones de Navier-Stokes.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad \text{(Ecuación de conservación de la masa)}$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pi + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot u)i - \frac{2}{3}\rho ki] + F \quad \text{(Ecuación de conservación del movimiento)}$$

en donde ρ y μ son la densidad y la viscosidad del fluido de trabajo, F es el vector de fuerzas volumétricas, u es el vector velocidad, μ_T y k son la viscosidad volumétrica y la disipación asociados a la turbulencia.

Como el flujo será turbulento, dadas las velocidades requeridas para conseguir la cavitación (el número de Reynolds supera valores de 10^5):

$$D_H = \frac{4A}{P} = \frac{4 \cdot 0,011 \cdot 0,05}{2 \cdot (0,011 + 0,05)} = 0,018 \text{ m}$$

$$Re_{D_H} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_H}{\mu} = \frac{1000 \cdot 15 \cdot 0,018}{0,00103} = 2,62 \cdot 10^5 > 10^5 \text{ (turbulento)} \quad \text{(Ec. 22)}$$

se trabajó con un modelo turbulento llamado "Turbulent Flow $k-\epsilon$ " (*modelo de turbulencia $k-\epsilon$*) [19]. El modelo en cuestión es un modelo para flujo turbulento que trabaja con dos ecuaciones extra de transporte para representar las propiedades del flujo. Una de las variables asociadas a dichas ecuaciones es la energía cinética turbulenta, k , que es la energía cinética por unidad de masa que se genera por la turbulencia del fluido. La otra variable es la disipación viscosa, ϵ , que es el ratio por el que la energía cinética turbulenta se convierte a energía térmica interna. En el modelo se ha añadido además la configuración

“Enhanced Wall Treatment” que implica la resolución al completo de toda la capa límite turbulenta, incluida la dominada por la viscosidad (subcapa viscosa), en todas las celdas cercanas a la pared sólida. También se ha añadido un modelo de cavitación, que calcula según el modelo de “Schnerr and Sauer” [20].

Las primeras simulaciones se realizaron con el objetivo de determinar la potencia que tendrá que proporcionar el motor (esta parte fue un modo de verificar que los datos introducidos fueran adecuados); así, se realizó una simulación transitoria en la que se calculó el par requerido para mover al líquido en diez posiciones sucesivas, empezando con los dientes enfrentados (ver Figura 11, más adelante, en apartado Resultados), y después cada $2,25^\circ$ de desplazamiento del rotor. Finalmente la potencia se obtuvo como el producto del promedio aritmético de los pares requeridos en cada posición multiplicado por la velocidad angular ($\dot{W} = T \cdot \Omega$).

Parámetros introducidos en Ansys

Los parámetros introducidos para la simulación correspondieron al fluido del interior del dispositivo, es decir, agua a temperatura y presión ambientes.

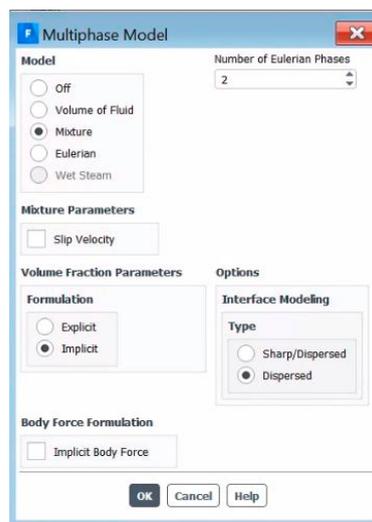


Figura 8: Configuración de Mixture

La configuración “mixture” (Figura 8) se seleccionó porque se contemplan diferentes fluidos mezclados a nivel molecular, esto es, para trabajar con agua líquida y vapor de agua producido por la cavitación, con transferencia de masa entre ambos. La desactivación de la velocidad de deslizamiento (slip velocity) es apropiada para los casos como éste donde hay una fase secundaria diluida y también donde la densidad de la fase secundaria es mucho menor que la de la primaria [21], porque tanto el alto nivel de turbulencia, que no permite que las burbujas alcancen un tamaño significativo, como la importante diferencia de densidades entre ambos fluidos, hacen que no haya necesidad de realizar el cálculo de la velocidad de deslizamiento entre ambos.

Geometría

La geometría se diseñó con la herramienta de dibujo “Autocad Inventor” y se exportó a Ansys en formato “parasolid”. Dada la limitación de la versión de Ansys para estudiantes, en cuanto al número de celdas del mallado, se planteó una geometría en dos dimensiones, que simula la octava parte de la corona de diente completa (únicamente 45°). En la Figura 9 se muestra un ejemplo de la parte simulada. De esta forma, aunque se desprecien algunos factores como el rozamiento con las paredes no circulares, se conseguirá una malla considerablemente más refinada.

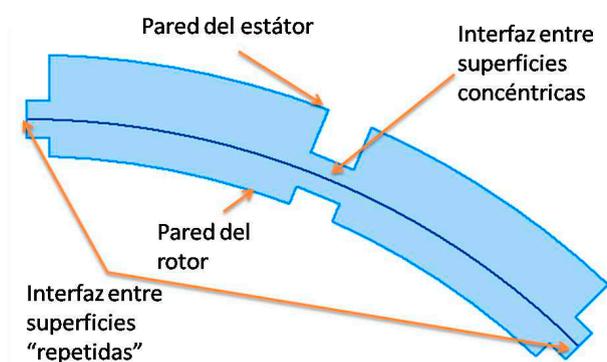


Figura 9: Muestra de la Geometría de la simulación con Ansys. Pieza que representa la octava parte de la corona total de dientes en el estátor.

Así, se dividió la geometría en dos superficies concéntricas, una interior que será la que incluya la pared del rotor y posea movimiento, y una externa que permanecerá estática e incluya la pared del estátor y los dientes, ambas unidas por una interfaz de tipo “Periodic Repeats”. Para simular el resto de la circunferencia, se añadió una interfaz “Periodic” en ambos extremos de la porción, de esta forma el fluido que salga por una de esas interfaces repetidas (en este caso la de la derecha porque el rotor gira en sentido horario) entrará por la interfaz de la izquierda.

El mallado es una de las partes más importantes de la simulación, ya que cuanto más fina sea la malla, más precisos serán los resultados. El mallado consiste en dividir la geometría de la pieza en elementos más pequeños con los que pueda trabajar el programa. En este caso, se han usado unos elementos de forma cuadrada y de orden lineal, porque son más fiables que los de forma triangular y más simples que los de orden cuadrático. También se ha aplicado un refinamiento mediante la opción “Inflation” en los nudos más cercanos a la pared para mejorar los resultados. La malla elegida se compone de un total de 360.098 celdas.

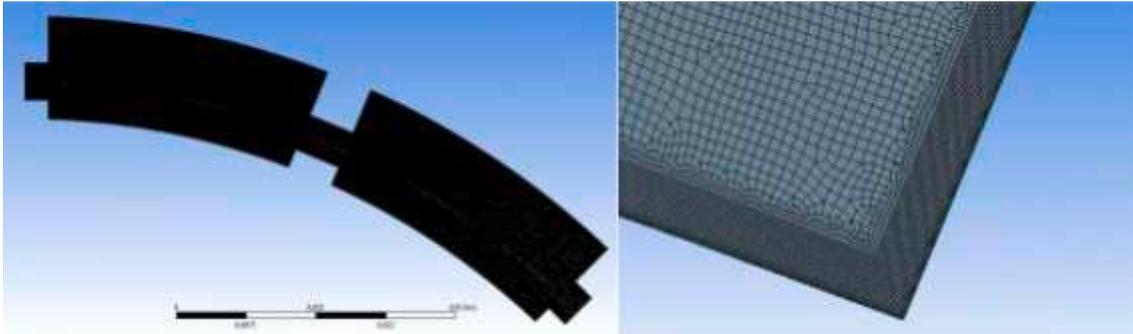


Figura 10: Detalle del mallado empleado en Ansys

Resultados

Como se ha comentado, la toma de datos del par requerido se realiza en una serie de 10 posiciones sucesivas, que inicia una vez que un diente del rotor se enfrenta a uno del estátor (Figura 10); de esta manera se consigue una mejor convergencia de las simulaciones. En la Figura 11 se muestra una secuencia de las 10 posiciones tomadas, mostrando además el contorno de velocidades que sigue el fluido.

