

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL

---

# PROYECTO SEMESTRAL

MECÁNICA DE FLUIDOS – ICH1104

---

Profesores:

Wernher Brevis

Rodrigo Cienfuegos

Leandro Suarez

Karina Soto

29 de junio de 2022

# Open Sourced Drifter Imprimible en Plástico Reciclado

Torres Fernández, Paula Andrea  
patorres8@uc.cl

Soto Gomez, Marcela Antonia  
masoto22@uc.cl

Saez Martinez, Rodrigo Ignacio  
risaez@uc.cl

Iruretagoyena Oliveri, Diego Iñaki  
diiru@uc.cl

30 de junio de 2022

## Resumen

Los **drifters** son instrumentos flotantes, cuya principal función es medir en cuerpos de aguas las trayectorias lagrangianas sobre la superficie libre.

Estos equipos contienen en su interior instrumentos para medir su ubicación en tiempo real, y muchas veces tienen implementos para realizar mediciones adicionales, tales como de temperatura, salinidad, entre otros.

Para cumplir su objetivo, los drifters deben ser estables, flotar y ser simétricos respecto de su eje vertical. En este informe se propone un **drifter imprimible con impresora 3D**, liberando los archivos originales de forma gratuita con el fin de aportar a la comunidad de investigación. La estructura del drifter busca maximizar el esfuerzo viscoso del agua sobre el aparato al contar con cuatro aspas con forma de cuboide rectangular, unidas por un cilindro macizo, además de una cápsula impermeable en donde se pueden colocar instrumentos de medición sin arriesgar comprometerlos.



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Hipótesis . . . . .	5
2.2. Objetivos . . . . .	5
2.3. Principios Físicos . . . . .	5
2.4. Análisis Estabilidad y Flotabilidad . . . . .	6
2.5. Fuerza de arrastre . . . . .	7
<b>3. Metodología</b>	<b>8</b>
<b>4. Resultados y conclusiones</b>	<b>10</b>
<b>5. Bibliografía</b>	<b>11</b>

# 1. Introducción

Los **drifters** son instrumentos flotantes, cuya principal función es medir, en cuerpos de agua, las trayectorias lagrangianas sobre la superficie libre. Estos equipos contienen en su interior instrumentos para determinar su ubicación en tiempo real, además de contar frecuentemente con implementos para realizar mediciones adicionales, tales como temperatura, salinidad, entre otras.

En cuanto a sus usos, los drifters poseen gran utilidad para la comunidad científica. Esto porque, los datos requeridos de los cuerpos de agua como océanos y mares ha ido creciendo en el tiempo con el fin de predecir su evolución y poder preservar la biodiversidad. Ante esta problemática, los buques de investigación representan un elevado coste y por consecuencia otros instrumentos de medición se han incorporado. Entre ellos se encuentran los drifters, que poseen en comparación un bajo costo, son versátiles y fáciles de manipular, siendo utilizados en investigación climática, seguimiento de derrames de petróleo u operaciones de búsqueda y rescate, encontrándose actualmente una amplia gama de drifters comerciales <sup>1</sup>. Para algunos de los usos mencionados anteriormente, es necesaria la medición de corriente oceanográfica, donde se complementa con drifters, dado que esta última es espacialmente compleja de realizar y para obtener los datos, serían necesarios un gran número de medidores de corrientes fijos en un solo punto<sup>2</sup>.

En orden de cumplir su objetivo, los drifters deben ser estables, flotar y ser simétricos respecto de su eje vertical. Asimismo, se han incorporado nuevas tecnologías a los mismos según su uso, tales como el rastreo en tiempo real por medio de GPS, convertidores mecánicos de oscilaciones (KEH), almacenadores de energía (ESE), entre otros; lo que aumenta su costo. Esto se ha sumado al auge de acceso a hardware (incluyendo información como código arduino), potenciando así el desarrollo de tecnologías de bajo costo (low cost). De esta forma, quienes gustan construir sus propios instrumentos actualmente pueden hacerlo a un menor precio <sup>3</sup>. Las ventajas de estos instrumentos no se limitan solo a ampliar la cantidad de datos que pueden obtener científicos, sino que también han acercado las ciencias a la población.

