



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

LOCOMOCIÓN DE ROBOTS MAGNÉTICOS  
EN FLUIDOS CON PARTÍCULAS  
SUSPENDIDAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero mecánico**

PRESENTA:

**Johnny Amadeus Puente Velázquez**



DIRECTOR DE TESIS:  
Dr. Francisco Antonio Godínez Rojano

México, D.F., 2015



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



*A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad, por la formación que me han  
dado. A mi familia con José Luis incluido. A mis amigos. Es gracias a ustedes  
que es posible el presente trabajo.  
En verdad, gracias.  
Yo.*



# Agradecimientos

---

Agradezco a Dios ser maravilloso que me dió fuerza y fe para creer en lo que me parecía lejano terminar. A mi mamá por alentarme e impulsarme toda mi vida. A mi hermano Brian y a mi casi hermano Aaron que nunca dejaron de creer en mí. A toda mi familia, la que conozco y la que aún no. En especial quiero expresar mi más grande agradecimiento a José Luis que sin su ayuda hubiera sido imposible culminar mi profesión. A Miriam por ser el inicio de todo esto. A Omar, Tucuch, Arzápalo, Ariel, Alonso, Laura, Hugo, Hector, Isma y Rafael por ser los mejores amigos que he podido tener. Al Dr. Francisco Godínez por su apoyo total, dirección y amistad. Al Dr. Roberto Zenit por formarme, confiar en mí y darme esta oportunidad. Finalmente quiero agradecer al IIM por el equipo e instalaciones, a la Facultad y a la Universidad por todo lo que aún me da.



# Declaración de autenticidad

---

Por la presente declaro que, salvo cuando se haga referencia específica al trabajo de otras personas, el contenido de esta tesis es original y no se ha presentado total o parcialmente para su consideración para cualquier otro título o grado en esta o cualquier otra Universidad. Esta tesis es resultado de mi propio trabajo y no incluye nada que sea el resultado de algún trabajo realizado en colaboración, salvo que se indique específicamente en el texto.

Johnny Amadeus Puente Velázquez. México, D.F., 2015





# Resumen

---

Se estudió experimentalmente el desempeño de nado a bajo número de Reynolds de robots magnéticos en suspensiones (mezclas de partículas y un fluido). Se fabricaron cuatro nadadores con diferentes características geométricas y estructurales. Cada robot consta de una cabeza cilíndrica unida a una cola. La cabeza se construyó con tubo de polietileno en cuyo interior se coloca un imán permanente y se atrapa una cantidad de aire para lograr la flotación neutra del dispositivo, las dimensiones de la cabeza se mantuvieron constantes en los cuatro robots. Se utilizaron diferentes materiales y diferentes configuraciones geométricas para fabricar la cola de cada robot según las necesidades. Con un arreglo electromecánico (compuesto básicamente por un par de bobinas de Helmholtz y un motor eléctrico para hacerlas rotar) se genera un campo magnético rotatorio uniforme que permite propulsar a los robots a través del fluido controlando inalámbricamente su velocidad de giro. Las pruebas se realizaron en dos fluidos diferentes. Un fluido newtoniano de referencia a base de una mezcla de agua + glucosa y una suspensión a base de una mezcla de agua + glucosa + partículas de hidrogel.

En particular, la meta de este trabajo fue estudiar el efecto que tienen la concentración de partículas de la suspensión así como la rigidez y la geometría de la cola sobre el desempeño de nado. En tres de nuestros robots se fijó el imán en la zona interior-central de la cabeza, con esta configuración se le confiere un movimiento de bamboleo al nadador. Uno de estos robots posee una cola rígida hecha con un filamento de acero, otro nadador posee una cola de rigidez media hecha con un filamento de látex, un tercer nadador se equipó con una cola de rigidez baja hecha con un filamento de poliestireno. En el cuarto robot se fijó un imán en la punta de la cabeza y la cola se fabricó con un filamento rígido de acero en forma de hélice; con esta configuración no se observa un movimiento de bamboleo. Los resultados más relevantes se enumeran a continuación:

- 1) Los cuatro nadadores desarrollaron mayores velocidades de nado en el fluido con partículas en comparación con las velocidades desarrolladas en el

fluido de referencia. En ambos fluidos y a bajas revoluciones de giro, el flagelo de los nadadores de cola flexible se deforma tomando la geometría de media hélice. Sin embargo, al incrementar la frecuencia de giro del robot en el fluido de referencia parte de la cola se aplanan o enrollan disminuyendo paulatinamente la propulsión. Inesperadamente, la presencia de partículas permite aumentar la frecuencia de giro sin que la forma de media hélice de la cola cambie; esto se traduce en mayor propulsión y mayor velocidad de nado. Para el nadador de cola helicoidal rígida se cree que el incremento en su velocidad de nado en la suspensión se debe a que las partículas se adhieren a lo largo del filamento incrementándose la cantidad de líquido desplazado y por ende la propulsión.

- 2) La velocidad de nado se incrementa al aumentar la concentración de partículas en la suspensión.

Estos resultados ayudarán a entender mejor el nado de microorganismos como la *E. coli* dado que muchos de los fluidos biológicos en los que se desplazan son suspensiones. Además servirá para el diseño de robots magnéticos que desempeñen tareas prácticas en diversas aplicaciones de índole biomédico, industrial, etc.

# Índice general

---

Índice de figuras	xI
Índice de tablas	xv
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Nado de microorganismos a bajo número de Reynolds . . . . .	1
1.2. Mecanismo de nado de microorganismos . . . . .	2
1.3. Primeros trabajos . . . . .	3
1.4. Impacto de la investigación . . . . .	5
1.5. Objetivos . . . . .	6
<b>2. Marco teórico</b>	<b>9</b>
2.1. Locomoción . . . . .	9
2.2. Numero de Reynolds . . . . .	10
2.3. Tipos de fluidos . . . . .	12
<b>3. Diseño del experimento</b>	<b>15</b>
3.1. Preparación de los fluidos . . . . .	15
3.1.1. Fluido newtoniano . . . . .	15
3.1.2. Suspensión . . . . .	16
3.2. Diseño de bobina rotatoria . . . . .	17
3.3. Contenedor de fluido . . . . .	20
3.4. Cámara de vídeo . . . . .	20
3.5. Diseño de los nadadores . . . . .	20
3.5.1. Nadador de cola helicoidal . . . . .	21
3.5.2. Nadador de cola flexible tipo flagelo . . . . .	24
3.6. Análisis de vídeos . . . . .	27
<b>4. Análisis de Resultados</b>	<b>31</b>
4.1. Nadadores de cola flexible . . . . .	31
4.1.1. Efecto de la rigidez de la cola . . . . .	31

## ÍNDICE GENERAL

---

4.1.2. Efecto de la adición de partículas al fluido. . . . .	34
4.1.2.1. Cola muy flexible . . . . .	34
4.1.2.2. Cola de flexibilidad media . . . . .	34
4.1.2.3. Cola rígida . . . . .	37
4.1.3. Efecto del cambio en la concentración de partículas . . . . .	42
4.2. Nadador de cola helicoidal . . . . .	42
4.2.1. Efecto de la adición de partículas al fluido. . . . .	44
4.3. Comparación global . . . . .	44
<b>5. Conclusiones</b>	<b>49</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>53</b>

## Índice de figuras

---

1.1. Ejemplos de los valores del número de Reynolds para el nado a distintas escalas. 1) Bacteria, 2) esperma, 3)bacteria, 4)copépodo, 5)minicrustaceo, 6)renacuajo, 7)pez ,8) ballena. Los rectángulos representan rangos del número de Reynolds para cada especie [1]. . . . .	3
1.2. a)Nado asimétrico. b)Nado simétrico. [2] . . . . .	4
1.3. Mecanismos de nado de microorganismos. a) Pala flexible, b) cola en forma de sacacorchos. Ambos mecanismos pueden servir como una guía para el diseño de nadadores artificiales [3]. . . . .	5
2.1. Comparación entre los tres modos de locomoción [4]. . . . .	10
2.2. Comportamiento reológico de distintos tipos de fluidos [5]. . . . .	13
2.3. Comportamiento reológico de distintos tipos de fluidos [6]. . . . .	13
3.1. Fluido newtoniano. . . . .	16
3.2. Viscosidad de la suspensión a distintas concentraciones de partículas. . . . .	18
3.3. (A) y (B) rodamientos de bola, (C) motor de corriente directa, (D) par de bobinas de Helmholtz, (E) arreglo de banda y polea, (F) escobillas de carbón, (G) eje hueco [7]. . . . .	21
3.4. Campo magnético a lo largo del eje de rotación de las bobinas [7]. . . . .	22
3.5. Vista frontal de la pecera llena de fluido y con un nadador en su interior. . . . .	23
3.6. Posición de la cámara de vídeo durante el experimento. . . . .	23
3.7. Nadador de cola helicoidal rígida y sus parámetros geométricos. . . . .	25
3.8. Nadador de cola helicoidal bajo el efecto del campo magnético. Las líneas de campo de la bobina se denotan con $B_{HC}$ , y las correspondientes a las líneas del imán con $B_m$ . $\omega$ representa la velocidad de giro del robot que resulta estar en sincronía con la velocidad de giro de la bobina. . . . .	25
3.9. De arriba hacia abajo: nadadores con cola de rigidez baja, mediana y alta. . . . .	26
3.10. Características geométricas del nadador de cola flexible tipo flagelo. Es importante notar que la sección transversal de la cola es rectangular. . . . .	26