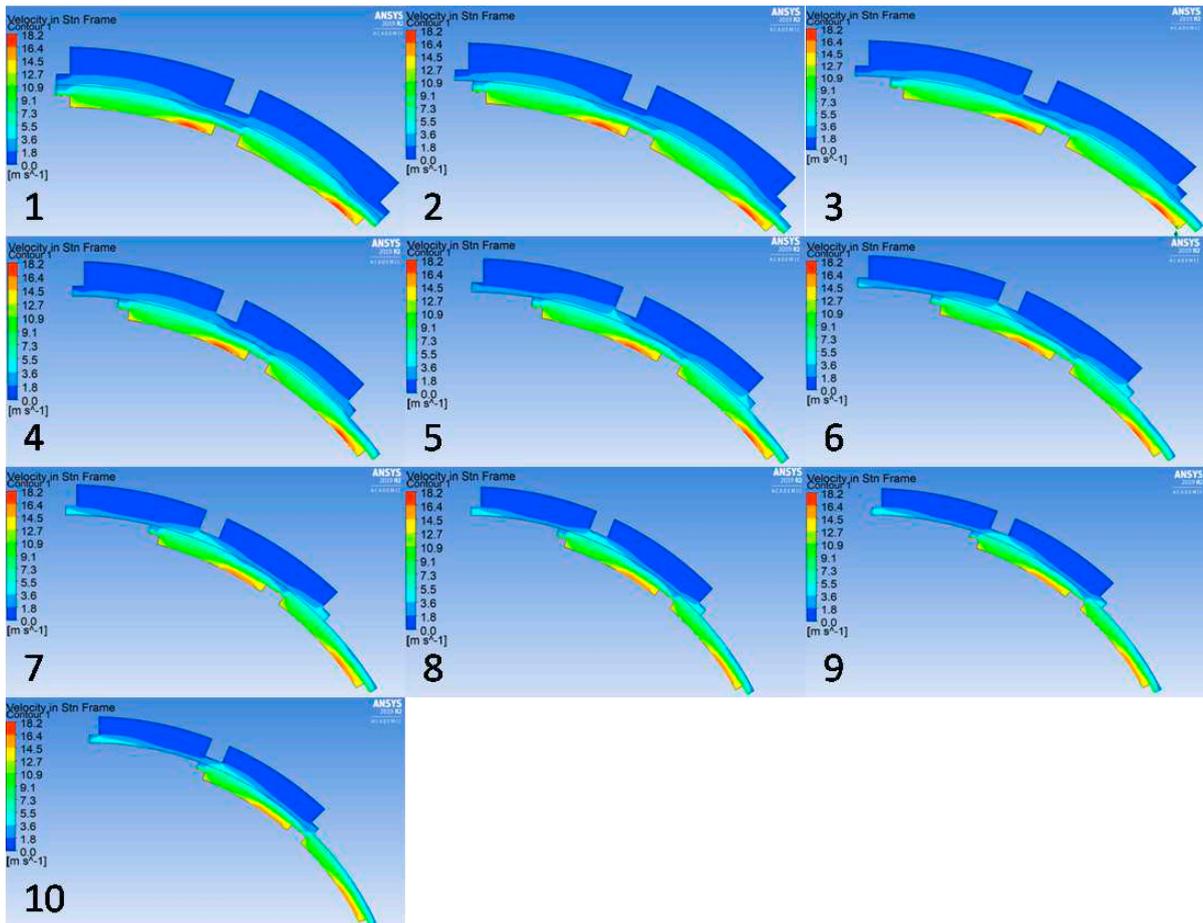


Figura 11: Secuencia posiciones en estado transitorio para el cálculo iterativo del par requerido.

Las simulaciones comenzaron con una velocidad inicial de rotación en torno al 10% de la consignada final y se fue incrementando gradualmente. Se hace así, para generar datos de partida del fluido que facilitarán el cálculo a velocidades superiores. Empezar con la velocidad consignada final desde el principio, o producir un aumento de velocidad demasiado alto, como se pudo comprobar, genera esfuerzos complejos que el programa no es capaz de calcular [22]. Así se realizaron iteraciones al 10%, 25%, 50% y 75% antes de llegar a la velocidad deseada. Para respetar la secuenciación de diez tomas, simultáneamente se cambia el tiempo de captura, calculado de la siguiente manera:

$$\Omega \cdot \frac{2\pi}{60} = \frac{2,25^\circ \cdot \pi / 180}{t} \quad (\text{Ec. 23})$$

donde Ω es la velocidad de giro en revoluciones por minuto, $2,25^\circ$ corresponde al ángulo que rota entre cada toma y t es el tiempo en segundos a introducir en el programa. Despejando resulta:

$$t = \frac{0,375}{\Omega} \quad (\text{Ec. 24})$$

y finalmente, los datos del par obtenidos son:

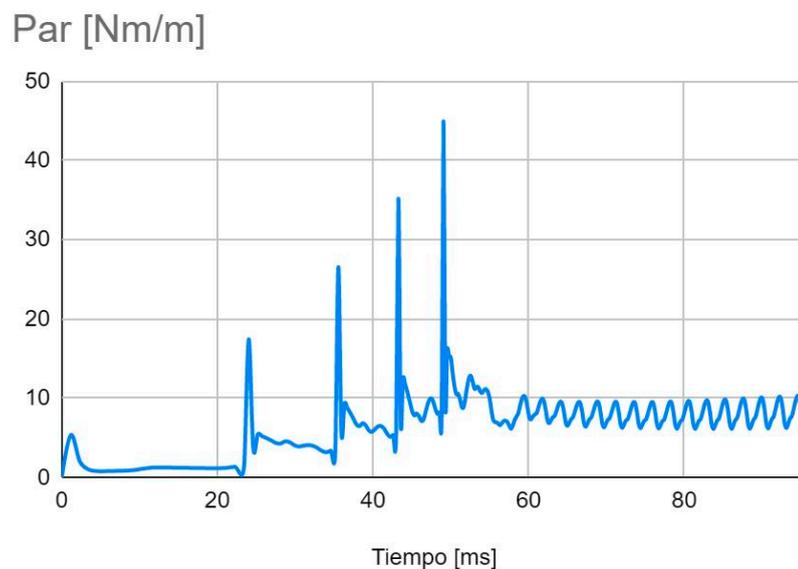


Figura 12: Evolución temporal del cálculo del par, por unidad de profundidad, durante el cálculo iterativo con ANSYS

En la gráfica anterior (Figura 12) se puede apreciar la evolución temporal del valor del par transmitido por el rotor al fluido, habiendo empezado a 160 revoluciones por minuto y finalizando a 1600 rpm. Cada aumento de velocidad se inicia con ambos dientes enfrentados (del rotor y del estátor), y finaliza tras un giro de 45° . Cada vez que se aumenta la velocidad de rotación se produce una pequeña desestabilización en los cálculos,

representada por cada uno de los cinco picos grandes (aumento a 320, 640, 960, 1280 y 1600 rpm, respectivamente), pero tiempo después se consolida en valores más estables formando una evolución temporal oscilante. Estas oscilaciones más pequeñas se deben al “pellizco” que se produce cada vez que un diente del rotor “alcanza” a uno del estátor, siendo en ese momento el par consumido más alto de la oscilación.

Para determinar la potencia que será necesaria aportar para hacer girar el dispositivo simulado a la velocidad especificada, se debe recordar que la geometría simulada es únicamente un octavo de la geometría total (Figura 9), además de que el cálculo considera una profundidad de los dientes unitaria, por lo que se han de tener en cuenta estos parámetros para el cálculo final del par total. Después de tomar la media de los valores de par en el momento en que éstos son estables, y una vez que se ha alcanzado la velocidad final de consigna, se multiplica por la velocidad de rotación en radianes por segundo. Como ejemplo, para el caso de la Figura 12 se observa que los resultados arrojados en las simulaciones ya son estables en el milisegundo 60, aproximadamente, por lo cual para este dispositivo de 16 contracciones/expansiones, girando a 1600 rpm, requerirá de un par total:

$$\begin{aligned}
 M_{medio} &= 8,0042 \text{ Nm/m} \\
 M &= M_{medio} \cdot b \cdot 8 = 8,0042 \cdot 0,05 \cdot 8 = 3,2 \text{ Nm} \\
 \dot{W} = M \cdot \omega &= 3,2 \cdot 1600 \cdot \frac{2\pi}{60} = 536,64 \text{ W} \approx 0,73 \text{ cv}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 25}$$

Este resultado nos indica que para el caso en que se tengan 16 contracciones/expansiones dentro de un rotor de 80 mm de radio interior y 90 mm de radio exterior, se requerirá una potencia aproximada de 550 W. De esta manera, cada una de las 16 paletas deben soportar un par de 137,5 W, lo que dará las pautas para la selección del material escogido.

La diferencia entre la potencia obtenida por las simulaciones (Ec. 25), y la obtenido por la ecuación de las turbomáquinas (Ec. 17 y Ec. 21) sigue bajo estudio.

3. CONJUNTO EXPERIMENTAL

Para realizar esta tarea, se decidió separar la instalación en cuatro partes según su función, seguidamente del *modus operandi* por el cual se introduce cierto volumen de aguas a tratar, se procesa en el dispositivo cavitador, y posteriormente se trasiega la muestra ya tratada a un depósito limpio, de tal forma que se puedan excluir riesgos de contaminación.

El conjunto experimental se descompone de cuatro partes fundamentales, que son (Figura 13): 1) el soporte, que hace de sostén mecánico; 2) la instalación hidráulica, que almacena y transporta el fluido que se tratará; 3) el dispositivo cavitador; y 4) el sistema de accionamiento y control.

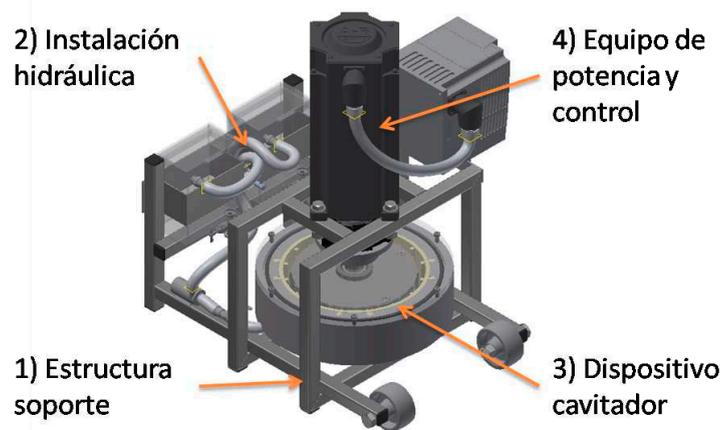


Figura 13: Partes que conforman el conjunto experimental

3.1 Estructura soporte

Son todos los elementos que sirven de apoyo al resto de los componentes de la instalación experimental. Además de poseer la resistencia mecánica adecuada, deberá de ser ligera para facilitar su transporte (condiciones requeridas por el Grupo de Cavitación de la EINA).

