

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL  
PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS DE VON KARMAN EN AGUA**

**ADRIAN EMILIANO OPAZO AGUILERA**

**Profesor Guía:**

Dr. Raúl Labbé Morales

**Trabajo de Tesis presentado a la  
Facultad de Ciencias en  
cumplimiento parcial de los  
requisitos exigidos para optar al  
Título de Ingeniero Físico**

Santiago – Chile

2012

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL  
PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS DE VON KARMAN EN AGUA**

ADRIAN EMILIANO OPAZO AGUILERA

Este trabajo de Tesis fue elaborado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Raúl Labbé Morales del Departamento de Física y ha sido aprobado por los miembros de la Comisión Calificadora del Candidato:

---

Profesor Guía

Dr. Raúl Labbé Morales

---

Corrector N° 1

Dr. Ernesto Gramsh

---

Corrector N° 2

Dr. Rodrigo Hernández

---

Corrector N° 3

Dr. Nelson Moraga Benavides

---

DIRECTOR

## AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, he de agradecer a mi familia, en especial a mi hermano Sergio Opazo y a mi futura esposa Marcela Farías por su compañía y paciencia, además de ese apoyo incondicional que siempre me han brindado.

Quisiera agradecer también al Dr. Raúl Labbé Morales por todo el tiempo dedicado a ayudarme con este trabajo, además de todas las técnicas experimentales e ingenieriles que me enseñó, que han sido una buena base para mi desempeño como profesional en la industria privada, así como al Sr. Gastón Bustamante por su gran colaboración en la fabricación y en el armado del montaje experimental.

Este trabajo contó con financiamiento proveniente del proyecto FONDECYT #1090686.

## DEDICATORIA

---

Dedicado a mi madre, Silvia Aguilera, quien me enseñó con el ejemplo que los sacrificios que se hacen no son para obtener recompensas personales, sino para ayudar, cuidar y proteger a los seres que uno más ama.

Gracias por todo.

## RESUMEN

---

Este trabajo de tesis consistió en diseñar y fabricar un montaje experimental para realizar estudios de flujos de von Kármán en agua, con el fin de eliminar, en la medida de lo posible, cualquier efecto en el flujo que pueda asociarse a la compresibilidad del fluido. Se espera que este montaje permita la obtención de funciones de densidad de probabilidad (PDF) que ayuden a dilucidar algunas de las discrepancias presentes en trabajos experimentales previos relacionados con este tema.

Este montaje experimental, llamado VKF H<sub>2</sub>O, fue dimensionado usando similitud dinámica a partir del montaje experimental VKF. La idea de fondo era obtener, con agua, un flujo con el mismo número de Reynolds que en el montaje VKF que se usa para medir las mismas PDFs con aire como fluido de trabajo. El montaje está aproximadamente en escala 1:2 respecto al montaje utilizado con aire. Las frecuencias de rotación de los agitadores están aproximadamente en una escala 1:4.

Los números de Reynolds máximos que se pueden obtener actualmente con el montaje VKF H<sub>2</sub>O son del orden de  $Re \sim 150000$ .

El montaje diseñado cuenta con un sistema para extraer el calor generado por el flujo. Se estimó la capacidad de enfriamiento del mismo, mostrando que aunque la potencia inyectada al flujo exceda 1 kW, la temperatura del agua puede mantenerse por debajo de 60 °C. Sin embargo, con las potencias

utilizadas en los experimentos realizados a la fecha, no ha sido necesario utilizar este sistema de enfriamiento.

Adicionalmente, el montaje se diseñó con un sistema para la conexión de una bomba de vacío, lo cual permite desgasar el agua antes de iniciar las mediciones. Así, se evitan efectos indeseados asociados a la presencia de burbujas en el agua.

Se realizó un experimento en el cual el agua fue previamente desgasada con el sistema de vacío. Haciendo girar los agitadores a 3 rps (revoluciones por segundo), se recolectaron los datos de la velocidad angular instantánea de los dos agitadores. Al analizar los datos, se encontró que las PDFs de las fluctuaciones de velocidad angular son, en este caso, esencialmente gaussianas, en contraste con las obtenidas en un experimento realizado en aire al mismo número de Reynolds, del cual resultan PDFs fuertemente asimétricas. Lo anterior muestra que la estadística de las fluctuaciones de velocidad angular de los agitadores en un flujo de von Kármán en aire es diferente de la que se obtiene cuando el fluido es agua.

## TABLA DE CONTENIDOS

---

### CAPÍTULO I

<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>1</b>
1.1.    Un poco de Historia.....	1
1.2.    Introducción a la Turbulencia.....	4
1.3.    Flujos de von Kármán.....	7
1.4.    Estudios de Flujos de Von Kármán.....	9

### CAPÍTULO II

<b>REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....</b>	<b>11</b>
2.1.    Montaje VKF.....	11
2.2.    Montaje VKF H <sub>2</sub> O.....	12
2.3.    Requerimientos de diseño.....	14

### CAPÍTULO III

<b>DISEÑO.....</b>	<b>17</b>
3.1.    Contenedor.....	17
3.2.    Sistema de Soporte.....	19
3.2.1    Placas de Soporte.....	20

## TABLA DE CONTENIDOS

---

3.2.2	Soporte Fijo. ....	23
3.2.3	Soporte Móvil. ....	25
3.3.	Base del Montaje. ....	27
3.4.	Sistema de Enfriamiento. ....	28
3.5.	Sistema de Vacío. ....	31
3.6.	Sistema Motor Agitador. ....	32
3.7.	Montaje VKF H <sub>2</sub> O Completo. ....	34

### **CAPÍTULO IV**

#### **FABRICACIÓN Y ARMADO. .... 36**

4.1.-	Fabricación. ....	36
4.2.-	Armado. ....	41

### **CAPÍTULO V**

#### **PRUEBAS Y MEDICIONES. .... 46**

5.1.-	Pruebas de funcionamiento. ....	46
5.2.-	Mediciones. ....	48

### **CAPÍTULO VI**

#### **RESULTADOS Y ANÁLISIS. .... 51**



## TABLA DE CONTENIDOS

---

### CAPÍTULO VII

CONCLUSIÓN. .... 55

REFERENCIAS. .... 57

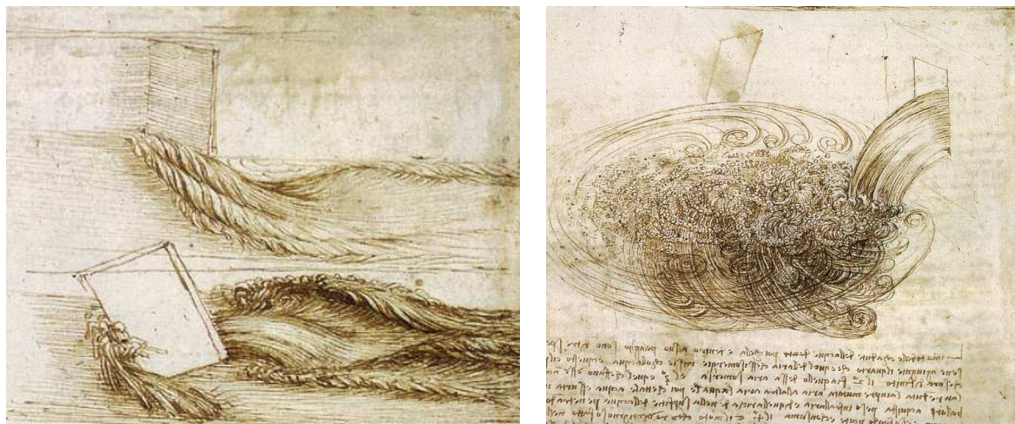
ÍNDICE DE FIGURAS. .... 58

ANEXO. .... 64

A1- Estimaciones Sistema de Refrigeración. .... 64

#### 1.1. Un poco de Historia.

A principios del siglo XVI Leonardo da Vinci se percató de que el agua que caía en una pileta se revolvía y generaba pequeños remolinos, al igual que lo hacía el agua en los canales de regadío, por lo que hizo algunos dibujos que le ayudasen a entender el fenómeno que estaba observando. Así se comenzó con los primeros estudios de la turbulencia.



**Figura 1.1.** Bocetos de flujos turbulentos de Leonardo da Vinci. El documento original se encuentra en el Museo Real de Londres.

Pasaron más de tres siglos para que el matemático Irlandés Osborne Reynolds complementara y explicara las observaciones de Leonardo. Identificó dos tipos

de flujos (Laminar y Turbulento) mediante un experimento que consistió en inyectar colorante en un líquido que circulaba por un largo tubo de sección circular. En el flujo laminar, las líneas de colorante son paralelas a las paredes del tubo (sólo se observaba difusión radial debida al transporte molecular), mientras que en el flujo turbulento las líneas se hacen irregulares y pierden su carácter estacionario. Reynolds descubrió que ambos flujos dependen del valor que toman algunos parámetros importantes del flujo: velocidad media del flujo,  $U$ , diámetro del tubo,  $D$ , y viscosidad cinemática del fluido,  $\nu$ . Este descubrimiento fue una de sus mayores contribuciones, y consiste en un parámetro adimensional llamado número de Reynolds ( $Re = UD/\nu$ ).

Ya en 1904, el ingeniero alemán Ludwig Prandtl introdujo el concepto de capa límite. Observó que muchos flujos cercanos a alguna superficie pueden separarse en dos regiones principales: región laminar, que mantiene la forma de la superficie y donde los efectos de viscosidad del fluido son importantes, y región turbulenta, donde la viscosidad pierde su efecto sobre las partículas del fluido y los efectos asociados a la rotación, junto a los gradientes de velocidad, adquieren importancia.

Posteriormente, el matemático Inglés Lewis Fry Richardson realizó las primeras observaciones cualitativas sobre turbulencia. Richardson observó que los regímenes turbulentos estaban caracterizados por estructuras a las que llamó

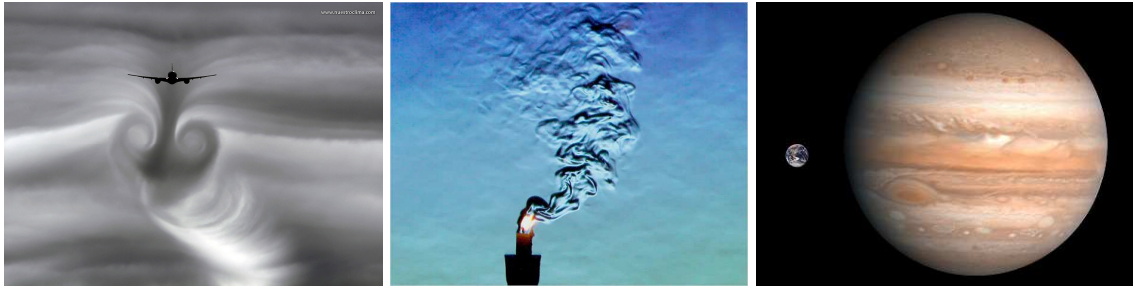
remolinos (eddies), los cuales eran de tamaño variable y parecían destruirse para dar lugar a numerosos remolinos de menor tamaño. Además entendió que en esta división de remolinos la energía cinética se subdividía al atravesar las subescalas. Este fenómeno fue llamado “Cascada de Energía de Richardson”.

El trabajo de Richardson fue continuado por el matemático ruso Andrei Kolmogorov. Kolmogorov postuló que para números de Reynolds muy altos la turbulencia a pequeñas escalas es estadísticamente isotrópica y homogénea. Que la turbulencia sea homogénea significa que se ve igual si nos movemos a distintos puntos del fluido. Que sea isotrópica quiere decir que parece igual si vemos en cualquier dirección. Explicaba que a través de la cascada de Richardson la información geométrica y direccional se perdía. En definitiva, las pequeñas escalas tenían un carácter universal, lo que fue corroborado mediante el cálculo de la función que establecía cómo se distribuía la energía en función del tamaño característico de los remolinos. Sin embargo, este espectro de energías se observaba más bien en casos particulares.

El gran problema de la turbulencia es que no se ha logrado formular una teoría general, ya que para distintos problemas, la turbulencia es similar en algunos aspectos pero muy distinta en otros.

## 1.2. Introducción a la Turbulencia.

La mayor parte de los flujos son turbulentos, ya sean naturales o no. Ejemplos de ello son: los flujos atmosféricos, el caudal de un río, el humo del cigarrillo, el chorro que sale de una llave, el flujo de un líquido o un gas al interior de una cañería, turbomáquina o cámara de combustión, flujos alrededor de objetos (vehículos, aeronaves, edificios), etc.



**Figura 1.2.** Ejemplos de turbulencia. Izquierda: vórtices turbulentos en una nube, generados por el paso de un avión. Centro: turbulencia generada por el flujo de aire caliente a través de aire frío. Derecha: Júpiter y su gran mancha roja. La atmósfera del planeta es muy turbulenta.

Cabe destacar que la turbulencia no es una característica de los fluidos, sino de los flujos (que pueden ser laminares o turbulentos), y su estudio es de gran interés por sus aplicaciones a nivel tecnológico.

En realidad, no es fácil definir el concepto “turbulencia”, pero posee una serie de características que permiten formarse una noción intuitiva [1]:

- ❖ Irregularidad. El flujo turbulento es irregular, aleatorio y caótico, lo que es fácilmente apreciable por un observador. Las irregularidades aparecen debido a fluctuaciones en las variables fluidodinámicas a diferentes escalas (velocidades, tamaños y tiempos): En escalas grandes (comparables a las dimensiones del flujo) el tamaño de los vórtices que aparecen es comparable con el orden de la geometría del flujo, mientras que en escalas muy pequeñas (sin embargo mucho mayores que la escala molecular) las fuerzas viscosas disipan la energía de los vórtices en la energía interna del flujo.
- ❖ Difusividad. La turbulencia amplifica notablemente los fenómenos de transporte de masa (capacidad de mezcla), cantidad de movimiento (resistencia del flujo) y energía (transmisión de calor).
- ❖ Tridimensionalidad. Los flujos turbulentos son tridimensionales. Pero en su estudio, el considerarlos tridimensionales o bidimensionales depende de la escala. A escalas grandes se pueden hacer aproximaciones bidimensionales, mientras que en escalas muy pequeñas el flujo es considerado tridimensional.
- ❖ Alto número de Reynolds. La turbulencia se origina frecuentemente como una inestabilidad de flujos laminares. Dicha inestabilidad se manifiesta a partir de un cierto número de Reynolds (valor crítico). Sin embargo, el valor del número de Reynolds depende del tipo de flujo. Por ejemplo, la transición de flujo laminar a flujo turbulento en un tubo delgado (pipeta) ocurre cuando

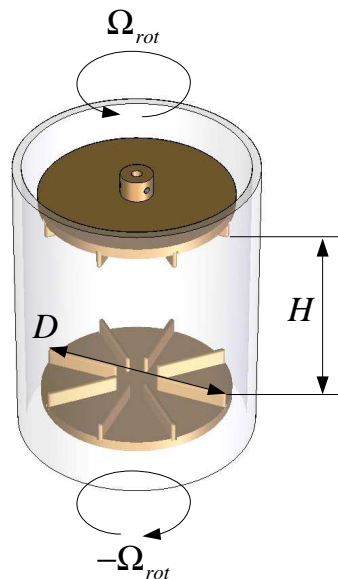
$Re_D \approx 2300$ , mientras que en la capa límite del flujo alrededor de una esfera se produce a  $Re_x \approx 100000$ .