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.11. Líneas de campo de la bobina y el imán de los nadadores de cola tipo flagelo flexible. . . . .	27
3.12. Pasos para el análisis de vídeo. . . . .	29
4.1. Velocidad de nado en función de la rigidez de la cola para el fluido sin partículas. Las líneas continuas representan ajustes polinomiales de segundo orden. . . . .	32
4.2. Velocidad de nado en función de la rigidez de la cola para el fluido con partículas. Las líneas continuas representan ajustes polinomiales de segundo orden. . . . .	33
4.3. a) Nadador de cola muy flexible, b) nadador de cola flexible, c) nadador de cola rígida. Espacio requerido para cada uno de los nadadores para su nado, donde $\alpha = 0.47[cm]$ , $\frac{\beta}{\alpha} = 1.43$ y $\frac{\gamma}{\alpha} = 5.48$ . . . . .	35
4.4. Nadador de cola muy flexible en el fluido con partículas y sin partículas.	36
4.5. Nadador de cola muy flexible en el fluido sin partículas. . . . .	36
4.6. Nadador de cola muy flexible en el fluido con partículas. . . . .	37
4.7. Nadador con cola de flexibilidad media en los fluidos con y sin partículas. Las líneas continuas representan ajustes polinomiales de segundo orden. El recuadro superior izquierdo de la figura muestra la relación de velocidades, $R = \frac{V_{cp}}{V_{sp}}$ , contra la frecuencia adimensional, $f^* = \frac{f * D}{V_{cp}}$ , donde $D$ es el diámetro de la cabeza, $V_{cp}$ y $V_{sp}$ las velocidades en el fluido con y sin partículas respectivamente. . . . .	38
4.8. Nadador con cola de flexibilidad media en el fluido con partículas. . .	39
4.9. Nadador con cola de flexibilidad media en el fluido sin partículas. . . .	39
4.10. Nadador con cola de flexibilidad media en el fluido sin partículas. La imagen es una representación a escala del fenómeno observado guardando las proporciones con el nadador real. . . . .	40
4.11. Nadador con cola de flexibilidad media en el fluido con partículas. La imagen es una representación a escala del fenómeno observado guardando las proporciones con el nadador real. . . . .	40
4.12. Nadador de cola rígida en el fluido con y sin partículas. Las líneas continuas representan ajustes polinomiales de segundo orden. El recuadro superior izquierdo de la figura muestra la relación de velocidades, $R = \frac{V_{cp}}{V_{sp}}$ , contra la frecuencia adimensional, $f^* = \frac{f * D}{V_{cp}}$ , donde $D$ es el diámetro de la cabeza, $V_{cp}$ y $V_{sp}$ las velocidades en el fluido con y sin partículas respectivamente. . . . .	41

4.13. Variación de la velocidad del nadador de cola con flexibilidad intermedia al cambiar la concentración de partículas. El recuadro superior izquierdo de la figura muestra la relación de velocidades, $r = \frac{V_{cp}}{V_{sp}}$ , contra la frecuencia de giro de la bobina. Siendo $V_{cp}$ y $V_{sp}$ las velocidades en el fluido con y sin partículas respectivamente. . . . .	43
4.14. Comparación de la velocidad de nado en el fluido con partículas y sin partículas para el caso del nadador de cola helicoidal. Las líneas continuas representan ajustes lineales. El recuadro superior izquierdo de la figura muestra la relación de velocidades, $R = \frac{V_{cp}}{V_{sp}}$ , contra la frecuencia adimensional, $f^* = \frac{f * D}{V_{cp}}$ , donde $D$ es el diámetro de la cabeza, $V_{cp}$ y $V_{sp}$ las velocidades en el fluido con y sin partículas respectivamente. . . . .	45
4.15. Comparación de la velocidad de nado en el fluido sin partículas para todos los nadadores. . . . .	46
4.16. Comparación de la velocidad de nado en el fluido con partículas para todos los nadadores. La gráfica muestra la relación de velocidades $R = \frac{V_{cp}}{V_{max}}$ , contra la frecuencia adimensional, $f^* = \frac{f * D}{V_{max}}$ , donde $D$ es el diámetro de la cabeza, $V_{cp}$ la velocidad en el fluido con partículas y $V_{max}$ la velocidad máxima desarrollada en el fluido con partículas. . .	47





# Índice de tablas

---

1.1. Características de flujo a bajo y alto número de Reynolds. . . . .	2
3.1. Viscosidades de los fluidos en función de la velocidad de corte. . .	19
3.2. Parámetros de diseño del sistema electro-mecánico . . . . .	20
3.3. Valores de los parámetros geométricos del nadador de cola helicoidal rígida. . . . .	22
3.4. Valores de los parámetros geométricos del nadador de cola tipo flagelo flexible. . . . .	24



# Introducción

---

Durante las últimas décadas ha crecido el interés por entender los mecanismos de locomoción, movimiento constante y activo de un lugar a otro [4], de organismos autopropulsados tales como bacterias, pájaros o peces. Otra cuestión de interés es entender cómo esta locomoción afecta procesos biológicos tales como la reproducción humana o la infección bacteriana [8]. El interés práctico de construir nadadores artificiales que pudiesen llevar a cabo tareas específicas en sistemas microfluídicos genera gran atención en el mundo científico.

## 1.1. Nado de microorganismos a bajo número de Reynolds

Cuando un microorganismo se mueve lentamente en un fluido se dice que las fuerzas viscosas predominan sobre las inerciales. Esto en hidrodinámica se conoce como un flujo a bajo número de Reynolds,  $Re$ . El número adimensional  $Re$  compara la magnitud de las fuerzas inerciales (fuerzas requeridas para acelerar masas) con las fuerzas viscosas (fuerzas que se deben al esfuerzo de corte viscoso). Este número se define como:

$$Re = \frac{\rho V L}{\eta}$$

donde  $V$  es una velocidad característica,  $L$  una longitud característica;  $\rho$  la densidad y  $\eta$  la viscosidad dinámica del fluido, respectivamente. Existen varias opciones para calcular el número de Reynolds; se puede por ejemplo considerar como longitud característica el tamaño del nadador y como velocidad característica el promedio de su velocidad de nado.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

<b>Flujo a alto número de Reynolds</b>	<b>Flujo a bajo número de Reynolds</b>
Dominan fuerzas inerciales	Dominan fuerzas viscosas
Separación de flujo	No hay separación de flujo
Puede ser turbulento	Siempre laminar
No reversible	Reversible

**Tabla 1.1:** Características de flujo a bajo y alto número de Reynolds.

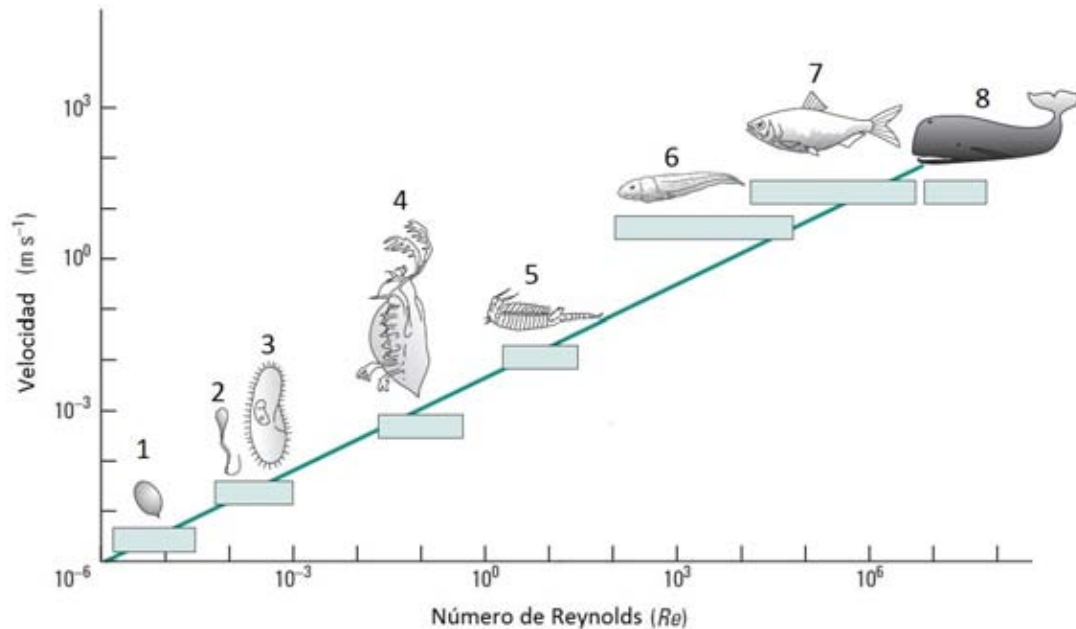
En la tabla 1.1 se presentan algunas características generales del flujo a bajo y alto número de Reynolds [2].

Para tener una idea sobre los valores del número de Reynolds, se puede observar que la diferencia que existe entre el nado de los microorganismos y el de los animales marinos más grandes, como las ballenas, es de unos 14 órdenes de magnitud (ver figura 1.1).

Por otro lado ya que el nado de microorganismos es muy distinto al que conocemos (escala humana), es importante entender cómo es que éstos pueden moverse. En general, nadar significa deformar de cierta manera el cuerpo cuando se está inmerso en un fluido. A modo de mantenerse nadando se realizan deformaciones cíclicas, pero a bajo número de Reynolds es necesario además que estos movimientos sean asimétricos, es decir, que luego de alcanzar una cierta configuración, el camino hacia el estado inicial no sea descrito por la misma secuencia de configuraciones (ver figura 1.2 a). En caso contrario, como se muestra en la figura 1.2b, el movimiento simétrico no genera nado si el número de Reynolds es muy pequeño.

## 1.2. Mecanismo de nado de microorganismos

De acuerdo a los trabajos sobre el nado de microorganismos realizados por Purcell, se conocen al menos dos estrategias de solución al problema del nado a bajo número de Reynolds (ver figura 1.3) . Una es la cola tipo pala flexible y la otra, la cola en forma de sacacorchos. En ambos casos el nado se logra a través de un movimiento asimétrico.



**Figura 1.1:** Ejemplos de los valores del número de Reynolds para el nado a distintas escalas. 1) Bacteria, 2) espermatozoos, 3) bacteria, 4) copépodo, 5) mini-crustáceo, 6) renacuajo, 7) pez, 8) ballena. Los rectángulos representan rangos del número de Reynolds para cada especie [1].

### 1.3. Primeros trabajos

Los primeros progresos en el estudio del nado de microorganismos se lograron en la década de los 70's, un ejemplo de ellos son los trabajos de Purcell [3] sobre el análisis de los mecanismos de nado usuales en los microorganismos y la descripción matemática del nado.