Para satisfacer los criterios anteriores, se unen varios perfiles metálicos a los que estará sujetos los demás elementos. La estructura soporte descansa sobre el suelo a través de seis apoyos estáticos y dos ruedas que facilitarán el desplazamiento de la instalación (Figura 14).

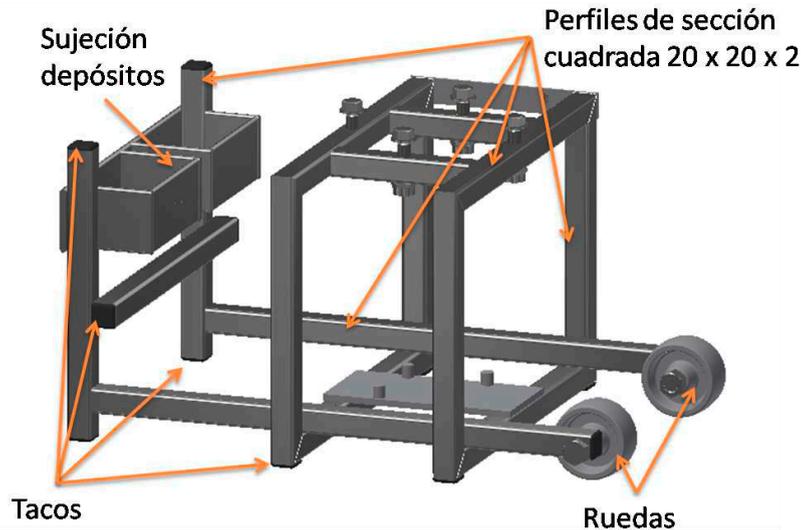


Figura 14: Elementos que conforman la Estructura soporte

La estructura se compondrá de tubos de sección cuadrada de 20 milímetros de lado y 2 milímetros de espesor que se unen entre sí mediante soldadura. Verticalmente se disponen seis tubos, dos que mediante chapas metálicas albergarán los depósitos del fluido (muestra sin tratar y muestra tratada), y otros cuatro que fijarán el sistema de accionamiento y control sobre el dispositivo cavitador. Dos tubos horizontales unirán los anteriores, terminando cada uno en sendas ruedas que, además de apoyo, servirán para desplazar la instalación más cómodamente. Además, la instalación contará con seis apoyos fijos, que dispondrán de unos tacos de goma para evitar deslizamiento durante el funcionamiento del equipo. También se ha dispuesto que haya tacos de goma en cada una de las terminaciones de los pilares que queden al descubierto (Figura 14) para evitar posibles percances (arañazos, atoramientos, cortes, ...) debido a los cantos vivos.

Para fijar el dispositivo cavitador (arreglo rotor estátor) y evitar giros por arrastre no deseados en el estátor, se dispone una chapa rectangular soldada a los perfiles metálicos sobre la que sobresaldrán cuatro pernos que se harán coincidir con cuatro agujeros en el estátor (Figura 15). De esta forma el dispositivo quedará sujeto en todas direcciones menos en la dirección saliente de los pernos. Así permite la extracción hacia arriba del dispositivo hasta la salida de los pernos y después su retirada lateral.

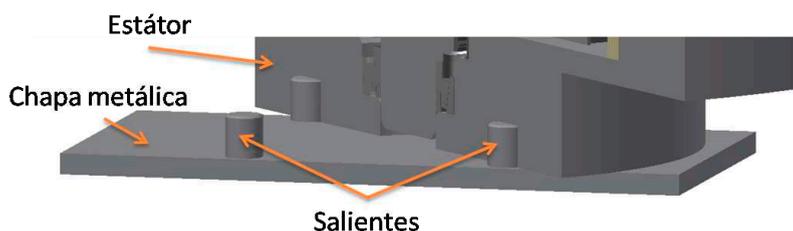


Figura 15: Detalle de los pernos de sujeción del estátor a la base de la estructura

3.2 Instalación hidráulica

Estará compuesta por el conjunto de elementos que lograrán el abastecimiento de agua del dispositivo cavitador y su posterior extracción: válvulas, depósitos, tubos, acoplamientos (manguitos) y bombas. Se han elegido tres distintos tipos de válvula: tres válvulas de cierre, una válvula antirretorno, y una válvula de 3 posiciones y 3 vías. Todas ellas diseñadas para circuitos hidráulicos donde la presión de trabajo estará en torno a la presión atmosférica.

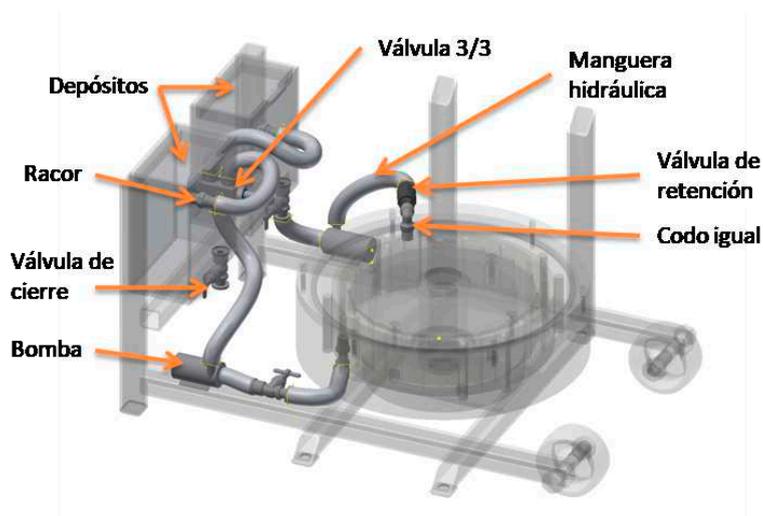


Figura 16: Componentes instalación hidráulica

Respecto a los depósitos de carga y descarga de muestra del dispositivo consistirán en ortoedros compuestos por placas rectangulares de metacrilato, en donde la placa superior será extraíble para, en el depósito inicial introducir el agua sin tratar, y en ambos poder realizar la limpieza de la superficie interior contemplando la existencia de residuos ajenos al experimento que se puedan acumular. En los casos que así se requiera, ambos depósitos podrán ser sustituidos por envases de vidrio sin que el funcionamiento de la instalación se vea afectada.

Para la elección del material de los depósitos, inicialmente se contemplaron varias opciones, entre las cuales destacarían vidrio templado (muy recurrido en ensayos químicos) o metacrilato; en cualquier caso se estipuló que fueran transparentes. La decisión final de usar metacrilato como material de los depósitos (sin descartar su posible sustitución por otro tipo de material), se debió a las numerosas ventajas, entre las que se destaca: la facilidad de construcción, el coste de fabricación, las propiedades ópticas del metacrilato (transparencia) y su resistencia a los golpes. La sencillez para unir las placas de metacrilato, hacen su construcción y reparación más sencillas respecto al cristal, incluso en el caso en que deban sustituirse, ya que, por medio de triclorometano (cloroformo) o elementos comerciales como el AcryFix [23], se produce la fundición del material, produciendo un efecto similar al que tiene una soldadura en metales. Por último, el metacrilato es más ligero y económico (como ya se ha mencionado) que el cristal o el vidrio.

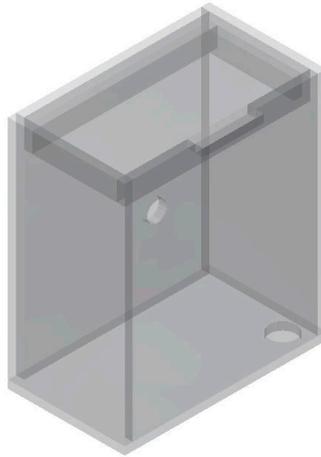


Figura 17: Detalles de los depósitos para almacenamiento de muestras (sin tratar y tratadas) de la instalación de cavitación.

Para interconectar los elementos hidráulicos se emplearán tuberías y manguitos de PVC, que aportarán manejabilidad al sistema, aunque no se descarta que a futuro y en función de las necesidades del Grupo, éstas puedan ser sustituidas por acero inoxidable.

Para el suministro de fluido se utilizan bombas de acuario de 1,5 W, que permiten un caudal máximo de 120 l/h. Con este caudal se espera llenar el dispositivo cavitador en 7,5 segundos, aproximadamente, lo que se considera adecuado. Además de la adecuación del caudal y la potencia, las bombas de acuario se pueden despiezar fácilmente, lo que permite su limpieza y desinfección sin necesidad de herramientas especializadas.

3.3 Dispositivo cavitador

Es el conjunto de rotor y estátor en el que se producirá la cavitación. El dispositivo se accionará con un motor eléctrico, que por medio de una conexión entre ejes será transmitido al rotor. La posición del rotor respecto al motor se fijará mediante un rodamiento de rodillos oblicuo, lo que permitirá únicamente la rotación procedente del motor. La conexión del motor y el rotor, además, se diseñará para facilitar su extracción de la estructura soporte.

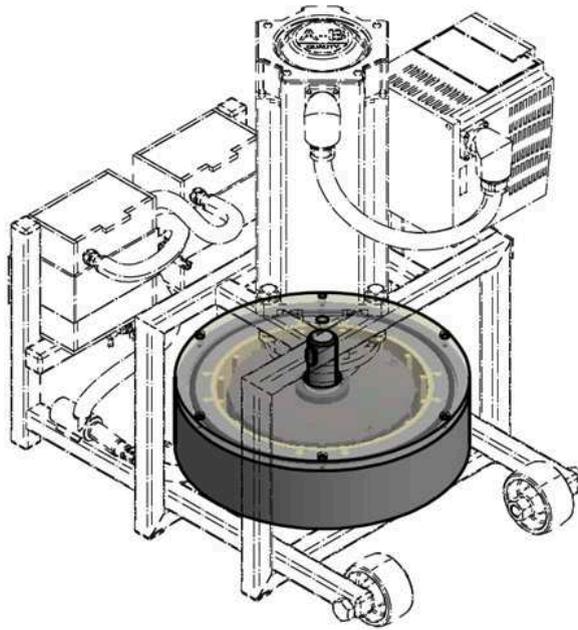


Figura 18: Posición final del Dispositivo cavitador dentro de la estructura soporte.