❖ Disipación. Los flujos turbulentos son siempre disipativos. Una vez formada la turbulencia, necesita de un suministro continuo de energía para mantenerse, la que es extraída del flujo principal. Sin embargo, se genera un traspaso continuo de energía de escalas mayores de turbulencia a escalas menores, y en la escala más pequeña la energía cinética se transforma en energía interna debido a las fuerzas viscosas del fluido. Ese proceso de transferencia de energía (de escalas mayores a escalas menores) se denomina “Proceso de Cascada de Richardson”.

La Turbulencia es un fenómeno complejo, y es gobernada por las ecuaciones de la Mecánica de Fluidos para un medio continuo debido a que incluso en las escalas más pequeñas que aparecen en un flujo turbulento, dichas escalas están muy lejos de las escalas de longitud molecular. Ahora bien, la dinámica de la turbulencia es la misma en todos los fluidos (líquidos o gases) si el número de Reynolds es suficientemente grande. Además, debido a que las ecuaciones del movimiento no son lineales, cada tipo de flujo posee ciertas características particulares asociadas a sus condiciones iniciales y de contorno.

### 1.3. Flujos de von Kármán.

Se denomina flujo de von Kármán a un flujo rotatorio y confinado, con un número de Reynolds muy alto en un volumen relativamente pequeño (adecuado para experimentos de laboratorio). Este tipo de flujo obedece a una configuración particular constituida por dos discos provistos de palas, enfrentados entre ellos, que rotan en el mismo sentido o en sentido contrario dentro de un cilindro, como se muestra en la figura 1.3.



**Figura 1.3.** Esquema básico del dispositivo experimental para generar flujos de Von Kármán. Un fluido entre dos discos separados a una distancia  $H$ , que giran en el mismo sentido u opuesto, dentro de un cilindro.



Al hablar de un número de Reynolds muy alto, se hace referencia a valores superiores a 10000. Como sabemos, el número de Reynolds está definido por  $Re=UL/\nu$ , donde  $U$ ,  $L$  y  $\nu$  son, respectivamente, una velocidad característica, una longitud característica y la viscosidad cinemática del fluido cuyo flujo se estudia. En el caso de los flujos de von Kármán, la velocidad característica corresponde a la velocidad de rotación  $U = \Omega_{rot} r$ , y la longitud característica es el radio  $r$  de los discos, por lo que el número de Reynolds para los flujos de von Kármán está definido por:

$$Re = \frac{\Omega_{rot} r^2}{\nu} \quad (1)$$

El fluido de trabajo puede ser líquido o gaseoso.

La configuración de von Kármán es muy usada para estudiar aspectos fundamentales del desarrollo de turbulencia, como por ejemplo la estadística de la energía inyectada a un flujo turbulento. Debido a que la turbulencia es un proceso intrínsecamente disipativo (Cascada de Richardson), es necesario inyectar energía permanentemente al flujo para mantener la turbulencia. Por lo tanto la configuración de von Kármán, debido a que el flujo está confinado, se presenta como una excelente alternativa para medir la potencia total que se inyecta a un flujo turbulento.

#### **1.4. Estudio de Flujos de Von Kármán.**

Debido a las ventajas que presenta la configuración de von Kármán para estudiar flujos turbulentos, variados grupos de investigación han desarrollado trabajos en flujos de von Kármán para medios como aire, agua y sodio.

Uno de los temas de mayor interés es el estudio de las fluctuaciones de la potencia inyectada a un flujo turbulento. Sin embargo, los resultados obtenidos por distintos grupos de estudio, muestran ciertas discrepancias estadísticas para la turbulencia en líquidos respecto a los gases: para aire, las PDF (probability density function) son fuertemente no gaussianas y asimétricas [2,3]; para agua, las PDF son ligeramente asimétricas y se parecen mucho más a una distribución gaussiana [4]. Para entender un poco los diferentes resultados, bajo el proyecto FONDECYT #1090686, se propone usar montajes experimentales equivalentes para medir las PDF en aire y agua.

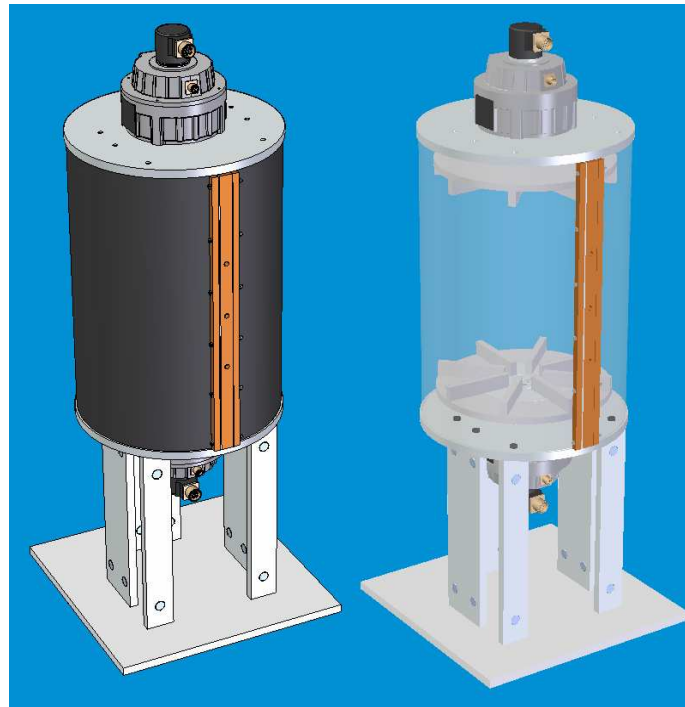
Dado que el montaje experimental para estudiar flujos de Von Kármán en aire ya existe [5], sólo falta fabricar un montaje experimental equivalente para agua.

He aquí los objetivos de este trabajo de tesis:

- Diseñar y fabricar un sistema experimental para realizar estudio de flujos de von Kármán en agua.
- Obtener PDF en agua, y comparar con PDF obtenida anteriormente en aire.

Usando similitud dinámica [6], para obtener dos sistemas equivalentes, se consideró un igual número de Reynolds, razones de aspecto iguales, además de condiciones geométricas y dinámicas equivalentes, representando éstas las bases para el diseño del nuevo sistema.

### 2.1. Montaje VKF.



**Figura 2.1.** Montaje VKF. Este sistema permite realizar estudios de flujos de von Kármán en aire.

Se denomina VKF al montaje experimental fabricado para realizar estudios de flujos de von Kármán en aire [5]. Este montaje se encuentra en el Laboratorio de Turbulencia de la Universidad de Santiago de Chile.

Este montaje (figura 2.1) consta de dos discos de poliestireno expandido de 350mm de diámetro, a una distancia de 388mm el uno del otro, con 8 palas de 145mm x 30mm x 10mm que permiten incrementar en más de 2 órdenes de magnitud la cantidad de energía entregada al flujo. El aire interior está confinado por un manto cilíndrico vertical, hecho de hoja de aluminio de 417.5mm de diámetro, 601mm de alto y espesor 0.5mm. Cada disco de poliestireno está acoplado directamente a los ejes de los motores eléctricos, los cuales están conectados a un sistema de control que consta de un amplificador de corriente, una serie de filtros, una tarjeta A/D y un computador de escritorio.

#### **2.2. Montaje VKF H<sub>2</sub>O.**

El equipo experimental que permitirá realizar estudios de flujos de von Kármán en agua es llamado VKF H<sub>2</sub>O.

Dado que el montaje VKF estaba fabricado, se usó similitud dinámica para determinar las proporciones geométricas para el sistema VKF H<sub>2</sub>O.

Para que exista equivalencia dinámica en sistemas geoméricamente semejantes, el número de Reynolds debe ser el mismo. El número de Reynolds para un sistema con geometría de von Kármán está definido en la ecuación (1). Por lo tanto, para ambos sistemas (aire y agua), de la igualdad del número de Reynolds obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{\Omega_w r_w^2}{v_w} = \frac{\Omega_a r_a^2}{v_a} \quad (2)$$

Dado que  $\Omega_a/\Omega_w \approx 4$ ,  $r_a = 19\text{cm}$ ,  $v_w = 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$  y  $v_a = 1.5 \times 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$ , el radio de los agitadores para el montaje VKF H<sub>2</sub>O en función del radio del agitador en el montaje VKF es:

$$r_w = 0.5r_a = \lambda r_a \quad (3)$$

Esto significa que el factor de escala para el montaje experimental VKF H<sub>2</sub>O es  $\lambda = 0.5$ .

Para estimar la potencia suministrada al flujo, se usa análisis dimensional para relacionar el torque de los motores con la densidad del fluido, la velocidad de rotación y el radio de los discos agitadores:

$$P = f(\rho, \Omega, r) \propto \rho r^5 \Omega^3 \quad (4)$$

Al hacer la razón entre la potencia suministrada en agua respecto a la potencia suministrada en aire, y considerando las ecuaciones (2) y (3), y que  $\Omega_a/\Omega_w \approx 4$ , se obtiene:

$$\gamma = \frac{P_w}{P_a} = \frac{\rho_w}{\rho_a} \left( \frac{\Omega_w}{\Omega_a} \right)^3 \left( \frac{r_w}{r_a} \right)^5 \approx 0.48 \quad (5)$$

Esto significa que para tener flujos dinámicamente equivalentes en agua y en aire, la potencia requerida por el montaje experimental VKF H<sub>2</sub>O es aproximadamente la mitad de la utilizada en el montaje VKF.

El número de Reynolds del montaje VKF H<sub>2</sub>O con los agitadores girando a 3 rps es de aproximadamente  $Re \approx 150000$ .

### 2.3. Requerimientos de diseño.

Habiendo determinado que tanto el factor de escala como la potencia inyectada al fluido es  $\sim 0.5$  respecto al montaje VKF, es necesario considerar que el montaje VKF H<sub>2</sub>O debe cumplir con una serie de requisitos de diseño:

1. Para eliminar posibles efectos de compresión, el agua debe ser sometida a un “desgasado”, es decir, extraer los gases diluidos en ella. La presencia de gases diluidos podría dar lugar a la producción de burbujas, lo cual degradaría la incompresibilidad que debe poseer el fluido. Para esto, debe contar con un sistema que permita extraerlos.
2. Para asegurarnos de que se eliminan todas las burbujas de aire diluidas en el agua, el contenedor debe ser transparente. Eso permitirá por

simple inspección visual verificar que no queden burbujas al interior del contenedor.

3. En el montaje VKF la energía inyectada, junto con el roce del aire con la superficie interior del contenedor, genera que el aire se caliente, midiéndose temperaturas cercanas a los 100°C en la superficie del contenedor. Si el agua del montaje VKF H<sub>2</sub>O llega esas temperaturas, comenzará a evaporarse generando burbujas de vapor en el fluido, con lo cual se perdería una propiedad central del montaje: la incompresibilidad del fluido. Por lo tanto, el equipo debe contar con un sistema de enfriamiento que mantenga la temperatura del agua por debajo de 60°C.
4. Como el contenedor será de un material no metálico, debe estar montado horizontalmente sobre dos soportes metálicos que aporten rigidez al sistema. El metal de estos soportes debe ser buen conductor térmico, y relativamente fácil de trabajar.
5. Los agitadores del montaje VKF H<sub>2</sub>O deben tener un radio 0.5 veces el radio de los discos del montaje VKF. Además, deben ser de un material cuyo coeficiente de absorción de agua sea mínimo, y cuya razón de densidad material/agua sea igual o menor a la razón poliestireno/aire. También deben poder acoplarse directamente a los motores.

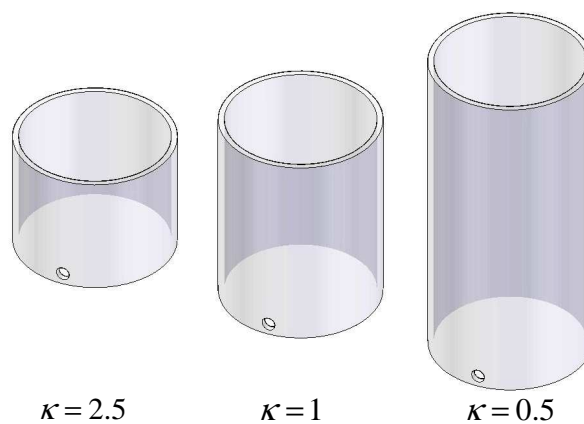


6. El factor de escala  $\lambda=0.5$  debe mantenerse para todo el sistema mecánico.
7. El sistema debe estar sellado de modo tal que no presente fugas de agua.
8. El control de los motores se realizará mediante el controlador que se usa en el montaje VKF. Las mediciones de fluctuación de velocidad en los mismos se hará con un encoder óptico acoplado al eje de los motores.
9. El montaje experimental debe poseer una base que lo soporte y mantenga estable. Debe poder instalarse sobre una mesa de trabajo, y permitir una fácil manipulación (armado y mantención).

---

Basados en los requerimientos de diseño, el montaje experimental a fabricar puede ser dividido en 6 partes fundamentales: cilindro contenedor, sistema de soporte del cilindro, base del montaje, sistema de enfriamiento, sistema de vacío y sistema motor-agitador.

### 3.1. Contenedor.



**Figura 3.1.** Cilindros contenedores con sus respectivas razones de aspecto. El acrílico transparente permite observar el comportamiento del agua durante el experimento.

