

# BAJAS TEMPERATURAS AFECTAN A LA RAPIDEZ CON QUE GIRA UN REMOLINO DE AGUA DE MAR

## Low temperatures affect how fast a whirlpool of seawater spins

*As baixas temperaturas afetam a rapidez com que um redemoinho de água do mar gira*

• Edgar Xavier Mendoza Arce<sup>1</sup>

Fecha de recepción: 31 de julio de 2025

Fecha de aceptación: 29 de septiembre de 2025

Doi: [10.33210/ca.v14i2.514](https://doi.org/10.33210/ca.v14i2.514)

Cienciamérica (2025) | Vol. 14 N° 2 | pp. 20-35

ISSN 1390-9592 ISSN-L 1390-681X

<sup>1</sup>Universidad Estatal de Milagro. Milagro-Ecuador.  
Correo: emendozaa9@unemi.edu.ec

\*Cómo citar: E. X. Mendoza-Arce, "Bajas temperaturas afectan a la rapidez con que gira un remolino de agua de mar", Cienciamérica, vol. 14, no. 2, pp. 20-35, Sep. 2025, doi: [10.33210/ca.v14i2.514](https://doi.org/10.33210/ca.v14i2.514).

## RESUMEN

**INTRODUCCIÓN.** Los remolinos oceánicos son fenómenos cuya dinámica depende de variables físicas como la temperatura, que modifica la viscosidad del agua y, con ello, la transmisión del movimiento rotacional. **OBJETIVO.** Analizar cómo la temperatura del agua influye en la rapidez de rotación de un remolino forzado en condiciones controladas de laboratorio. **MÉTODO.** Se diseñó un experimento cuantitativo con un cilindro de 250 mm de diámetro y 3,5 L de capacidad, acoplado a un motor de 375 W para generar el remolino. Se utilizaron tres temperaturas de agua destilada:  $2,5 \pm 0,2$  °C,  $26 \pm 0,2$  °C y  $48 \pm 0,2$  °C. La velocidad tangencial se midió con un Anemómetro Láser Doppler (LDA) en radios de 50, 70 y 90 mm, registrando 39 puntos por cada condición. **RESULTADOS.** Se encontró una relación positiva entre la temperatura y la velocidad: a 2,5 °C la rapidez disminuyó un 17 % respecto a la condición ambiente y a 48 °C aumentó un 28 %, lo que representa más del 50 % frente a la condición fría. **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.** La temperatura influye significativamente en la magnitud y distribución del movimiento rotacional. Este modelo experimental valida principios de dinámica de fluidos y constituye una herramienta aplicable a la oceanografía y la ingeniería hidráulica.

## PALABRAS CLAVE

Temperatura, velocidad de rotación, remolino forzado, viscosidad, dinámica de fluidos.



## ABSTRACT

**INTRODUCTION.** Ocean eddies are phenomena whose dynamics depend on physical variables such as temperature, which modifies the viscosity of the water and, with it, the transmission of rotational movement. **OBJECTIVE.** Analyze how water temperature influences the rotation speed of a forced eddy under controlled laboratory conditions. **METHOD.** A quantitative experiment was designed with a cylinder of 250 mm diameter and 3.5 L capacity, coupled to a 375 W motor to generate the whirlpool. Three distilled water temperatures were used:  $2.5 \pm 0.2$  °C,  $26 \pm 0.2$  °C, and  $48 \pm 0.2$  °C. Tangential velocity was measured with a Laser Doppler Anemometer (LDA) at radii of 50, 70 and 90 mm, registering 39 points for each condition. **RESULTS.** A positive relationship between temperature and velocity was found: at 2.5 °C the velocity decreased by 17 % compared to the ambient condition and at 48 °C it increased by 28 %, which represents more than 50 % compared to the cold condition. **DISCUSSION AND CONCLUSIONS.** Temperature significantly influences the magnitude and distribution of rotational motion. This experimental model validates principles of fluid dynamics and is a tool applicable to oceanography and hydraulic engineering.

## KEYWORDS

Temperature, rotational speed, forced eddy, viscosity, fluid dynamics.



## RESUMO

**INTRODUÇÃO.** Os redemoinhos oceânicos são fenômenos cuja dinâmica depende de variáveis físicas como a temperatura, que modifica a viscosidade da água e, com ela, a transmissão do movimento de rotação. **OBJETIVO.** Analisar como a temperatura da água influencia a velocidade de rotação de um turbilhão forçado em condições laboratoriais controladas. **MÉTODO.** Um experimento quantitativo foi projetado com um cilindro de 250 mm de diâmetro e 3,5 L de capacidade, acoplado a um motor de 375 W para gerar o redemoinho. Foram utilizadas três temperaturas de água destilada:  $2,5 \pm 0,2$  °C,  $26 \pm 0,2$  °C e  $48 \pm 0,2$  °C. A velocidade tangencial foi medida com um Anemômetro Doppler a Laser (LDA) em raios de 50, 70 e 90 mm, registrando 39 pontos para cada condição. **RESULTADOS.** Foi encontrada uma relação positiva entre temperatura e velocidade: a  $2,5$  °C a velocidade diminuiu 17 % em comparação com a condição ambiente e a  $48$  °C aumentou 28 %, o que representa mais de 50 % em comparação com a condição fria. **DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.** A temperatura influencia significativamente a magnitude e distribuição do movimento rotacional. Esta modelo experimental valida princípios de dinâmica de fluidos e é uma ferramenta aplicável à oceanografia e engenharia hidráulica.