Para acoplar el eje del motor y el del rotor, se realiza una conexión mediante un acoplamiento mecánico de ejes concéntricos. El fabricante es “PRUD’HOMME TRANSMISSIONS” y su referencia es “CF4A2S”. El par máximo que es capaz de transmitir el acoplamiento es de 120 N·m, a una velocidad máxima es 7000 rpm.

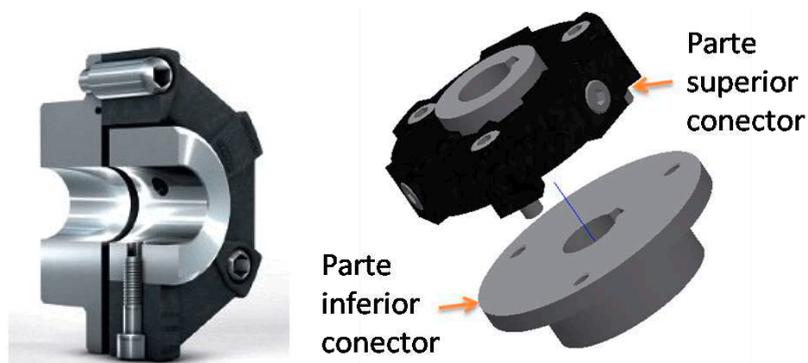


Figura 19: Acoplamiento mecánico. Forma de unir el eje del rotor con el eje del motor eléctrico.

3.4 Equipo de potencia y control

Contemplará tanto el propio motor como los componentes electrónicos (variador de frecuencia, pulsador de arranque y paro). El motor será monofásico de corriente alterna, controlado con un variador de frecuencia. Se decidió por un motor monofásico para su fácil conexión en cualquier toma eléctrica. Por su parte, el controlador de frecuencia permitirá monitorizar las condiciones de energía requerida por el equipo, y alterar la velocidad de giro en el caso en que sea necesario.

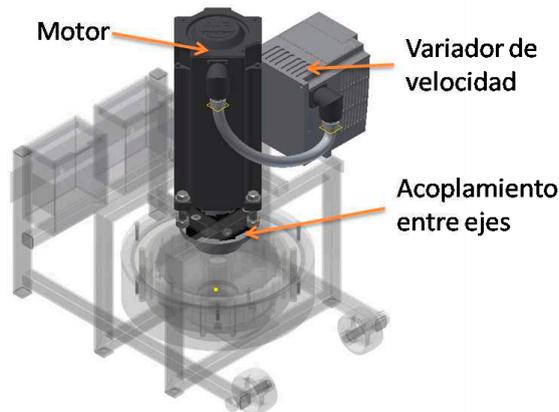


Figura 20: Equipo de potencia y control

Para seleccionar el motor, regulador de velocidad y acoplamiento mecánico se recurre además de los cálculos realizados, a datos experimentales realizados con anterioridad en un dispositivo similar (F1). Para comparar la fiabilidad de las simulaciones, también se ha realizado un estudio con Ansys. Experimentalmente se obtuvo que para una velocidad de giro de 1200 rpm, el motor consumía 3.62 kW. Realizando la simulación en Ansys se calcularon los valores que aparecen en la Figura 21.

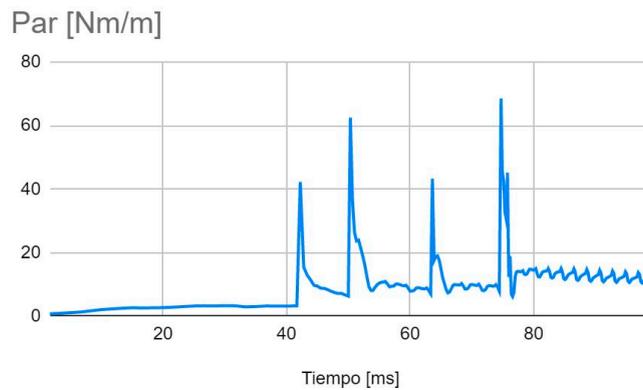


Figura 21: Datos de potencia del dispositivo experimental. Simulaciones con Ansys.

donde, procediendo igual que en el dispositivo experimental:

$$M_{medio} = 12,59 \text{ Nm/m}$$

$$M = M_{medio} \cdot b \cdot 12 = 12,59 \cdot 0,05 \cdot 12 = 7,55 \text{ Nm}$$

$$\dot{W} = M \cdot \omega = 7,55 \cdot 1200 \cdot \frac{2\pi}{60} = 949,26 \text{ W} \approx 1,29 \text{ CV}$$

$$\text{Correlación} = 0,949 / 3,62 = 26,21 \%$$

Aunque los valores experimentales fueron tomados directamente del consumo del motor, que incluye sus pérdidas y demás consideraciones que no se han tenido en cuenta en la simulación de Ansys, si se aplica la correlación directamente al dispositivo cavitador se obtiene un consumo teórico de alrededor de 2 kW. Así, se escoge un motor capaz de aportar dicha potencia, más un cierto margen de seguridad, como el que se incluye a continuación.

El motor escogido es el modelo SGMSV-30ADA21 de la marca Yaskawa Electric. Este motor consume 3 kW de potencia (200 V), y es capaz de generar 9,8 Nm de par a una velocidad máxima de 3000 rpm). El eje de transmisión es de 24 milímetros de diámetro, y cuenta con un chavetero de 8x7x18 milímetros.



Figura 22: Motor Yaskawa de corriente alterna de 3kW. (Par máximo 9,8 Nm y 3.000 rpm)

Para regular la velocidad de giro del motor, y monitorizar los consumos eléctricos, se hará uso de un variador de frecuencia de la marca Schneider Electric, modelo ATV320D11M3C que puede manejar hasta 11 kW.



Figura 23: Variador de frecuencia para controlar la velocidad de giro del motor eléctrico y monitorizar los consumos energéticos

3.5 Método de operación

En este subapartado se describe el orden lógico que debe seguirse para el correcto funcionamiento de un ensayo. En la Figura 24 se muestra el esquema del circuito hidráulico a través del cual se relacionan los distintos componentes, comenzando con un depósito lleno de agua sin tratar (Depósito 1) y finalizando con un depósito con agua tratada (Depósito 2).

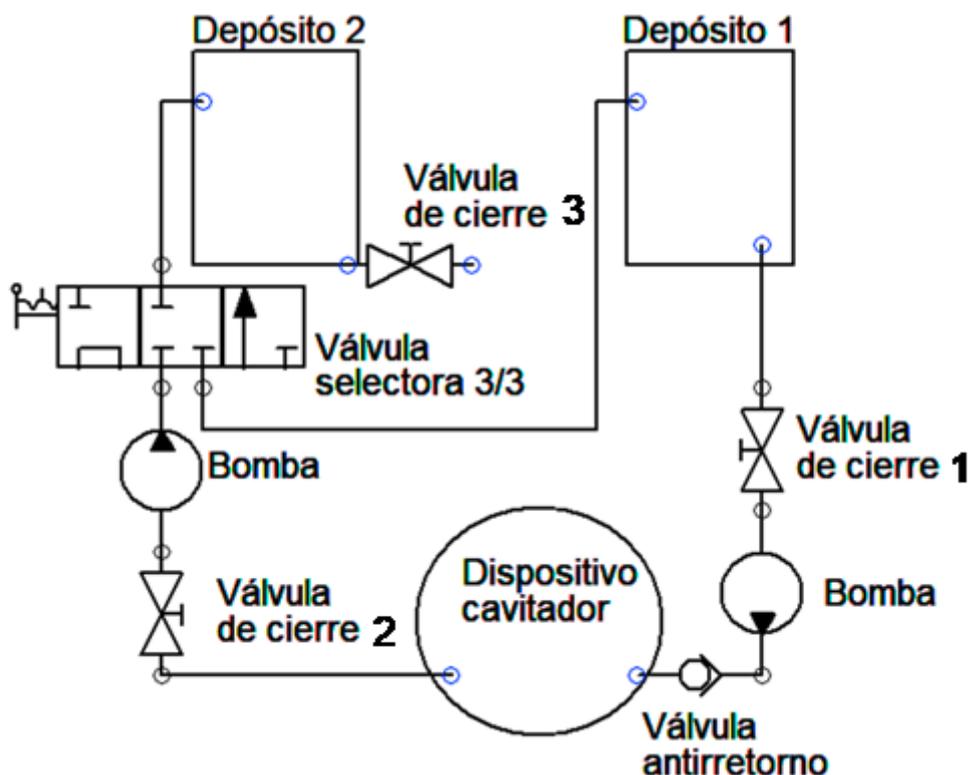


Figura 24: Esquema del circuito hidráulico

1. Inicialmente se introduce el agua en el primer depósito (depósito de muestra sin tratar: Depósito 1).
2. Se abre la correspondiente válvula (válvula de cierre 1) y se acciona la bomba 1; de esta forma se llenará el dispositivo cavitador a través de una válvula antirretorno que impedirá el regreso del fluido por ese conducto.
3. Se realiza el experimento accionando el variador de frecuencia hasta llegar al valor de consigna de la velocidad de giro del motor.