Los trabajos de esa época se centraron principalmente en estudiar el nado en fluidos newtonianos [9, 10, 11]. Sin embargo, casi la totalidad de los fluidos en la naturaleza, y los de uso ingenieril e industrial, son no newtonianos, de modo que las investigaciones más recientes se han enfocado en el estudio del nado de microorganismos en estos fluidos. Como ejemplo se tienen investigaciones realizadas en fluidos viscoelásticos [12, 13, 14] las cuales son importantes en áreas como la Biología en donde entender los fenómenos de transporte, y por lo tanto la locomoción, resulta de suma importancia.

Se han realizado estudios con diferentes geometrías para los nadadores. Se

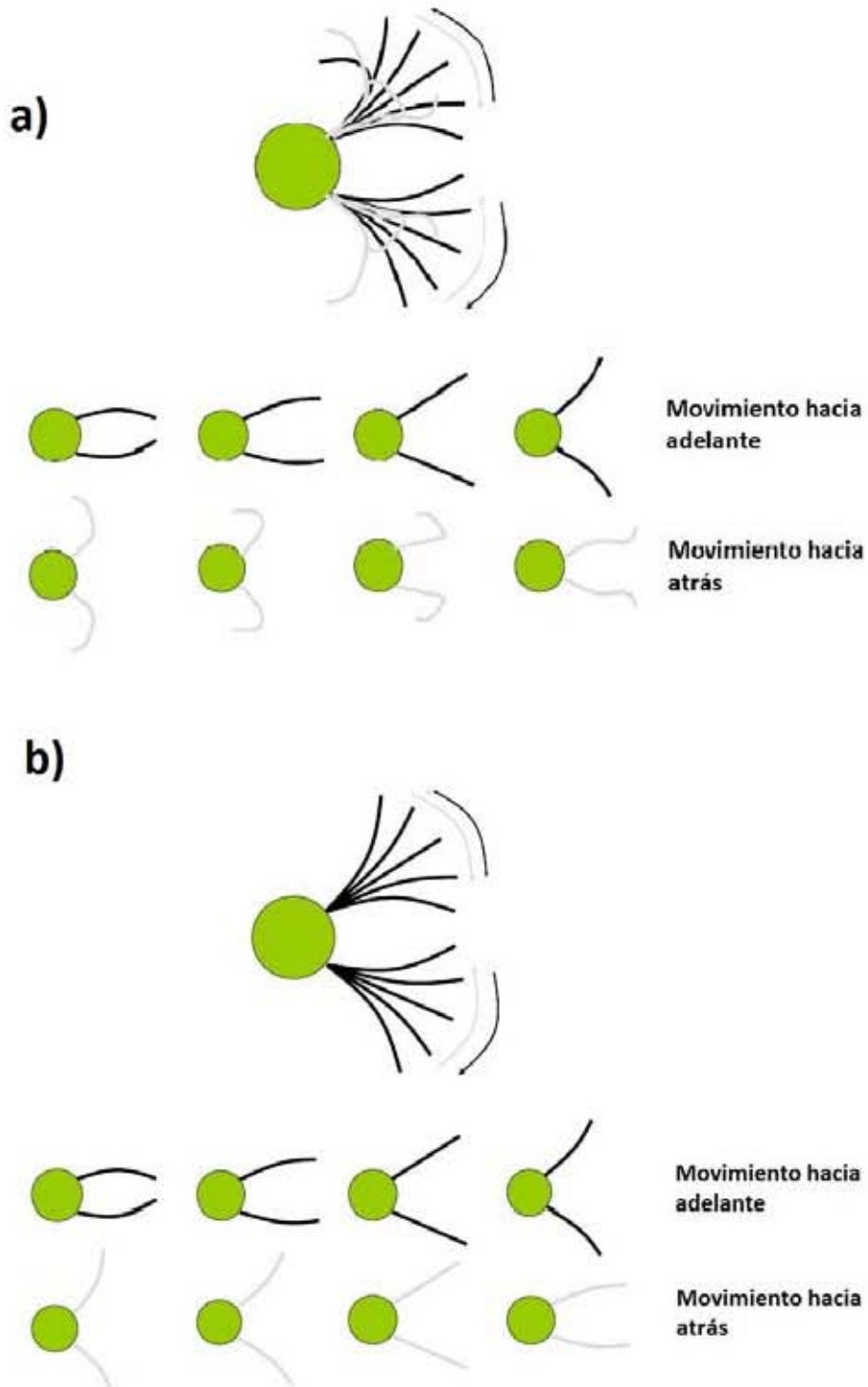
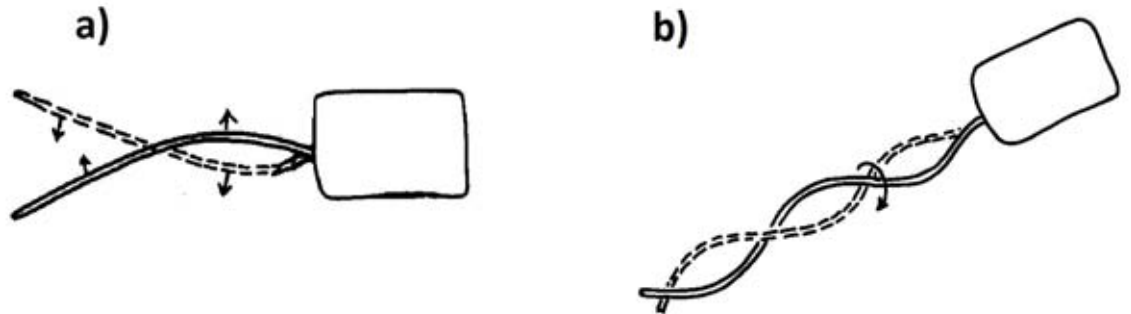


Figura 1.2: a)Nado asimétrico. b)Nado simétrico. [2]



**Figura 1.3:** Mecanismos de nado de microorganismos. a) Pala flexible, b) cola en forma de sacacorchos. Ambos mecanismos pueden servir como una guía para el diseño de nadadores artificiales [3].

tiene por ejemplo un nadador hecho de tres esferas [13], un nadador con una cola híbrida (una parte de filamento flexible y una parte helicoidal rígida)[15], un nadador de cola flexible [16], por citar algunos.

Para la presente tesis se construyeron diferentes tipos de robots magnéticos y se realizaron pruebas para investigar la influencia que tienen la rigidez de la cola, y la presencia de partículas en el fluido sobre la velocidad de los nadadores.

Pocos trabajos experimentales sobre estos temas se han realizado con antelación; así que en este trabajo se presenta una investigación novedosa sobre el tema. Así creemos que los resultados de la presente investigación aportarán más y mejor conocimiento sobre la hidrodinámica del nado de nadadores artificiales y su interacción con el fluido a través del cual se desplazan.

## 1.4. Impacto de la investigación

Los robots impulsados magnéticamente tienen aplicaciones médicas prometedoras permitiendo un acceso no invasivo al cuerpo humano en regiones que son difíciles de alcanzar [17]

Tienen el potencial para ser usados en un amplio rango de aplicaciones incluyendo:

- Terapia localizada: se pueden utilizar para la distribución localizada de productos químicos y sustancias biológicas.
- Remoción de material: se pueden utilizar para eliminar material por medios mecánicos. Si el robot es relativamente grande, puede ser posible diseñar



herramientas especializadas para llevar a cabo la tarea. Para robots más pequeños, el robot por sí mismo será la herramienta.

- Estructuras controlables: Los robots pueden actuar como estructuras estáticas simples cuyas posiciones son controlables. Ejemplos de estas estructuras son los andamios, endoprótesis y oclusiones.
- Telemetría: Los robots se pueden utilizar para transmitir desde una ubicación específica, la información que de otro modo sería difícil o imposible de obtener.

Una vez equipados con algunas funcionalidades básicas y miniaturizados a tamaños de unos pocos milímetros o menos, los robots tienen el potencial para llevar a cabo procedimientos médicos por todo el cuerpo. Como ejemplos se tienen el sistema circulatorio, el sistema urinario, el sistema nervioso central y los ojos.

El presente trabajo se encuentra estructurado de la siguiente forma: Los conceptos y definiciones que se utilizan a lo largo del trabajo son introducidos en el capítulo 2. Esto con el fin de facilitar la lectura y hacer comprensible la obra para cualquier persona, relacionada o no con el tema.

En el capítulo 3 es descrito el arreglo experimental que permite llevar a cabo los experimentos. Se incluyen, la construcción de los robots nadadores, la elaboración de los fluidos y la pecera en donde nadan, el sistema electromecánico que genera el movimiento y la cámara de vídeo (junto con la descripción del análisis de los vídeos con el software Tracker).

Más adelante en el capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos así como una interpretación de los mismos. Se describe de forma detallada lo observado con apoyo de imágenes y gráficas de los fenómenos. Finalmente, las conclusiones del trabajo (obtenidas de los resultados observados y con base en los objetivos planteados en un principio) y algunas recomendaciones para realizar experimentos en condiciones similares se exponen en el capítulo 5.

### 1.5. Objetivos

- Estudiar el efecto que tienen partículas suspendidas en un fluido sobre la velocidad de nado de los robots magnéticos de cola helicoidal rígida y de cola flexible a condiciones de bajo número de Reynolds.
- Estudiar el efecto que tiene la rigidez de la cola, sobre la velocidad de nado, en el nadador de cola flexible.

- Analizar que configuración para la cola del nadador genera un nado más rápido.
- Comparar las velocidades de nado de ambas configuraciones.
- Describir la condición óptima para el nado de los microorganismos considerando todos los parámetros estudiados.
- Analizar el efecto de la concentración de partículas en el fluido sobre la velocidad de nado en robots con diferentes configuraciones.



## Marco teórico

---

El objetivo de este capítulo es introducir conceptos que serán usados más adelante, como una forma para que todos los desarrollos posteriores resulten entendibles sin la necesidad de consultar fuentes de información adicionales.