En este informe se propone un **drifter imprimible con impresora 3D**, liberando los archivos originales de forma gratuita con el fin de aportar a la comunidad de investigación. Esto tiene por objetivo reducir los costos y tiempos de los investigadores al ofrecer una solución hecha a medida y fácilmente reproducible al ser **Open Source**. Dentro de los resultados obtenidos gracias a este estudio, están encontrar los centros de gravedad y carena necesarios para cumplir con la condición de estabilidad de un drifter imprimible y la fuerza de arrastre que se ejerce sobre este en un canal turbulento.

---

<sup>1</sup>Matias Carandell et al., *Design and Testing of a Kinetic Energy Harvester Embedded Into an Oceanic Drifter*, (IEEE Sensors Journal 20, n.º 23, diciembre de 2020), <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2976517>.

<sup>2</sup>W. E. Schmidt et al., *A GPS-Tracked Surf Zone Drifter\**, (Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 20, n.º 7, julio de 2003) 1069

<sup>3</sup>Rolf Hut, Thanda Thatoe Nwe Win y Thom Bogaard, *Easy to build low-power GPS drifters with local storage and a cellular modem made from off-the-shelf components*, (Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems 9, n.º 2 (noviembre de 2020) 435

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Hipótesis

Como hipótesis de esta investigación se plantea que la estructura compuesta por un compartimiento flotante, acoplado vía rosca a cuatro aspas que maximizan el efecto del perfil de velocidades presentes en el fluido, es **efectiva** en su propósito al cumplir con las condiciones de estabilidad, flotabilidad y resistencia a esfuerzos de corte moderados.

### 2.2. Objetivos

- Crear un drifter que satisfaga condiciones de estabilidad, optimizando sus materiales y dimensiones.
- Cumplir condiciones de flotabilidad.
- Determinar experimentalmente la fuerza de arrastre del drifter desarrollado.
- Explorar límites de resistencia a peso acarreado por las aspas.
- Explorar límites de resistencia a colisiones o esfuerzos de corte externos.
- Crear un diseño fácilmente reproducible y de bajo costo.

### 2.3. Principios Físicos

Para la realización de este informe, se utilizaron principalmente los principios de flotación, equilibrio y fuerza de arrastre. El primero, denominado flotación o empuje, corresponde al peso del volumen de fluido desplazado y actúa en el centro de gravedad de este, el centro de carena. La fórmula para calcular la fuerza de empuje del cuerpo sumergido esta descrita por la siguiente ecuación:

$$F_{\text{empuje}} = V_{\text{carena}} \cdot \rho_{\text{líquido}} \cdot g \quad (1)$$

Asimismo, el equilibrio o estabilidad del cuerpo flotante, alude a la condición  $\vec{E} + \vec{W} = 0$ , vale decir, que la suma del empuje y el peso de este sea nula <sup>4</sup>. A partir de lo anterior, se determina que si el centro de la carena se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo total, frente a pequeñas perturbaciones en el cuerpo, el cuerpo tiende a recuperar su estado natural. Esto indica que el cuerpo se encuentra en un equilibrio estable.