Dado que el contenedor debe ser transparente y resistente a las tensiones, el material elegido es acrílico transparente de 8mm de espesor. Como el diámetro

interior del contenedor del montaje VKF es de 416mm, el diámetro interior del contenedor de acrílico debe ser de 208mm.

Debido a que en algún momento se planea verificar los resultados obtenidos en [7], se consideró la fabricación de tres contenedores para diferentes razones de aspecto  $\kappa=0.5, 1, 2.5$  (ver figura 3.1). Este parámetro se define como la razón entre el diámetro de los discos agitadores  $D$  y la distancia  $H$  entre ellos:  $\kappa = D / H$ . Así, el largo de cada cilindro depende de la razón de aspecto que se use. Para una razón de aspecto de  $\kappa=0.5$ , el largo del cilindro es de 458mm. Para  $\kappa=1$ , el largo es de 278mm. Mientras que para  $\kappa=2.5$ , el largo del cilindro es de 168mm. Con esto se cubren las tres razones de aspecto.

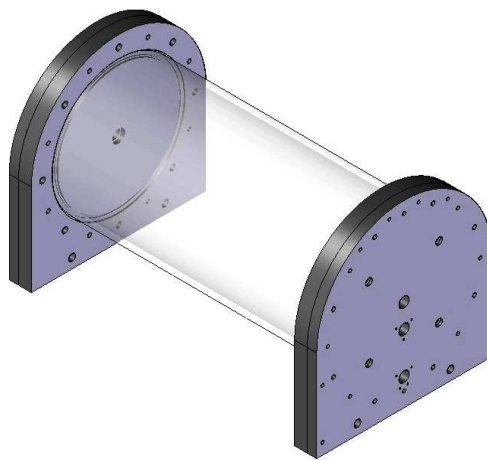
La similitud geométrica entre VKF y VKF H<sub>2</sub>O se obtiene para  $\kappa=1$ .

Además, cada cilindro contendrá la siguiente cantidad de agua: para  $\kappa=0.5$ ,  $V_{\kappa=0.5} \approx 15\text{ls}$ , para  $\kappa=1$ ,  $V_{\kappa=1} \approx 9\text{ls}$  y para  $\kappa=2.5$ ,  $V_{\kappa=2.5} \approx 5\text{ls}$ .

Cada cilindro posee un agujero de 19mm de diámetro a 16.5mm de uno de los bordes, por el cual se introduce y saca el agua usada en el experimento. Además, estos agujeros son los puntos de conexión con la cámara de expansión del sistema de vacío.

### 3.2. Sistema de Soporte.

Debido a que el montaje debe ajustarse para cada uno de los tres cilindros, el sistema de soporte se divide en dos subsistemas: soporte fijo y soporte móvil. Sin embargo, la arquitectura de ambos subsistemas es similar. Las diferencias radican en la capacidad de desplazamiento del soporte móvil y en la simetría respecto al contenedor que poseen los sistemas de enfriamiento incluidos en las placas de soporte



**Figura 3.2.** Sistema de soporte. Las placas laterales (principal y secundaria) están hechas en duraluminio y fueron maquinadas en el Laboratorio de Turbulencia de la Universidad de Santiago de Chile.

Básicamente, el sistema de soporte consta de dos placas de duraluminio que sostienen y cierran los contenedores de acrílico como se muestra en la figura

3.2. Estas placas se denominan placas principales, y tienen en su interior el serpentín para el agua de enfriamiento. Cada una está acompañada de una placa secundaria que funciona como tapa del sistema de refrigeración.

3.2.1. Placas de Soporte.

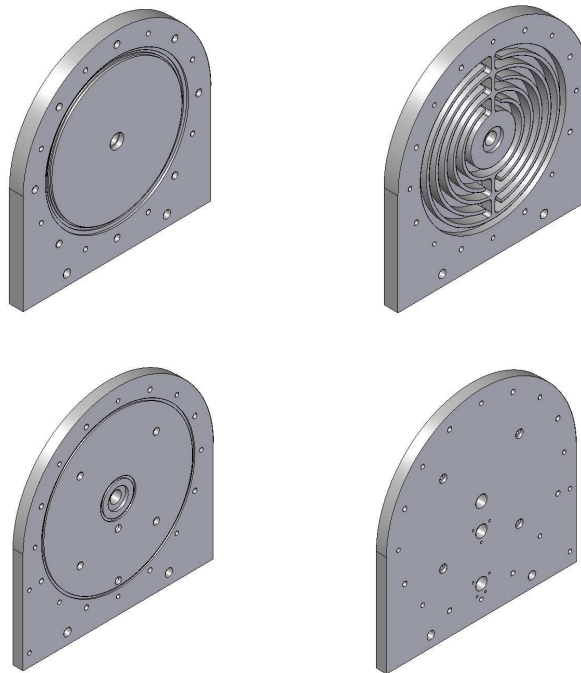
Cada placa principal posee 306mm de alto, 300mm de ancho y un espesor de 22mm. En la cara que está en contacto con el contenedor (figura 3.3, arriba, izquierda), cada placa posee una ranura de 3mm de profundidad que permite sujetar y centrar el cilindro.

En la misma ranura, habrá un surco para instalar un o'ring, y en el centro de la placa una perforación para un retén. Ambos elementos evitarán fugas de agua.

En la cara posterior de cada placa principal (figura 3.3, arriba, derecha) se encuentra el serpentín del sistema de refrigeración. También hay una perforación para instalar un rodamiento que guía el eje de los agitadores, facilitando además la rotación de estos. Además posee 18 agujeros pasantes, de los cuales 8 son para la sujeción de las placas que soportan el cilindro, 8 para tapar el serpentín de enfriamiento, y 2 para los pasadores de anclaje.

Las dimensiones de cada placa secundaria son 306mm de alto por 300mm de ancho, con un espesor de 16mm. Estas placas corresponden a la tapa del

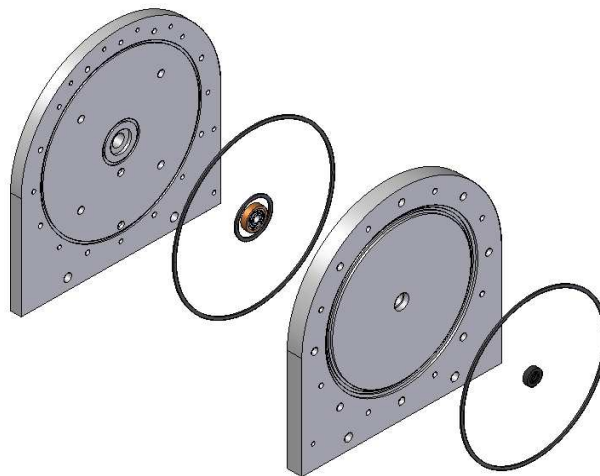
sistema de enfriamiento, y poseen dos perforaciones que permiten el ingreso y la salida de agua hacia y desde el serpentín.



**Figura 3.3.** Arriba: Placa principal. Izquierda: Se muestra la cara que entra en contacto con el fluido. Derecha: Se muestra la cara con el serpentín para la circulación de agua de enfriamiento. Abajo: Placa secundaria. Izquierda: Se muestra la cara que cumple la función de tapa del serpentín. Derecha: Se muestra la cara exterior.

Al igual que en la placa principal, un agujero de 18mm de diámetro permite el paso del eje de los agitadores. Además tienen 8 agujeros para la sujeción de las placas, 8 agujeros para tapar el serpentín, 2 agujeros para los pasadores de anclaje y 2 agujeros extra para la entrada y salida de agua del serpentín. En la

cara que enfrenta al serpentín (figura 3.3, abajo, izquierda), la placa posee dos canales para o'rings de 3mm de espesor, que cumplen la función de evitar fugas de agua desde el serpentín. Concéntrico al agujero para el eje de los agitadores, está la perforación de 32mm de diámetro para el rodamiento antes mencionado. En la cara externa de la placa (figura 3.3, abajo, derecha), en los agujeros de entrada y salida de agua, se hacen dos rebajes de 18mm de diámetro con 12mm de profundidad. Esto permite instalar los elementos de entrada y salida de agua del sistema de enfriamiento, que se conectan a cañerías de ½".



**Figura 3.4.** Placas de soporte principal y secundario. Entre estas placas se instalan 2 o'rings y un rodamiento. En la cara de la placa principal que está en contacto con el contenedor, se instala un o'ring y un retén.

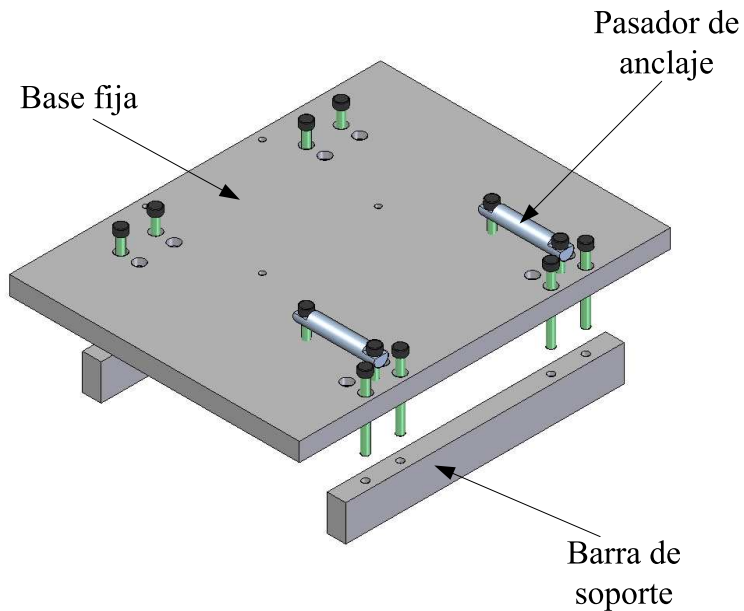
Cada par de placas se monta sobre una base de duraluminio con distintas dimensiones para el soporte fijo y móvil.

### 3.2.2. Soporte Fijo.

Este sistema se ancla directamente a la base del montaje experimental mejorando la rigidez del sistema. Las placas principal y secundaria de este sistema se montan sobre una placa de duraluminio de 320x250mm con 16mm de espesor.

Esta placa posee 4 agujeros pasantes con hilo M6 que se conectan a los pasadores con pernos Parker M6x30mm, y 8 agujeros pasantes de 6mm de diámetro. Estos últimos se usan para anclar la base fija a la base del montaje experimental mediante dos barras de duraluminio de 240mm x 31 mm x16mm. Esto permite que el eje de las placas principal y secundaria quede a una distancia de 203mm de la base del montaje experimental. Esta distancia debe ser la misma en el sistema móvil, de modo que la simetría del montaje se mantenga.

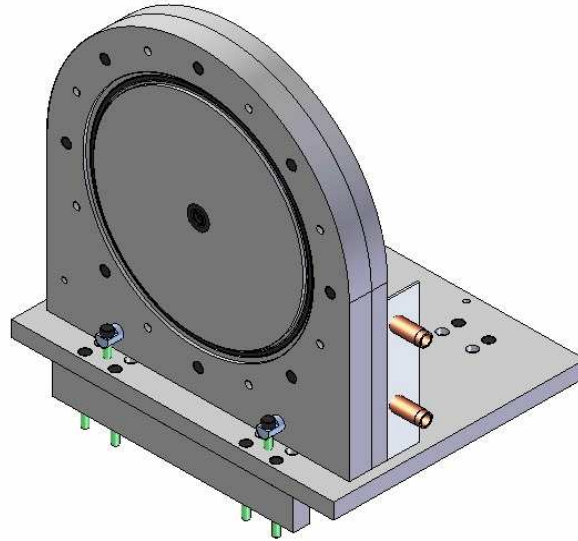




**Figura 3.5.** Base del sistema fijo. Se aprecian los pasadores de anclaje para las placas de soporte, y las barras de soporte que se instalan en la base del montaje VKF H<sub>2</sub>O mediante pernos Parker M6 de 40mm.

Los pasadores (figura 3.5) están hechos de acero y sus dimensiones son 70mm de largo, con un diámetro de 12mm. En cada extremo de los pasadores hay un agujero de 6.5mm de diámetro, que permite el paso de un perno parker M6 x 30mm para anclar las placas de soporte a la base fija.

Una vez fabricado, el soporte fijo debe verse como se muestra en la figura 3.6.

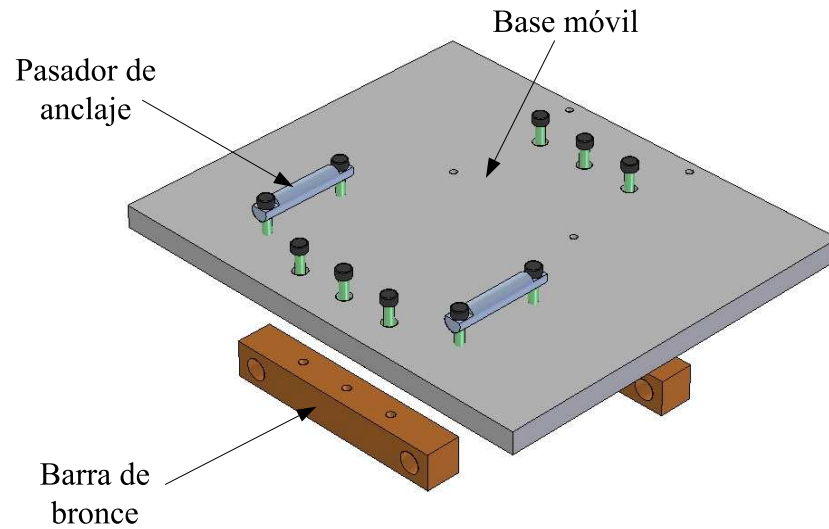


**Figura 3.6.** Soporte Fijo. Se instala directamente sobre la base del sistema. En este soporte se instala el sistema de vacío.

