

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

Edgar Xavier Mendoza Arce  
emendozaa9@unemi.edu.ec

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

Universidad Estatal de Milagro - Ecuador

Recibido: 25/05/25

Aceptado: 23/06/25

Publicado: 01/07/25

### RESUMEN

Este estudio analizó cómo la temperatura del agua influye en la velocidad de rotación de un remolino forzado aportando datos relevantes para la comprensión de procesos oceánicos y el diseño de sistemas hidráulicos. Se desarrolló un experimento cuantitativo en laboratorio, utilizando un cilindro de 250 mm de diámetro y 3,5 L de capacidad, acoplado a un motor de licuadora de 375 W para generar remolinos en agua destilada a tres temperaturas controladas:  $2,5 \pm 0,2$  °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 condición. Los resultados evidenciaron una correlación positiva entre temperatura y velocidad; respecto a la condición ambiente, la velocidad disminuyó un 17 % a  $2,5$  °C y aumentó un 28 % a  $48$  °C, con un incremento superior al 50 % frente a la condición fría. El núcleo y la zona media mostraron mayor sensibilidad a cambios térmicos, mientras que la periferia presentó menor respuesta por pérdidas energéticas. Se concluye que la temperatura afecta significativamente la magnitud y distribución del movimiento rotacional, validando principios de dinámica de fluidos y proponiendo un modelo experimental aplicable en ingeniería y oceanografía.

**PALABRAS CLAVE:** temperatura, velocidad de rotación, remolino forzado, viscosidad, dinámica de fluidos.

## LOW TEMPERATURES AFFECT HOW FAST A WHIRLPOOL OF SEAWATER SPINS

### ABSTRACT

This study analyzed how water temperature influences the rotation speed of a forced vortex, providing relevant data for understanding oceanic processes and designing hydraulic systems. A quantitative laboratory experiment was conducted using a 250-mm-diameter cylinder with a 3.5-L capacity, coupled to a 375-W blender motor to generate vortices in distilled water at three controlled temperatures:  $2.5 \pm 0.2$  °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, recording 39 data points per condition. The results showed a positive correlation between temperature and velocity; compared to the ambient condition, velocity decreased by 17% at 2.5 °C and increased by 28% at 48 °C, with an increase of more than 50% relative to the cold condition. The core and the middle zone showed greater sensitivity to thermal changes, while the periphery exhibited a lower response due to energy losses. It is concluded that temperature significantly affects the magnitude and distribution of rotational motion, validating principles of fluid dynamics and proposing an experimental model applicable in engineering and oceanography.

**KEY WORDS:** temperature, rotation speed, forced eddy, viscosity, fluid dynamics.

## 1. 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 (Cruz Gómez et al., 2008). Su funcionamiento es muy importante en la oceanografía física porque ayudan a mover y distribuir características del agua como: calor, sal, nutrientes y oxígeno disuelto, influyendo en procesos esenciales como la producción de materia orgánica, renovación de aguas profundas y almacenamiento de carbono (Gardea-Villegas, 2001). Desde un enfoque físico, de acuerdo a Gardea-Villegas (2001), los vórtices se dividen en dos categorías: libres y forzados, basándose en la forma en que se generan. En el caso de los vórtices forzados, el movimiento giratorio es causado por un mecanismo o estructura que aplica una fuerza al fluido. Su comportamiento es afectado por varios factores, incluyendo la temperatura del fluido, que altera su viscosidad, su capacidad para almacenar energía y su reacción ante influencias externas (Cheng et al., 2024; Costa & Macedonio, 2005).

El efecto del calor sobre el movimiento de los fluidos ha sido observado, no solo en el ambiente marino, sino también en investigaciones sobre el diseño de edificios eficientes. Por ejemplo, Omer (2008) señala que, en los sistemas de calefacción, ventilación y climatización, una disminución en la temperatura del entorno aumenta la viscosidad del aire, lo que reduce la eficiencia energética del sistema al complicar la transferencia de momento y calor. Aunque estos análisis se enfocan en edificios, los fundamentos físicos que los respaldan, como la conservación del momento angular y la transferencia de energía interna, pueden aplicarse a sistemas en movimiento en líquidos. Esto refuerza la teoría que los remolinos de agua forzados reaccionan de manera análoga a cambios térmicos.

El estudio del impacto del calor en sistemas con movimiento giratorio ha sido ampliamente investigado en experimentos de mecánica de fluidos. En particular, investigaciones sobre el tubo de Ranque-Hilsch, aparato que crea corrientes rotativas usando aire comprimido, muestran que la expansión sin intercambio de calor en el centro del remolino causa una baja importante en la temperatura y disminuye la velocidad de giro (Xue et al., 2010). Además, cuando la temperatura es baja, la viscosidad aumenta y esto limita el movimiento de rotación; aunque este efecto se ha analizado mayormente en ingeniería térmica, los mismos principios se pueden aplicar a sistemas marinos con fuerzas externas, ya que la relación entre temperatura, viscosidad y rotación obedece a las mismas leyes de conservación del momento y la energía interna (González-Estrada et al., 2022).

Es así que investigaciones recientes, en el campo del modelado oceanográfico, muestran que la forma en que se distribuye el calor en el océano en tres dimensiones depende mucho del movimiento de remolinos de tamaño medio, sobre todo en zonas con mucha actividad como el Atlántico Norte. Cosne et al. (2019) desarrollaron un modelo de regresión por clases latentes que combina observaciones satelitales y perfiles térmicos in situ para predecir la temperatura vertical del océano, concluyendo que las estructuras vorticosas se comportan de

Mendoza Arce, E. (2025). Bajas temperaturas afectan a la rapidez con que gira un remolino de agua de mar. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(2), 101-117.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/206>

julio - diciembre (2025) ISSN 2806-5573

manera diferenciada según las condiciones térmicas superficiales. Esto reafirma que los gradientes de temperatura, no solo modifican la estabilidad de los remolinos, sino también su velocidad de rotación y capacidad de transporte vertical.