## PALAVRAS-CHAVE

Temperatura, velocidade de rotação, turbilhão forçado, viscosidade, dinâmica dos fluidos.



## INTRODUCCIÓN

Los remolinos oceánicos, o vórtices marinos son movimientos giratorios de diferentes tamaños que se forman por causas como cambios en la temperatura y salinidad, el contacto con el fondo marino, la acción del viento o la mezcla de aguas con distintas densidades [1]. Su funcionamiento es muy importante en la oceanografía física porque ayudan a mover y distribuir características del agua como el calor, la sal, los nutrientes y el oxígeno disuelto, influyendo en procesos esenciales como la producción de materia orgánica, la renovación de aguas profundas y el almacenamiento de carbono [2].

Los vórtices oceánicos se dividen en dos categorías: libres y forzados, siendo los segundos aquellos en los que el movimiento giratorio es inducido por un mecanismo externo que aplica una fuerza al fluido. El comportamiento de estos vórtices depende de factores como la temperatura del fluido, que afecta su viscosidad, capacidad de almacenar energía y su reacción ante influencias externas [2]. La influencia del calor en los fluidos ha sido ampliamente estudiada en diversos contextos, como el diseño de edificios, donde se observa que una disminución de temperatura incrementa la viscosidad del aire, reduciendo la eficiencia de sistemas de calefacción y ventilación [3], [4]. Este mismo principio de temperatura-energía-viscosidad también se aplica a los vórtices forzados, ya que la conservación del momento angular y la transferencia de energía interna son fundamentales en líquidos en movimiento y en otros sistemas [5].

En experimentos de mecánica de fluidos, como los realizados con el tubo de Ranque-Hilsch, se ha demostrado que la expansión sin intercambio de calor en el centro del remolino causa una disminución significativa en la temperatura, lo que reduce la velocidad de giro [6]. De manera similar, a bajas temperaturas, el aumento de la viscosidad limita el movimiento de rotación, efecto que ha sido principalmente analizado en ingeniería térmica, pero que también se aplica a sistemas marinos, donde la relación entre temperatura, viscosidad y rotación sigue las mismas le-

yes de conservación del momento y la energía interna [7].

La distribución térmica en el océano influye en los remolinos, especialmente en áreas como el Atlántico Norte, donde los modelos combinan observaciones satelitales y perfiles térmicos para predecir cómo los gradientes de temperatura afectan la estabilidad y velocidad de los vórtices [8], este fenómeno también se observa en la atmósfera, donde los sistemas rotacionales responden a los cambios térmicos, como demuestra la disminución del hielo marino en áreas como Barents-Kara, que debilita el vórtice polar y afecta la circulación atmosférica [9], [10].

Investigaciones recientes han analizado la relación entre los remolinos y las variaciones de temperatura en diversos climas Renault et al. [11] demostraron mediante simulaciones del modelo climático EC-Earth que la retroalimentación de corriente, originada por las interacciones entre las corrientes marinas y la atmósfera, reduce hasta un 30% la energía de rotación de los remolinos de tamaño medio, un fenómeno conocido como eddy killing. Este efecto contribuye a la estabilidad de corrientes de borde occidental como el Gulf Stream y el Kuroshio, además de modificar la distribución térmica en la superficie oceánica, estos cambios afectan directamente la baroclinicidad atmosférica, influyendo en la intensidad de las tormentas extratropicales y evidenciando el vínculo entre la temperatura oceánica y el comportamiento de los vórtices.

En el estudio realizado por Rallu De Malibrán et al. [12] se describe cómo las olas de calor marinas que se presentaron en el Golfo de Alaska entre 2013 y 2023, los cambios en la presión del sistema de bajas Aleutianas deterioraron las condiciones de surgencia costera, creando un entorno desfavorable para la formación de vórtices. Como resultado, disminuyó tanto la cantidad como la intensidad de los remolinos anticlónicos, lo que afectó negativamente la productividad biológica al interrumpir el transporte de nutrientes hacia el interior del golfo. Este hallazgo refuerza la relación entre temperatura, duración, estructura y movimiento de los remolinos mari-

nos, tal como lo sugieren Kim & Choi, [9].

El incremento de la temperatura del agua conduce a una disminución de su viscosidad debido a una mayor agitación molecular, lo cual facilita el desarrollo de flujos vorticosos rápidos y estables [7], en cuando la temperatura es baja, la viscosidad se incrementa, dificultando la transferencia del momento angular, lo que reduce la velocidad del remolino, este concepto ha sido confirmado en experimentos con tubos de vórtice y máquinas hidráulicas rotativas, como indican Cheng et al., [3] y Xue et al. [6] y muestra que la eficiencia y la energía de rotación de sistemas en movimiento son muy afectadas por la temperatura del líquido.