4. Terminado el ensayo, el dispositivo se vacía realizando un procedimiento análogo al del de llenado, con la diferencia de que en su lugar se abrirá la válvula de cierre 2.

Observar que se cuenta con una válvula distribuidora de 3 vías después de la bomba de vaciado. Las 3 posiciones permitirán retornar el fluido al primer depósito para repetir el ensayo, cerrar los conductos, o proceder al llenado del depósito de agua tratada.

5. Finalmente, el depósito de agua tratada cuenta con una válvula (válvula de cierre 3) mediante la cual se podrá extraer el fluido al exterior para su uso.

La secuencia explicada permite, además de conocer el diseño conceptual inicial de la instalación, observar que se ha diseñado con la intención de que el operario de la instalación interaccione lo mínimo posible con la muestra, y esto disminuye los riesgos de contaminación (tanto de la muestra como del operario) después de haber sido tratada.

Entre la alimentación eléctrica y el motor, se dispone un de un equipo capaz de controlar la velocidad de rotación del motor de corriente alterna (velocidad de consigna), mediante el control por frecuencia de la corriente eléctrica (apartado 3.4 Equipo de potencia y control).

3.6 Mantenimiento y cambio de dientes

Una de las consignas propuesta al inicio de este proyecto, fue la de diseñar un equipo versátil que permitiera experimentar con diferentes geometrías de contracciones y expansiones. Para cumplir con este objetivo, se decidió realizar un diseño modular que permita realizar cambios de ciertas partes del equipo (como en este caso las expansiones y contracciones). Además, del tipo de tratamiento (tipos de bacterias, concentración por mL de agua, etc.), se considera necesario una serie de operaciones destinadas al mantenimiento e higiene del conjunto, que estarán en consonancia con el procedimiento para cambiar el tipo de dientes.

Se decidió que la operación esté restringida a desatornillar el conector entre ejes, por lo que se tratará de una pieza comercial que a su vez se divide en otras dos unidas por tornillos. En la siguiente imagen (Figura 25) se puede apreciar de forma gráfica dicha unión.

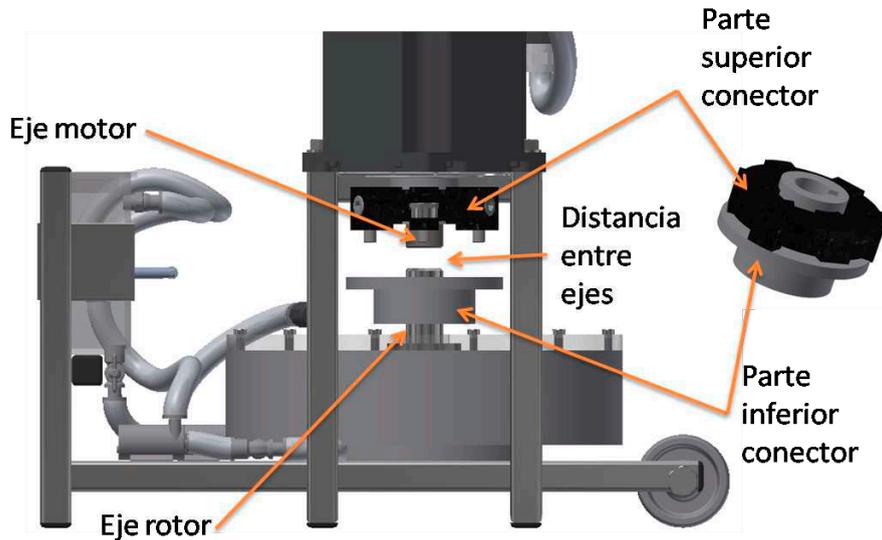


Figura 25: Vista lateral del diseño

Una vez desarticulada la unión entre ambos ejes, no debe existir ningún impedimento para extraer el dispositivo verticalmente, por lo que la distancia que separa los ejes (eje del motor y eje del estator) debe ser adecuada. Además, deberá haber holgura suficiente como para que, al levantar el dispositivo cavitador, se libren los pernos salientes de la chapa que evitan el arrastre rotacional del estátor (Figura 15). De esta manera, con levantar y retirar el dispositivo lateralmente, deberá ser suficiente (Figura 26).

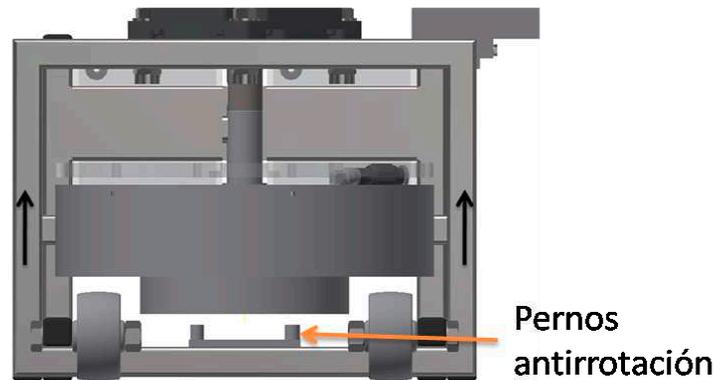


Figura 26: Vista frontal del diseño del Conjunto

Extraído el dispositivo del conjunto, se deberá poder acceder a la cámara entre el rotor y el estátor para realizar la limpieza y/o el cambio de geometrías entre contracciones y expansiones. Para ello se procedería a retirar los tornillos que sujetan la tapa, seguidamente de quitar la propia tapa, además de la junta (Figura 27) de estanqueidad. Asimismo saldría el retén dispuesto entre la tapa y el eje del rotor que asegurará la estanqueidad entre ambos.

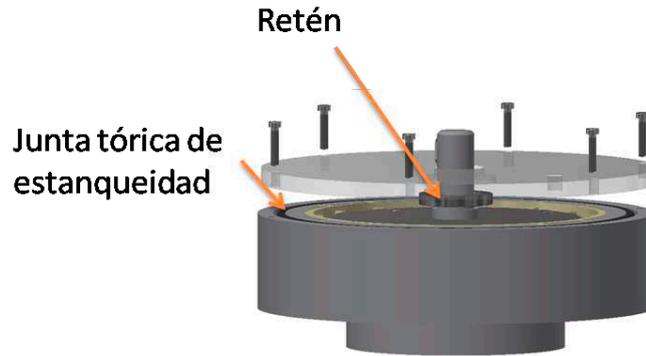


Figura 27: Dispositivo Cavitador

Con la tapa retirada ya habría libertad para extraer la junta tórica, el eje del rotor, el propio rotor, la pared dentada, y la junta de estanqueidad inferior, momento en el que se podría realizar la limpieza y desinfección de todos los componentes.

Para ensamblar el conjunto se procedería a la inversa. Primero es importante decidir si los dientes del estátor serán reemplazados por otros. Habiendo tomado esta decisión, el rotor será la primera pieza en colocar, asegurándose de que el extremo inferior del eje del rotor únicamente descansa sobre el rodamiento inferior. Se colocará la tapa con la junta tórica de estanqueidad y el retén del eje del rotor para poder ser atornillada en su lugar. Inmediatamente, se introduciría el dispositivo entrando lateralmente a la estructura y dejándolo reposar sobre la chapa inferior (Figura 15). Debe tenerse en cuenta que el dispositivo se colocará sobre los pernos de la chapa inferior, y prestando atención para situar el agujero inferior del estátor de vaciado de muestra en la posición más cercana al circuito hidráulico. El eje del rotor con el eje del motor, deben quedar posicionados correctamente e inequívocamente para unirlos a través del acoplamiento mecánico (Figura 19).

4. DISPOSITIVO CAVITADOR

Debido a que se trata del elemento fundamental de la instalación, en este apartado se describe minuciosamente el conjunto de piezas que entrañan el dispositivo cavitador.

Al tratarse de distintos tipos de piezas, principalmente se ha intentado recurrir a catálogos comerciales, según la norma DIN, para encontrar elementos de ensamblaje comunes en caso de requerimiento (rotura o pérdida de piezas); sin embargo, en el caso de aquellas piezas cuya forma es más singular se ha realizado el diseño mediante el software Autocad Inventor (programa de licencia gratuita para estudiantes con limitación de funciones).

Seguidamente se muestran dichos componentes, junto con su nomenclatura, características y cálculos de diseño en los casos así requeridos.

4.1 Rotor, estátor y componentes internos

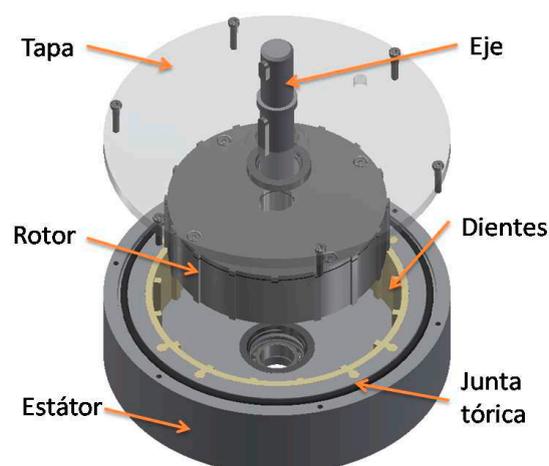


Figura 28: Explosionado del arreglo del dispositivo cavitador. Piezas que conformarán la cámara de cavitación.

Rotor

Originalmente se trataba de una pieza sólida, pero que finalmente se decidió dividir en dos piezas unidas por tornillos. El fin de tal decisión residió en aligerar el rotor mediante “un vaciado” y disminuir de esta forma las fuerzas de inercia en el par transmitido. Para ahorrar en mecanizado, y a diferencia de la junta tórica del estátor, estas piezas se unirán con una junta plana ya que no se contempla una asidua separación entre ambas, ni en caso de mantenimiento ni de funcionamiento. Esto último permite recurrir a este tipo de juntas que, no sería el caso del estator porque éstas se degradan conforme se retiran unas vez prensadas.