### 3.2.3. Soporte Móvil.

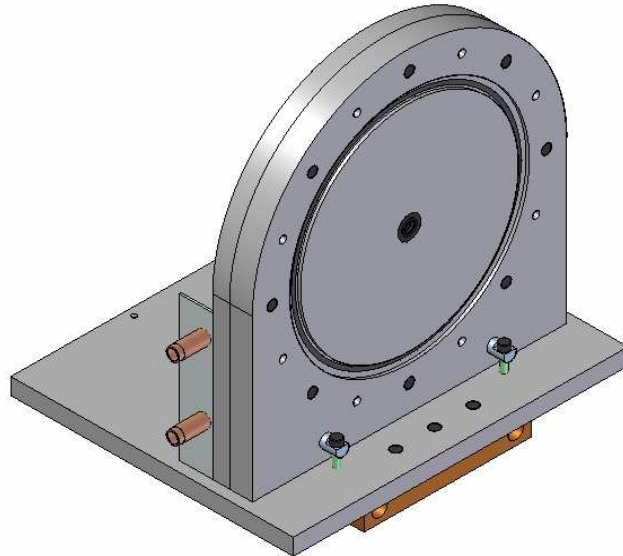
Este sistema se desplaza sobre dos rieles de acero-plata, permitiendo variar la distancia entre ambos soportes (fijo y móvil) para cada largo de los contenedores.

Al igual que el sistema fijo, las placas principal y secundaria de este sistema se anclan sobre una placa de duraluminio de 320mm x 270mm x 16mm mediante dos pasadores de acero (con las mismas dimensiones).



**Figura 3.7.** Base del sistema móvil. Las barras de bronce que permite al sistema móvil deslizarse por los rieles de desplazamiento, permitiendo ajustar el montaje experimental a los diferentes contenedores.

Para que el Sistema Móvil (figura 3.8) se pueda desplazar sobre los rieles de acero-plata, se usan dos barras de bronce de 160mm x 25mm x 26mm, con dos agujeros pasantes de 15mm de diámetro.



**Figura 3.8.** Soporte Móvil. Unas barras de bronce permiten desplazar este sistema sobre los rieles de acero-plata.

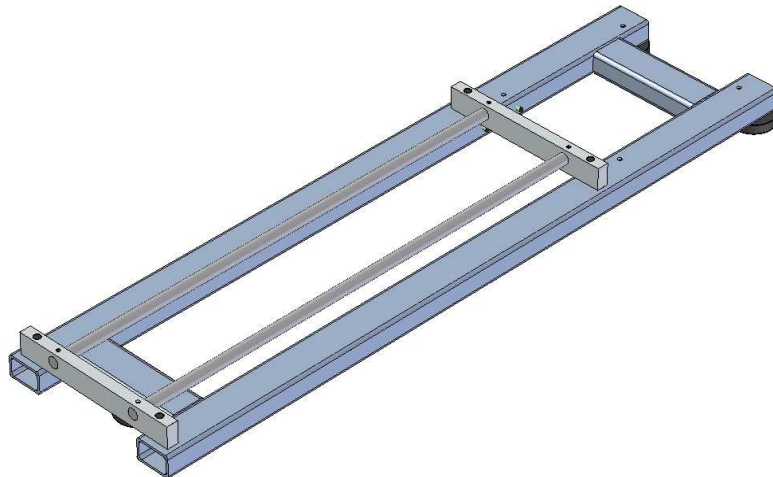
El Soporte Móvil es prácticamente igual al Soporte Fijo, salvo la capacidad de desplazarse sobre un riel.

### **3.3. Base del montaje.**

Este sistema soporta todo el montaje experimental, por lo cual debe ser una estructura resistente y robusta. Está compuesto de dos perfiles rectangulares de acero, de 30mm x 50mm x 1000 mm con un espesor de 3mm. Ambos perfiles están unidos por dos perfiles transversales de 30mm x 50mm x 160mm.

Este marco está soportado sobre tres bases de PVC que en conjunto aguantan un peso aproximado de 1500N, y el sistema completo pesa cerca de 1100N.

En esta base se instalan dos rieles de acero plata de 15mm de diámetro y 1000mm de largo (figura 3.9). Montados sobre dos soportes de duraluminio anclados a la base mediante pernos. Estos rieles permiten el desplazamiento del sistema de soporte móvil.



**Figura 3.9.** Base de soporte del sistema. Estructura hecha de perfiles de acero unidos con soldadura TIG. Posee rieles para el desplazamiento del soporte móvil.

#### **3.4. Sistema de Enfriamiento.**

Un factor importante en el desarrollo del experimento es la incompresibilidad del fluido de trabajo (agua), por lo que es primordial evitar la aparición de burbujas de vapor de agua por el aumento de la temperatura en el montaje experimental.

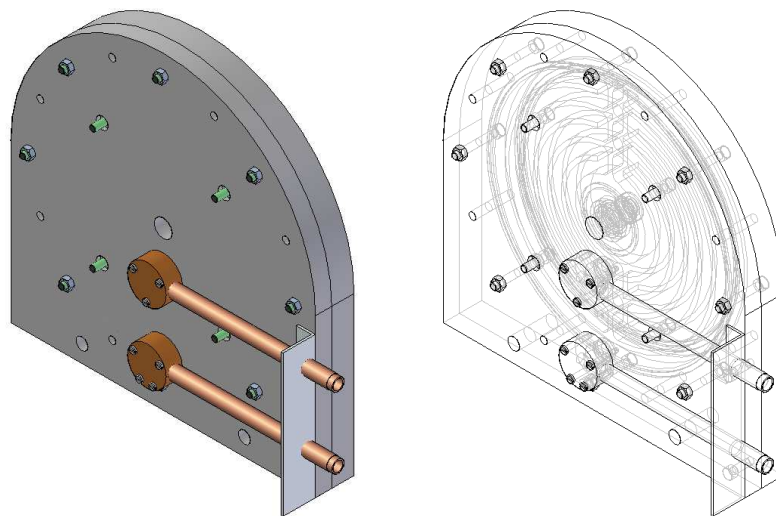
Al aumentar la temperatura del agua, las primeras burbujas aparecen aproximadamente a los 65°C, por lo que se ha establecido como temperatura crítica los 60°C. Así, el sistema de enfriamiento debe ser capaz de mantener el agua del sistema a una temperatura menor o igual a 60°C.

Para que esto ocurra, es necesario estimar las dimensiones del serpentín que se pretende fabricar. Dadas las dimensiones de las placas de soporte, podemos hacer surcos concéntricos de 15mm de profundidad y 10mm de ancho, separados por paredes de 4mm de espesor. En total se pueden hacer 6 de estos surcos. Se conectan unos con otros mediante canales de 15mm de profundidad, con un largo de 24mm y un ancho de 10mm (ver figura 3.3, arriba, derecha). El soporte secundario funciona como tapa, además de entrada y salida de agua de refrigeración.

Para introducir y sacar agua al sistema de enfriamiento, se usan dos tubos de cobre de ½" de diámetro conectados a dos codos de bronce que encajan en la entrada y salida de agua de la placa de soporte secundaria. El agua entra en el surco central del serpentín, y sale por la parte inferior del surco externo del mismo.

El sistema VKF H<sub>2</sub>O usa dos sistemas de enfriamiento, uno en el sistema de soporte fijo y el otro en el sistema de soporte móvil. Existen dos pequeñas diferencias entre ambos sistemas de enfriamiento. La primera diferencia es la

posición de los tubos de entrada y salida de agua: los tubos de ½" son simétricos respecto al contenedor de agua. La segunda diferencia radica en que el sistema de enfriamiento del soporte móvil posee perforaciones para anclar la cámara de expansión del sistema de vacío.

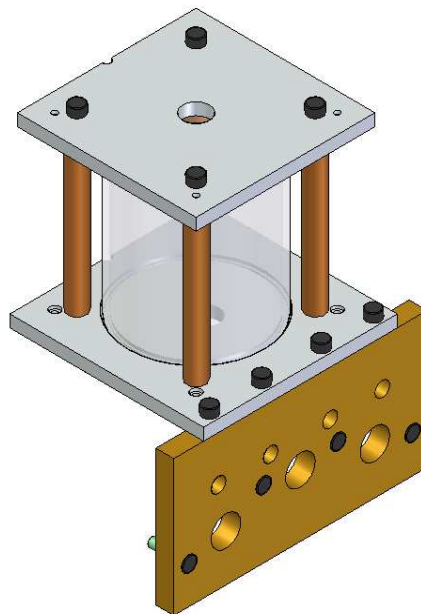


**Figura 3.10.** Sistema de refrigeración. El serpentín queda atrapado como un emparedado. Para evitar fugas de agua se instalan 2 o'rings de 3mm de espesor.

En base a las estimaciones que se muestran en el anexo A1, sabemos que el sistema de enfriamiento va a mantener el agua a menos de 60°C, ya que se sobreestimó la potencia inyectada al fluido por los agitadores. Sin embargo, las sospechas apuntan a que no se necesitará circular agua por el serpentín debido

a la baja potencia que inyectan realmente los motores. Por lo que, básicamente, el sistema de refrigeración es un resguardo por si se llegase a necesitar.

### 3.5. Sistema de Vacío.



**Figura 3.11.** Sistema de vacío. La cámara de este sistema permite conectar una bomba de vacío para poder sacar el gas diluido en el agua.

Para poder desgasar el agua, se pensó en integrar una cámara de expansión, también con agua, conectada al contenedor mediante un tubo de acrílico (ver figura 3.11). Esta cámara, que es un contenedor de acrílico de 82.5mm de diámetro interior con un espesor de 3.2mm, está montada entre dos placas de



aluminio (para disipar calor de ser necesario) de 8mm de espesor. Ambas placas están unidas por cuatro barras de bronce de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y 105mm de largo, con pequeño desbaste de ajuste en cada extremo. La placa inferior se une a una placa de latón que se ancla al sistema de refrigeración fijo mediante pernos.

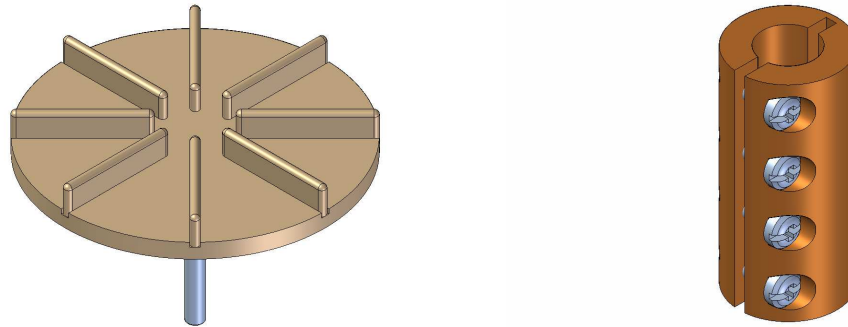
Para evitar fugas, el contenedor de acrílico es calzado en 2 canales de 3mm de profundidad en las placas. Dichos canales tienen, a su vez, un pequeño surco para un o'ring de nitrilo de 2 mm de diámetro. En la placa superior se conecta la bomba de vacío.

Una bomba de vacío [9] se conecta a la parte superior de la cámara de expansión, para poder desgasar el agua.

### **3.6. Sistema Motor Agitador.**

Este sistema consta de un motor eléctrico de corriente continua acoplado a un disco agitador.

El agitador (figura 3.12, izquierda) está fabricado de un disco de PVC [8] de 179.5mm de diámetro y 10mm de espesor. Posee ocho palas, también de PVC, de 69.75mm de largo, 5mm de espesor y de una altura de 15mm. El eje es de acero-plata de 10mm de diámetro y 100mm de largo.

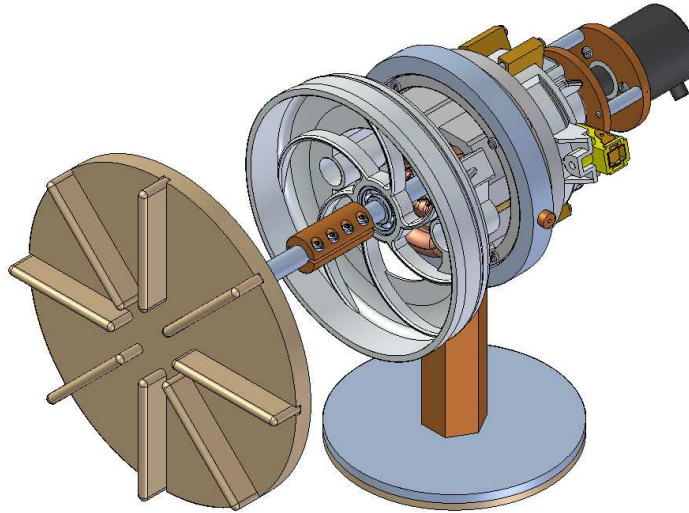


**Figura 3.12.** Izquierda: Disco agitador. Está hecho de PVC debido a su bajo coeficiente de absorción. Derecha: Acople mecánico. Conecta el eje del agitador con el eje del motor.

El motor usado, corresponde a un motor de corriente alterna que ha sido modificado para ser controlado mediante corriente continua. Además se instaló un encoder óptico en la parte trasera del motor, acoplado al eje de rotación, para medir las fluctuaciones de velocidad que permitirán obtener las PDF.

Para poder montar los motores, se fabricó una estructura con 5 grados de libertad (2 angulares y 3 lineales) que permite alinear el eje del motor con el eje del agitador. Para fijar el eje del motor con el eje del agitador se usa un acople mecánico de bronce (ver figura 3.12, derecha).

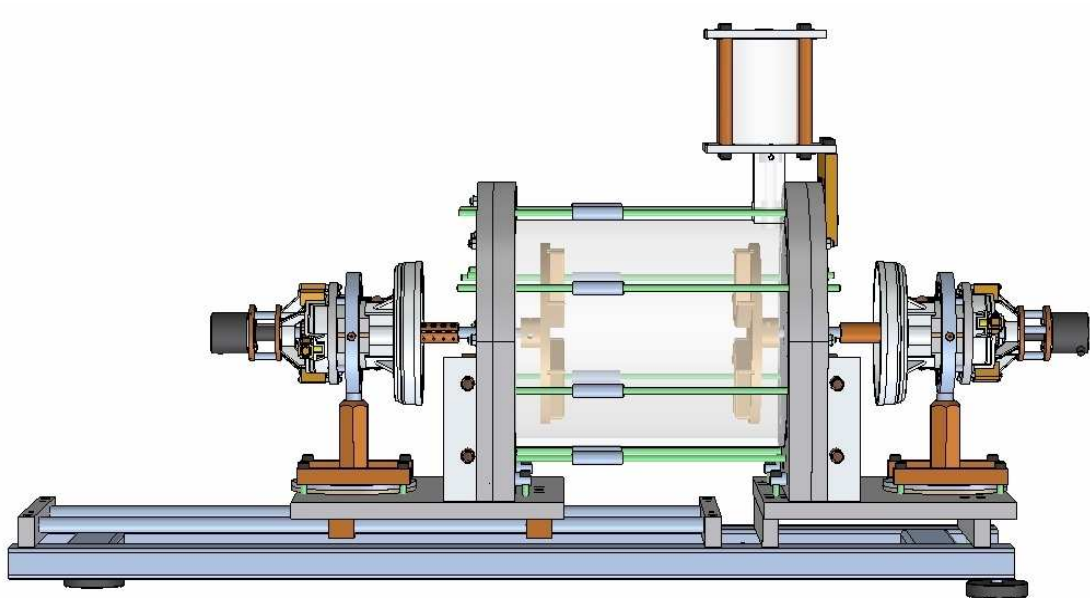
En la figura 3.13 se muestra el agitador acoplado al motor.