A pesar de los avances teóricos y en simulaciones computacionales, aún falta evidencia directa que cuantifique el impacto de las bajas temperaturas en la velocidad de rotación de los remolinos en condiciones controladas, especialmente en escalas medianas y en entornos de laboratorio simulados [7], para un enfoque aplicado en petróleo, esta carencia resulta crítica en un contexto de cambio climático global, en el cual la alteración de los gradientes térmicos oceánicos y el incremento de eventos extremos (como olas de calor marinas o anomalías frías tipo La Niña) pueden modificar drásticamente la frecuencia, intensidad y comportamiento de los vórtices marinos.

La investigación tiene como objetivo examinar de forma concreta cómo la temperatura afecta la rapidez de rotación de un vórtice creado en agua salada, para ello, se llevó a cabo un experimento en un entorno de laboratorio utilizando agua destilada a tres temperaturas diferentes: 2.5 grados, 26 grados y 48 grados, se evaluó la velocidad del flujo circular empleando un dispositivo conocido como Anemometría Doppler Láser, o LDA, la idea fundamental del estudio plantea que temperaturas más bajas reducen de manera significativa la energía del movimiento giratorio, lo que hace que el vórtice gire más lentamente.

Este enfoque intenta validar los conceptos fundamentales de la dinámica de fluidos y

también proporcionar datos que faciliten la comprensión de cómo la temperatura afecta el desplazamiento de los remolinos en océanos, lo cual puede ser beneficioso para la oceanografía aplicada, el desarrollo de modelos de desplazamiento acuático, la elaboración de sistemas hidráulicos y el análisis de eventuales alteraciones climáticas en el futuro.

## MÉTODO

La temperatura influye directamente en la velocidad de rotación de un vórtice forzado en agua. Para estudiar este efecto, se diseñó un dispositivo experimental que consistía en un cilindro de 250 mm de diámetro, 180 mm de altura y capacidad de 3,5 L, acoplado a un motor de 375 W, utilizando componentes reciclados de una batidora Oster. Un mezclador de acero inoxidable, conectado al motor, generaba un flujo rotacional constante en el líquido.

Se controlaron tres temperaturas del agua ( $2,5 \pm 0,2$  °C,  $26 \pm 0,2$  °C y  $48 \pm 0,2$  °C) empleando agua destilada para mantener la homogeneidad en las propiedades físicas y químicas del fluido. La temperatura se ajustó con un sistema de enfriamiento por hielo, un calentador eléctrico y temperatura ambiental como referencia.

## Normas éticas de investigación

El estudio no involucró animales ni seres humanos, por lo que no se aplicaron condiciones de ética experimental. Se trató de un estudio experimental tecnológico realizado únicamente con fluidos.

## Instrumentos

Se utilizó un Anemómetro Láser Doppler (LDA, Dantec Dynamics, modelo FiberFlow), que permite obtener la velocidad del fluido sin contacto físico, analizando el cambio en la frecuencia Doppler cuando partículas en movimiento cruzan un haz láser dividido en dos partes.

El sistema constó de:

- Unidad emisora de haces láser (He-Ne, 632,8 nm).



- Sistema de posicionamiento automatizado (robot LDA con control numérico).
- Unidad de procesamiento de señal.
- Interfaz computacional con software BSA Flow v5.20 (Dantec Dynamics), que se utilizó para la adquisición y preprocesamiento de datos.

El componente óptico fue modificado para adaptarse al contenedor experimental. El robot fue programado para desplazarse siguiendo trayectorias circulares y realizar mediciones en radios de 50 mm, 70 mm y 90 mm, con 13 puntos por radio. Cada medición capturó los componentes de velocidad en los ejes X y Y, calculándose la velocidad tangencial mediante el teorema de Pitágoras.

#### Técnicas de análisis de datos

En cada condición térmica (2,5 °C, 26 °C y 48 °C) se registraron 39 puntos de medición distribuidos angularmente. Los datos fueron exportados desde el software BSA Flow, procesados para obtener velocidades promedio por cada radio, y representados gráficamente para relacionar temperatura y rapidez de rotación.

#### Procedimiento

Preparación del fluido: el agua destilada fue llevada a la temperatura deseada utilizando baño de hielo, resistencias eléctricas o condiciones ambientales controladas. Una vez estabilizada, se vertió en el cilindro y se dejó reposar durante un minuto para minimizar perturbaciones iniciales.

Generación del remolino: el motor de 375 W fue encendido a velocidad constante, asegurando un régimen de flujo estacionario antes de iniciar las mediciones.

Adquisición de datos: el LDA se configuró con una resolución temporal de 4 segundos por punto. Cada ensayo registró 39 puntos distribuidos angularmente en los tres radios definidos. Las señales crudas fueron adquiridas en BSA Flow v5.20, filtradas con el algoritmo de validación de picos Doppler incluido en el software, y exportadas en formato .csv.

Procesamiento de datos: los componentes de velocidad ( $V_x$  y  $V_y$ ) fueron integradas en el mismo software para obtener la magnitud de la velocidad tangencial ( $V_t$ ). Posteriormente, los datos fueron analizados en MATLAB R2023a (MathWorks, Natick, MA, USA) para calcular promedios, desviaciones estándar y generar representaciones gráficas comparativas entre las diferentes condiciones térmicas.