### 2.1. Locomoción

La mayoría de los animales están en un movimiento constante y activo de un lugar a otro. Esto se conoce como locomoción[4]. Para que exista la locomoción el animal debe moverse a través de su entorno o desplazar el agua o el aire circundante. Se pueden reconocer tres formas de locomoción: nadar, volar y correr. De estas tres, el nado es el modo más eficiente en términos energéticos. Es importante notar que, de cualquier modo, mientras más pequeño sea un animal, mayor es el coste energético del movimiento (ver figura 2.1).

En el nado intervienen distintos factores, tales como la inercia del objeto y la viscosidad del fluido. Empecemos entonces definiéndolos.

#### a) Inercia

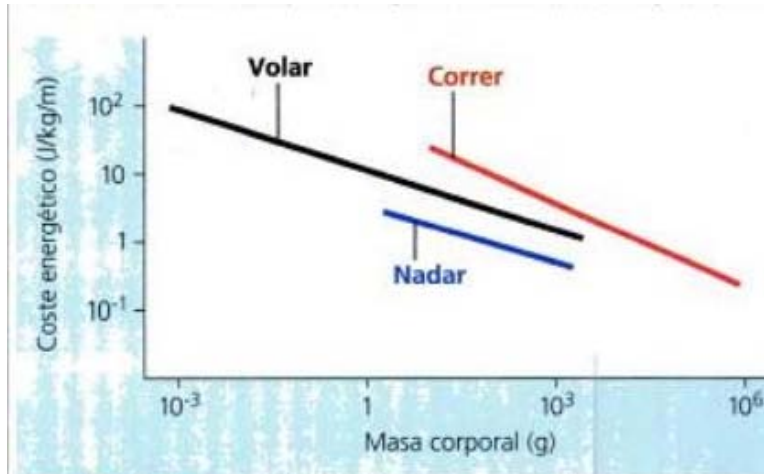
Es la capacidad de un cuerpo para mantener su estado de reposo, o de movimiento rectilíneo uniforme, a menos de que una fuerza externa actúe sobre él [18]. A un cuerpo con una inercia grande, le resulta difícil iniciar o detener su movimiento. Por otro lado, un cuerpo con una inercia pequeña, puede fácilmente iniciar o detener su movimiento cuando se le aplica una fuerza [3].

#### b) Viscosidad

Es la capacidad que tienen los fluidos para ofrecer resistencia a fluir bajo la acción de una fuerza externa [19]. Siendo la fuente del arrastre en los objetos moviéndose

## 2. MARCO TEÓRICO

---



**Figura 2.1:** Comparación entre los tres modos de locomoción [4].

a través del fluido.

Para un objeto moviéndose a través de un fluido se puede establecer que, la inercia trata de mantener al objeto en movimiento, mientras que la viscosidad intenta detenerlo. A la relación entre las fuerzas que se generan por la inercia, y las generadas por la viscosidad se le conoce como número de Reynolds.

### 2.2. Numero de Reynolds

El número de Reynolds es el número adimensional más importante en la mecánica de fluidos. Está definido por:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}}$$

Donde:

- $\rho$ : Densidad del fluido
- $U$ : Velocidad del objeto moviéndose a través del fluido.
- $L$ : Longitud representativa del objeto.
- $\mu$ : Viscosidad del fluido.

El número de Reynolds será grande si las fuerzas inerciales dominan sobre las viscosas; en caso contrario será pequeño. El nado a bajo número de Reynolds es de interés para el presente trabajo dado que se pretende emular el nado de microorganismos bajo algunas condiciones particulares. El movimiento de los fluidos es descrito por un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales llamadas ecuaciones de Navier-Stokes (ec.2.1).

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2.1)$$

Donde:

- $\rho$ : Densidad del fluido
- $U$ : Velocidad del objeto moviéndose a través del fluido.
- $L$ : Longitud representativa del objeto.
- $\mu$ : Viscosidad dinámica del fluido.
- $P$ : Presión.

Cuando el número de Reynolds es muy pequeño, el flujo es reversible y por lo tanto independiente del tiempo. Además no importa si los movimientos se realizan rápido o lento; el patrón de movimiento es exactamente el mismo de modo que los términos inerciales pueden ser despreciados [3]. Con estas consideraciones la ecuación 2.1 se reduce a lo siguiente:

$$-\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = 0 \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 se conoce como ecuación de Stokes, y gobierna el movimiento de los fluidos a bajos números de Reynolds. Cumple con las siguientes propiedades:

- Instantánea.
- Lineal.
- Reversible en el tiempo.

El teorema de la almeja establece que para que haya un movimiento en estas condiciones, el nadador debe deformar el fluido en una forma que no sea reversible en el tiempo. Esto se logra rompiendo la simetría del nado con movimientos que sean asimétricos.

### 2.3. Tipos de fluidos

Existen diversos tipos de fluidos en la naturaleza. Desde un punto de vista reológico, los fluidos más sencillos son los newtonianos. Un fluido newtoniano es aquél cuya viscosidad puede considerarse constante con el tiempo y cuyo comportamiento sigue la ley de Newton “*El esfuerzo de corte es proporcional al gradiente de velocidad o velocidad de corte*”[20]. Es decir:

$$\tau_{xy} = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (2.3)$$

donde:

- $\tau_{xy}$  es el esfuerzo tangencial ejercida en un punto del fluido, se mide en  $[Pa]$ .
- $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido, se mide en  $[Pa \cdot s]$ .
- $\frac{dv_x}{dy}$  es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección al plano en el que estamos calculando el esfuerzo tangencial, se mide en  $[s^{-1}]$ .

Por definición, todos aquellos fluidos que no siguen la ec. 2.3 son “no newtonianos”. El aire, el agua, el vapor de agua, todos los gases y la mayoría de fluidos constituidos por moléculas sencillas son newtonianos. Las suspensiones densas, lodos, emulsiones, soluciones de polímeros de cadena larga, fluidos biológicos, alimentos líquidos, pinturas, suspensiones de arcillas y mezclas de hormigón son, en general, no newtonianos [21].

El comportamiento de algunos tipos de fluidos se ejemplifica en las figuras 2.2 y 2.3.

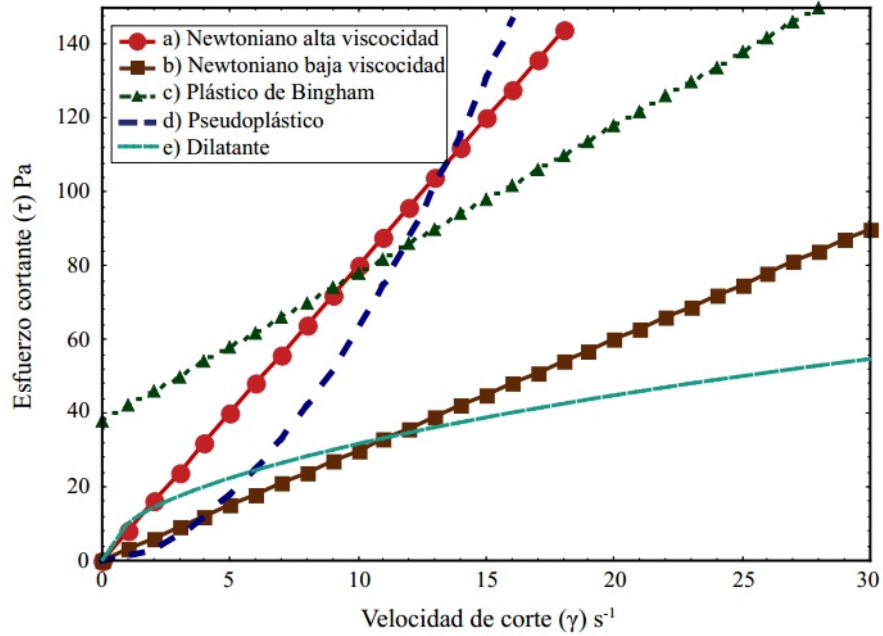


Figura 2.2: Comportamiento reológico de distintos tipos de fluidos [5].

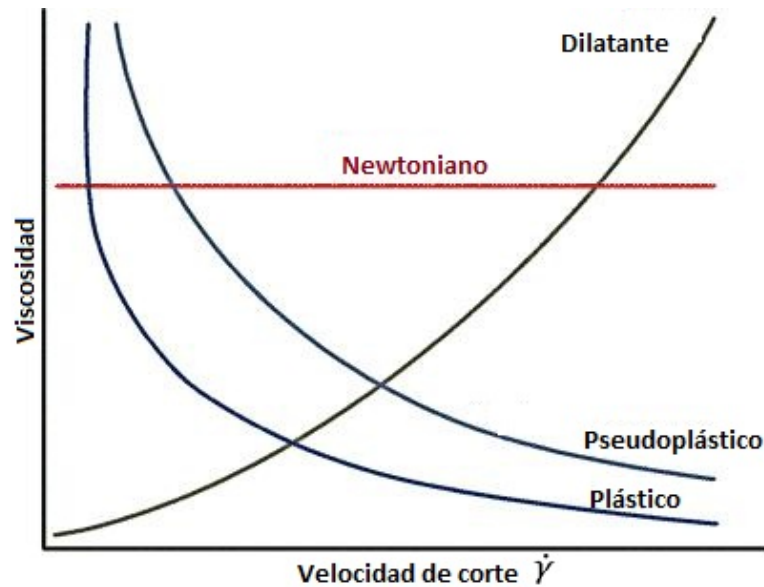


Figura 2.3: Comportamiento reológico de distintos tipos de fluidos [6].





## Diseño del experimento

---

En esta sección se explican las condiciones y características de los experimentos realizados como: los tipos de fluidos, los robots milimétricos con los que se llevaron a cabo los experimentos, la descripción del espacio en el que nadan y la configuración del arreglo mecánico-eléctrico que genera el movimiento de los robots milimétricos.