También, se define la fuerza de arrastre  $F_D$  como la fuerza experimentada por un objeto debido al movimiento a través de un fluido, ya sea en un canal o una tubería. La ecuación de la fuerza de arrastre queda definida como:

$$F_D = c_D A \frac{\rho V^2}{2} \quad (2)$$

Se tiene  $c_D$  como el coeficiente de arrastre a la cual esta sujeta el cuerpo.  $A$  representa el área del cuerpo sujeto al flujo. En este proyecto, se va a considerar este área como el área

---

<sup>4</sup>B. L. Fernandez, *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. (4ta Edición, Ediciones Universidad, 2005).

transversal del drifter.  $\rho$  corresponde a la densidad del fluido y  $V$  corresponde a la velocidad que experimenta el flujo. Debido a que se tiene un flujo turbulento, se procede a calcular el promedio de las velocidades que influyen sobre el área transversal del cuerpo. Para ello, se entrega un perfil de velocidad  $u(h)$ , el cual depende de una altura  $h$  comprendida entre 0,01 metros y 0,6 metros desde el suelo del canal. El perfil de velocidad está definido por la siguiente ecuación:

$$u(h) = -0,194h^2 + 0,288h + 0,186 \quad (3)$$

El promedio de la velocidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\int u(h)dh}{\int dh} \quad (4)$$

## 2.4. Análisis Estabilidad y Flotabilidad

En este caso se desprecian las aspas dado que el peso no es significativo. Además, se realiza un promedio simple entre el radio superior e inferior del cono para simplificar la figura y trabajar esta como cilindro.

El radio grande tiene un valor de 0,1 metros, mientras que el radio pequeño tiene un valor de 0,02 metros. Luego, el promedio de los radios es de 0,06 metros. La altura total, despreciando las aspas, es de 0,22 metros. Debido a que el cuerpo es simétrico en el eje  $x$  e  $y$ , se tiene que tanto el centro de gravedad como de carena, en un principio, se encuentra en el centro del cuerpo. El drifter tiene un peso másico de 0,7 Kg aproximadamente.

El centro de gravedad del cuerpo se encuentra en la mitad, a una profundidad de 0,11 metros a partir del tope del cuerpo. Se estima que 0,06 metros del cuerpo se encuentra fuera del líquido, mientras que 0,16 metros están sumergidos. De acuerdo con lo anterior, el centro de gravedad se encuentra a 0,05 metros de profundidad bajo el agua. Por otra parte, el centro de la carena se calcula como el centroide de la figura sumergida. Este se ubica a 0,08 metros de profundidad. Por definición de equilibrio estable, se tiene que el centro de gravedad del cuerpo debe estar por debajo del centro de carena del cuerpo sumergido. De esta forma, si existe una pequeña perturbación en el cuerpo, este intentaría volver a su posición inicial. En principio esto no ocurre en el drifter, presentando problemas de estabilidad.

Para solucionar el problema de equilibrio, se decidió agregar un cilindro de radio igual a 0,03 metros, con una altura de 0,4 metros y con un peso másico de 0,5 Kg debajo del drifter, para modificar los centros de gravedad y de carena, cumpliendo así con la condición de estabilidad. El nuevo centro de gravedad debe estar ubicado justo en la mitad del peso del cuerpo, es decir, a los 0,6 Kg. Para ello, se realiza el siguiente cálculo:

$$C_g = \frac{0,6(Kg)}{0,7(Kg)} \cdot 0,22(m) = 0,189(m)$$

El nuevo centro de gravedad  $C_g$  está ubicado a los 0,19 metros de distancia desde el tope del cuerpo. Ya que, solo 0,06 metros del cuerpo se encuentran sobre la superficie del agua, el centro de gravedad  $C_g$  se encuentra a los 0,13 metros de profundidad.

Respecto al centro de carena  $C_c$ , se debe calcular el centro de gravedad del nuevo cuerpo sumergido. Para ello, se debe determinar cuanto es la fuerza de empuje que se desplaza con este nuevo cilindro incorporado al drifter.