## RESULTADOS

En esta sección se presentan los hallazgos del estudio que se llevó a cabo para analizar de qué manera se modifica la rapidez de un remolino en el agua al cambiar la temperatura, se realizaron mediciones en tres situaciones de temperatura regulada: agua fría a 2.5°C, con una leve variación; temperatura ambiente a 26°C; y agua caliente a 48°C, también con una ligera variación.

La medición de la velocidad tangencial del flujo rotacional se realizó utilizando un Anemómetro Láser Doppler LDA, el cual es un dispositivo no intrusivo que facilitó la obtención de información exacta y confiable en tres radios concéntricos en relación al centro del vórtice, que correspondieron a 50 mm, 70 mm y 90 mm, en cada temperatura se registraron 39 puntos distribuidos angularmente en cada radio, con una resolución temporal de aproximadamente 4 segundos por cada punto.

En la Tabla 1, se presentan las lecturas de la velocidad tangencial  $V_t$  a una temperatura de  $26 \pm 0,2^\circ\text{C}$ , obtenidas con un Anemómetro Láser Doppler LDA en tres radios concéntricos: 50 mm, 70 mm y 90 mm. Los valores de  $V_t$  variaron entre 0,42 m/s y 0,69 m/s, con la velocidad máxima en 70 mm (0,69 m/s) y la mínima en 90 mm (0,42 m/s). Este patrón concuerda con los principios de la dinámica de fluidos en vórtices forzados, donde la energía cinética es mayor cerca del núcleo, debido a la menor disipación por viscosidad y fricción con las paredes del contenedor. Las velocidades disminuyen a medida que aumenta la distancia radial, siendo 0,53 m/s en 50 mm, 0,59 m/s en 70 mm y 0,48 m/s en 90 mm, lo que sugiere una relación inver-



**Tabla 1.** Velocidad tangencial medida a 26 °C en radios de 50, 70 y 90 mm

Radio (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)
50	50	0	-0.66	-0.12	0.67
50	43.30	-25	-0.62	-0.29	0.69
70	70	0	-0.54	-0.13	0.56
70	60.62	35	-0.44	0.35	0.56
90	90	0	-0.44	-0.01	0.44
90	77.94	-45	-0.40	-0.26	0.48

Fuente: Elaboración propia.

samente proporcional entre la distancia al centro y la velocidad de rotación. La media global de la velocidad tangencial fue de 0,53 m/s, un valor intermedio para comparar con las condiciones de temperatura fría (2,5°C) y caliente (48°C). Este patrón confirma cómo la viscosidad influye en la distribución de la velocidad y valida el diseño experimental y el método de medición.

En la Tabla 2 se presentan los valores de velocidad tangencial (Vt) que se registraron en cada punto medido a una temperatura reducida de (2,5 ± 0,2 °C). De manera similar a la temperatura ambiente, las mediciones se realizaron en tres radios concéntricos de 50 mm, 70 mm y 90 mm, y se cubrieron un total de 39 ubicaciones distribuidas angularmente para garantizar una apropiada representación del campo de velocidades.

Los valores de Vt variaron entre 0,18 m/s y 0,68 m/s, lo que evidenció un espectro de ve-

locidades más extenso que en la temperatura ambiente y las velocidades más bajas fueron considerablemente inferiores, lo que sugiere que el incremento de la viscosidad del agua en temperaturas frías influye en el movimiento del flujo rotacional, las mayores velocidades se observaron principalmente en el radio interior de 50 mm, donde también se registró la energía cinética más alta. Por otro lado, las velocidades más reducidas se encontraron en áreas más distantes del eje central y en lugares específicos, donde pudieron producirse alteraciones debido a la aparición de burbujas o micro turbulencias generadas por el funcionamiento del impulsor.

El análisis de los promedios para cada radio reveló que, para un radio de 50 mm, la velocidad alcanzó 0,42 m/s; para un radio de 70 mm, se registró 0,53 m/s, y para el radio de 90 mm, se observó 0,49 m/s, en esta situación, la velocidad tangencial media total fue de 0,44 m/s, lo que representa una dismi-

**Tabla 2.** Velocidad tangencial medida a 2,5 °C en radios de 50, 70 y 90 mm

Radio (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)
50	50	0	-0.48	0.13	0.50
50	43.30	-25	-0.41	-0.12	0.43
70	70	0	-0.47	0.06	0.47
70	60.62	35	-0.44	0.27	0.52
90	90	0	-0.42	-0.01	0.42
90	77.94	-45	-0.43	-0.19	0.47

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.** Velocidad tangencial medida a 2,5 °C en radios de 50, 70 y 90 mm.

Radio (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)
50	50	0	-0.66	0.12	0.67
50	43.30	-25	-0.52	0.44	0.68
70	70	0	-0.62	0.02	0.62
70	60.62	35	-0.54	0.22	0.58
90	90	0	-0.47	0.00	0.47
90	77.94	-45	-0.45	-0.16	0.48

Fuente: Elaboración propia.

nución aproximada del 17 % en relación con la velocidad media medida a temperatura ambiente, esta caída está vinculada al incremento en la viscosidad del agua a temperaturas más bajas, lo que dificulta la transmisión del movimiento rotacional y reduce la energía cinética del sistema.