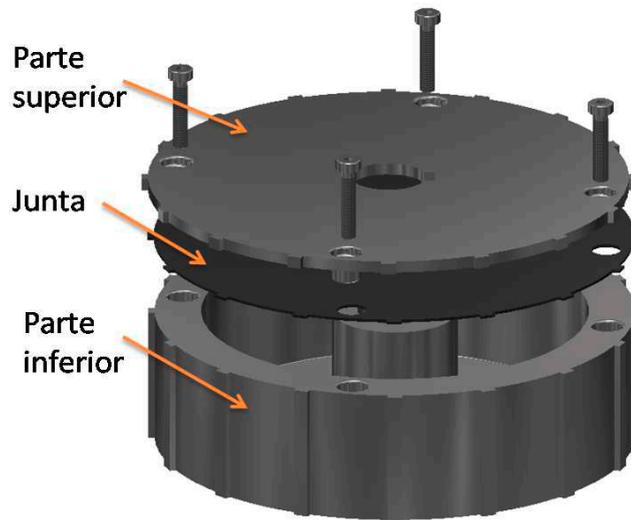


Figura 29: Explosionado del rotor con 16 paletas de arrastre

Las dimensiones que fueron indicadas por el Grupo de Cavitación son: un diámetro de 160 mm, y 50 mm de espesor, con paletas para arrastre de 2 mm sobresaliendo de la superficie del rotor. Asimismo se ha diseñado un chavetero en la cara interna de la pieza con el que se transmitirá el movimiento desde el eje.

Finalmente cabe aclarar que las primeras simulaciones con Ansys se hicieron considerando un rotor de 16 paletas de arrastre (el equipo básico, experimentado por el Grupo de Cavitación presentaba 58 paletas triangulares de 5 mm de profundidad y 80 mm de altura). Sin embargo, es posible recalcular los requerimientos de par y energía, en caso de cambiar este número.

Estátor

Como su nombre indica, se trata de la superficie que permanece estática frente al rotor. Sobre esta pieza se decidió alojar los dientes que derivarán en cambios de sección a lo largo del paso del fluido. Principalmente debe satisfacer que la geometría de los dientes debe ser intercambiable (modular), para ensayar distintas formas y número de contracciones y expansiones, y debe tener el volumen adecuado para albergar la cantidad de muestra estipulada.

De acuerdo al diseño conceptual mostrado en el apartado 3, también se tiene en cuenta en el diseño el posibilitar la extracción del dispositivo cavitador de la instalación, siendo deseable cuantas menos operaciones sean necesarias para ello.

Para lograr ambos requerimientos de diseño del estátor, se partió de una base rígida que dará soporte al resto de sus componentes. Las paredes laterales (la cara interna) estarán compuestas por unas paredes dentadas explicadas en el siguiente subapartado. El material escogido deberá ser tanto inoxidable (que aguante el contacto con el agua) como económico y maleable. Para este caso, el acero inoxidable es un buen candidato, pero no

se ha descartado el Polioximetileno (POM por su abreviatura DIN) que es un termoplástico con propiedades mecánicas muy adecuadas y su gran facilidad de mecanizado.

De acuerdo al diseño propuesto (ver Figura 30), en la cara superior, además de los agujeros roscados que asegurarán la tapa, se mecanizarán los huecos para sujetar los dientes (con esto se facilitará su intercambio en caso requerido). También se mecanizará la ranura, con forma circular, donde se aloja la junta tórica con la que se garantizará la estanqueidad de la cámara de cavitación.

En el fondo o cara interna de la base (Figura 30), se aprecia una doble intrusión cilíndrica. El alojamiento más inferior (y más pequeño) contendrá un rodamiento de rodillos oblicuos para dar apoyo a las reacciones axiales debidas tanto al peso del conjunto eje/rotor como a las reacciones generadas por el propio movimiento de giro e hidrodinámicas, controlando cualquier oscilación que se presente, incluso por desequilibrado. El otro alojamiento, el más cercano a la cara superior de la base, dará cabida a una junta cilíndrica (retén), que impedirá el paso del fluido hacia el rodamiento. Finalmente, se proyecta un agujero pasante que permitirá extraer el rodamiento o el eje del rotor en caso de, limpieza, sustitución y/u obstrucción.

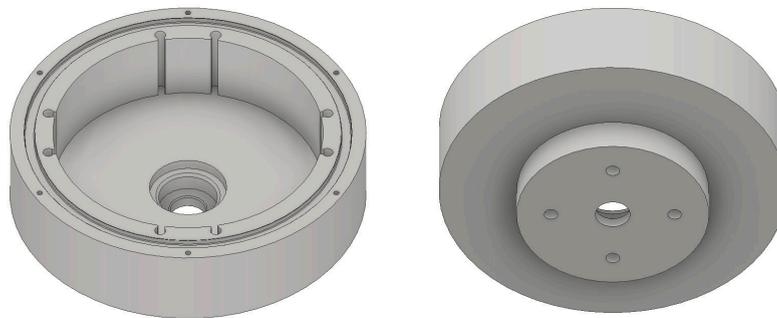


Figura 30: Vista superior e inferior del estátor diseñado

Finalmente, en la Figura 30, se observa que en la cara inferior de la base del estátor, que es la cara en contacto con la base de la estructura-soporte de la instalación, se practican cuatro perforaciones ciegas que cuadrarán con los pernos de la chapa (Figura 15). Como ya se mencionó, este arreglo impedirá que el estator gire por arrastre del rotor.

4.2 Componentes mecánicos

Eje

Se trata de la flecha que se sitúa en el eje geométrico de giro del rotor, y es la pieza que le transmite el movimiento (par) desde el motor.



Figura 31: Flecha del rotor.

A pesar de tener como función básica la de transmitir el movimiento circular del motor hacia el rotor, esta pieza se ha diseñado para solventar otras posibles situaciones.

Una de ellas es la de delimitar el movimiento ascendente que pueda tener el rotor hacia fuera del estátor, por eso se diseña un tope a la altura adecuada (Figura 31) (El posible desplazamiento en sentido opuesto se verá impedido por la presencia del rodamiento situado en la intrusión cilíndrica inferior en la base del rotor - Figura 30). A través de los chaveteros y sus correspondientes chavetas, se transferirá el par de rotación. Por último, el chaflán situado en la base facilitará su inserción en la parte cilíndrica del rodamiento.

Pared dentada

Como se ha explicado en el estátor, debido a la necesidad de estudiar los efectos que se producen al ensayar diversas configuraciones de diente (geometrías, secciones mínimas de paso, número), se crean unas piezas intercambiables de fabricación sencilla que se unen mediante un engrapado según la norma DIN 8580, como se aprecia en la Figura 32.

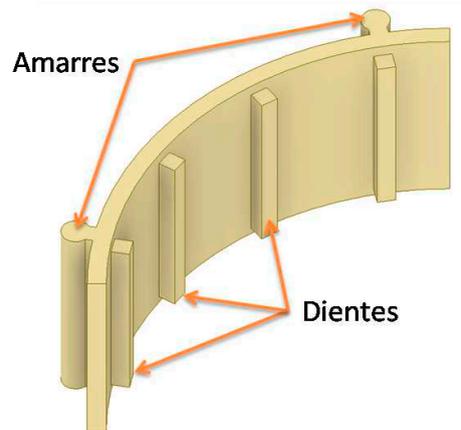


Figura 32: Configuración general de los Dientes del estátor. La grapas, o amarres, permitirán sujetarlos a la superficie interna del estátor, y retirarlos en caso necesario...

A fin de simplificar su mecanizado, la corona completa de dientes (360°) se ha dividido en cuatro piezas iguales (90° cada una), con cuatro dientes por pieza. Inicialmente se han diseñado dientes de sección transversal cuadrada ($5 \times 5 \text{ mm}$), aunque la forma de éstos puede ser diseñada y las piezas mecanizadas en función de los requerimientos. Los amarres (dos por cada pieza) se caracterizan por su forma alveolar en vista desde planta, forma que permite insertarlas y retirarlas desde arriba en el estátor. Nótese que una vez colocada la tapa del estátor se impedirá cualquier desplazamiento vertical del diente, asegurando su correcta posición durante cada ensayo. A diferencia de los amarres, los dientes poseerán una longitud menor, cuyo objetivo es el de facilitar la extracción de la pieza completa (Figura 33).

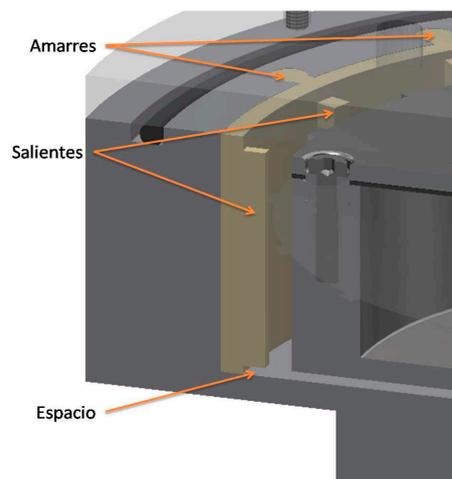


Figura 33: Sección de la pared dentada (pieza independiente del estátor)

Tapa

A diferencia de las piezas anteriores, diseñadas para ser fabricadas con materiales de altas prestaciones mecánicas (acero inoxidable, POM, nylon), esta pieza del conjunto deberá ser transparente para permitir el acceso óptico. Igual que los depósitos de la instalación hidráulica, son varias las razones por las que se ha decidido fabricarla en metacrilato: economía, tanto de la materia prima como de su posterior mecanizado; resistencia adecuada a las vibraciones y tensiones; y sobretodo, como ya se ha mencionado, su transparencia, lo que permitirá observar el fenómeno en el momento del funcionamiento y la adquisición de imágenes en caso de requerimiento.