### 3.1. Preparación de los fluidos

#### 3.1.1. Fluido newtoniano

La preparación del fluido newtoniano es a base de una mezcla de agua y miel comercial; se sigue la siguiente serie de pasos:

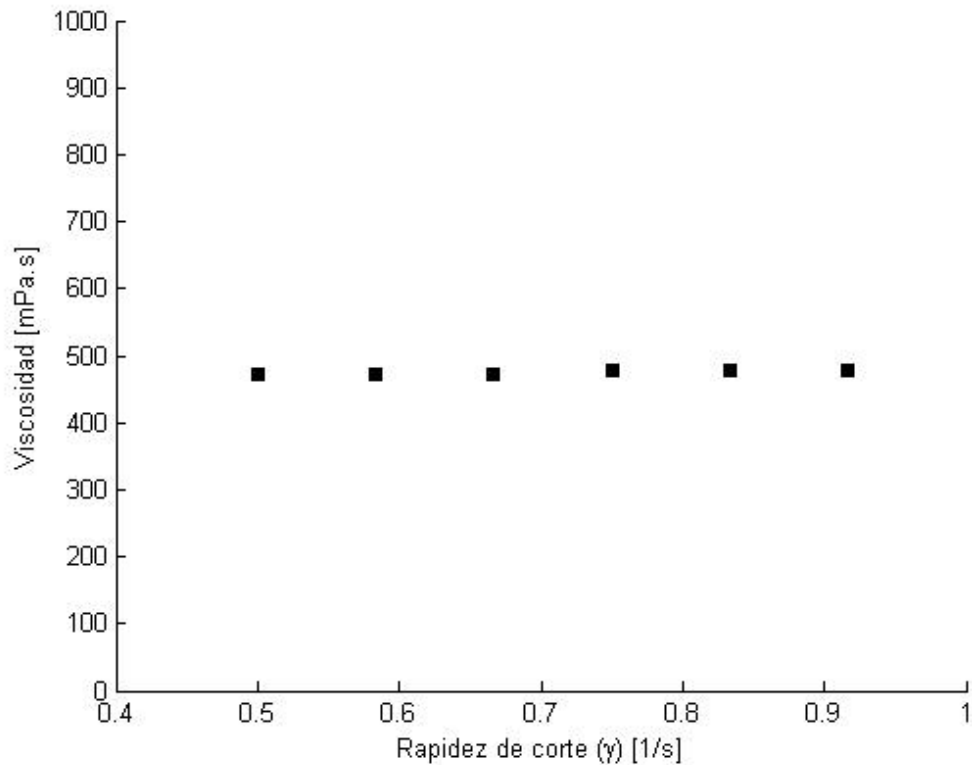
- Se toman  $800ml$  de miel; esta cantidad representa el 91 % del peso total de la mezcla.
- Se completa el 9 % restante (en peso) con agua.
- Se revuelve la mezcla hasta que sea homogénea.
- Se deja reposar hasta que el fluido ya no contenga burbujas.

Esta receta da como resultado un fluido con una viscosidad dinámica aproximadamente constante  $\mu \simeq 462 [mPa \cdot s]$  y una densidad  $\rho \simeq 1342 [\frac{kg}{m^3}]$  (medida con un picnómetro). Para la construcción de la curva de viscosidad de la figura 3.1, se usa un reómetro marca Brookfield modelo DV-III, equipado con un husillo del tipo L2. Las lecturas se hacen seleccionando velocidades de rotación del husillo

### 3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

---

que van de 30 a 55 rpm y registrando el valor de viscosidad que corresponde a cada velocidad.



**Figura 3.1:** Fluido newtoniano.

#### 3.1.2. Suspensión

Para la elaboración de este fluido, primero se prepara un lote de fluido newtoniano como se indica en el apartado 3.1.1. Luego se agrega una cantidad de partículas y se revuelve hasta que se genere una suspensión que sea homogénea.

Las partículas que se usan son de hidrogel de forma irregular, cuyo "diámetro" promedio es de 0.4 [mm]. Se agrega una cantidad de 0.18 [g] en masa de partículas por cada mililitro de fluido. La razón detrás de la elección de las partículas de hidrogel sobre otro tipo de partículas, es su índice de refracción, similar al del fluido. Esto permite, al momento de realizar el experimento, que se pueda observar el movimiento del nadador entre las partículas.

Esta otra receta da como resultado un fluido con una viscosidad dinámica aproximadamente constante  $\mu \simeq 750 [mPa \cdot s]$  y una densidad  $\rho \simeq 1299[\frac{kg}{m^3}]$ . Se prepararon dos variaciones para este fluido, un fluido con la mitad de la concentración de partículas y otro con el doble.

Dada la dificultad para determinar de forma experimental las viscosidades de estos fluidos, se usa un modelo teórico propuesto por Mooney [22] el cual se muestra en la ecuación 3.1.

$$\mu_{ef} = \mu_0 \exp \left( \frac{\frac{5}{2}\phi}{1 - \frac{\phi}{\phi_0}} \right) \quad (3.1)$$

donde:

- $\mu_{ef}$ : Viscosidad del fluido con partículas.
- $\mu_0$ : Viscosidad del fluido puro.
- $\phi$ : Fracción volumétrica de las partículas en el fluido.
- $\phi_0$ : Constante empírica igual a 0.74 en este caso.

Para el cálculo de las viscosidades se usaron los datos obtenidos en la tabla 3.1. Los resultados son los que se muestran en la figura 3.2.

## 3.2. Diseño de bobina rotatoria

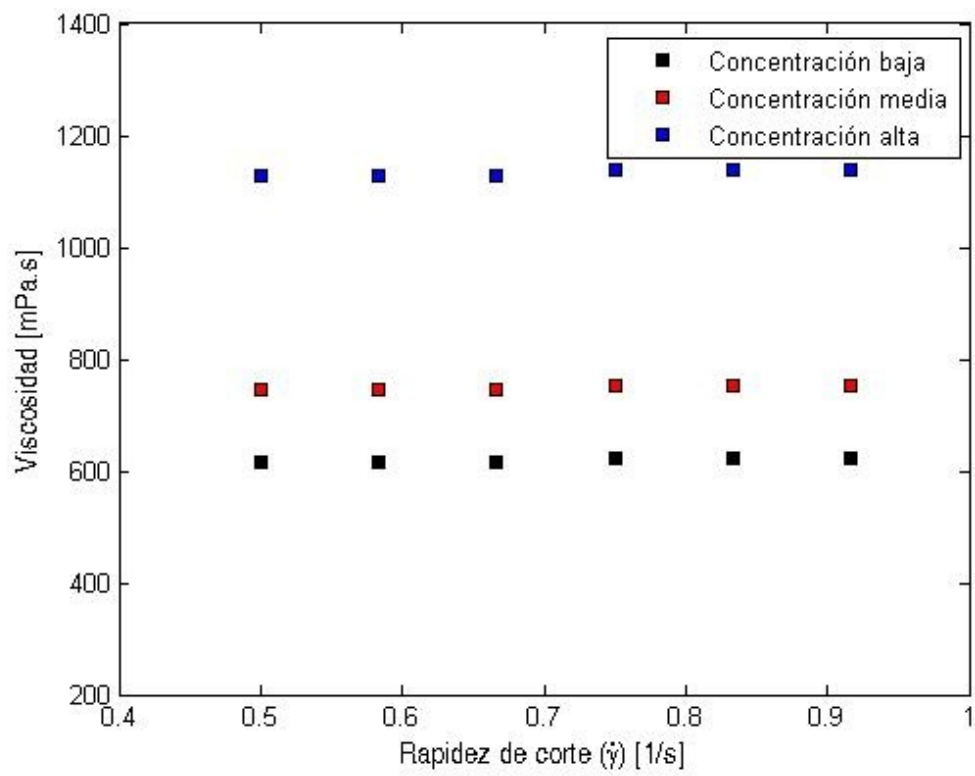
Se desarrolló un aparato electro-mecánico compuesto de un par de bobinas de Helmholtz, el cual se hace girar por medio de un motor eléctrico de corriente directa [7]. El sistema genera un campo magnético rotatorio cuya frecuencia angular e intensidad son controladas variando la velocidad angular del motor de corriente continua y la densidad de corriente en las bobinas, respectivamente.

Subsistemas del dispositivo electro-mecánico:

- **Par de bobinas de Helmholtz:** Generadoras del campo magnético.
- **Sistema para hacer rotar las bobinas:** Motor de corriente directa con controlador de velocidad, arreglo de banda y patea, rodamientos de bolas.
- **Sistema de alimentación:** Consiste en un par de escobillas de carbón y una fuente de corriente directa.

### 3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

---



**Figura 3.2:** Viscosidad de la suspensión a distintas concentraciones de partículas.

Velocidad de corte [1/s]	Viscosidad newtoniano [mPa.s]	Viscosidad a distinta concentración de partículas [mPa.s]		
		Baja	Media	Alta
		$\phi = 0.093$	$\phi = 0.147$	$\phi = 0.237$
0.5	472.9	616.72	746.66	1129.31
0.58	473	616.85	746.82	1129.55
0.67	473.1	616.98	746.97	1129.79
0.75	477.2	622.33	753.45	1139.58
0.83	477.5	622.72	753.92	1140.30
0.92	477.2	622.33	753.45	1139.58

**Tabla 3.1:** Viscosidades de los fluidos en función de la velocidad de corte.

Para obtener un campo magnético uniforme de alrededor de 6 mT, el sistema se diseñó con los parámetros que indica la tabla 3.2.

El conjunto se energiza mediante una fuente de alimentación de corriente continua (Agilent E3632A) con una corriente y un voltaje máximos de 3 A y 103 V, respectivamente.

Para la medición del campo magnético generado por este dispositivo se utilizó un teslámetro (FW Bell, 5100 system). Este dispositivo puede medir la intensidad del campo magnético en el rango de  $\pm 30$  mT con exactitud de 0.01 mT. La sonda se utilizó para medir la magnitud del campo magnético a lo largo del eje de giro "z" de la bobina (ver fig. 3.3).

Como se observa en la figura 3.4, los valores del campo magnético son prácticamente constantes; en una región de  $\pm 50$  mm; a lo largo del eje "z" de rotación del par de bobinas; la intensidad del campo cambia sólo 1.7%. Esta región de campo magnético uniforme, de unos 400 [cm<sup>3</sup>], se encuentra ubicada en el centro de las bobinas de Helmholtz, justamente el lugar donde se llevan a cabo los experimentos con los nadadores.