El patrón en forma de radio que se ha observado indica que, aunque la velocidad más alta permanece cerca del centro del remolino, la fuerza de estas velocidades es inferior en comparación con situaciones de temperaturas más elevadas, además, esto sugiere que el enfriamiento afecta toda la configuración del vórtice, siendo más evidente en la zona central donde el flujo es más veloz. Esto muestra que el movimiento de rotación del líquido responde de forma clara a los cambios en la temperatura.

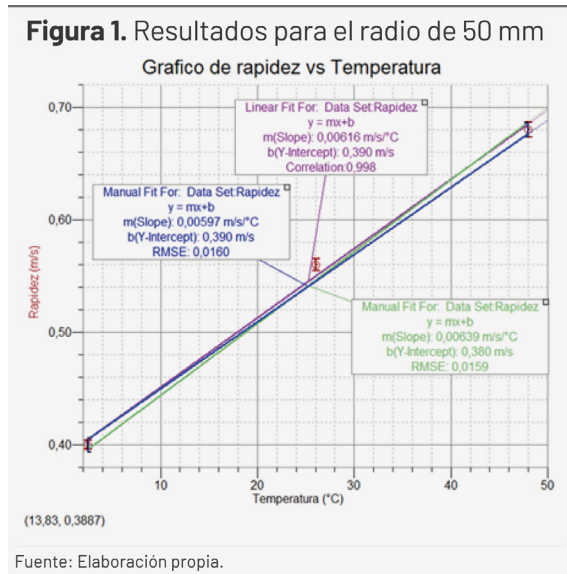
En la Tabla 3 se presentan los valores de la velocidad tangencial  $V_t$  a una temperatura de  $48 \pm 0,2$  °C, obtenidos en tres radios concéntricos (50 mm, 70 mm y 90 mm) con 39 ubicaciones distribuidas angularmente. Los valores de  $V_t$  variaron entre 0,46 m/s y 0,73 m/s, siendo este el intervalo más alto registrado entre las tres condiciones analizadas. La velocidad máxima de 0,73 m/s se detectó en el radio de 50 mm, mientras que la mínima de 0,46 m/s se registró en el radio de 90 mm. Los promedios por radio fueron de 0,67 m/s en 50 mm, 0,62 m/s en 70 mm y 0,52 m/s en 90 mm, lo que indica un incremento significativo en comparación con las condiciones de baja temperatura y temperatura ambiente.

La velocidad tangencial promedio a nivel global fue de 0,68 m/s, lo que representó un incremento de casi el 28 % en comparación con la temperatura ambiente y más del 50 % en relación con la condición de baja temperatura. Este hallazgo se debe a que el agua a temperaturas más elevadas tiene una viscosidad reducida, facilitando así que el impulsor transmita el momento angular de forma más eficiente y logre un movimiento rotacional más óptimo.

Se observó que, aunque el remolino mantiene su estructura habitual con velocidades más rápidas en el centro y más lentas en los bordes, la disminución de la velocidad tangencial cerca del límite del remolino no es tan pronunciada como en la condición fría. Esto indica que a temperaturas elevadas el movimiento rotatorio se mantiene más estable y pierde menos energía debido a la fricción lo que produce un remolino más fuerte y que dura más tiempo.

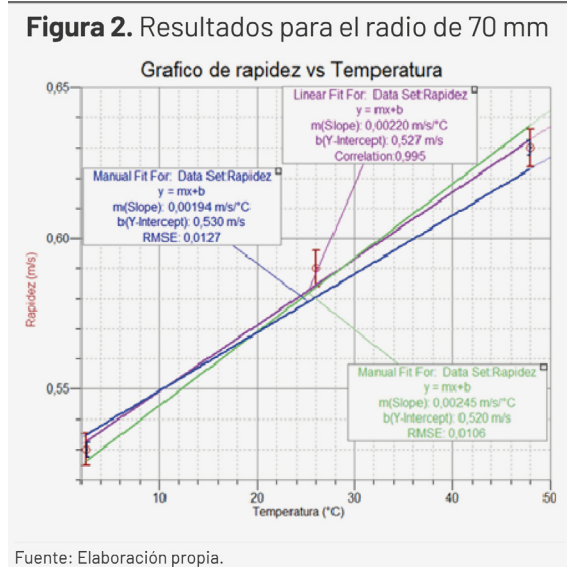
La Figura 1 ilustra la relación entre la velocidad tangencial promedio y la temperatura del agua en un remolino forzado con un radio de 50 mm. Los puntos reflejan los valores promedios obtenidos en los ensayos, mientras que la línea violeta muestra la pendiente ajustada ( $2,2 \times 10^{-3}$ ), con la pendiente máxima de  $2,45 \times 10^{-3}$  representada por las líneas verdes y la mínima de  $1,94 \times 10^{-3}$  en la línea azul.

Las incertidumbres en el eje de temperatura son insignificantes, mientras que en el eje de velocidad tangencial tienen relevancia estadística. La tendencia muestra una rela-



ción clara entre la temperatura del líquido y la velocidad de rotación en el núcleo del vórtice: al incrementarse la temperatura, el agua pierde viscosidad, lo que facilita la transmisión de energía, resultando en una mayor velocidad de giro.