**Figura 3.13.** Sistema Motor Agitador. El agitador está acoplado al eje del motor. A su vez el motor está montado en el soporte que permite ajustar su posición y altura. En la parte posterior del motor se aprecia el encoder óptico acoplado al eje del motor.

### 3.7. Montaje VKF H<sub>2</sub>O Completo.

Finalmente, con todos los sistemas en su lugar, el montaje VKF H<sub>2</sub>O terminado se verá como en la figura 3.14, donde se aprecia la diferencia entre el soporte fijo (derecha) y el soporte móvil (izquierda). Los motores se montan sobre ambas superficies (fija y móvil). Para sostener el contenedor, ocho barras con hilo presionan los sistemas de refrigeración. Los rieles de acero-plata, por los que desliza el sistema móvil, permiten cambiar el contenedor.



**Figura 3.14.** Sistema VKF H<sub>2</sub>O. Este sistema es el equivalente dinámico del sistema VKF en escala 1:2.

#### 4.1. Fabricación.

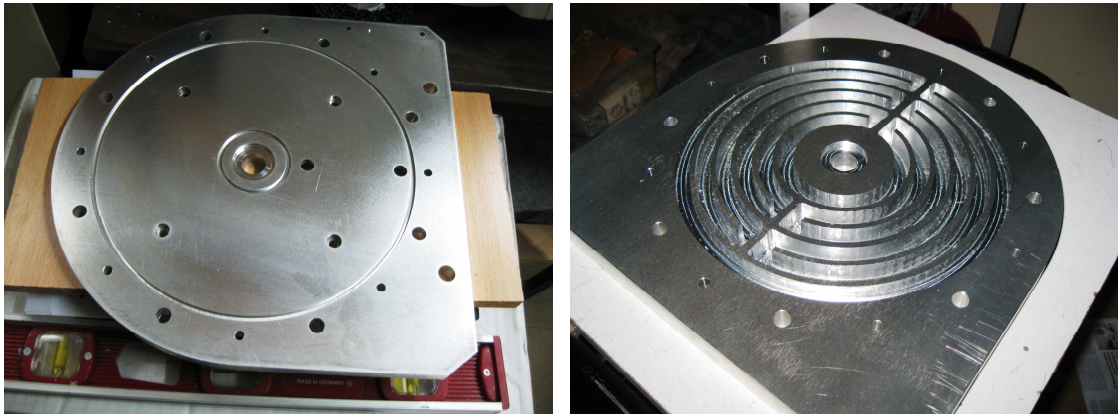
Una de las principales características de este montaje experimental, es que todas las partes mecánicas fueron fabricadas en el laboratorio. Para eso usamos una fresadora marca ARFA, modelo RF-31, y un torno marca JONNESWAY, modelo C06230A/914. Ambas máquinas se muestran en la figura 4.1.



**Figura 4.1.** Izquierda: Fresadora ARFA. Derecha: Torno JONNESWAY. Todas las piezas del montaje experimental se fabricaron con estas máquinas.

En términos generales, el mecanizado de las piezas mecánicas que componen el montaje experimental es relativamente sencillo. El trabajo más complicado

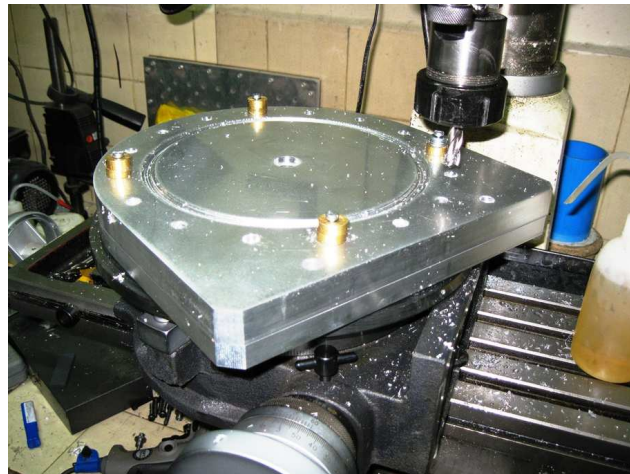
fue la fabricación de las placas laterales que sostienen el contenedor, en especial las que incluyen el serpentín del sistema de enfriamiento, dado el nivel de detalle (ver figura 4.2). Sin embargo, la facilidad de trabajo la otorgó el duraluminio, que al ser una aleación de aluminio con cobre, silicio, magnesio y manganeso, posee más resistencia mecánica (31-50 Kg/mm<sup>2</sup> con respecto al aluminio 25Kg/mm<sup>2</sup>) con una conductividad térmica un poco más baja que la del aluminio (164 W/mK con respecto al aluminio 209.3 W/mK). Estas placas se trabajaron en la fresadora usando un plato divisor y algunos soportes.



**Figura 4.2.** Izquierda: Soporte secundario terminado. Se aprecia los canales para los o'rings y el espacio para el rodamiento. Derecha: Soporte principal. Se aprecia el serpentín del sistema de refrigeración.

Las placas de soporte (principal y secundaria) se agrupan en dos pares. Esto permite ultimar detalles y perforaciones de sujeción con los juegos armados (figura 4.3).

Los demás componentes mecánicos del montaje experimental VKF H<sub>2</sub>O, como las bases de los sistemas fijo y móvil, rieles de desplazamiento, y la base del sistema, fueron más sencillos de fabricar y requirieron menos tiempo de trabajo.



**Figura 4.3.** Soporte lateral. Compuesto de una placa principal y una secundaria.

En el caso de los contenedores, debido a que en el mercado no hay cilindros de acrílico del espesor y diámetro que se necesita, se mandó a fabricar los tres cilindros, los que fueron moldeados en una matriz a partir de placas de acrílico de 8mm de espesor. Dado que la metodología usada es un tanto artesanal, los bordes de los cilindros presentaban algunas fallas de simetría, por lo que se

debió tornearse en el laboratorio cada cilindro para dejar los costados perfectamente paralelos.



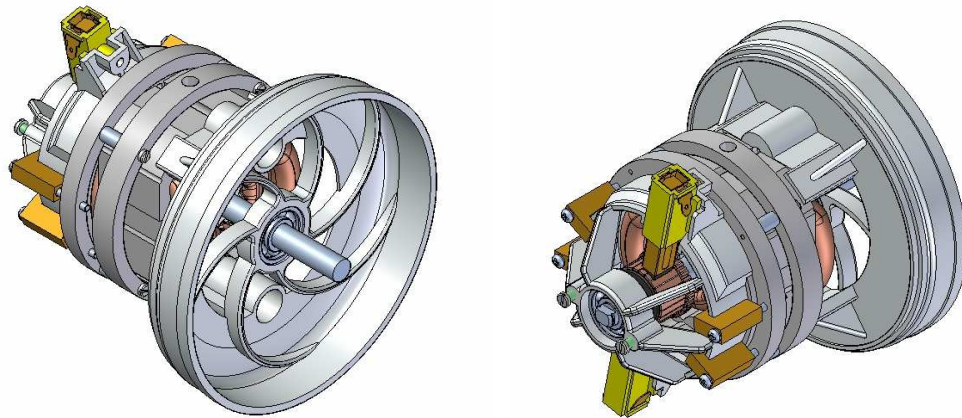
**Figura 4.4.** Contenedor de acrílico. Se aprecia la costura de unión de los extremos de la placa usada para moldear este contenedor.

Para fabricar el contenedor de la cámara de expansión del sistema de vacío, se adquirió un cilindro estándar de 82.5mm de diámetro y 3.2mm de espesor. Una vez cortados, fue necesario tornearse los costados para que quedaran paralelos, al igual que el contenedor principal.

En los motores, además de fabricar un sistema que lo soportase, fue necesario modificar la posición de las escobillas para poder controlar el motor. Para hacer esto, es necesario determinar en qué punto el momento magnético del rotor es



perpendicular al campo inducido. En general, para hacer que un motor de corriente alterna gire siempre en el mismo sentido (el motor de una encerradora por ejemplo), el momento magnético del rotor no se encuentra perpendicular al campo magnético de la bobina de campo, sino que existe un pequeño desequilibrio entre ambos para asegurar que el rotor gire siempre en el mismo sentido.

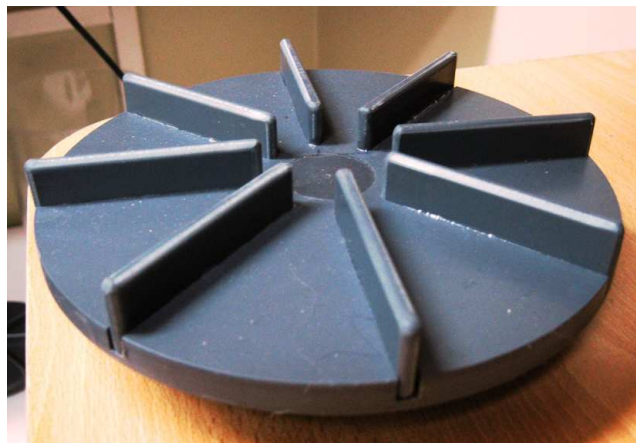


**Figura 4.5.** Vista del motor universal utilizado en el montaje VKF H<sub>2</sub>O.

Ahora, para obtener la perpendicularidad entre el momento magnético del rotor y el campo magnético inducido, se aplica una diferencia de potencial fija en la bobina de campo y en el inducido, de modo que el rotor gire. Mientras el rotor gira se ajustan los carbonillos de las escobillas, hasta que la frecuencia de giro

sea mínima. Al fijar la posición de las escobillas, el motor esta listo para ser controlado (figura 4.5).

Los agitadores se fabricaron en PVC (ver figura 4.6). En el disco se hicieron 8 ranuras de 5mm de ancho para encajar y pegar las 8 palas que transmitirán energía al fluido. En el centro de la cara opuesta a las paletas, se pega un cilindro de PVC de 30mm de diámetro que cumple la función de sujetar el eje de giro del agitador mediante tres prisioneros M3.

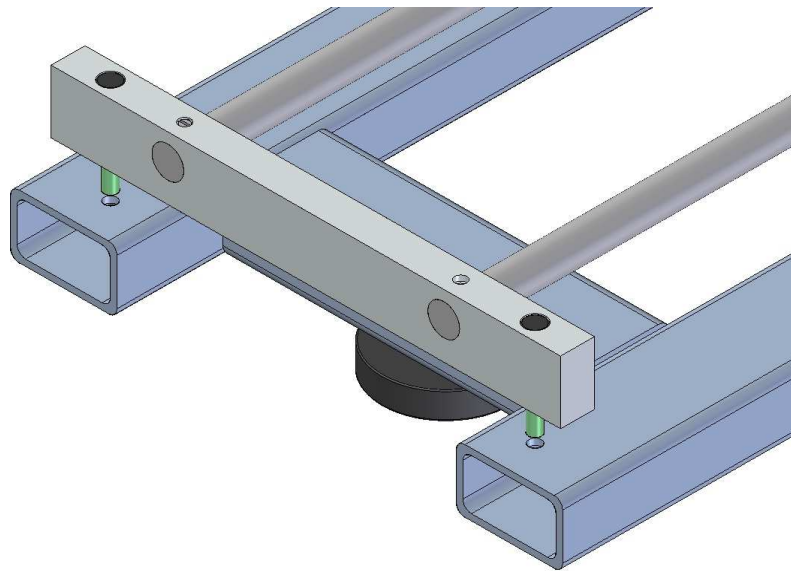


**Figura 4.6.** Paleta giratoria. Fabricada en PVC. Se aprecian algunas de las ranuras que permiten encajar las paletas que transfieren energía al fluido.

#### **4.2. Armado.**

Lo primero es armar la base del sistema. Con soldadura TIG, se unen los perfiles de acero pulido formando una estructura rígida como se aprecia en la figura 3.9. Luego, usando pernos, se monta el sistema de rieles y las bases de

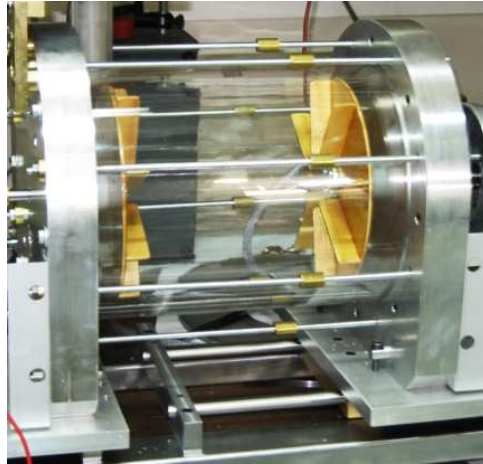
los sistemas fijos y móviles (ver figura 4.7). Es necesario verificar el correcto desplazamiento de la base del sistema móvil sobre los rieles antes de fijar los pernos.



**Figura 4.7.** Base del sistema VKF H<sub>2</sub>O. Tiene montado el sistema de rieles para el soporte móvil mediante pernos parker M6 x 30mm.