Del mismo modo, en la atmósfera, se ha documentado que los sistemas rotacionales a gran escala responden de forma sensible a los cambios térmicos. Kim & Choi (2024) y Xu et al. (2024) mostraron a través de simulaciones del proyecto PAMIP que la disminución del hielo marino en zonas como Barents-Kara (Océano Ártico) debilita el vórtice polar en la estratósfera al aumentar la subida de ondas planetarias. Este debilitamiento influye en la circulación del aire cerca de la superficie y está relacionado directamente con cambios térmicos en la región. Estos resultados permiten comparar los efectos del enfriamiento en sistemas rotatorios del océano y de la atmósfera; en ambos casos, la bajada de temperatura reduce la energía del movimiento y con ello la velocidad de rotación.

Se añaden a esta información investigaciones recientes que analizan la relación entre los remolinos y las variaciones de temperatura en diversos climas. Renault et al. (2024) confirmaron, a través de simulaciones minuciosas del modelo climático EC-Earth, que el efecto de las corrientes marinas en la atmósfera, conocido como retroalimentación de corriente, provoca una reducción de energía en los remolinos de tamaño medio. Este fenómeno, denominado eddy killing, puede reducir hasta un 30 % la energía de rotación de dichos remolinos. Este efecto estabiliza las Corrientes de Borde Occidental como el Gulf Stream y el Kuroshio, además de modificar la distribución térmica en la superficie del océano. Estos cambios tienen un impacto directo en la baroclinicidad de la atmósfera, lo que influye en la intensidad de las tormentas extra tropicales, evidenciando así el vínculo entre la temperatura del océano y el comportamiento de los vórtices.

En este contexto, el estudio realizado por Rallu de Malibrán et al. (2024) describe cómo las olas de calor marinas que se presentaron en el Golfo de Alaska entre 2013 y 2023 causaron una reducción continua en la circulación del océano y en los grandes remolinos anticiclónicos. Las condiciones atmosféricas de surgencia costera empeoraron, debido a cambios en la presión del sistema de bajas aleutianas, lo que generó un entorno desfavorable para la formación de grandes vórtices. Esto provocó disminución en la cantidad y en la fuerza de los remolinos anticiclónicos, además de una pérdida en la productividad biológica, porque estos remolinos son fundamentales para transportar nutrientes hacia el interior del golfo. Este descubrimiento apoya la idea que la temperatura influye en la duración, la estructura y el movimiento de los remolinos marinos (Kim & Choi, 2024).

El incremento de la temperatura del agua conduce a una disminución de su viscosidad debido a una mayor agitación molecular, lo que facilita el desarrollo de flujos vorticosos rápidos y estables (González-Estrada et al., 2022). 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., (2024) y Xue et al. (2010) y muestra que la eficiencia y la

Mendoza Arce, E. (2025). Bajas temperaturas afectan a la rapidez con que gira un remolino de agua de mar. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(2), 101-117.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/206>

julio - diciembre (2025) ISSN 2806-5573

energía de rotación de sistemas en movimiento son muy afectadas por la temperatura del líquido. A pesar de los avances en teoría y en el uso de computadoras, no hay mucha evidencia directa que mida cómo las bajas temperaturas cambian la velocidad de rotación de un remolino en un ambiente controlado, especialmente, en escalas medianas y en condiciones de laboratorio simuladas. Según González-Estrada et al. (2022), para un enfoque aplicado en petróleo, esta carencia resulta crítica en un contexto de cambio climático global. Una alteración de los gradientes térmicos oceánicos y el incremento de eventos extremos (olas de calor marinas o anomalías frías tipo La Niña) pueden modificar drásticamente la frecuencia, intensidad y comportamiento de los vórtices marinos.

Esta investigación tuvo 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. Esto 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.

## 2. METODOLOGÍA

La investigación llevada a cabo tuvo como objetivo analizar de qué manera la temperatura afecta la rapidez de rotación de un vórtice creado de manera controlada en agua. Para alcanzar este fin, se diseñó un aparato experimental en un laboratorio que consistió en un contenedor con forma cilíndrica conectado a un sistema que rota el líquido. El aparato diseñado para generar el remolino fue fabricado con componentes reutilizados de una batidora con una potencia de 375 W. Además, se utilizó un cilindro de plástico que posee un diámetro de 250 mm, una altura de 180 mm y una capacidad útil de 3.5 L. También, se incorporó un mecanismo de ensamblaje que unió la parte inferior del cilindro con el vaso de la batidora mediante adhesivo de contacto, garantizando un sellado seguro. Dentro del cilindro se instaló un mezclador de acero inoxidable conectado directamente al eje del motor para crear un movimiento rotativo constante en el líquido.

La variable independiente del experimento fue la temperatura del agua, con tres niveles definidos:

- Condición fría:  $2,5 \pm 0,2$  °C
- Condición ambiente:  $26 \pm 0,2$  °C
- Condición caliente:  $48 \pm 0,2$  °C

El líquido utilizado fue destilado para asegurar que el entorno mantuviera consistencia en sus características físicas y químicas. La temperatura se controló mediante técnicas térmicas simples, aplicando hielo para enfriar la muestra y usando un calentador eléctrico para elevar su temperatura, mientras que se consideró la temperatura ambiental para un estado intermedio. Las muestras se manipularon con precaución para evitar la pérdida de calor al ser transferidas al sistema de experimentación. La cantidad de agua utilizada en cada prueba permaneció constante y se señaló con una marca distintiva en el contenedor para garantizar que las evaluaciones pudieran llevarse a cabo con resultados consistentes. Los experimentos se ejecutaron en un entorno regulado, sin corrientes de aire que modificaran las condiciones ni interferencias mecánicas externas que pudieran afectar los resultados.