La fuerza de empuje de este cuerpo sumergido se calcula como:

$$F_{\text{empuje drifter}} = \pi(0,06(m))^2(0,16(m)) \cdot 1000\left(\frac{Kg}{m^3}\right) \cdot 9,81\left(\frac{m}{s^2}\right) = 17,75(N)$$

La fuerza de empuje del peso másico agregado se calcula como:

$$F_{\text{empuje drifter}} = \pi(0,03(m))^2(0,04(m)) \cdot 1000\left(\frac{Kg}{m^3}\right) \cdot 9,81\left(\frac{m}{s^2}\right) = 1,11(N)$$

Luego, se tiene que el centro de gravedad de la carena se encuentra cuando el cuerpo sumergido ejerce una fuerza de empuje igual a 18,86 Newton. Esto ocurre cuando el peso másico del cuerpo sumergido es igual a la mitad de 1,92 Kg, es decir, 0,96 Kg. Para determinar cual es la profundidad en que esto se cumple, se realiza el siguiente cálculo:

$$C_c = \frac{0,96(Kg)}{1,81(Kg)} \cdot 0,16(m) = 0,085(m)$$

Finalmente, se tiene que el centro de la carena  $C_g$ , se ubica a los 0,085 metros de profundidad. Entonces, debido a que el centro de gravedad, ubicado a los 0,13 metros de profundidad, se encuentra por debajo del centro de la carena, se cumple la condición de estabilidad.

## 2.5. Fuerza de arrastre

Para el cálculo de la fuerza de arrastre, se considera solo el momento en que la parte del drifter está sumergida y quieta. Para simplificar los cálculos, se utiliza el área transversal de las aspas en contacto con el flujo del fluido. El área transversal tiene una medida igual a 0,0324 metros cuadrados. Se utiliza un  $\rho$  igual a  $1000\frac{Kg}{m^3}$ . Para el coeficiente de arrastre  $c_D$ , se utiliza un valor igual a 1.17, el cual corresponde al coeficiente de arrastre de una placa tridimensional perpendicular al flujo del fluido <sup>5</sup>. En tanto, para el cálculo de la velocidad, se tiene que el comienzo de la aspa se encuentra a los 0,26 metros de distancia con el suelo, y el término a los 0,44 metros de distancia del fondo del canal. Con la información anterior, se puede calcular la velocidad  $V$  como:

$$V = \frac{\int_{0,26}^{0,44} u(h)dh}{\int_{0,26}^{0,44} dh} = 0,263\left(\frac{m}{s}\right) \quad (5)$$

Reemplazando los valores obtenidos para la ecuación de la fuerza de arrastre, se tiene que:

$$F_D = 1,17 \cdot 0,0324(m^2) \frac{1000\left(\frac{Kg}{m^3}\right) \cdot 0,263^2\left(\frac{m}{s}\right)^2}{2} \quad (6)$$

Finalmente, el valor de la fuerza de arrastre es:

$$F_D = 1,311(N) \quad (7)$$

---

<sup>5</sup>Sighard F. Hoerner, *FLUID-DYNAMIC DRAG* (Author, 1965), 3-17.

### 3. Metodología

La decisión de diseño del drifter, considera la propuesta realizada por Meyerjürgens, Wolff, Badewien y Zielinski <sup>6</sup>, quienes desarrollaron una estructura de cuerpo flotante pequeño, que permitiera su despliegue en aguas con baja profundidad. Además de ser en general ligero y minimizar el espacio de almacenamiento para permitir una fácil manipulación.

La gracia de la estructura propuesta en esta investigación es poder contar con un compartimiento sellable que proteja los instrumentos y maximizar el área afectada por los perfiles de velocidad en todas las direcciones. Al ser cuatro aspas de igual forma, el dispositivo reacciona rápidamente a cambios bruscos de las líneas de corriente del flujo en que está inmerso.