Al armar los soportes del contenedor, en las placas principales, se instaló el retén de nitrilo en el centro de las caras que están en contacto con el agua del contenedor. Estos retenedores cumplen la función de evitar la salida de agua desde el contenedor a través de las perforaciones hechas para los ejes de los agitadores. En las placas secundarias se instalan los o-rings que evitan fugas

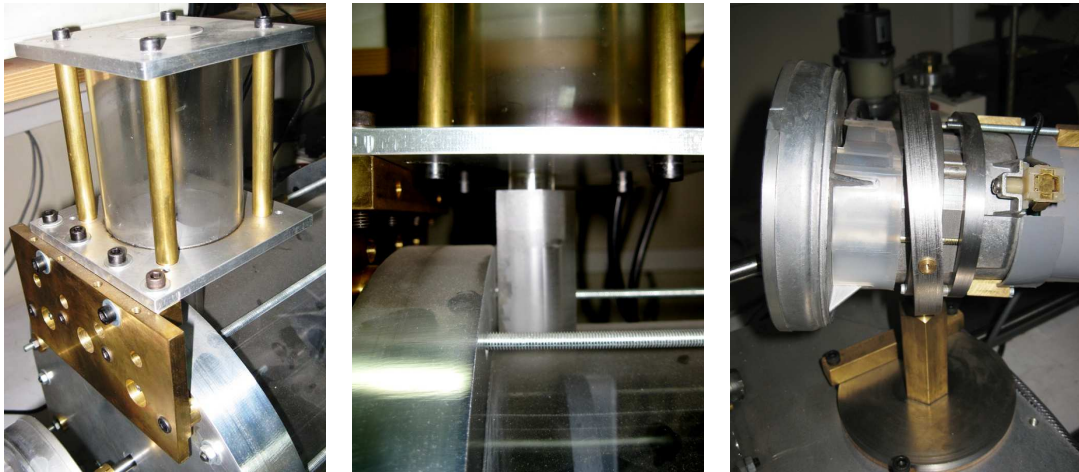
de agua desde el sistema de refrigeración, y el rodamiento, que facilita el giro del disco sin generar tensiones sobre el eje del motor (ver figura 3.4).



**Figura 4.8.** Sistema armado. Las placas sujetan el contenedor mediante barras con hilo tensionadas homogéneamente.

Las placas de soporte se montan en sus correspondientes bases mediante pasadores de acero y pernos perpendiculares a ellos. Luego se instalan los agitadores de modo que cada eje pase por su correspondiente retén y rodamiento, instalando luego los o'rings para evitar fugas por los bordes del contenedor. Al instalar el contenedor, se verifica que la entrada de agua se encuentre apuntando hacia arriba (perpendicular a la base del sistema). Usando barras con hilo (espárragos), coplas y tuercas, se presionan ambos soportes contra el contenedor, ajustando las tuercas de los espárragos para generar una

tensión aproximadamente homogénea. La figura 4.8 muestra esta parte del montaje experimental armado.

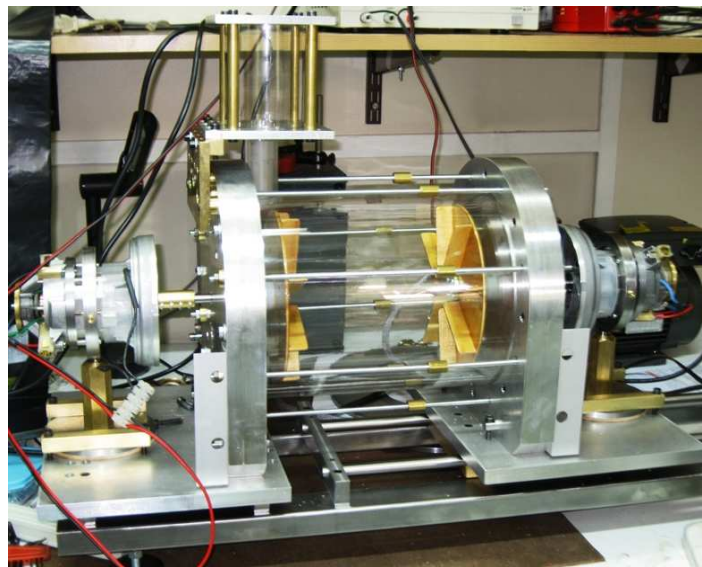


**Figura 4.9.** Izquierda: Sistema de vacío. Centro: ajuste de la cámara de expansión respecto a la entrada de agua del contenedor. Derecha: Motor universal montado su estructura de soporte. Se aprecia la camisa metálica que permite fijar las escobillas del motor.

Para armar el sistema de vacío, primero se instalaron los o’rings en las placas superior e inferior. Para cerrar el contenedor se usaron 4 barras de bronce que presionan ambas placas sobre el contenedor, y luego se instaló la placa de soporte hecha de latón. Esta placa de soporte permite unir el sistema de vacío al montaje experimental (ver figura 4.9, izquierda). Es necesario cerciorarse de que la entrada de agua del contenedor encaja correctamente en la placa inferior de la cámara de expansión (ver figura 4.9, centro).

Con el sistema ensamblado, se procede a instalar los motores. Cada motor se monta en su soporte a través de una camisa metálica en la que se fijan las escobillas del motor (ver figura 4.9). El soporte de cada motor se fija a su correspondiente base (fija y móvil), mediante barras de bronce. Pero antes de fijar, se alinea el eje del motor con el eje de giro de los agitadores. Ya ajustadas las posiciones de cada motor, se instala el acople de bronce que une el eje del motor con el eje de la paleta agitadora.

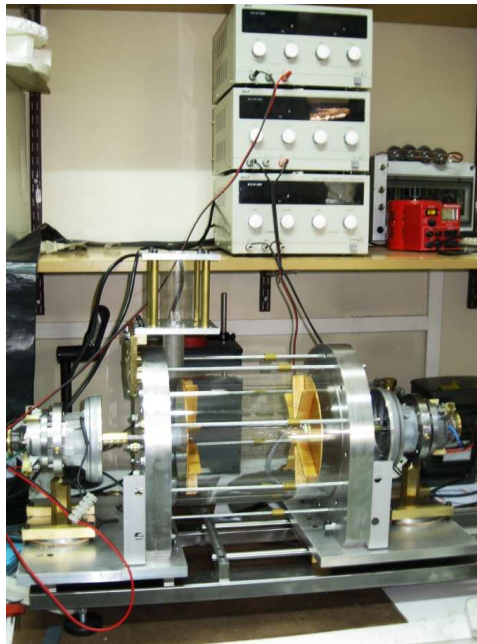
La figura 4.10 muestra el montaje experimental VKG H<sub>2</sub>O armado.



**Figura 4.10.** Montaje VKF H<sub>2</sub>O terminado.

#### 5.1. Pruebas de funcionamiento.

Con el sistema armado, se procedió a realizar pruebas de funcionamiento.

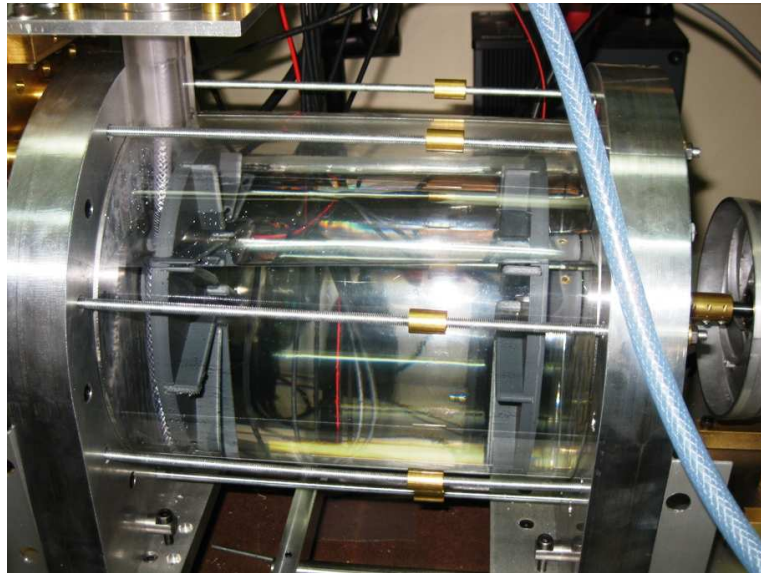


**Figura 5.1.** Sistema VKF H<sub>2</sub>O. Para alimentar los motores se usó fuentes de corriente para verificar funcionamiento.

Para alimentar los motores se usaron 3 fuentes de corriente. Una fuente se conectó a la bobina inducida del motor 1 (izquierda), la segunda fuente se conectó a la bobina inducida del motor 2, y la tercera fuente alimentó las

bobinas de campo de ambos motores en serie. El conectar ambas bobinas de campo sirve para que ambos motores trabajen bajo las mismas condiciones. Al activar las fuentes se verificó el funcionamiento de los motores. Se comprobó que las aspas girasen sin problemas, no mostrando signos de que el giro fue perturbado por alguna tensión producida por el retén, el rodamiento o el acople mecánico.

Posteriormente, se procedió a llenar el contenedor con agua desmineralizada para verificar que no aparecieran filtraciones desde el contenedor.



**Figura 5.2.** En el experimento se usa agua desmineralizada, que se introduce al contenedor a través de la cámara de expansión del sistema de vacío.



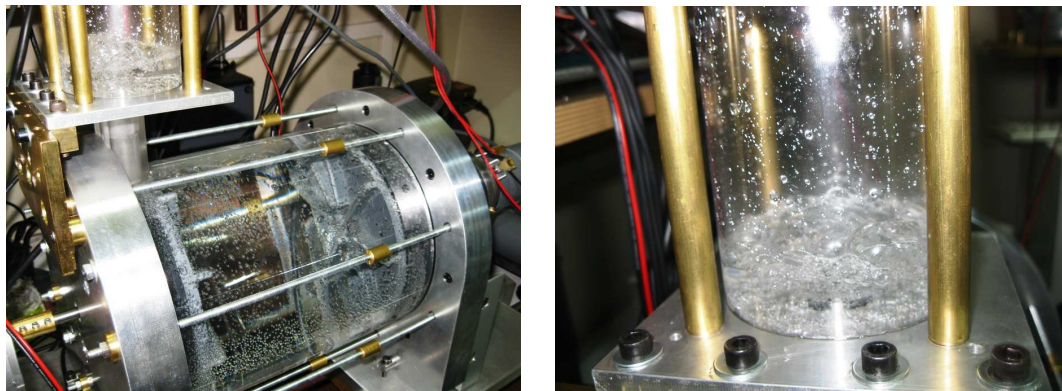
## **5.2. Mediciones.**

Antes de realizar las mediciones, es necesario preparar el sistema.

Primero, se llenó el contenedor de agua desmineralizada (figura 5.2).

En seguida, se procedió a desgasar el agua usando el sistema de vacío.

Durante el desgasamiento se activan los motores para ayudar al sistema a eliminar los gases disueltos en el agua. Recordemos que este proceso se lleva a cabo porque es necesario que el fluido sea incompresible.

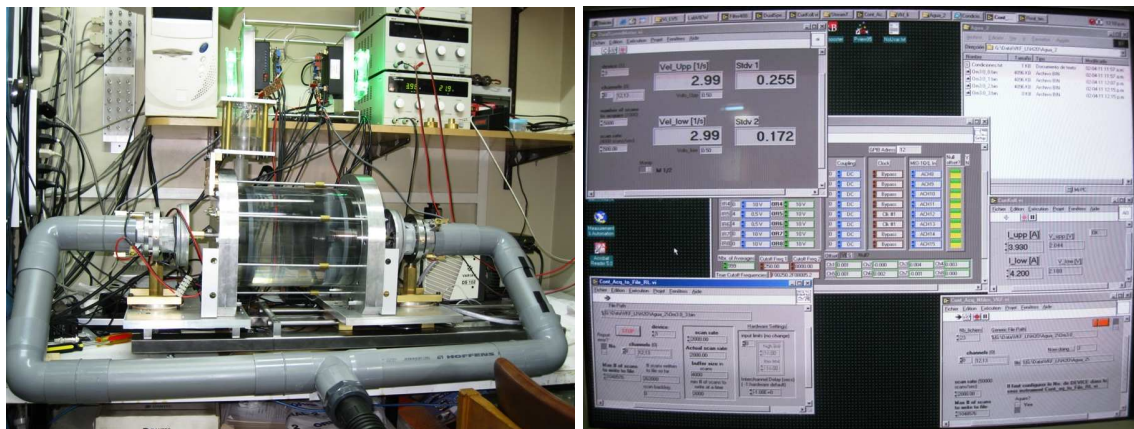


**Figura 5.3.** Izquierda: Aparición de burbujas en el sistema al desgasar el agua usando el sistema de vacío. Derecha: Detalles del burbujeo del agua en la cámara de expansión.

Una vez conseguido que el fluido sea incompresible, conectamos el sistema de medición y control.

Cada motor tiene acoplado a su eje un encoder óptico que genera 8000 pulsos por vuelta. Este encoder es conectado al filtro 488/8 para enviar la señal obtenida a una tarjeta A/D conectada a una computadora.

Usando los mismos amplificadores del sistema VKF, se pudo controlar los motores del sistema VKF H<sub>2</sub>O por corriente, permitiendo que el sistema trabaje a torque constante (figura 5.4, izquierda).

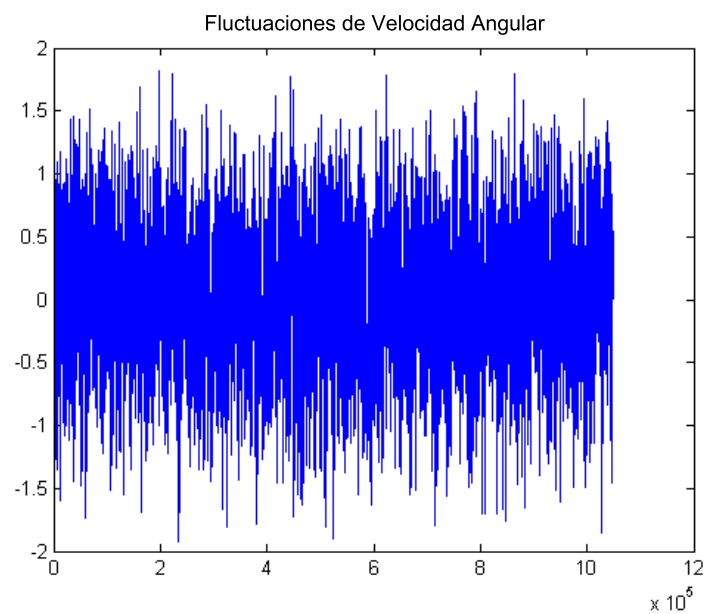


**Figura 5.4.** Izquierda: Sistema VKF H<sub>2</sub>O listo para realizar mediciones. En la parte superior se aprecian los amplificadores de corriente que alimentan y controlan los motores, que son los mismos amplificadores que se usan en el sistema VKF. Derecha: Mediante Lab VIEW se controla la corriente suministrada a los motores. Además graba los datos a 2000 ks/s en un total de 20 archivos.