### Instrumentación

Para medir la velocidad tangencial del flujo que gira se empleó un Laser Doppler Anemómetro o LDA del modelo Dantec Dynamics. Este instrumento permite obtener la velocidad del fluido sin necesidad de tocarlo físicamente. Esto se logra analizando el cambio en la frecuencia Doppler que ocurre cuando partículas en movimiento cruzan un haz de láser dividido en dos partes. El sistema LDA constó de los siguientes componentes:

- Unidad generadora de haces láser.
- Sistema de posicionamiento automatizado (robot LDA).
- Unidad de procesamiento de señal.
- Interfaz computacional con el software BSA Flow.

El componente óptico del LDA fue modificado al regular la palanca de soporte, de manera que se adaptara al tamaño del contenedor de experimentación. Posteriormente, se programó al robot para que se desplace siguiendo trayectorias circulares y realice mediciones en ubicaciones determinadas. Finalmente, se seleccionaron tres distancias desde el centro del remolino: 50 mm, 70 mm y 90 mm, que corresponden a trayectorias próximas al borde del flujo giratorio.

Cada medición capturó las componentes de velocidad en los ejes X y Y; adicional, la velocidad tangencial se calculó aplicando el teorema de Pitágoras:

$$V_F = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$$

Las mediciones fueron automatizadas, con una resolución temporal de 4 segundos por punto, permitiendo una alta precisión y consistencia de los datos.

## Procedimiento

**Tabla 1**

*Fases del procedimiento experimental.*

N°	Fase	Descripción del procedimiento
1.	<b>Preparación del fluido</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muestra fría: agua destilada almacenada en hielera con hielo picado hasta alcanzar <math>2,5 \pm 0,2</math> °C.</li> <li>- Muestra caliente: calentamiento en calderín hasta <math>48 \pm 0,2</math> °C.</li> <li>- Muestra intermedia: agua a temperatura ambiente (<math>26 \pm 0,2</math> °C).</li> </ul>
2.	<b>Llenado del recipiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verter el agua hasta el nivel de referencia marcado previamente en el recipiente.</li> <li>- Permitir reposo durante 1 minuto para estabilización del fluido.</li> </ul>
3.	<b>Activación del sistema rotacional</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Encender el motor de la licuadora para inducir la formación del remolino forzado.</li> <li>- Asegurar que el flujo sea estable y sin perturbaciones visibles.</li> </ul>
4.	<b>Configuración del sistema LDA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Programar el robot del LDA mediante el software BSA Flow.</li> <li>- Definir coordenadas para 13 puntos por cada radio: 50 mm, 70 mm y 90 mm.</li> <li>- Asegurar fijación y alineación del cabezal óptico.</li> </ul>
5.	<b>Medición automatizada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Iniciar la adquisición de datos para cada muestra térmica.</li> <li>- El robot realiza mediciones secuenciales de <math>V_x</math> y <math>V_y</math> en cada punto (duración: ~4 s por punto).</li> </ul>
6.	<b>Recolección de datos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exportar los datos obtenidos desde el software.</li> <li>- Calcular la rapidez tangencial para cada punto.</li> </ul>
7.	<b>Control de condiciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medir temperatura inicial y final del agua para cada ensayo.</li> <li>- Remover burbujas y evitar salpicaduras antes de cada medición para no afectar el haz láser.</li> </ul>
8.	<b>Procesamiento final</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calcular la velocidad promedio por cada radio.</li> <li>- Representar gráficamente la relación entre temperatura y rapidez para cada conjunto de datos.</li> </ul>
9.	<b>Cierre del experimento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vaciar y limpiar el sistema.</li> <li>- Restaurar el equipo LDA a su configuración original.</li> <li>- Archivar y respaldar los datos experimentales obtenidos.</li> </ul>

*Fuente:* autoría propia.

## 3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los hallazgos del estudio. 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, 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,

Mendoza Arce, E. (2025). Bajas temperaturas afectan a la rapidez con que gira un remolino de agua de mar. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(2), 101-117.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/206>

julio - diciembre (2025) ISSN 2806-5573

en cada temperatura se registraron 39 puntos distribuidos angularmente en cada radio, con una resolución temporal de aproximadamente 4 segundos por cada punto. Los resultados muestran una correlación positiva clara entre la temperatura del agua y la rapidez angular del remolino, con una variación significativa en la magnitud de la velocidad tangencial promedio para cada condición térmica y radio evaluado.