### 3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

---

Radio,R	140 mm
Número de vueltas por bobina	230
Diámetro del cable,d	0.91 mm
Resistencia de cada bobina,Rc	5.34 $\Omega$
Rango de operación de temperatura	0-80 °C
Inductancia del par de bobinas	73mH

**Tabla 3.2:** Parámetros de diseño del sistema electro-mecánico .

### 3.3. Contenedor de fluido

El contenedor del fluido es el lugar en donde se lleva a cabo el nado de los robots. Está hecha con acrílico transparente de dimensiones 167.4 x 91.44 x 86.36 [mm], y se encuentra fija en el centro del par de bobinas de Helmholtz.

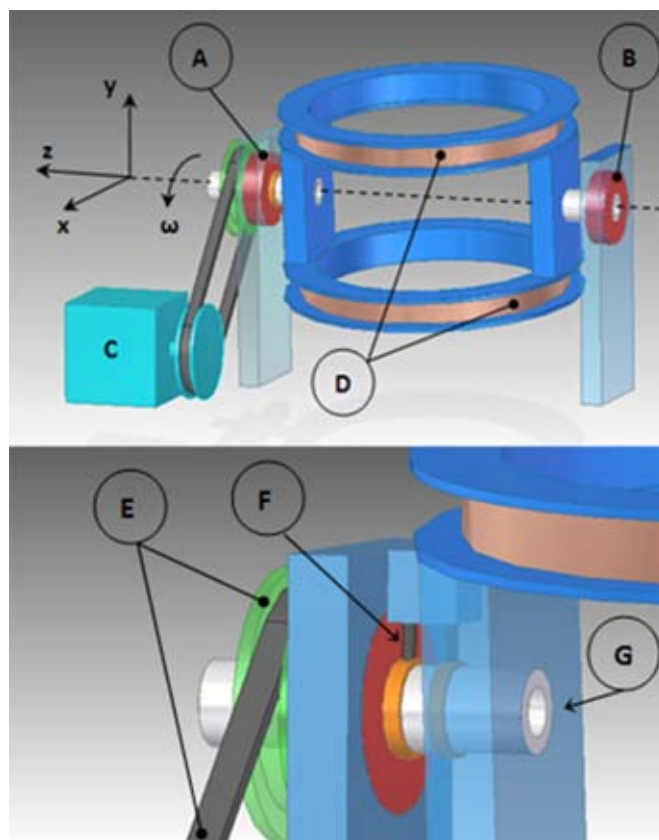
Como se observa en la figura 3.5 , el contenedor cuenta con una escala centimétrica en su parte inferior frontal que sirve para hacer un análisis posterior del nado a través de videograbaciones del movimiento de los robots.

### 3.4. Cámara de vídeo

Se usó una cámara digital de vídeo (Casio exilim EX-F1), configurada para grabar a 30 cuadros por segundo. La cámara se coloca de forma frontal a la pecera y una vez que se hace funcionar el arreglo electromecánico se procede a la grabación. Hay que resaltar que para obtener vídeos que permitan realizar un buen análisis, la cara de la pecera y el lente de la cámara deben estar puestos de forma paralela (figura 3.6).

### 3.5. Diseño de los nadadores

El cuerpo de cada robot consiste en una cabeza hecha de tubo de polietileno. En uno de los extremos de la cabeza se pega un imán; en el otro extremo se pega



**Figura 3.3:** (A) y (B) rodamientos de bola, (C) motor de corriente directa, (D) par de bobinas de Helmholtz, (E) arreglo de banda y polea, (F) escobillas de carbón, (G) eje hueco [7].

una cola en la periferia del tubo o en el centro, según sea el caso, y finalmente se sella por ambos extremos con silicón. Es importante hacer notar que adentro de la cabeza se atrapan una o varias burbujas de aire para lograr la flotación neutra del nadador. Se construyeron dos tipos de nadadores, un nadador con una cola helicoidal rígida y otros más, con una cola flexible de tipo flagelo.

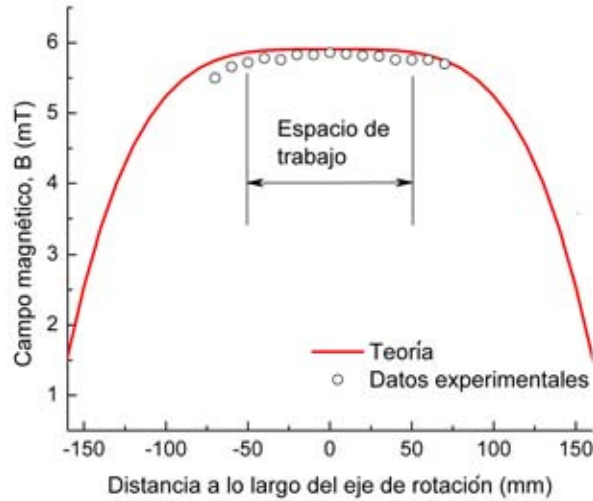
### 3.5.1. Nadador de cola helicoidal

Este tipo de nadador tiene una cola rígida de tipo helicoidal hecha de alambre de acero con un módulo de elasticidad de  $E = 200[GPa]$ . Una representación esquemática de este nadador se muestra en la figura 3.7. Es importante notar que en este caso, el eje longitudinal de la cabeza (el cilindro) coincide con el eje



### 3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

---



**Figura 3.4:** Campo magnético a lo largo del eje de rotación de las bobinas [7].

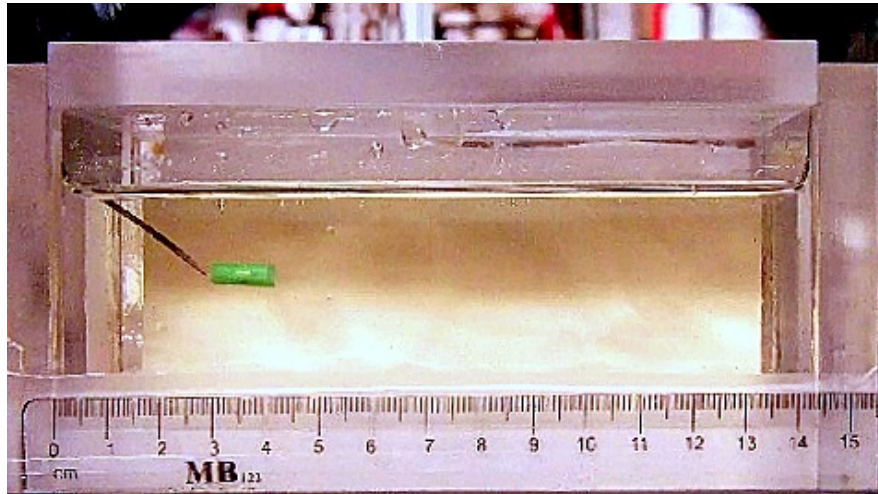
central de la hélice.

Los robots construidos son de escala milimétrica. Así, los valores de los parámetros mostrados en la figura 3.7 se fijaron como indica la tabla 3.3.

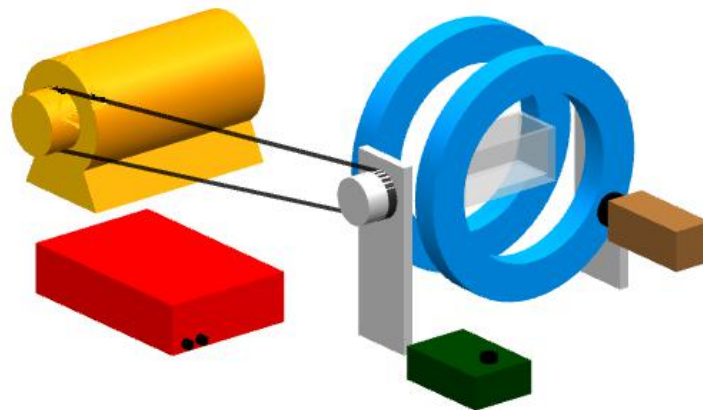
Diametro de la cabeza, $D_h$	4 mm
Longitud de la cabeza, $L_h$	20 mm
Longitud de la cola, $L_t$	26.6 mm
Ángulo de paso, $\theta$	$45^\circ$
Paso, $\lambda$	5.3 mm
Radio de la espiral, $R$	mm

**Tabla 3.3:** Valores de los parámetros geométricos del nadador de cola helicoidal rígida.

Durante el experimento, el campo magnético está girando y por lo tanto, el imán del nadador trata continuamente de orientarse con él. La orientación continua del imán con el campo magnético giratorio produce que el nadador gire y se obtiene un efecto neto de propulsión. La figura 3.8 esquematiza la interac-



**Figura 3.5:** Vista frontal de la pecera llena de fluido y con un nadador en su interior.



**Figura 3.6:** Posición de la cámara de vídeo durante el experimento.

### 3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

---

ción entre las líneas de campo de las bobinas y del imán en la cabeza del nadador.

#### 3.5.2. Nadador de cola flexible tipo flagelo

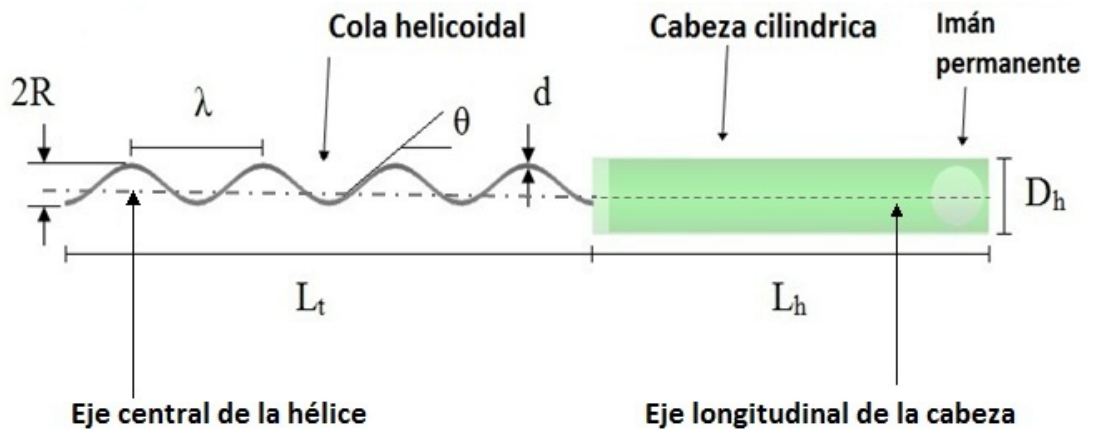
Para esta parte de los experimentos se construyeron tres nadadores. El parámetro que se varía para construir cada uno es la rigidez de la cola. Se tiene entonces un nadador con una cola muy flexible hecha de polietileno con un módulo de Young de  $E = 0.025[GPa]$ , uno con una cola de rigidez intermedia hecha de latex con un  $E = 0.703[GPa]$ , y otro con una cola rígida de acero con un  $E = 200[GPa]$  (ver figura 3.9). El resto de los parámetros como : longitud de cabeza, longitud de cola y el diámetro de la cabeza, se mantuvieron fijos. En este caso la cola se pega en la periferia del cilindro fuera del eje longitudinal de la cabeza.