Esto es más pronunciado en el núcleo del vórtice, donde la energía en movimiento es más fuerte, y la variación hacia el exterior es más notoria. El impacto térmico es más evidente en esta sección central, donde el intercambio de movimiento es más directo y menos afectado por las pérdidas de energía.

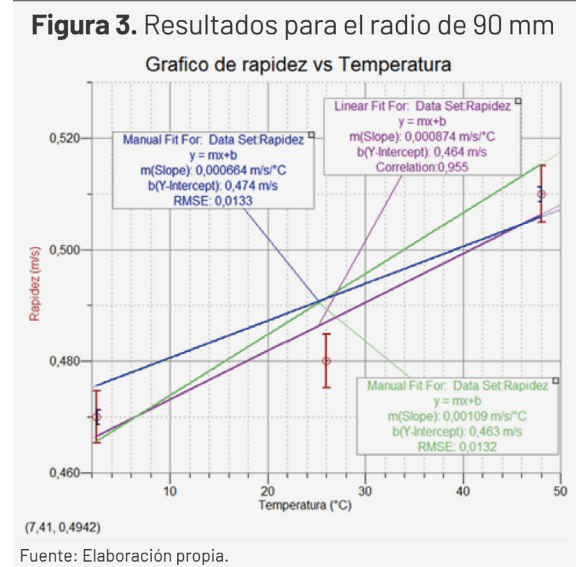


En la Figura 2 se presenta la relación entre la velocidad tangencial promedio y la temperatura del agua para el radio de 70 mm, correspondiente a una región intermedia del

remolino forzado. En esta zona, la velocidad angular comienza a decrecer respecto al núcleo, pero aún mantiene una cantidad significativa de energía cinética.

Los datos experimentales muestran que la velocidad tangencial promedio aumenta con la temperatura, con una variación térmica más pronunciada que la registrada en el núcleo de 50 mm. Este comportamiento, reflejado en la pendiente de ajuste lineal ( $2,8 \times 10^{-3}$ ), es explicado por la menor fricción generada por el impulsor en esta región, lo que favorece la relación entre la energía cinética absorbida y la pérdida energética por viscosidad.

Este comportamiento se explica porque, el radio de 70 mm representa una zona donde el efecto térmico sobre la rotación es más eficiente, lo que incrementa la sensibilidad del sistema ante variaciones de temperatura.



En la Figura 3 se muestra la relación entre la velocidad tangencial promedio y la temperatura del agua para un radio de 90 mm, correspondiente a la parte externa del remolino forzado. En esta región, la fricción con las paredes del recipiente y la pérdida de energía por viscosidad adquieren mayor relevancia, lo que limita el incremento de la velocidad tangencial en comparación con las zonas internas del vórtice.

Los datos revelan que la pendiente del ajuste lineal entre temperatura y velocidad en esta región es de  $8,0 \times 10^{-4}$ , con un rango de varia-



ción entre  $6,5 \times 10^{-4}$  y  $9,5 \times 10^{-4}$ , lo que refleja una menor sensibilidad térmica. En la periferia del remolino, las pérdidas energéticas superan la capacidad del sistema para transmitir eficientemente el momento angular, lo que resulta en una respuesta más limitada a los cambios térmicos.

Los hallazgos indican que, en resumen, la velocidad tangencial en la porción externa está influenciada por la energía de rotación proveniente del núcleo, junto con las pérdidas provocadas por la fricción y la viscosidad, lo que da lugar a velocidades significativamente más bajas y una menor respuesta térmica en comparación con las zonas más cercanas al centro.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la viscosidad influye directamente en la velocidad de rotación. A temperaturas bajas, la mayor viscosidad dificulta el movimiento rotacional, mientras que, a temperaturas altas, la menor viscosidad facilita la transferencia de momento angular y aumenta la velocidad. Este comportamiento es consistente con estudios previos que han demostrado que un aumento en la viscosidad reduce la eficiencia de los sistemas de vórtices forzados, tanto en condiciones naturales como en experimentos controlados [7], [6], [13].

El análisis radial de las velocidades muestra que el núcleo con un radio de 50 mm es la zona que reacciona más a los cambios de temperatura porque en este punto el flujo recibe un impulso más directo y la fricción con las paredes tiene menor efecto. El área intermedia con un radio de 70 mm presenta el cambio más pronunciado cuando varía la temperatura lo que indica que en esta parte hay un equilibrio favorable entre la energía que se entrega y la resistencia que opone la viscosidad, en cambio la zona exterior con un radio de 90 mm responde poco a la temperatura porque las pérdidas de energía por fricción y por la viscosidad superan la energía que el impulsor logra transmitir.

Estos resultados coinciden con lo observado en estudios de oceanografía física, donde en zonas frías como las de latitudes altas o

áreas con fuerte afloramiento, los remolinos suelen girar más lentamente, mientras que en aguas cálidas, como las regiones tropicales, se forman vórtices más rápidos y estables [12], [11]. Investigaciones adicionales, como las de Lin et al. [14], han mostrado que en sistemas de refrigeración, el comportamiento de los remolinos depende no solo de la energía del flujo, sino también de cómo se combinan los flujos secundarios y de impacto en tres dimensiones.