**Condición de temperatura: 26°C (temperatura ambiente)**

**Tabla 2**

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

R (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)	R (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)	R (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)
50	50	0	-0.66	-0.12	0.67	70	70	0	-0.54	-0.13	0.56	90	90	0	-0.44	-0.01	0.44
50	43.30	-25	-0.62	-0.29	0.69	70	60.62	35	-0.44	0.35	0.56	90	77.94	-45	-0.40	-0.26	0.48
50	25	-43.30	-0.29	-0.61	0.67	70	35	60.62	-0.21	0.57	0.60	90	45	-77.94	N/A	N/A	N/A
50	0	-50	-0.41	-0.38	0.56	70	0	70	-0.02	0.56	0.56	90	0	-90	0.03	-0.53	0.53
50	-25	-43.30	0.11	-0.43	0.44	70	-35	60.62	0.34	0.59	0.69	90	-45	-77.94	0.29	-0.46	0.54
50	-43.30	-25	0.20	-0.46	0.50	70	-60.62	35	0.60	0.30	0.67	90	-77.94	-45	0.43	-0.30	0.52
50	-50	0	0.47	-0.25	0.53	70	-70	0	0.60	-0.06	0.60	90	-90	0	0.49	0.07	0.49
50	-43.30	25	0.52	-0.14	0.53	70	-60.62	-35	0.45	-0.39	0.60	90	-77.94	45	0.43	0.25	0.50
50	-25	43.30	0.29	0.30	0.42	70	-35	-60.62	0.33	-0.53	0.63	90	-45	77.94	-0.19	0.40	0.44
50	0	50	0.04	0.45	0.45	70	0	-70	0.03	-0.62	0.62	90	0	90	0.02	0.43	0.43
50	25	43.30	-0.31	0.45	0.55	70	35	-60.62	-0.25	-0.46	0.53	90	45	77.94	-0.21	0.38	0.44
50	43.30	25	-0.47	0.36	0.59	70	60.62	-35	-0.38	-0.34	0.51	90	77.94	45	-0.35	0.27	0.44
50	50	0	-0.65	-0.14	0.66	70	70	0	-0.54	-0.04	0.54	90	90	0	-0.46	-0.04	0.46

Fuente: autoría propia.

En la Tabla 2 se presentan las lecturas de la velocidad tangencial Vt que se registraron a una temperatura de  $26 \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , empleando un Anemómetro Láser Doppler LDA. Las observaciones se realizaron en tres radios concéntricos en relación al centro del remolino forzado: 50 milímetros, 70 milímetros y 90 milímetros. En total se recogieron datos en 39 puntos, ubicados en distintos ángulos para garantizar una representación adecuada del campo de velocidades. Los valores de la velocidad tangencial variaron entre 0,42 m/s y 0,69 m/s, lo que indica una moderada diferencia en la manera en que se distribuyen las velocidades dentro de la estructura en forma de vórtice. La velocidad máxima registrada fue de 0,69 m/s en una ubicación intermedia a 70 mm del centro, mientras que la velocidad mínima de 0,42 m/s se detectó en la región más externa a 90 mm del centro. Esta distribución concuerda con lo que establecen los principios de dinámica de fluidos en vórtices forzados, donde la energía cinética es mayor en las áreas adyacentes al núcleo, ya que en esos lugares las fuerzas que disipan energía, como la viscosidad y la fricción con las paredes del contenedor, tienen un menor impacto.

El estudio de los promedios por radio mostró que la velocidad tangencial fue menor. Cuando la distancia radial aumentó en un radio de 50 mm se obtuvo una velocidad de 0.53 m/s, en un radio de 70 mm se registró 0.59 m/s y en un radio de 90 mm bajó a 0.48 m/s, lo que refleja que en general las velocidades disminuyen hacia los radios más alejados. La media de la velocidad tangencial global, calculada a partir de todas las observaciones, fue de 0,53 m/s. Esto sugiere que el sistema se

encontraba en un equilibrio térmico y ofrece un punto de referencia intermedio para comparar con las condiciones del agua fría a 2,5 °C y el agua caliente a 48 °C. Estos hallazgos evidencian que, aun cuando se presentaron condiciones térmicas estables, el vórtice experimenta un cambio progresivo de velocidad, desde el centro hacia los bordes. Este es resultado de cómo el impulsor distribuye el movimiento rotacional y de la interacción entre la viscosidad del líquido y el contacto con las paredes del contenedor. Este patrón es consistente con el comportamiento esperado de sistemas de vórtices creados artificialmente en fluidos nuevos, confirmando así la exactitud del diseño experimental y del método de medición.

**Condición de temperatura: 2.5°C (temperatura fría)**

**Tabla 3**

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

R (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)	R (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)	R (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)
50	50	0	-0.48	0.13	0.50	70	70	0	-0.47	0.06	0.47	90	90	0	-0.42	-0.01	0.42
50	43.30	-25	-0.41	-0.12	0.43	70	60.62	35	-0.44	0.27	0.52	90	77.94	-45	-0.43	-0.19	0.47
50	25	-43.30	-0.39	-0.56	0.68	70	35	60.62	-0.25	0.42	0.49	90	45	-77.94	-0.28	-0.43	0.52
50	0	-50	-0.29	-0.12	0.31	70	0	70	0.01	0.50	0.50	90	0	-90	0.05	-0.51	0.51
50	-25	-43.30	-0.13	-0.30	0.33	70	-35	60.62	0.23	0.48	0.53	90	-45	-77.94	0.31	-0.47	0.56
50	-43.30	-25	0.08	-0.16	0.18	70	-60.62	35	0.56	-0.26	0.62	90	-77.94	-45	0.49	-0.24	0.55
50	-50	0	0.42	-0.12	0.44	70	-70	0	0.59	0.12	0.60	90	-90	0	0.53	0.05	0.53
50	-43.30	25	0.26	0.05	0.27	70	-60.62	-35	0.56	-0.50	0.56	90	-77.94	45	0.43	0.28	0.51
50	-25	43.30	0.23	0.25	0.34	70	-35	-60.62	0.25	-0.50	0.56	90	-45	77.94	-0.21	0.38	0.44
50	0	50	-0.26	0.22	0.34	70	0	-70	-0.03	-0.55	0.55	90	0	90	0.01	0.42	0.42
50	25	43.30	-0.27	0.46	0.53	70	35	-60.62	-0.30	-0.46	0.55	90	45	77.94	-0.17	0.46	0.49
50	43.30	25	-0.36	0.18	0.40	70	60.62	-35	-0.43	-0.24	0.49	90	77.94	45	-0.38	0.30	0.48
50	50	0	-0.48	0.16	0.50	70	70	0	-0.49	0.04	0.49	90	90	0	-0.46	-0.04	0.46

Fuente: autoría propia.