Dado lo anterior, se escoge este modelo para incentivar la estructura del drifter desarrollado en el presente informe. Como se mencionó en el apartado 2,4 Análisis de Estabilidad y Flotabilidad, se decide agregar un peso en la parte inferior del drifter para lograr cumplir con las condiciones de estabilidad. En la siguiente figura se puede observar el drifter propuesto por Meyerjürgens junto a los otros investigadores aludidos:

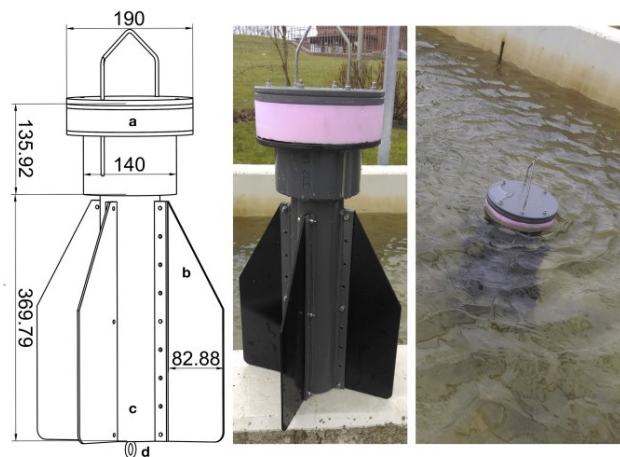


Figura 1: Diseño drifter Meyerjürgens

El proceso de construcción del drifter se llevó a cabo bajo impresión 3D, con una duración aproximada de 46 horas de impresión. Teniendo la estructura final una altura máxima de 40 cm y diámetro de 20 cm. Esta se puede visualizar en las siguientes figuras. Además, se incluyen las medidas de cada componente.

<sup>6</sup>Meyerjürgens et al., *A State-of-the-Art Compact Surface Drifter Reveals Pathways of Floating Marine Litter in the German Bight*, (Frontier in Marine Science, 2019).