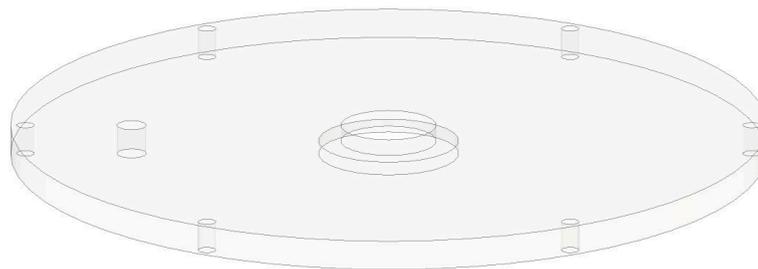


Figura 34: Tapa en posición de montaje

Coincidentes con los agujeros del estátor, se encuentran unas perforaciones donde se introducirán los tornillos que asegurarán la hermeticidad de la cámara de cavitación. La perforación circular en torno al agujero, por donde pasará el eje del rotor, deberá tener el diámetro adecuado para alojar el retén de estanqueidad.

Rodamientos

Dadas las cargas esperadas por el conjunto móvil en el estátor, se optó por un rodamiento de rodillos oblicuos, que soporte tanto las fuerzas axiales como las radiales. Axialmente apoyará el rotor, que a su vez recibe las cargas del eje en su parte superior. Las cargas radiales serán comunicadas por la prolongación del eje. El rodamiento estará sujeto en el seno del estátor mediante una unión a presión, dejando un juego mínimo con el eje.

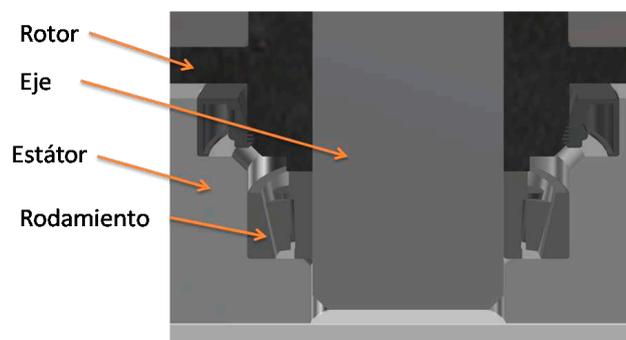


Figura 35: Vista seccionada de la ubicación del rodamiento

Chaveta

Se busca una chaveta con medidas estandarizadas por la norma DIN, que precisarán cálculos del par que transmitirá. Para averiguarlo se hace uso de la herramienta de dimensionado de Inventor, que habiendo sido asignados una potencia, velocidad de rotación, diámetro del eje y propiedades del material es capaz de designar una geometría adecuada junto con un valor de coeficiente de seguridad.

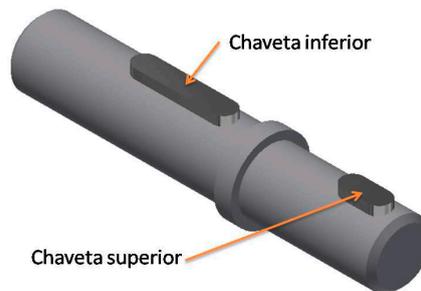


Figura 36: Disposición de las chavetas en el eje

Para proporcionar valores reales que garanticen la seguridad de la instalación, se han empleado los datos experimentales anteriores (Figura 7). Con estos datos, se observó que en el caso más extremo esperado, para un equipo similar, girando a 1600 rpm, la potencia máxima demandada por el dispositivo rondó los 8,5 kW. Introduciendo dichos valores en el herramienta de cálculo de Inventor, se concluye que para un eje de 24 milímetros de diámetro, la chaveta recomendada tiene unas dimensiones de 8x7x18 milímetros, y un coeficiente de seguridad de 1,8 en un material cuya máxima tensión admitida es de 246 MPa. Para acoplar el rotor con el motor, se ubica una chaveta de mayor tamaño dado que la geometría lo permite.

Juntas de labio

Se sitúan al final del eje para evitar que el rodamiento entre en contacto con el agua, y en el agujero de la tapa. Son de tipo radial, se encontrarán alojadas en la cavidad, con una parte elástica en contacto con el eje que impedirá el paso del fluido.

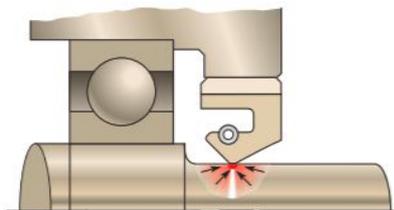


Figura 37: Junta de labio

Están diseñadas para funcionar entre superficies cuya diferencia de velocidades es superior a 15 m/s, ampliamente superior a la velocidad con la que se trabajará en el dispositivo. En concreto se muestra a continuación la velocidad de la junta situada en la tapa, cuyo diámetro de 40 milímetros es mayor que la inferior y por tanto también lo será la velocidad, calculada a partir del valor de velocidad de giro multiplicado por el radio del eje que cubre.

$$v = \Omega \times r = 1800 \cdot \frac{2\pi}{60} \times 0,02 = 3,77 \text{ m/s}$$

Junta tórica

Es una junta diseñada para asegurar la estanqueidad de fluidos mediante la aplicación de esfuerzos axiales siendo su montaje sencillo en comparación con las otras juntas. Se alojará en una hendidura circular a lo largo de la cara superior externa del estátor, que al posicionar encima la tapa evitará el paso del fluido.

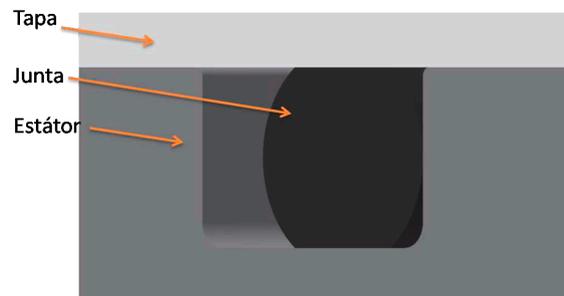


Figura 38: Junta tórica

5. PRESUPUESTO

En este apartado se proporciona una estimación del presupuesto necesario para llevar a cabo el proyecto. Se muestra el valor unitario de cada elemento comercial junto con el número de unidades requeridas de cada uno, y en las piezas como el estátor o el rotor que requieren mecanizado, se incluye en el precio asignado. En la última fila se incorpora una estimación del tiempo de ejecución del ensamblado y su correspondiente coste.

Soporte			
Descripción	Medición	Precio	Importe
Tornillo hexagonal AS 1427 M10 x 40	4 u	0,5 €/u	2€
Tuerca hexagonal AS 1112 M4 Tipo 5	2 u	0,2 €/u	0,40€
Tornillo hexagonal AS 1110 M4 x 16	2 u	0,5 €/u	1€
Chapa 150 x 20 x 2	0,003 m ²	141 €/m ²	0,50€
Perfil 20 x 20 x 2	3,1 m	2,21 €/m	6,85€
Tuerca hexagonal AS 1112 M8 Tipo 5	2 u	0,2 €/u	0,40€
Rueda	2 u	19,96 €/u	39,92€
Tornillo hexagonal AS 1111 M8 x 65	2 u	0,5 €/u	1€
Taco redondo	4 u	0,8 €/u	3,20€
Tuerca hexagonal AS 1285 (B1) M10	4 u	0,2 €/u	1€
Taco cuadrado	6 u	0,8 €/u	4,80€
Placa 50 x 2	0,67 m	16,48 €/m	11,10€
Placa soporte	0,1125 m ²	283,3 €/m ²	32€
Ejecución y montaje	2 h	25 €/h	50€
Total soporte			154,2€

Instalación hidráulica			
Descripción	Medición	Precio	Importe
Manguera hidráulica d1/4"	1 m	5 €/m	5€
Válvula de retención ref. MG6G1.2	1 u	10,8 €/u	10,80€
Codo igual ref. 3602 06 00	2 u	3,52 €/u	7,04€
Válvula de cierre ref. 0501 04 13	1 u	5,42 €/u	5,42€
Bomba 6V DC	2 u	2,69 €/u	5,38€
Plancha metacrilato 297 x 430 x 4	1 u	18 €/u	18,00€
Racor 6 mm	2 u	1,15 €/u	2,30€
Válvula selectora 3/3	1 u	80,9 €/u	80,9€
Ejecución y montaje	3 h	25 €/h	75,00€
Total instalación hidráulica			209,840€

Dispositivo cavitador			
Descripción	Medición	Precio	Importe
Tornillo hexagonal DIN 7984 M5 x 25	6 u	0,5 €/u	3€
Chaveta DIN 6885-1 tipo A 8 x 7 x 18	1 u	1 €/u	1,00€
Junta ANSI/B93.98M 30x47x7-Tipo 2	1 u	3,45 €/u	3€
Tornillo hexagonal DIN 7984 M5 x 25	4 u	0,5 €/u	2,00€
Chaveta DIN 6885-1 tipo A 8 x 7 x 38	1 u	1 €/u	1,00€
Impresión pared dentada	4 u	9,89 €/u	39,56€
Junta ISO 3601-1 D 2180 G	1 u	15,04 €/u	15,04€
Estátor	1 u	200 €/u	200€
Junta ANSI/B93.98M 30x47x7-Tipo 2	1 u	3,45 €/u	3,45€
Rotor	1 u	150 €/u	150€
Junta rotor	1 u	10,47 €/u	10,47€
Tapa	1 u	12 €/u	12,00€
Eje	1 u	50 €/u	50€
Ejecución y montaje	8 h	25 €/h	200€
Total dispositivo cavitador			691,0€

Componentes de control			
Descripción	Medición	Precio	Importe
Motor SGMSV-30ADA21	1 u	849 €/u	849€
Variador de velocidad ATV320D11M3C	1 u	139,82 €/u	139,82€
Acoplamiento entre ejes	1 u	8,79 €/u	8,79€
Ejecución y montaje	0,5 h	25 €/h	12,50€
Total componentes de control			1.010,110€

Presupuesto total			
Descripción	Medición	Precio	Importe
Soporte	1 u	154,2€	154€
Instalación hidráulica	1 u	209,840€	210€
Dispositivo cavitador	1 u	691,0€	691€
Componentes de control	1 u	1.010,110€	1.010€
Ejecución y montaje	1 h	25 €/h	25,00€
Total Conjunto			2.090,091€

6. CONCLUSIONES

El presente proyecto ha tenido como objetivo principal el diseñar una instalación para realizar ensayos experimentales paramétricos (análisis de los parámetros que influyen en los ensayos) para usar el fenómeno de cavitación como un proceso para tratamiento de aguas infectadas por microorganismos persistentes. Este uso se espera ampliarlo para el tratamiento de agentes químicos peligrosos.