En la Tabla 3 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: 50 mm, 70 mm y 90 mm. 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 velocidades 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 disminución 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.

**Condición de temperatura: 48°C (temperatura caliente)**

**Tabla 4**

*Velocidad tangencial medida a 48 °C en radios de 50, 70 y 90 mm.*

R (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)	R (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)	R (mm)	X (mm)	Y (mm)	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vt (m/s)
50	50	0	-0.66	0.12	0.67	70	70	0	-0.62	0.02	0.62	90	90	0	-0.47	0.00	0.47
50	43.30	-25	-0.52	0.44	0.68	70	60.62	35	-0.54	0.22	0.58	90	77.94	-45	-0.45	-0.16	0.48
50	25	-43.30	-0.72	-0.03	0.72	70	35	60.62	-0.37	0.54	0.66	90	45	-77.94	-0.32	-0.43	0.54
50	0	-50	-0.01	-0.68	0.68	70	0	70	0.03	0.68	0.68	90	0	-90	-0.04	-0.57	0.57
50	-25	-43.30	-0.27	-0.64	0.70	70	-35	60.62	0.34	0.59	0.69	90	-45,00	-77,94	0,31	-0,47	0,56
50	-43.30	-25	0.31	-0.54	0.62	70	-60.62	35	0.48	0.38	0.61	90	-77,94	-45,00	0,49	-0,24	0,55
50	-50	0	0.34	-0.64	0.73	70	-70	0	0.61	0.12	0.63	90	-90,00	0,00	0,53	0,05	0,53
50	-43.30	25	0.50	0.43	0.66	70	-60.62	-35	0.50	-0.32	0.60	90	-77,94	45,00	0,43	0,28	0,51
50	-25	43.30	0.25	0.66	0.71	70	-35	-60.62	0.21	-0.59	0.63	90	-45,00	77,94	0,23	0,44	0,50
50	0	50	0.07	0.69	0.70	70	0	-70	-0.05	-0.66	0.66	90	0,00	90,00	-0,01	0,50	0,50
50	25	43.30	-0.33	0.59	0.68	70	35	-60.62	-0.36	-0.52	0.63	90	45,00	77,94	-0,17	0,46	0,49
50	43.30	25	-0.53	0.38	0.65	70	60.62	-35	-0.53	-0.23	0.58	90	77,94	45,00	-0,38	0,30	0,48
50	50	0	-0.65	0.08	0.65	70	70	0	-0.55	0.11	0.56	90	90,00	0,00	-0,46	-0,04	0,46

Fuente: autoría propia.

En la Tabla 4 se presentan los valores de la velocidad tangencial Vt que están relacionados con la situación de alta temperatura de 48 ± 0,2 °C. Las evaluaciones se llevaron a cabo en los tres radios concéntricos: 50 mm, 70 mm y 90 mm, en un total de 39 ubicaciones distribuidas angularmente, lo que indica un incremento significativo en comparación con las condiciones de baja temperatura y temperatura ambiente. Los valores de Vt variaron entre 0,46 m/s y 0,73 m/s, siendo este el intervalo más elevado registrado entre las tres condiciones analizadas. La velocidad máxima de 0,73 m/s se detectó en el radio interno de 50 mm, mientras que la mínima de 0,46 m/s se registró en el radio externo de 90 mm. El análisis de los promedios por radio indicó que, en el radio de 50 mm, el valor fue de 0,67 m/s, en el de 70 mm fue de 0,62 m/s, y en el de 90 mm fue de 0,52 m/s.

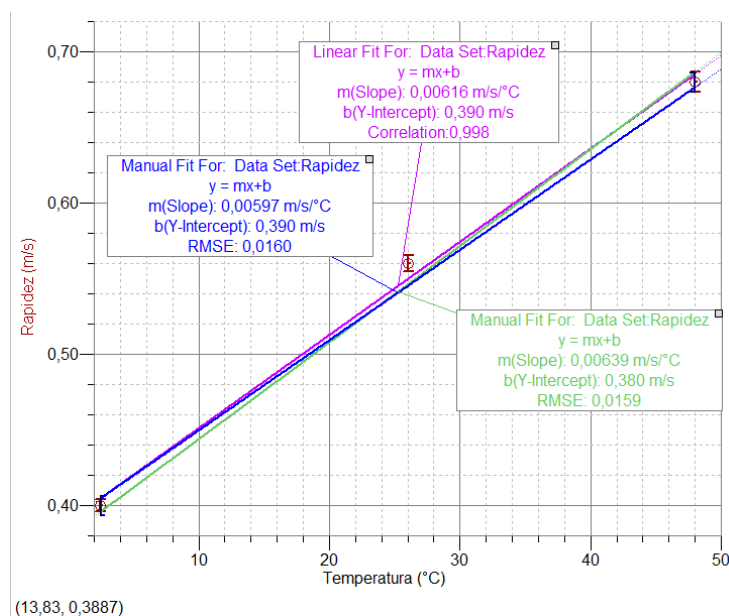
La velocidad tangencial promedio a nivel global fue de 0,68 m/s, lo que representó un incremento de casi el 28 % en comparación con la temperatura

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.