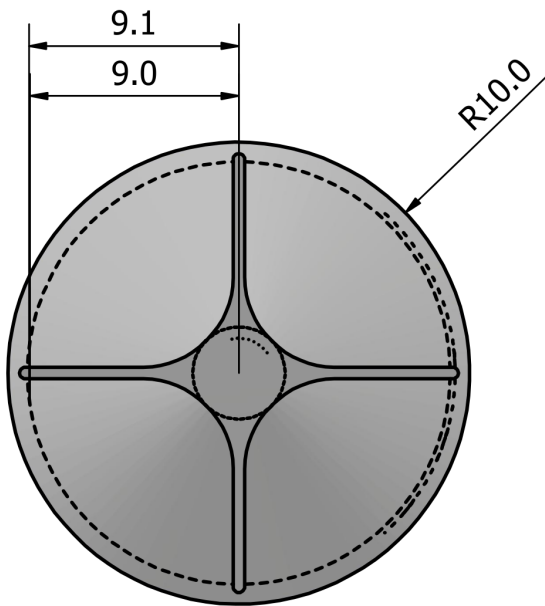


Figura 2: Drifter vista completa inferior

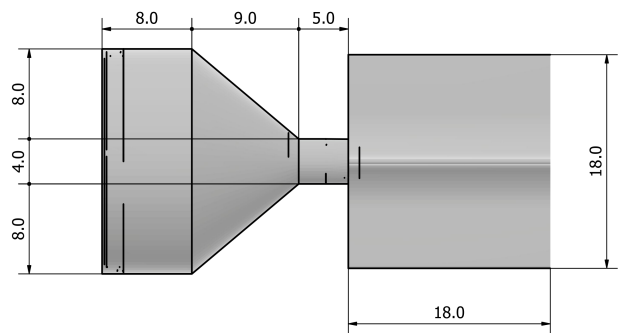


Figura 3: Drifter vista completa lateral

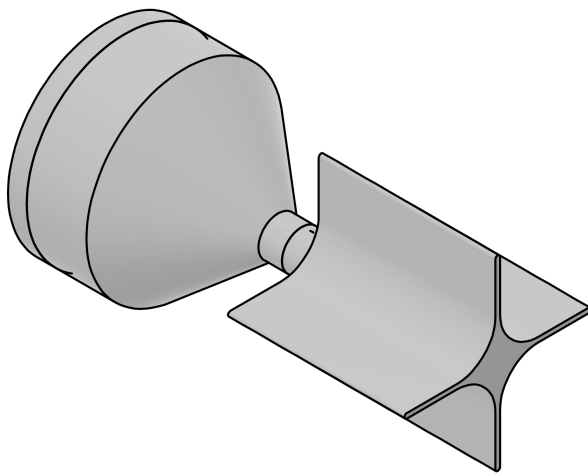


Figura 4: Drifter vista completa lateral 3D

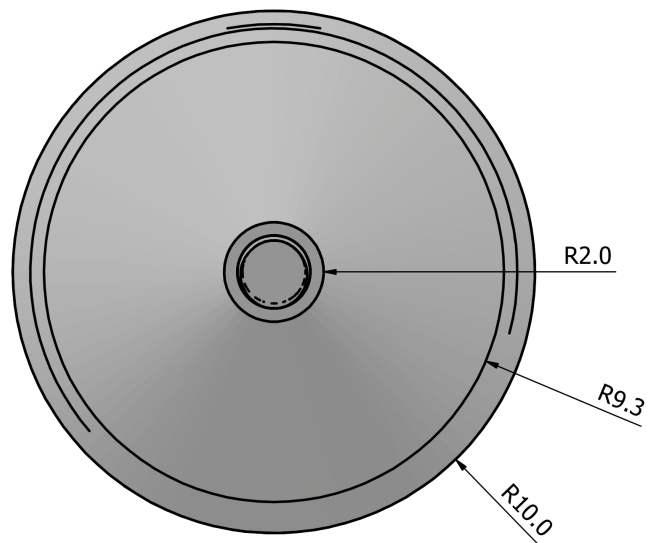


Figura 5: Drifter vista completa superior

Tal como se menciona, la estructura anteriormente presentada se sustenta en la propuesta de Meyerjürgens. Esta decisión de diseño busca maximizar el esfuerzo viscoso del agua sobre el aparato, al contar con cuatro aspas con forma de cuboide rectangular, unidas por un cilindro macizo. Además, el drifter cuenta con una cápsula impermeable en donde se pueden colocar instrumentos de medición sin arriesgar comprometerlos.

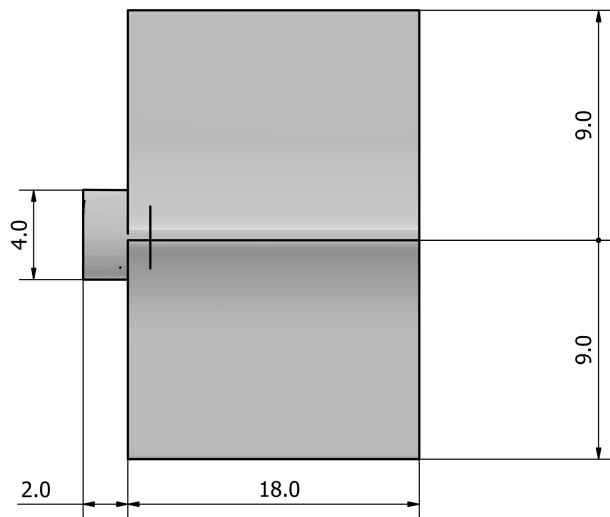


Figura 6: Aspas vista lateral.

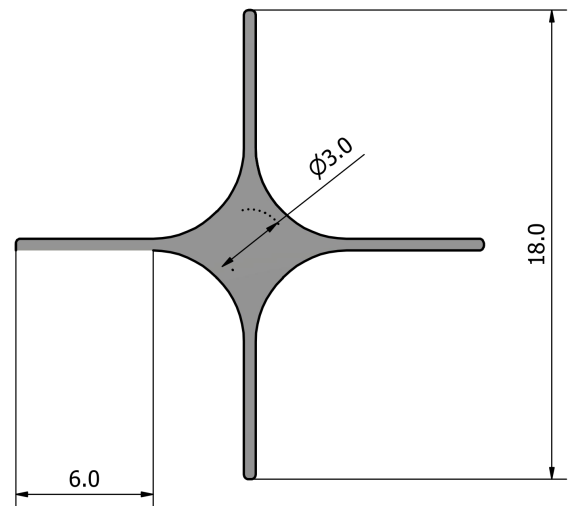


Figura 7: Aspas vista superior.