Un paralelo relevante se encuentra en las simulaciones numéricas de Du et al. [15], quienes demostraron que el número de rotación ( $Ro$ ) y la relación de densidad en sistemas de refrigeración por vórtices afectan significativamente la transferencia de calor y la estructura de las líneas de corriente. Según su estudio, una mayor densidad relativa del fluido de enfriamiento (similar a una temperatura más baja) intensifica la transferencia de calor, mientras que un aumento en el  $Ro$  reduce la velocidad del flujo, disminuyendo así su eficiencia térmica. Estos hallazgos refuerzan la idea de que la persistencia y efectividad de los vórtices dependen de un equilibrio óptimo entre las propiedades termodinámicas y las condiciones dinámicas operacionales.

En resumen la investigación demuestra que la temperatura influye en la velocidad con la que gira un remolino forzado debido principalmente a su efecto sobre la viscosidad y la forma en que se transmite el momento angular la intensidad de esta influencia depende de la distancia al centro del vórtice siendo más evidente en las zonas internas y medias y menos en la parte exterior los trabajos de Ding et al., [13]; Du et al., [15]; Lin et al., [14], confirman que los cambios de temperatura y las condiciones de movimiento afectan no solo la velocidad sino también la forma la estabilidad y el rendimiento de los vórtices lo que respalda la relación entre los resultados obtenidos en laboratorio y los fenómenos que ocurren en la naturaleza, así como en diversas aplicaciones de la ingeniería.

Los hallazgos indican que la temperatura del agua influye directamente en la rapidez de rotación de un remolino forzado en un entor-



no controlado. A temperaturas bajas de 2,5 °C, la viscosidad del agua es más alta, lo que complica la transmisión del movimiento y resulta en una velocidad promedio un 17 % inferior a la observada a temperatura ambiente, por otro lado, al elevar la temperatura a 48 °C, la viscosidad se reduce, lo que facilita el movimiento de las capas de agua y permite que el impulsor transfiera el movimiento de forma más efectiva, logrando aumentos cercanos al 28 % en comparación con condiciones intermedias y más del 50 % en relación con la situación de baja temperatura.

El análisis radial mostró que la sección central del remolino (50 mm) es la más sensible a las variaciones de temperatura, ya que está en contacto directo con la fuente de energía. A 70 mm, se observó el cambio térmico más significativo, indicando un equilibrio entre la energía recibida y la resistencia del fluido. En la zona exterior de 90 mm, el cambio térmico fue menor, debido a las mayores pérdidas de energía por fricción y viscosidad.

En la investigación sobre el flujo de los líquidos, se nota que, al elevar la temperatura, la velocidad de giro también incrementa, ya que el calor disminuye la viscosidad, esto indica que el líquido presenta menor resistencia interna y puede conservar mejor su energía de rotación. Este fenómeno evidencia que tanto la persistencia como la constancia de un remolino dependen de las propiedades físicas y térmicas del líquido, así como de la forma en que la fuerza de rotación se transfiere desde el punto de inicio del movimiento hacia todo el sistema.

En términos generales, los hallazgos respaldan que las variaciones de temperatura modifican de forma esperada la intensidad y la manera en la que se reparte el movimiento rotatorio en los remolinos creados de forma controlada, ofreciendo un modelo de experimento que se alinea con las leyes de la mecánica de fluidos y con lo que se determina en vórtices que se encuentran en el entorno natural y en usos de ingeniería.

Aunque este estudio se desarrolló en un entorno controlado con agua destilada, lo que permitió controlar de manera precisa las

variables físicas, pero no incorporó factores propios del agua de mar, como la salinidad, la estratificación térmica ni la interacción con corrientes externas. De igual modo la prueba se realizó en una escala pequeña con un cilindro de 3,5 lts lo que dificulta trasladar los resultados de manera directa a sistemas oceánicos de gran tamaño tampoco se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales más allá de un análisis descriptivo de promedios lo que impide valorar de forma precisa la importancia de las diferencias encontradas.

Se propone ampliar este modelo experimental incorporando agua salada para analizar el efecto combinado de la salinidad y la temperatura sobre la viscosidad y la dinámica rotacional. De la misma manera sería adecuado repetir el experimento en sistemas más grandes que incluyan cambios en la presión y en la profundidad con el fin de aproximar los resultados a condiciones que se asemejen a las del océano real. El empleo de modelos numéricos junto con simulaciones de dinámica de fluidos computacional puede servir como apoyo a los resultados y permitir la proyección del comportamiento de los remolinos en escenarios de cambio climático en especial cuando se presentan variaciones extremas de temperatura como las olas de calor marinas o los eventos de La Niña.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió financiación de ninguna entidad pública, privada ni de organizaciones sin fines de lucro. El estudio fue desarrollado con recursos propios del autor, sin apoyo económico externo.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

El autor declara la no existencia de conflicto de interés alguno en relación con la investigación presentada.