Usando los módulos de trabajo diseñados en LabVIEW [11] por el profesor Raúl Labbé, podemos controlar la velocidad angular (figura 5.4, derecha) que

queremos que los motores posean, la cantidad de canales de transmisión de datos, la tasa de transmisión de datos, además de otras variables asociadas a las mediciones de fluctuación de velocidades angulares.

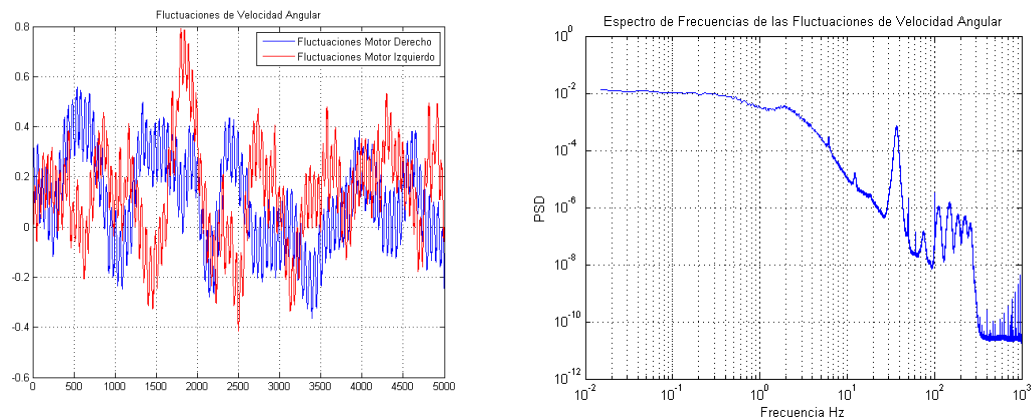
Los datos obtenidos presentan un perfil como el que se muestra en la figura 5.5.



**Figura 5.5.** Datos de las fluctuaciones de velocidad angular de 1 de los motores.

Ahora ya basta analizar los datos obtenidos y obtener las PDFs.

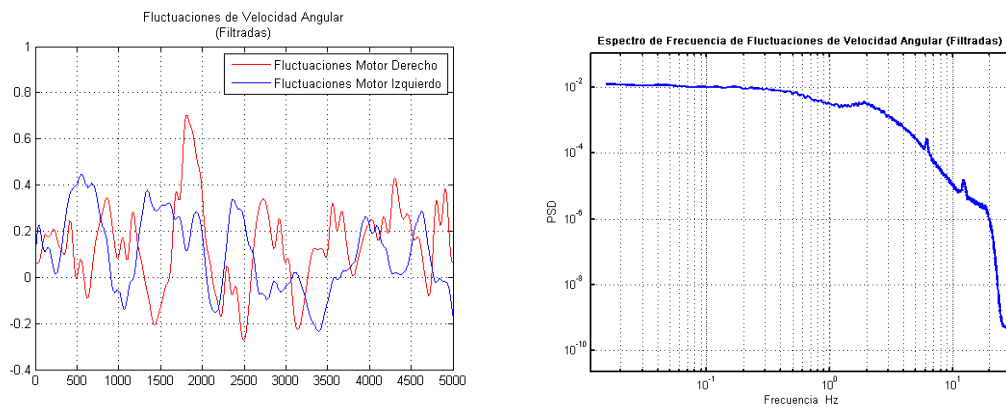
Los datos obtenidos para las fluctuaciones de velocidad angular se muestran en la figura 6.1.



**Figura 6.1.** Izquierda: Fluctuaciones de velocidad angular de ambos motores. Ambas señales presentan efecto cogging. Derecha: Espectro de frecuencias de uno de los motores. Hay que aplicar filtros de ruido para eliminar el efecto del cogging sobre la señal.

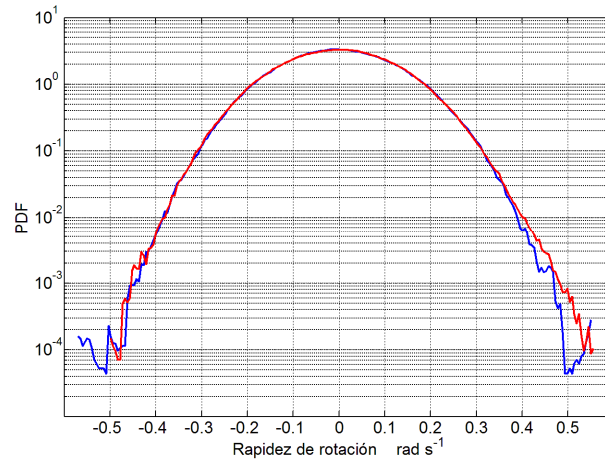
Ambas señales tienen mucho ruido. En este caso, el ruido predominante es una señal propia del motor asociada al torque de cogging. Este fenómeno radica en que el rotor está sometido a torques de detención para un cierto número de posiciones angulares, relacionadas con la reducción de reluctancia del circuito

magnético asociada a la presencia de las ranuras donde se alojan las bobinas. Si tratamos de obtener las PDF de esta señal, el efecto cogging provocará que la PDF se ensanche un poco, con algo de aumento de ruido en los extremos. Para reducir este efecto, los datos deben filtrarse con un corte en los 21Hz. Los datos filtrados se muestran en la figura 6.2.



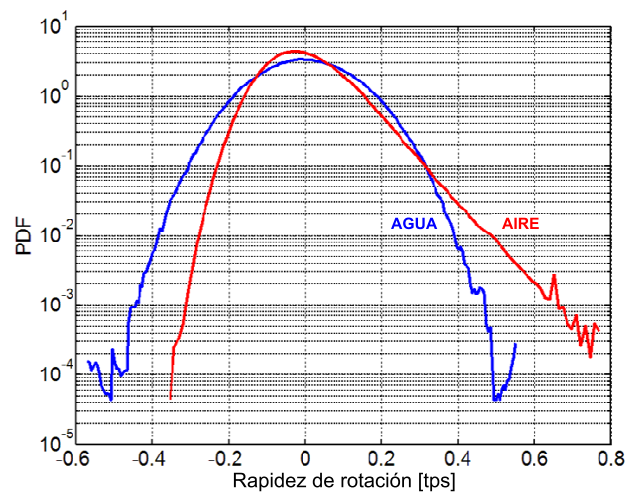
**Figura 6.2.** Izquierda: Fluctuaciones de velocidad angular de ambos motores sin cogging. Derecha: Espectro de frecuencias de uno de los motores con los filtros aplicados.

Finalmente, las PDFs obtenidas con el montaje VKF H<sub>2</sub>O se muestran en la figura 6.3.



**Figura 6.3.** PDF de cada motor. Ambas PDF muestran una fuerte simetría respecto al centro.

En la figura 6.4 se presentan las PDF de agua y del aire.



**Figura 6.4.** Comparación de la PDF en agua respecto a la PDF en aire.

La PDF obtenida en el agua es esencialmente gaussiana, mientras que la PDF en el aire muestra una pronunciada asimetría.

Las diferencias entre ambas PDF aún están en estudio. Se está preparando un documento para presentar las hipótesis que explicarían dichas diferencias.

El presente trabajo consistió en diseñar y fabricar un montaje experimental que permitiese realizar estudios de flujos rotatorios confinados llamados flujos de von Kármán. El montaje experimental se fabricó con los equipos de trabajo mecánico disponibles en el Laboratorio de Turbulencia.

De este trabajo se puede concluir que:

- Se diseñó y fabricó con éxito el sistema VKF H<sub>2</sub>O para estudiar flujos de von Kármán en agua, obteniendo al PDF en agua.
- Usando similitud dinámica y análisis dimensional, se determinó que la escala del nuevo montaje correspondía a 1:2 la escala del montaje original, usando el mismo número de Reynolds ( $Re \approx 150000$ ).
- Se estimó que el sistema de enfriamiento del montaje es capaz de remover el calor generado durante el funcionamiento de manera eficiente. Aun así, no hubo necesidad de usar el sistema de enfriamiento, puesto que en total los motores entregan 416W, y la estimación se basaba en que cada uno entregaba 1Kw de potencia.
- Se realizaron mediciones de fluctuación de velocidad angular usando los mismos componentes del sistema VKF. Las PDF's obtenidas con este



sistema son esencialmente gaussianas. Este resultado muestra que la estadística de fluctuaciones de potencia inyectada en flujos de von Kármán obtenida en agua es diferente de la que se obtiene si el fluido utilizado es aire.

- Se está trabajando en un escrito para dar a conocer las hipótesis respecto a las diferencias entre las PDF en agua y en aire.
- Como trabajo futuro, queda medir fluctuaciones de velocidad para las distintas razones de aspecto usando los otros 2 contenedores.

## REFERENCIAS

---

- [1] Davidson, Lars; "An Introduction to Turbulence Models"; Chalmers University of Technology; 2033.
- [2] J-F Pinton, P. Holdsworth and R. Labbé, "Power fluctuations in a closed turbulent shear flow", Phys. Rev. E, vol. 60, 3, 1999.
- [3] R. Labbé, J.F. Pinton and S. Fauve, "Power Fluctuations in Turbulent Swirling Flows", J. Phys. II France, 1099-1110, 1996.
- [4] J.H. Titon and O. Cadot, "The statistics of power injected in a closed turbulent flow: Constant torque forcing versus constant velocity forcing", Phys. Fluids, vol. 15, 625, 2003.
- [5] Sistema VKF para aire; Autor, Raúl Labbé M; Laboratorio de Turbulencia; Universidad de Santiago de Chile.
- [6] White, Frank M.; "Fluid Mechanics"; 4ª Edición; McGraw-Hill; 2002.
- [7] J.H. Titon and O. Cadot, "Global injected power statistics in a turbulent system: degrees of freedom and aspect ratio effect", Eur. Phys. J.B, 289-292, 2005.
- [8] [http://www.plastigen.cl/site/plasticos\\_ing16.html](http://www.plastigen.cl/site/plasticos_ing16.html)
- [9] [http://www.idealvac.com/files/brochures/Varian\\_DS102VanePump.pdf](http://www.idealvac.com/files/brochures/Varian_DS102VanePump.pdf)
- [10] M. Moran, H. Shapiro, B. Munson, D. DeWitt; "Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer"; John Wiley & Sons, Inc.; 2003.
- [11] <http://www.ni.com/labview/>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

- Figura 1.1.** Boceto de flujos turbulentos de Leonardo da Vinci (Circa 1500). El documento original se encuentra en el Museo Real de Londres. . . . . 1
- Figura 1.2.** Ejemplos de turbulencias. Izquierda: turbulencia en una nube generada por el paso de un avión. Centro: turbulencia generada por el flujo de aire caliente a través de aire frío. Derecha: Júpiter y su gran mancha roja. La atmósfera del planeta es muy turbulenta. . . . . 4
- Figura 1.3.** Esquema básico de flujos de Von Kármán. Un fluido entre dos discos que giran al interior de un cilindro. . . . .7
- Figura 2.1.** Sistema VKF. Este sistema permite realizar estudios de flujos de Von Kármán en aire. . . . . 11
- Figura 3.1.** Cilindros contenedores. Sus razones de aspecto son  $\kappa=2.5$ ,  $\kappa=1$  y  $\kappa=0.5$ . Hechos de Acrílico Transparente, permiten observar el comportamiento del agua durante el experimento. . . . .17
- Figura 3.2.** Sistema de soporte. Estas placas principales están hechas de Duraluminio y fueron maquinadas en el Laboratorio de Turbulencias de la Universidad de Santiago de Chile. . . . . 19

**Figura 3.3.** Arriba: Placa principal. Izquierda: Se muestra la cara que entra en contacto con el fluido. Derecha: Se muestra la cara con el serpentín para la circulación de agua de enfriamiento. Abajo: Placa secundaria. Izquierda: Se muestra la cara que cumple la función de tapa del serpentín. Derecha: Se muestra la cara exterior. . . . . 21

**Figura 3.4.** Placas de soporte principal y secundario. Entre estas placas se instalan 2 o’rings y un rodamiento. En la cara de la placa principal que está en contacto con el contenedor, se instala un o’ring y un retén. . . . . 22

**Figura 3.5.** Base del sistema fijo. Se aprecian los pasadores de anclaje para las placas de soporte, y las barras de soporte que se instalan en la base del montaje VKF H<sub>2</sub>O mediante pernos Parker M6 de 40mm. . . . . 24

**Figura 3.6.** Soporte Fijo. Se instala directamente sobre la base del sistema. En este soporte se instala el sistema de vacío. . . . . 25

**Figura 3.7.** Base del sistema móvil. Las barras de bronce que permite al sistema móvil deslizarse por los rieles de desplazamiento, permitiendo ajustar el montaje experimental a los diferentes contenedores. . . . .26

**Figura 3.8.** Soporte Móvil. Unas barras de bronce permiten desplazar este sistema sobre los rieles de acero-plata. . . . . 27

**Figura 3.9.** Base de soporte del sistema. Estructura hecha de perfiles de acero unidos con soldadura TIG. Posee rieles para el desplazamiento del soporte móvil. . . . .28

**Figura 3.10.** Sistema de refrigeración. El serpentín queda atrapado como un emparedado. Para evitar fugas de agua de instalan 2 o'rings de 3mm de espesor. . . . .30

**Figura 3.11.** Sistema de vacío. La cámara de este sistema permite conectar una bomba de vacío para poder sacar el gas diluido en el agua. . . . .31

**Figura 3.12.** Izquierda: Disco agitador. Está hecho de PVC debido a su bajo coeficiente de absorción. Derecha: Acople mecánico. Conecta el eje del agitador con el eje del motor. . . . . 33

**Figura 3.13.** Sistema Motor Agitador. El agitador está acoplado al eje del motor. A su vez el motor está montado en el soporte que permite ajustar su posición y altura. En la parte posterior del motor se aprecia el encoder óptico acoplado al eje del motor. . . . .34

**Figura 3.14.** Sistema VKF H<sub>2</sub>O. Este sistema es el equivalente dinámico del sistema VKF en escala 1:2. . . . .35

**Figura 4.1.** Izquierda: Fresadora ARFA. Derecha: Torno JONNESWAY. Todas las piezas del montaje experimental se fabricaron con estas máquinas. . . . . 36