Los valores de los parámetros, mostrados en la figura 3.10, para las tres configuraciones se indican en la tabla 3.4

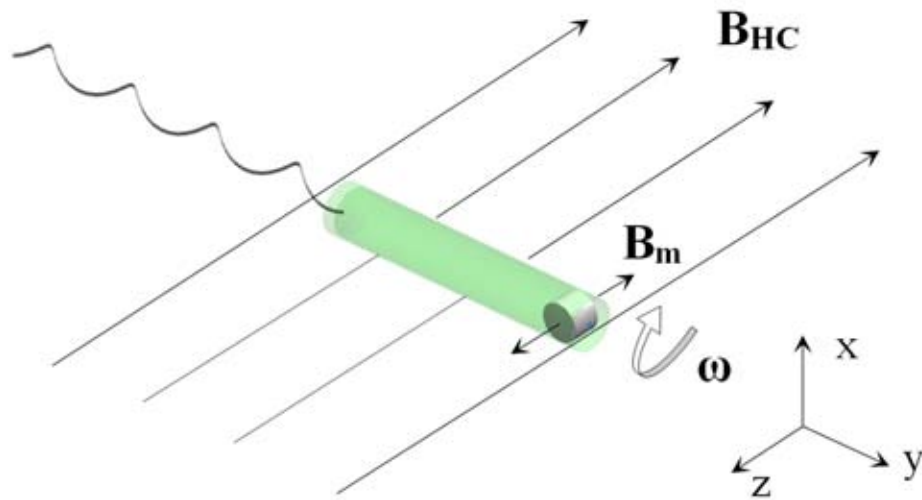
Parámetro	Cola de rigidez	Cola de rigidez	Cola de rigidez
	alta	media	baja
$a[mm]$	0.42	0.90	1.54
$b[mm]$	0.42	0.82	0.09
Diámetro de la cabeza , $D_h[mm]$	4.7	4.7	4.7
Longitud de la cabeza, $L_h[mm]$	14	14	14
Longitud de la cola, $L_t[mm]$	28.5	28.5	28.5

**Tabla 3.4:** Valores de los parámetros geométricos del nadador de cola tipo flagelo flexible.

A diferencia del caso helicoidal, en los robots con cola tipo flagelo, hay un imán contenido en la parte central de la cabeza del nadador. De esta manera se atrapan dos burbujas de aire a cada lado del imán para lograr la condición de flotación neutra.



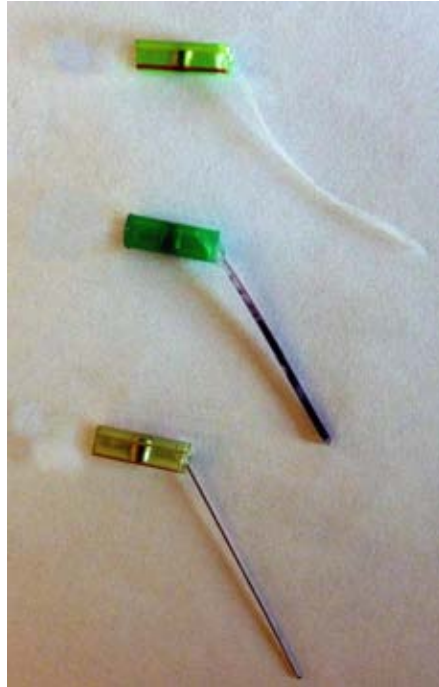
**Figura 3.7:** Nadador de cola helicoidal rígida y sus parámetros geométricos.



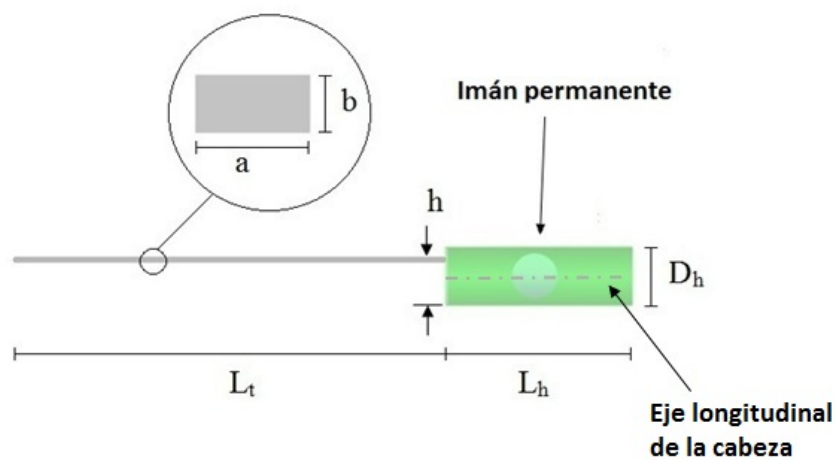
**Figura 3.8:** Nadador de cola helicoidal bajo el efecto del campo magnético. Las líneas de campo de la bobina se denotan con  $B_{HC}$ , y las correspondientes a las líneas del imán con  $B_m$ .  $\omega$  representa la velocidad de giro del robot que resulta estar en sincronía con la velocidad de giro de la bobina.

### 3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

---



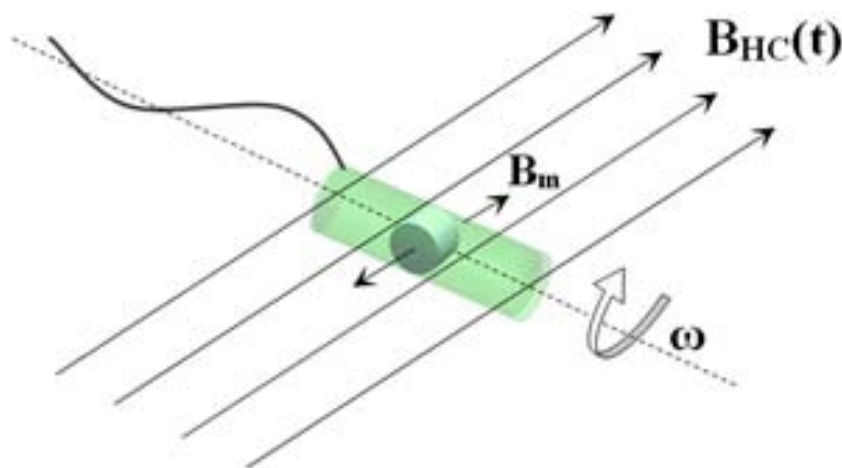
**Figura 3.9:** De arriba hacia abajo: nadadores con cola de rigidez baja, mediana y alta.



**Figura 3.10:** Características geométricas del nadador de cola flexible tipo flagelo. Es importante notar que la sección transversal de la cola es rectangular.

El imán está colocado de forma tal que, cuando se pone en marcha el arreglo electromecánico, trate de orientarse con el campo magnético generado por el par de bobinas de Helmholtz.

De igual forma, al estar girando el campo magnético, el imán del nadador trata continuamente de orientarse con él. La orientación continua del imán con el campo magnético giratorio produce que el robot milimétrico empiece a girar y se produce un efecto neto de propulsión. La figura 3.11 muestra la interacción que existe entre el campo magnético del imán dentro del nadador y el producido por la bobina.



**Figura 3.11:** Líneas de campo de la bobina y el imán de los nadadores de cola tipo flagelo flexible.

### 3.6. Análisis de vídeos

Aquí hablar del tracker, de donde se obtuvo y eso, un poco de choro para llenar espacio también ayudaría. Una vez videograbados los experimentos, se realiza un análisis de los mismos en la computadora con ayuda de Tracker. Tracker es una herramienta de software libre para modelado y análisis de vídeos [23]. En Tracker se determina la velocidad de nado de los robots en cada evento.

Con esto se construyen las gráficas de velocidad contra frecuencia de giro de la bobina las cuales se muestran en el capítulo 4. El proceso de análisis de vídeo, ilustrado en la figura 3.12, es el siguiente:

### 3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

---

- 1) Se carga el vídeo.
- 2) Se establece un sistema de referencia.
- 3) Se crea una vara de calibración (escala de referencia).
- 4) Se delimita la parte del vídeo que se analizará.
- 5) Se crea una partícula cuya trayectoria se seguirá.
- 6) Se define el avance del vídeo.
- 7) Se crea la trayectoria de la partícula.
- 8) Se obtiene una gráfica de posición contra tiempo.
- 9) Se realiza un ajuste lineal a los datos.
- 10) La pendiente de la recta es la velocidad promedio para ese evento.
- 11) Se registran los datos.