La cavitación es el fenómeno de generación de burbujas de vapor que al encontrar zonas de mayor presión que la presión de vapor, implosionan, generando puntos calientes (hot spots) de muy alta presión y temperatura. Las formas básicas de generar este fenómeno es por el uso de ultrasonidos (CU) o de forma hidrodinámica (CH). Las referencias bibliográficas consultadas, conllevan a una mayor eficiencia de la cavitación hidrodinámica frente a la cavitación ultrasónica, es decir, menor energía requerida para producir el mismo efecto. Sin embargo, también se ha encontrado que la CU es más manejable y repetible que la CH, motivo por el cual la CU es más empleada a nivel laboratorio. Este es el motivo principal por el cual el Grupo de Cavitación de la EINA (GC-EINA) intenta determinar los parámetros más importantes que puedan ser controlados para aplicar esta técnica a la depuración de aguas residuales, incluso para uso humano.

Cabe mencionar que esta tecnología no puede competir económicamente con la cloración (método más comúnmente empleado), pero se ha demostrado que la efectividad de la cavitación por sí sola (sin adición de agentes químicos) compensa el gasto energético que ésta demanda.

Se partió del Principio de Bernoulli (la forma más sencilla de la ecuación de la energía mecánica) para conocer los datos y variables iniciales del diseño. Después se realizaron dos tipos de cálculo para estimar la potencia que requerirá el dispositivo. Una primera aproximación se realizó mediante el teorema de Euler (Ecuación Fundamental de las Turbomáquinas), dada la analogía del dispositivo cavitador con este tipo de máquinas hidráulicas. La segunda se hizo con una versión básica del programa Ansys Fluent para estudiantes (licencia gratuita, pero restringida). A pesar de que ambos métodos arrojaron resultados similares, se realizó un tercer estudio, esta vez experimental, a un dispositivo similar pero de dimensiones y número de dientes diferentes. Gracias a estos resultados, se observó que la potencia obtenida mediante simulación numérica subestima en casi un tercio la potencia obtenida de forma experimental y por medio de la ecuación de Euler. Esta discrepancia sigue bajo análisis y se espera que pronto se puedan encontrar la respuesta.

Con los datos iniciales ya contrastados, se elaboraron los planos del conjunto de la instalación. Para ello se hizo uso de una versión gratuita, y restringida para estudiantes, del programa Autodesk Inventor 2019. El empleo de su herramienta para cálculo de tensiones y para comprobar la viabilidad de los elementos más susceptibles de rotura fue de gran ayuda y apoyo. Sin embargo, y previendo posible pérdida y/o rotura de piezas, se recurrió a

material de catálogo con cumplimiento de las norma DIN, con lo que cualquier repuesto requerido deberá ser fácil encontrar para sustituciones futuras.

Finalmente, el dispositivo propuesto cumple con los objetivos de portabilidad y operatividad, de acuerdo a los requerimientos expuestos por el Grupo de Cavitación de la EINA, Universidad de Zaragoza. Posee un número modular de contracciones y expansiones que, además, permite el intercambio de diferentes geometrías (tanto en número como en geometría).

Trabajos Futuros

Pese a la seguridad del funcionamiento del diseño expuesto a lo largo del presente trabajo, se espera poder seguir avanzando en la simulación numérica. Los primeros pasos ya se han logrado.

Mi recomendación es la realización inmediata de la instalación. Durante los primeros ensayos se podrán verificar las condiciones a las que será sometido, y con ello también se tendrán los indicios y las variables que toman juego durante el fenómeno.

De esta manera, todas las variables de la simulación con Ansys como la presión de vapor (que queda influenciada por las partículas sólidas suspendidas) y la tensión superficial (que puede variar en función de la temperatura media del ensayo) podrían ser “calibradas” para reflejar de manera más precisa el comportamiento funcional del equipo, y predecir futuros cambios necesarios para adecuarlo a cualquier aplicación.

Actualmente, la bibliografía especializada indica que los efectos térmico (altas temperaturas y presiones) juegan un papel muy importante en la eliminación de microorganismos patógenos. Sin embargo, las últimas investigaciones realizadas por el GC-EINA, indican que los efectos mecánicos (microchorros, grandes esfuerzos cortantes, y los gradientes de presión) juegan un papel muy importante en la consecución de los objetivos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M., "The Water Footprint Assessment Manual", Earthscan, 2011.

[2] Mir, J., Morató, J. and Ribas, F., "Resistance to chlorine of fresh water bacterial strains", The Society for Applied Bacteriology, Journal of Applied Microbiology (1997).

[3] Russell, A.D. and Harries, D., "Some Aspects of Thermal Injury in *Escherichia Coli*", J. Appl. Microbiology, 407-410, (1967).

[4] Dopazo, C. y Bandala, E., "Proyecto de demostración de una planta piloto para el tratamiento de agua contaminada con aplicación posterior en áreas rurales aisladas". Informe de proyecto para La Obra Social de Ibercaja, 2010.

[5] Rayleigh (Lord), "The pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity", Phil. Mag. 34 (6), 94 (1917).

[6] Suslick, K.S. (Ed.), "Ultrasound. Its Chemical, physical and biological effects", VCH Publishers, 1988.

[7] VRTX: Dynamic Water Technologies. Disponible en:
<https://www.cresca.upc.es/congreslegionella/arxiu/comunicacions/vitaltech-presentacion-vrtx.pdf>

[8] Torres, Daniel. "Mejoramiento de crudos mediante cavitación". Proyecto Fin de Carrera para la obtención del título de Ingeniero Químico. Universidad de Zaragoza, 2009.

[9] Shahram Niazi, et al., "CFD simulation of acoustic cavitation in a crude oil upgrading sonoreactor and prediction of collapse temperature and pressure of a cavitation bubble", Volume 92, Issue 1, 166-173, 2014.

[10] Cerecedo, Luis M., Dopazo, César, "Tratamiento de aguas contaminadas mediante procesos de cavitación", Seminario Cátedra FACSA, Castellón, mayo 2019.

[11] Brennen, C.E., "Cavitation and bubble dynamics", Oxford University Press, 1995.

[12] Phull S., Mason T.J., "Advances in Sonochemistry", 6, 1-23. JAI Press, 2001.

[13] Cogate, P.R., and Kabadi, A.M., "A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology". Biochemical Engineering Journal, pp. 60-72, 2009.

[14] García Rodríguez, J. A., y Calvo Bernad, E., "Teoría de máquinas e instalaciones de fluidos", Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2013.

[15] Plesset, M.S. "Tensile strength of liquids", Office of Naval Research, Dept. of the Navy, Report No. 85-47, 1969.

[16] Young, F.R., "Cavitation", Imperial College Press., 1999.

[17] Lorient Vadillo, Ricardo, "Estudio experimental sobre la concentración de burbujas de vapor en cavitación hidrodinámica mediante análisis de imágenes", Proyecto Fin de Carrera para la obtención del título de Ingeniero Químico, Universidad de Zaragoza, 2014.

[18] Bueno Juan, J.A., "Eliminación de microorganismos por medio de técnicas avanzadas de cavitación", Proyecto Fin de Carrera para la obtención del título de Ingeniero Químico. Universidad de Zaragoza, 2012.

[19] Wilcox, David C. "Turbulence Modeling for CFD". Second edition. Anaheim: DCW Industries, 174 – 175, 1998.

[20] Sauer J., Schnerr, G.H., "Unsteady Cavitating Flow. A New Cavitation Model Based on a Modified Front Capturing Method and Bubble Dynamics", Proceedings of FEDSM' 2000 ASME Fluids Engineering Summer Conference, June 11-15, 2000, Boston, Massachusetts, 2000.

[21] Barroso Estébanez, Jorge A., "Práctica de Laboratorio No.5: Cavitación en bombas", Guiones de Prácticas de Diseño de Instalaciones, 2019.

[22] Fluent Inc., Chapter 9. "Modeling Flows in Moving Zones," 12 -13, 2001.

[23]

<https://www.acrifix.com/product/acrifix/en/products/reaction-adhesives/pages/default.aspx.html>

[24] Abadía, L., "Estudio experimental sobre la cavitación hidrodinámica a partir de los espectros de presión generados por las burbujas de vapor", Proyecto Fin de Carrera para la obtención del título de Ingeniero Químico. Universidad de Zaragoza, 2012.