## APORTE DEL ARTÍCULO EN LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Este artículo aporta a la línea de investigación en dinámica de fluidos aplicada a la oceanografía e ingeniería hidráulica, al proporcionar evidencia experimental sobre cómo la temperatura del agua modifica la velocidad de ro-



tación de un remolino forzado. La investigación contribuye a reducir la brecha existente entre los estudios teóricos y los modelos computacionales con experimentos de laboratorio reproducibles, ofreciendo un marco de referencia que permite comprender mejor los efectos térmicos sobre la viscosidad y el transporte de momento angular en fluidos en rotación. Asimismo, los resultados constituyen una base para futuras aplicaciones en el diseño de sistemas hidráulicos y en la simulación de procesos oceánicos asociados al cambio climático.

### DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR

El autor Edgar Xavier Mendoza Arce fue responsable de todas las etapas de la investigación: la concepción de la idea, el diseño y construcción del aparato experimental, la ejecución de los ensayos en laboratorio, el análisis y procesamiento de los datos, la redacción del manuscrito y la preparación final del artículo para su publicación.

### REFERENCIAS

- [1] R. C. Cruz Gómez, M. A. Monreal Gómez, and S. N. Bulgakov, "Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología," *Inter-ciencia*, vol. 33, no. 10, pp. 741-746, 2008, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33931006>
- [2] H. Gardea-Villegas, "Conceptos básicos sobre la formación y teoría de los vórtices," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 2, no. 2, pp. 81-87, 2001, doi: 10.22201/fi.25940732e.2001.02n2.009.
- [3] Y. Cheng, W. Li, S. Ma, L. Ji, C. Xiao, and Y. Li, "The influence of different working fluid temperatures on the hydraulic performance of magnetic vortex pumps," *Water (Basel)*, vol. 16, no. 11, p. 1601, 2024, doi: 10.3390/w16111601.
- [4] A. Costa and G. Macedonio, "Viscous heating effects in fluids with temperature-dependent viscosity: Triggering of secondary flows," 2005. doi: 10.48550/arXiv.physics/0312066.
- [5] A. M. Omer, "Energía, medio ambiente y desarrollo sostenible," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 9, pp. 2265-2300, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.05.001.
- [6] Y. Xue, M. Arjomandi, and R. M. Kelso, "A critical review of temperature separation in a vortex tube," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 34, no. 8, pp. 1367-1374, 2010, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010.
- [7] O. A. González-Estrada, M. A. Rojas-Nova, and G. González-Silva, "Effect of temperature on a vortex reactor for hydrodynamic cavitation," *Ingeniería e Investigación*, vol. 42, no. 3, p. e93419, 2022, doi: 10.15446/ing.investig.93419.
- [8] G. Cosne, G. Maze, and P. Tandeo, "Coupling oceanic observation systems to study mesoscale ocean dynamics," 2019.
- [9] S.-J. Kim and H. Choi, "Polar vortex weakening and its impact on surface temperature in recent decades," *Polar Res*, vol. 43, p. Article 9723, 2024, doi: 10.33265/polar.v43.9723.
- [10] M. Xu, J. A. Screen, W. Tian, J. Zhang, C. Zhang, and H. Yu, "Influence of regional sea ice loss on the Arctic stratospheric polar vortex," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 129, no. 15, p. e2023JD040571, 2024, doi: 10.1029/2023JD040571.
- [11] L. Renault, T. Arsouze, F. Desbiolles, and J. Small, "Rectification effects of regional air-sea interactions over western boundary current on large-scale sea surface temperature and extra-tropical storm tracks," *Sci Rep*, vol. 14, p. Article 31771, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-82667-2.
- [12] M. C. Rallu De Malibrán, C. M. Kaplan, and E. Di Lorenzo, "Marine heatwaves suppress ocean circulation and large vortices in the Gulf of Alaska," *Commun Earth Environ*, vol. 5, p. Article 622, 2024, doi: 10.1038/s43247-024-01785-x.
- [13] S.-S. Ding et al., "Inverse centrifugal effect induced by collective motion of vortices in rotating thermal convection,"



Nat Commun, vol. 12, no. 1, p. 5585, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-25838-3.

- [14] G. Lin, H. Du, Y. Duan, and Y. Zhang, "Investigation on heat transfer enhancement and pressure loss of double swirl chambers cooling," *Appl Therm Eng*, vol. 57, no. 1-2, pp. 34-44, 2013, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.03.042.
- [15] H. Du, G. Liao, Z. Liu, Y. Lin, and S. Zhu, "Numerical study on vortex cooling flow and heat transfer behavior under rotating conditions," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 105, pp. 638-647, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.028>.

## EDGAR XAVIER MENDOZA ARCE

### Nota biográfica del autor

<https://orcid.org/0009-0001-4368-6941>

Es Ingeniero Mecánico graduado de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, con una maestría en Global Production Engineering por la Technische Universität Berlin, Alemania. Ha trabajado en la coordinación de la producción y la planeación de mantenimiento preventivo y predictivo en la industria de consumo masivo. Actualmente es docente e investigador en la Universidad Estatal de Milagro (UNEMI), Ecuador, en la School of Social Sciences, Commercial Education and Law (FSSCEL), donde desarrolla estudios sobre producción sostenible y energías renovables.

*This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.*