## Resultados para el radio de 50 mm

**Figura 1**

*Rapidez versus temperatura radio de 50 mm.*



Fuente: autoría propia.

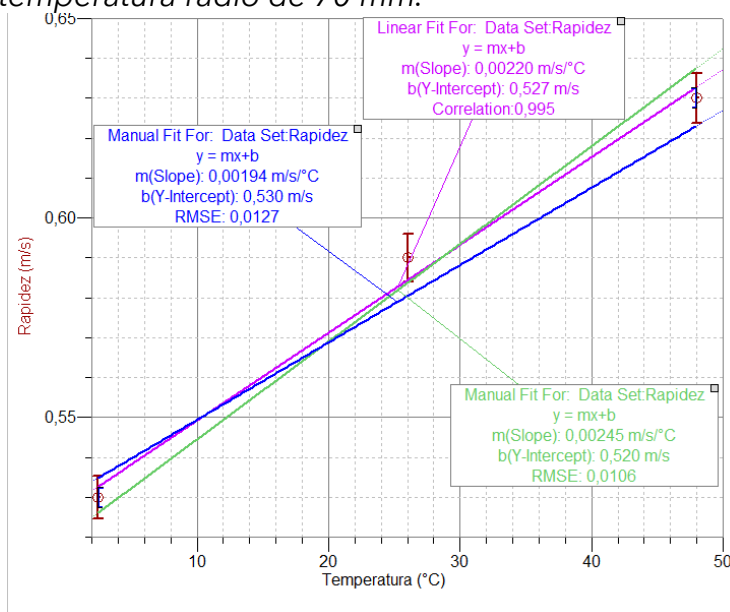
En la Figura 1 se presenta la conexión entre la velocidad tangencial media y la temperatura del agua para un radio de 50 mm, que representa la zona central del vórtice forzado. Los datos son promedios recolectados a partir de mediciones realizadas con un sistema de Anemometría Láser Doppler LDA en tres temperaturas evaluadas: 2,5 °C, 26 °C y 48 °C. Esta figura ilustra la relación entre la velocidad tangencial promedio y la temperatura del agua, cuando el radio es de cincuenta milímetros en un remolino forzado. Los puntos reflejan los valores promedios obtenidos en los ensayos para cada temperatura. La línea violeta simboliza la pendiente que más se ajusta con un valor de  $2,2 \times 10^{-3}$ , las líneas verdes y azules muestran la pendiente máxima de  $2,45 \times 10^{-3}$  y la pendiente mínima de  $1,94 \times 10^{-3}$ , respectivamente. Las incertidumbres en el eje de temperatura no se mencionan, ya que son insignificantes, mientras que en el eje de velocidad tangencial sí se presentan, dado que tienen relevancia estadística.

La tendencia registrada indica que hay una conexión clara y relevante entre la temperatura del líquido y la rapidez de rotación en el núcleo del vórtice, dado que al incrementarse la temperatura el agua pierde viscosidad, lo que facilita la transmisión de la potencia producida por el impulsor resultando en una mayor velocidad de giro. El radio de 50 mm representa la región donde la energía en movimiento es más fuerte y donde la variación de velocidad hacia el exterior es más notoria dentro del vórtice. El impacto de los cambios térmicos se percibe de forma más clara en esta sección en comparación con áreas medias o externas. Esto indica que el giro es altamente receptivo a los cambios en las características físicas y químicas del líquido, especialmente, en el núcleo del vórtice, donde el intercambio de movimiento es más directo y menos afectado por la pérdida de energía.

## Resultados para el radio de 70 mm

### Figura 2

Rapidez versus temperatura radio de 70 mm.



Fuente: autoría propia.

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 con respecto al núcleo, aunque aún mantiene un contenido significativo de energía cinética. Esta figura muestra cómo se relaciona la velocidad tangencial promedio con la temperatura del agua para un radio de 70 mm. En un remolino forzado, los puntos indican los valores promedio obtenidos en los experimentos para temperaturas de 2,5 °C 26 °C y 48 °C, la línea de color violeta representa la pendiente con el mejor ajuste calculada en  $2,8 \times 10^{-3}$  mientras que las líneas verde y azul señalan la pendiente más alta con un valor de  $3,05 \times 10^{-3}$  y la más baja con un valor de  $2,55 \times 10^{-3}$ . No se muestran valores de incertidumbre en el eje X por considerarse insignificantes, pero sí se presentan en el eje Y debido a su importancia estadística.

Mendoza Arce, E. (2025). Bajas temperaturas afectan a la rapidez con que gira un remolino de agua de mar. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(2), 101-117.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/206>