## 4. Resultados y conclusiones

Luego de un largo proceso iterativo se culmina con un diseño simple, altamente reproducible y de bajo costo. Además, el material es reciclado, siendo este responsable y amigable con el medio ambiente. El compartimiento flotante es sellable y no permite el ingreso de líquido en él, de esta forma, se cumple el requerimiento de mantener el arroz seco y sin daño alguno, potencialmente replicable para un equipo GPS u otro artefacto.

Mediante una conexión de rosca, el cuerpo flotante se conecta a las aspas y a la tapa para sellar el compartimiento. Este cuerpo es óptimo para cualquier flujo, ya sea laminar o turbulento dada su forma simétrica capaz de reaccionar a cambios de corriente. Lo que proporciona la mejor forma posible de describir la línea de corriente en las profundidades oceánicas.

Inicialmente cuando se creó el drifter no se tuvo en cuenta correctamente el peso del cuerpo y cómo éste influiría a nivel experimental. Es por ello que, al momento del testeo, hubo problemas en las condiciones de estabilidad y para resolverlo fue necesario incorporar un peso extra de 0.5 kg para conseguir las condiciones de equilibrio necesarias.

A nivel experimental se obtuvo un tiempo de 20.78 segundos en el canal de prueba del departamento de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, como se muestra en las figuras 7 y 8. Los archivos y diseños finales se dejan con acceso público en la carpeta de almacenamiento compartido con el fin de ayudar a cualquier investigador/a que quiera extender el estudio. Esto tiene por objetivo reducir los costos y tiempos de los investigadores al ofrecer una solución hecha a medida y fácilmente reproducible al ser **Open Source**<sup>7</sup>.

<sup>7</sup>GitHub, *Ocean\_Drifter*, GitHub, consultado el 29 de junio de 2022, [https://github.com/C0sch0/Ocean\\_Drifter](https://github.com/C0sch0/Ocean_Drifter).



Figura 8: Canal de prueba.



Figura 9: Canal con régimen turbulento.

## 5. Bibliografía

Fernández L., B. *Introducción a la Mecánica de Fluidos*, (4ta Edición, Ediciones Universidad, 2005).

Carandell, Matias, Daniel Mihai Toma, Montserrat Carbonell, Joaquín del Río, and Manel Gassulla. *Design and testing of a kinetic energy harvester embedded into an oceanic drifter*, (IEEE Sensors Journal 20, no. 23 (2020)): 13930-13939.

Hut, Rolf, Thanda Thatoe Nwe Win, and Thom Bogaard. *Easy to build low-power GPS drifters with local storage and a cellular modem made from off-the-shelf components*, (Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems 9, no. 2 (2020)), 435-442. doi: 10.5194/gi-9-435-2020, 2020.

Meyerjürgens, Jens, Thomas H. Badewien, Shungudzemwoyo P. Garaba, Jörg-Olaf Wolff, and Oliver Zielinski. *A state-of-the-art compact surface drifter reveals pathways of floating marine litter in the German bight*, (Frontiers in Marine Science (2019)): 58.

Schmidt, W. E., B. T. Woodward, K. S. Millikan, R. T. Guza, B. Raubenheimer, and Steve Elgar. *A GPS-tracked surf zone drifter*, (Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 20, no. 7 (2003)): 1069-1075.

Hoerner F. Sighard, *FLUID-DYNAMIC DRAG*, (Author, 1965), 3-17.

C0sch0, *GitHub - C0sch0/OceanDrifter*. (GitHub. Consultado el 30 de junio de 2022). <https://github.com/C0sch0/OceanDrifter>