<b>Figura 4.2.</b> Izquierda: Soporte secundario terminado. Se aprecia los canales para los o'rings y el espacio para el rodamiento. Derecha: Soporte principal. Se aprecia el serpentín del sistema de refrigeración. . . . .	37
<b>Figura 4.3.</b> Soporte lateral. Compuesto de una placa principal y una secundaria. . . . .	38
<b>Figura 4.4.</b> Contenedor de acrílico. Se aprecia la costura de unión de los extremos de la placa usada para moldear este contenedor. . . . .	39
<b>Figura 4.5.</b> Vista del motor universal utilizado en el montaje VKF H <sub>2</sub> O. . . . .	40
<b>Figura 4.6.</b> Paleta giratoria. Fabricada en PVC. Se aprecian algunas de las ranuras que permiten encajar las paletas que transfieren energía al fluido. . .	41
<b>Figura 4.7.</b> Base del sistema VKF H <sub>2</sub> O. Tiene montado el sistema de rieles para el soporte móvil mediante pernos parker M6 x 30mm. . . . .	42
<b>Figura 4.8.</b> Sistema armado. Las placas sujetan el contenedor mediante barras con hilo tensionadas homogéneamente. . . . .	43
<b>Figura 4.9.</b> Izquierda: Sistema de vacío. Centro: ajuste de la cámara de expansión respecto a la entrada de agua del contenedor. Derecha: Motor universal montado su estructura de soporte. Se aprecia la camisa metálica que permite fijar las escobillas del motor. . . . .	44
<b>Figura 4.10.</b> Sistema VKF H <sub>2</sub> O terminado. . . . .	45

**Figura 5.1.** Sistema VKF H<sub>2</sub>O. Para alimentar los motores se usó fuentes de corriente para verificar funcionamiento. . . . .46

**Figura 5.2.** En el experimento se usa agua desmineralizada, que se introduce al contenedor a través de la cámara de expansión del sistema de vacío. . . . . 47

**Figura 5.3.** Izquierda: Aparición de burbujas en el sistema al desgasar el agua usando el sistema de vacío. Derecha: Detalles del burbujeo del agua en la cámara de expansión. . . . .48

**Figura 5.4.** Izquierda: Sistema VKF H<sub>2</sub>O listo para realizar mediciones. En la parte superior se aprecian los amplificadores de corriente que alimentan y controlan los motores, que son los mismos amplificadores que se usan en el sistema VKF. Derecha: Mediante Lab VIEW se controla la corriente suministrada a los motores. Además graba los datos a 2000 ks/s en un total de 20 archivos. . . . . 49

**Figura 5.5.** Datos de las fluctuaciones de velocidad angular de 1 de los motores. . . . .50

**Figura 6.1.** Izquierda: Fluctuaciones de velocidad angular de ambos motores. Ambas señales presentan efecto cogging. Derecha: Espectro de frecuencias de uno de los motores. Hay que aplicar filtros de ruido para eliminar el efecto del cogging sobre la señal. . . . . 51

**Figura 6.2.** Izquierda: Fluctuaciones de velocidad angular de ambos motores sin cogging. Derecha: Espectro de frecuencias de uno de los motores con los filtros aplicados. . . . .52

**Figura 6.3.** PDF de cada motor. Ambas PDF muestran una fuerte simetría respecto al centro. . . . .53

**Figura 6.4.** Comparación de la PDF en agua respecto a la PDF en aire. . . . .53

**Figura A.I.** Esquema básico de la transferencia de calor desde el fluido al sistema de refrigeración. . . . .  
. . . . .56



---

**A1- Estimaciones sistema de refrigeración.**

Para determinar si el sistema de refrigeración diseñado es capaz de mantener el agua por debajo de los 60°C, se sobreestimarán algunas variables como la frecuencia de rotación del agua y la potencia entregada al fluido.

Pero antes debemos determinar cuanta potencia real se entrega al sistema.

En el montaje experimental VKF [5], la potencia entregada por cada motor es aproximadamente  $P_{air} \approx 427.1913(W)$ , y el torque generado por el motor es

$\tau_{air} \approx 2.66(Nm)$ , y la frecuencia promedio  $\langle f \rangle \approx 25.56(Hz)$ .

Usando análisis dimensional estimar el torque y la potencia del sistema VKF H<sub>2</sub>O.

Sabemos que el torque es  $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$ , y dimensionalmente  $[\tau] = [r][F] = ML^2T^{-2}$ .

El experimento depende de  $\rho$ ,  $f$  y  $r$ , por lo que  $[\rho] = ML^{-3}$ ,  $[f] = T^{-1}$  y  $[r] = L$ .

Así, el torque en función de  $\rho$ ,  $f$  y  $r$  es:

$$\tau = cte \cdot \rho \cdot f^2 \cdot r^5 \quad (a1)$$

Ahora, para relacionar  $\tau_{air}$  y  $\tau_{water}$ , recordando que  $r_{air} = 2r_{water}$  y  $Re_{air} = Re_{water}$ ,

hacemos:

$$\frac{r_{water}^2 f_{water}}{\nu_{water}} = \frac{r_{air}^2 f_{air}}{\nu_{air}} \Rightarrow f_{water} = 4 f_{air} \frac{\nu_{water}}{\nu_{air}} \quad (a2)$$

En la ecuación (a1) para aire reemplazamos  $r_{air} = 2r_{water}$  obteniendo

$\tau_{air} = cte \cdot \rho_{air} \cdot f_{air}^2 \cdot 32 \cdot r_{water}^5$ . Como  $\tau_{water} = cte \cdot \rho_{water} \cdot f_{water}^2 \cdot r_{water}^5$ , despejamos

$r_{water}^5$  e igualamos usando la ecuación (a2). De aquí obtenemos que:

$$\tau_{water} = \frac{16}{32} \left( \frac{\nu_{water}}{\nu_{air}} \right)^2 \frac{\rho_{water}}{\rho_{air}} \tau_{air} \quad (a3)$$

Dando valores a las densidades y a las viscosidades cinemáticas, la relación entre  $\tau_{air}$  y  $\tau_{water}$  es:

$$\tau_{water} \approx 1.8326 \cdot \tau_{air} \approx 4.87(Nm) \quad (a4)$$

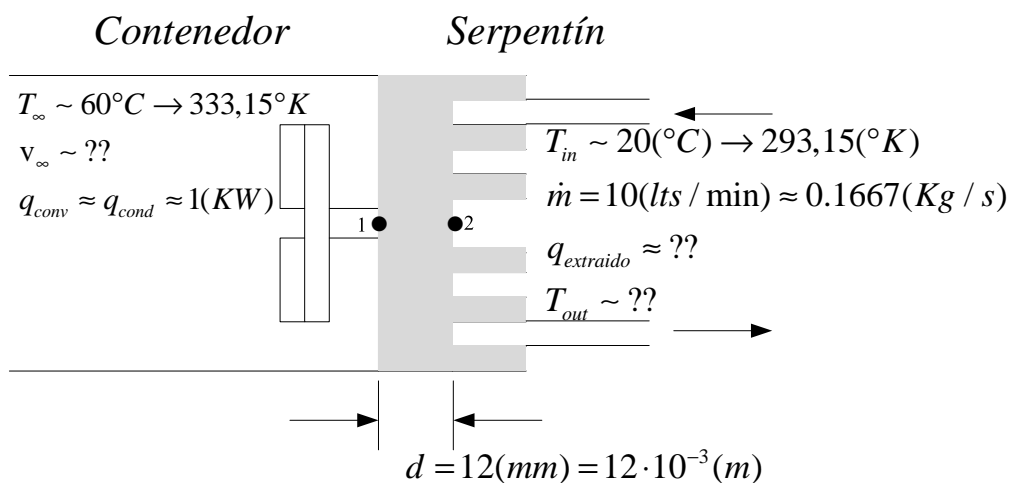
A partir de las ecuaciones (a2) y (a4) obtenemos una potencia por motor de:

$$P_{water} \approx 208.01(W) \quad (a5)$$

Aproximadamente, al sistema se inyectan 416W.

Sin embargo, para verificar que el sistema de enfriamiento sea capaz de extraer el calor necesario desde el fluido, supondremos que la potencia inyectada es de 1KW, y que los discos giran a una frecuencia de 10Hz.

El marco general de interacción entre los agitadores y el fluido es el siguiente: Los motores inyectan energía al fluido, y éste disipa la energía transfiriéndola de mayores escalas a menores escalas (cascada de Richardson). Como la inyección de energía es constante, el fluido transforma la energía en calor. Este calor se transfiere mediante convección a las superficies de las placas laterales que sostienen el contenedor. Ese calor se transmite mediante conducción a través de la placa, y nuevamente por convección al agua del sistema de refrigeración.



**Figura A.I.** Esquema básico de la transferencia de calor desde el fluido al sistema de refrigeración.

Entonces, lo que necesitamos saber es a qué temperatura sale el agua del sistema de refrigeración, y la cantidad de calor que es capaz de extraer.

Como primer punto, supondremos que la temperatura del agua es 60°C. También supondremos que no hay pérdidas de calor hacia el ambiente, y que la transferencia de calor desde el agua al sistema de refrigeración es constante.

De la transferencia de calor entre un fluido y una superficie [10] tenemos:

$$q_{conv} = h \cdot S \cdot (T_{\infty} - T_s) \quad (a6)$$

, donde  $h$  es el coeficiente de convección,  $S$  es la superficie en contacto con el fluido,  $T_{\infty}$  es la temperatura del fluido, y  $T_s = T_1$  es la temperatura de la superficie en contacto con el fluido.

El fluido está en contacto con una superficie  $S = S_1 = 0.0333(m^2)$  . Así que para determinar la temperatura de la superficie 1 (ver figura A.I), necesitamos el coeficiente de convección  $h$  . Este coeficiente se puede obtener del número de Nusselt, que se define como la razón entre la transferencia de calor por convección y conducción  $Nu_L = hL / k$  , y entrega una medición del coeficiente de convección. El número de Nusselt es un parámetro local, y se puede obtener mediante una aproximación numérica que depende del número de Reynolds y el número de Prandtl. Como ya sabemos, el número de Reynolds es la razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de un fluido, mientras que el número de Prandtl es un parámetro adimensional que entrega una medición

relativamente eficiente del transporte de momentum y de energía. Entonces, el número de Nusselt se obtiene de la siguiente relación:

$$Nu_L = 0.0296 \cdot Re_L^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad (a7)$$

El número de Reynolds depende de la velocidad característica del flujo, de la distancia característica que recorre el flujo y de la viscosidad cinemática. Como tenemos un flujo confinado que rota en un contenedor, la velocidad característica será la velocidad angular del fluido. Entonces  $Re = 1.09 \times 10^6$ ,  $Pr = 2.88$ , obteniendo  $Nu = 2.85 \times 10^3$ . Como el agua tiene un  $k = 0.670 (W / m^{\circ}K)$ , obtenemos el coeficiente de convección  $h = 2.12 \times 10^4 (W / m^2 \cdot K)$ . Usando (a6), obtenemos que la temperatura en la superficie 1 es:

$$T_{s1} = 58.16(^{\circ}C) \quad (a8)$$

Ahora debemos obtener la temperatura en la superficie 2, usando transferencia de calor por conducción:

$$q_{cond} = - \frac{\kappa_{al} S (T_{s2} - T_{s1})}{d} \quad (a9)$$

Suponiendo que  $q_{conv} \sim q_{cond}$ , con  $\kappa_{al} = 209.3(W/m^{\circ}K)$ , y  $S = S_1 = S_2 = 0.0333(m^2)$ , la temperatura en la superficie 2 es:

$$T_2 = 56.92(^{\circ}C) \quad (a10)$$

Ahora veamos el serpentín. El serpentín tiene una sección rectangular de 10mm de ancho y 15mm de profundidad, con un largo estimado de 1356mm. El agua entra al sistema con una temperatura  $T_{in} \approx 20^{\circ}C$  a una tasa de 10 litros por minuto ( $\dot{m} \approx 0.1667(Kg/s)$ ). La capacidad calórica del agua es  $C_p = 4178(J/Kg^{\circ}K)$ .

Si aproximamos la sección transversal del serpentín a un tubo de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro (considerando que el agua entra al serpentín a través de una cañería de  $\frac{1}{2}$ "), con un perímetro de 0.0393m, podemos usar la siguiente relación:

$$\frac{T_s - T_{out}}{T_s - T_{in}} = Exp\left(-\frac{Plh}{\dot{m}C_p}\right) \quad (a11)$$

, donde  $T_s$  es la temperatura de la superficie en contacto con el serpentín por donde ingresa el calor proveniente del contenedor de agua;  $T_{in}$  y  $T_{out}$  son las

temperaturas del agua que ingresa y sale del sistema de refrigeración;  $P$  es el perímetro de la sección transversal del canal del sistema de refrigeración;  $l$  es el largo del serpentín;  $h$  es el coeficiente de convección;  $\dot{m}$  es el flujo de agua en el serpentín, y  $C_p$  es la capacidad calórica del agua. La ecuación (a11) representa la distribución de temperatura media en un tubo, de ahí que aproximamos el canal del serpentín a un tubo de  $\frac{1}{2}$ ".

Sabemos que  $T_s = 56.92(^{\circ}C)$ ,  $T_{in} \approx 20^{\circ}C$ ,  $P = 39.3(mm)$ ,  $l = 1356(mm)$ ,  $\dot{m} \approx 0.1667(Kg / s)$  y  $C_p = 4178(J / Kg^{\circ}K)$ . Falta obtener  $h$ . Para determinar este valor usamos la ecuación (a7), sólo que en este caso, el número de Reynolds es  $Re = 4\dot{m} / \pi D \mu = \rho u D / \mu$  para tubos. Entonces, tenemos  $Re = 1.92 \times 10^4$  y  $Pr = 4.62$ , obteniendo  $Nu = 113.25$ . Esto nos entrega un  $h = 4.47 \times 10^3 (W / m^2 \cdot K)$ .

Reemplazando en estos en la ecuación (a11), obtenemos que el agua sale del sistema de refrigeración a una temperatura  $T_{out} \approx 33^{\circ}C$ .

Ahora, como todos los parámetros están sobredimensionados, en condiciones normales de operación, el agua del contenedor se mantendrá por muy debajo de los  $60^{\circ}C$ .

Inclusive, durante las pruebas no fue necesario activar el sistema de refrigeración. Por sí solo, el sistema mantuvo el agua a no más de  $35^{\circ}C$ .