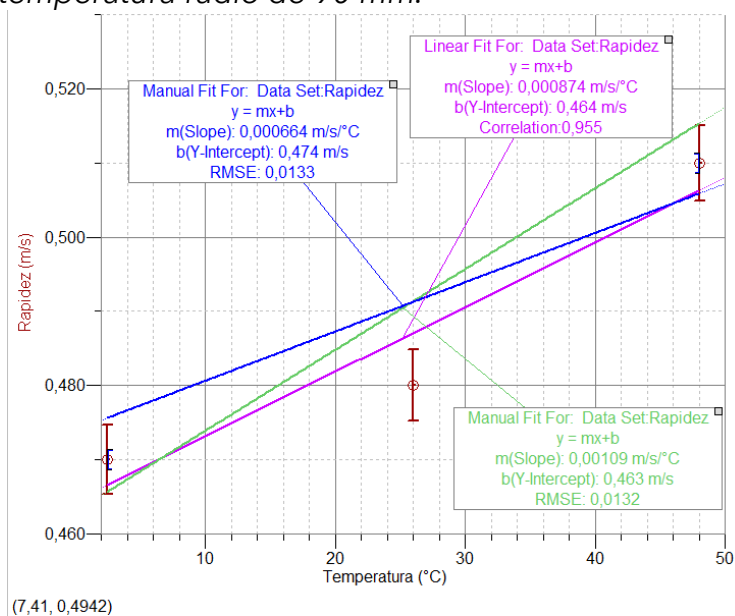
julio - diciembre (2025) ISSN 2806-5573

Los hallazgos indican que en esta área la rapidez tangencial crece de forma continua al elevarse la temperatura, con una variación térmica más pronunciada que la que se registra en el núcleo de 50 mm. Esto ocurre, porque en esta sección la fricción generada por el impulsor en movimiento impacta menos que en el centro y también porque hay una relación más ventajosa entre la energía cinética que el fluido absorbe y la reducción de energía debido a la resistencia interna del sistema. Por lo tanto, el radio de 70 mm corresponde a un área donde el calor influye, de manera notable, en el movimiento de rotación y alcanza su mejor rendimiento en el traspaso de impulso de giro lo que provoca una reacción más evidente ante variaciones de temperatura.

## Resultados para el radio de 90 mm

**Figura 3**

Rapidez versus temperatura radio de 90 mm.



Fuente: autoría propia.

En la Figura 3 se muestra cómo se relaciona la velocidad tangencial promedio con la temperatura del agua para un radio de 90 mm que corresponde a la parte externa del remolino forzado, donde la velocidad angular disminuye de forma notable debido a que la fricción con las paredes del recipiente y la pérdida de energía por efecto de la viscosidad tienen una influencia mayor. La figura muestra cómo se relaciona la velocidad tangencial promedio con la temperatura del agua para un radio de noventa milímetros. En un remolino forzado los puntos indican los valores promedio obtenidos en experimentos con temperaturas de 2,5 °C, 26 °C y 48 °C, la línea de color violeta representa la pendiente que mejor se ajusta con un valor de  $8,0 \times 10^{-4}$  mientras que la línea verde representa la pendiente máxima con un valor de  $9,5 \times 10^{-4}$  y la línea azul representa la pendiente mínima con un valor de  $6,5 \times 10^{-4}$ . No se muestran incertidumbres en el eje X porque son insignificantes en cambio en el eje Y sí se presentan debido a que tienen importancia.

Mendoza Arce, E. (2025). Bajas temperaturas afectan a la rapidez con que gira un remolino de agua de mar. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(2), 101-117.

<http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/206>

julio - diciembre (2025) ISSN 2806-5573

Los hallazgos indican que, aunque la temperatura y la velocidad tangencial aumentan simultáneamente, el incremento de temperatura es inferior al de las áreas más internas. Esto sugiere que la zona exterior del remolino tiene una reacción limitada a los cambios térmicos. Esta reducción en la influencia térmica ocurre porque predominan las pérdidas energéticas que afectan la eficiente transferencia del movimiento rotacional en esta área. En resumen, la velocidad tangencial en la porción externa se debe a la energía de rotación proveniente del núcleo, junto con las pérdidas provocadas por la fricción y la viscosidad, lo que resulta en velocidades significativamente más bajas y una respuesta menos intensa a las variaciones de temperatura en comparación con las zonas más cercanas al centro.

#### 4. DISCUSIÓN

Los resultados del estudio muestran que la temperatura del fluido afecta directamente la velocidad con la que gira un remolino forzado. Este efecto se entiende a partir de los principios de la dinámica de fluidos y la termodinámica molecular, donde la viscosidad es un factor importante que define cómo se transmite el movimiento de giro.

A una temperatura de 2,5 °C, la energía de movimiento de las moléculas disminuye y la viscosidad aumenta, lo que hace que las capas del fluido se muevan con mayor dificultad. Esta mayor resistencia interna provoca que el impulsor no pueda transferir la energía al sistema de manera eficiente y las velocidades tangenciales promedio sean un 17 % menores a las de temperatura ambiente. Este resultado coincide con González-Estrada et al. (2022) y Xue et al. (2010), sobre sistemas de vórtices forzados y naturales donde se demuestra que un aumento en la viscosidad reduce la transmisión del movimiento de rotación.

A temperaturas altas de 48 °C, la menor viscosidad provocada por una agitación molecular más intensa facilita que el impulsor transfiera el momento angular al fluido de manera más eficiente. Esto produce un incremento del 28 % en comparación con la temperatura ambiente y superior al 50 % respecto a la condición fría. También se observó que en estas condiciones la pérdida de velocidad hacia el borde del vórtice es menos intensa, lo que indica que la fricción disipa menos energía y esto ayuda a que el remolino se mantenga estable y dure más tiempo. Un efecto similar fue encontrado por Ding et al. (2021) en sistemas de convección térmica rotacional, donde los vórtices cálidos mostraron comportamientos de desplazamiento y organización colectiva que favorecen su mantenimiento frente a la disipación, sugiriendo que la temperatura modifica la magnitud de la rotación y la coherencia estructural del vórtice.

La distribución 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.

Los resultados coinciden con lo observado en estudios de oceanografía física, donde en lugares fríos como las zonas de latitudes altas o las áreas con fuerte afloramiento, los remolinos suelen girar de forma más lenta, mientras que en aguas cálidas como las regiones tropicales se forman vórtices más rápidos y estables según lo reportado por Rallu de Malibrán et al. (2024) y Renault et al. (2024). De acuerdo con lo señalado por (Lin et al., 2013), las investigaciones sobre el comportamiento interno de los remolinos en sistemas de refrigeración han mostrado que el incremento de la fuerza del flujo y el aprovechamiento del momento angular dependen, no solo de la energía con la que ingresa el agua, sino también de la manera en que se unen los flujos secundarios y los flujos de impacto en tres dimensiones.

Du et al. (2017) aporta un paralelo relevante: sus simulaciones numéricas en condiciones de rotación evidenciaron que, así como la temperatura en el presente experimento modifica la viscosidad y el transporte de momento angular, el número de rotación ( $Ro$ ) y la relación de densidad en sistemas de refrigeración por vórtices alteran de manera significativa la intensidad de la transferencia de calor y la estructura de las líneas de corriente. En dicho estudio, se identificó que una mayor densidad relativa del fluido de enfriamiento (análogo a una menor temperatura en términos de efecto sobre el gradiente de densidad) puede intensificar la transferencia de calor, mientras que un incremento en el  $Ro$  reduce la velocidad del flujo y, por ende, su eficiencia térmica. Esto coincide con la idea central que la persistencia y eficacia del vórtice dependen de un equilibrio óptimo entre propiedades termo físicas y condiciones dinámicas de operación.

En resumen, la investigación demuestra que la temperatura influye en la velocidad con 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., 2021; Du et al., 2017; Lin et al., 2013) 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.

## 5. CONCLUSIONES / CONSIDERACIONES FINALES

Los hallazgos indican que la temperatura del agua influye directamente en la rapidez de rotación de un remolino forzado en un entorno 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 demostró que la sección más central del remolino, que mide 50 mm de diámetro, es la más receptiva a las variaciones de temperatura, ya que está en contacto directo con la fuente de energía y la fricción con las paredes del recipiente tiene un impacto mínimo. La región central de 70 mm mostró el cambio más significativo respecto a la temperatura, lo que sugiere que hay un balance apropiado entre la energía que recibe y la resistencia generada por la viscosidad. En la zona exterior de 90 mm, el cambio térmico fue menor, debido a que en esta área predominan las pérdidas de energía causadas por la fricción y la disipación a través de la 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 repartición del 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.

## 6. REFERENCIAS

- Cheng, Y., Li, W., Ma, S., Ji, L., Xiao, C., & Li, Y. (2024). The influence of different working fluid temperatures on the hydraulic performance of magnetic vortex pumps. *Water*, 16(11), 1601. <https://doi.org/10.3390/w16111601>
- Cosne, G., Maze, G., & Tandeo, P. (2019). *Coupling oceanic observation systems to study mesoscale ocean dynamics*.
- Costa, A., & Macedonio, G. (2005). *Viscous heating effects in fluids with temperature-dependent viscosity: Triggering of secondary flows*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.physics/0312066>
- Cruz Gómez, R. C., Monreal Gómez, M. A., & Bulgakov, S. N. (2008). Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia*, 33(10), 741-746. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33931006>
- Ding, S.-S., Chong, K. L., Shi, J.-Q., Ding, G.-Y., Lu, H.-Y., Xia, K.-Q., & Zhong, J.-Q. (2021). Inverse centrifugal effect induced by collective motion of vortices in rotating thermal convection. *Nature Communications*, 12(1), 5585. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25838-3>
- Mendoza Arce, E. (2025). Bajas temperaturas afectan a la rapidez con que gira un remolino de agua de mar. *Revista Cotopaxi Tech*, 5(2), 101-117. <http://ojs.isuc.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/206>  
julio - diciembre (2025) ISSN 2806-5573

- Du, H., Liao, G., Liu, Z., Lin, Y., & Zhu, S. (2017). Estudio numérico del flujo de enfriamiento por vórtices y el comportamiento de la transferencia de calor en condiciones de rotación. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 105, 638-647. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.028>
- Gardea-Villegas, H. (2001). Conceptos básicos sobre la formación y teoría de los vórtices. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 2(2), 81-87. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2001.02n2.009>
- González-Estrada, O. A., Rojas-Nova, M. A., & González-Silva, G. (2022). Effect of temperature on a vortex reactor for hydrodynamic cavitation. *Ingeniería e Investigación*, 42(3), e93419. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.93419>
- Kim, S.-J., & Choi, H. (2024). Polar vortex weakening and its impact on surface temperature in recent decades. *Polar Research*, 43, Article 9723. <https://doi.org/10.33265/polar.v43.9723>
- Lin, G., Du, H., Duan, Y., & Zhang, Y. (2013). Investigation on heat transfer enhancement and pressure loss of double swirl chambers cooling. *Applied Thermal Engineering*, 57(1-2), 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.042>
- Omer, A. M. (2008). Energía, medio ambiente y desarrollo sostenible. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2265-2300. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001>
- Rallu de Malibran, M. C., Kaplan, C. M., & Di Lorenzo, E. (2024). Marine heatwaves suppress ocean circulation and large vortices in the Gulf of Alaska. *Communications Earth & Environment*, 5, Article 622. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01785-x>
- Renault, L., Arsouze, T., Desbiolles, F., & Small, J. (2024). Rectification effects of regional air-sea interactions over western boundary current on large-scale sea surface temperature and extra-tropical storm tracks. *Scientific Reports*, 14, Article 31771. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82667-2>
- Xu, M., Screen, J. A., Tian, W., Zhang, J., Zhang, C., & Yu, H. (2024). Influence of regional sea ice loss on the Arctic stratospheric polar vortex. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(15), e2023JD040571. <https://doi.org/10.1029/2023JD040571>
- Xue, Y., Arjomandi, M., & Kelso, R. M. (2010). A critical review of temperature separation in a vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(8), 1367-1374. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.06.010>