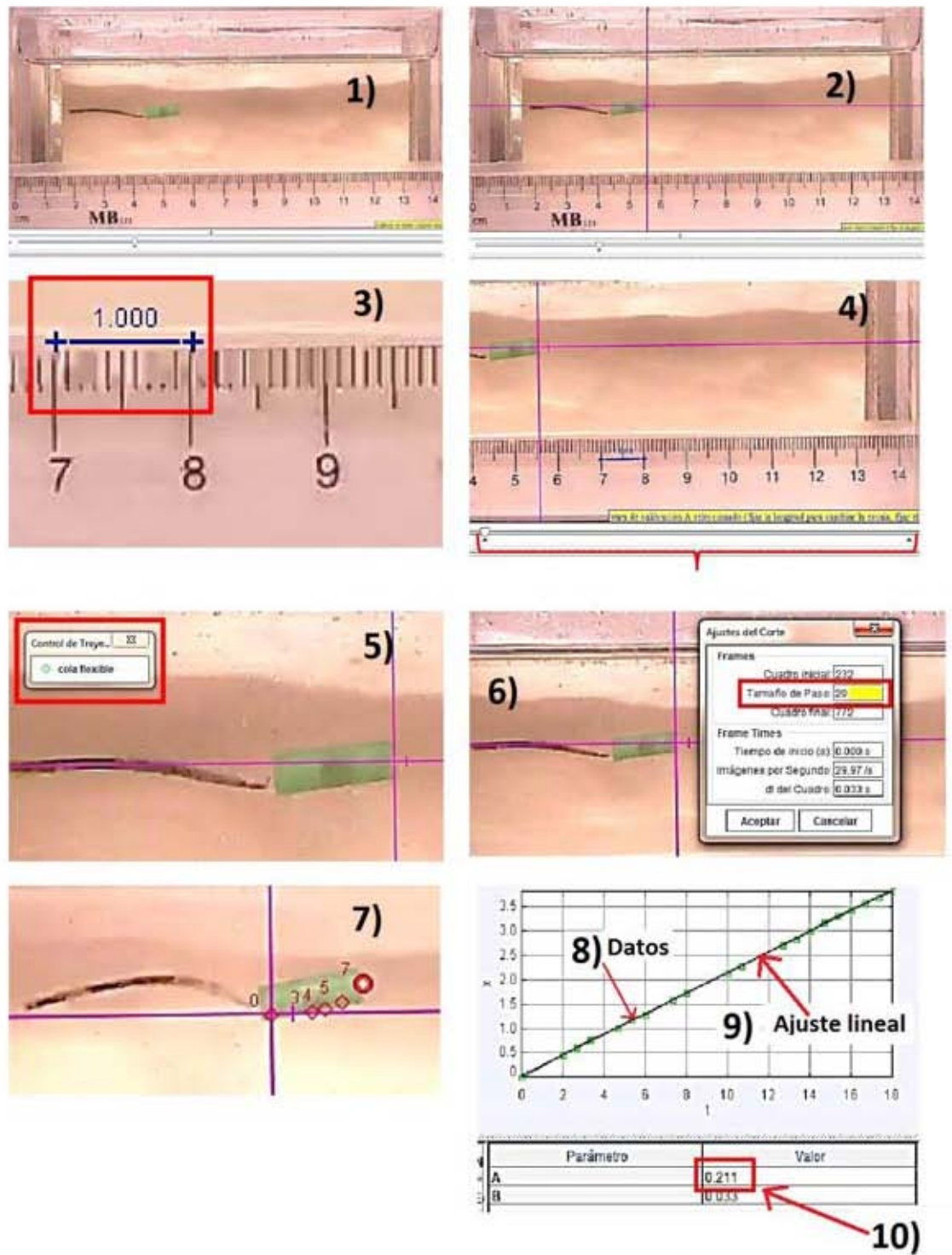


Figura 3.12: Pasos para el análisis de vídeo.





## Análisis de Resultados

---

Para los experimentos se hace nadar cada uno de los robots mientras se varía la frecuencia de giro de la bobina que produce el campo magnético. Se construye entonces una lista de valores de velocidades de nado asociadas a cada una de las frecuencias de giro de la bobina. Con estos valores se elabora una gráfica de velocidad de nado contra frecuencia de giro y se observa el comportamiento de cada nadador.

### 4.1. Nadadores de cola flexible

Con estos tipos de nadadores se realizaron dos experimentos. En el primero lo que se tiene intención de observar, es el efecto que tiene la rigidez de la cola en la velocidad del nadador manteniendo constantes el resto de parámetros (longitud total de la cola, longitud de la cabeza, diámetro de la cabeza). En el segundo, se desea determinar de que manera la presencia de partículas en el fluido influye en la velocidad de nado.

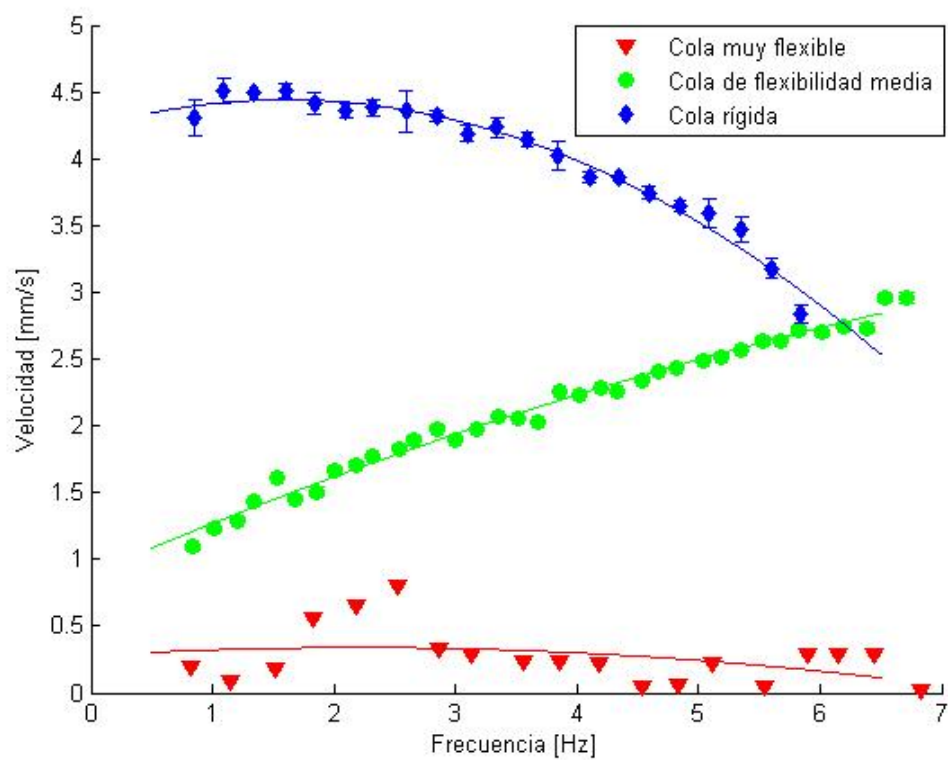
Los robots nadaron a  $Re < 0.08$  y desarrollaron una velocidad de corte  $\gamma < 1[s^{-1}]$ . Así pues, podemos considerar que el nado se desarrolla a bajo número de Reynolds y que durante el mismo la viscosidad del fluido es la que se determinó.

#### 4.1.1. Efecto de la rigidez de la cola

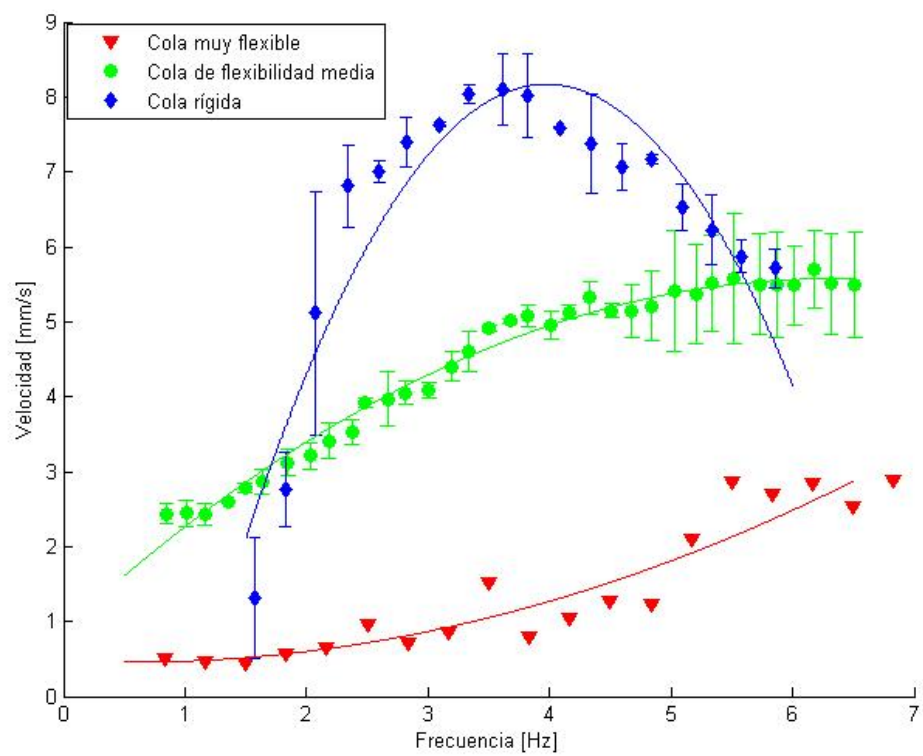
Los experimentos muestran una tendencia clara, a mayor rigidez de la cola, mayor es la velocidad de nado que experimenta el nadador. Esto además, sucede para el nado en los dos tipos de fluido en que se realiza el experimento, el fluido sin partículas (ver figura 4.1) y el fluido con partículas (ver figura 4.2).

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---



**Figura 4.1:** Velocidad de nado en función de la rigidez de la cola para el fluido sin partículas. Las líneas continuas representan ajustes polinomiales de segundo orden.



**Figura 4.2:** Velocidad de nado en función de la rigidez de la cola para el fluido con partículas. Las líneas continuas representan ajustes polinómicos de segundo orden.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

Una mayor rigidez en la cola del nadador, le permite desplazar mayor cantidad de fluido y lograr una velocidad de nado más grande. Sin embargo, en el caso del nadador de cola rígida, esta mayor velocidad de nado va acompañada también de un espacio de nado mayor (ver figura 4.3 c) si se le compara con el que requieren los nadadores de cola muy flexible y el de cola flexible (figuras 4.3 a y 4.3 b respectivamente).

### 4.1.2. Efecto de la adición de partículas al fluido.

#### 4.1.2.1. Cola muy flexible

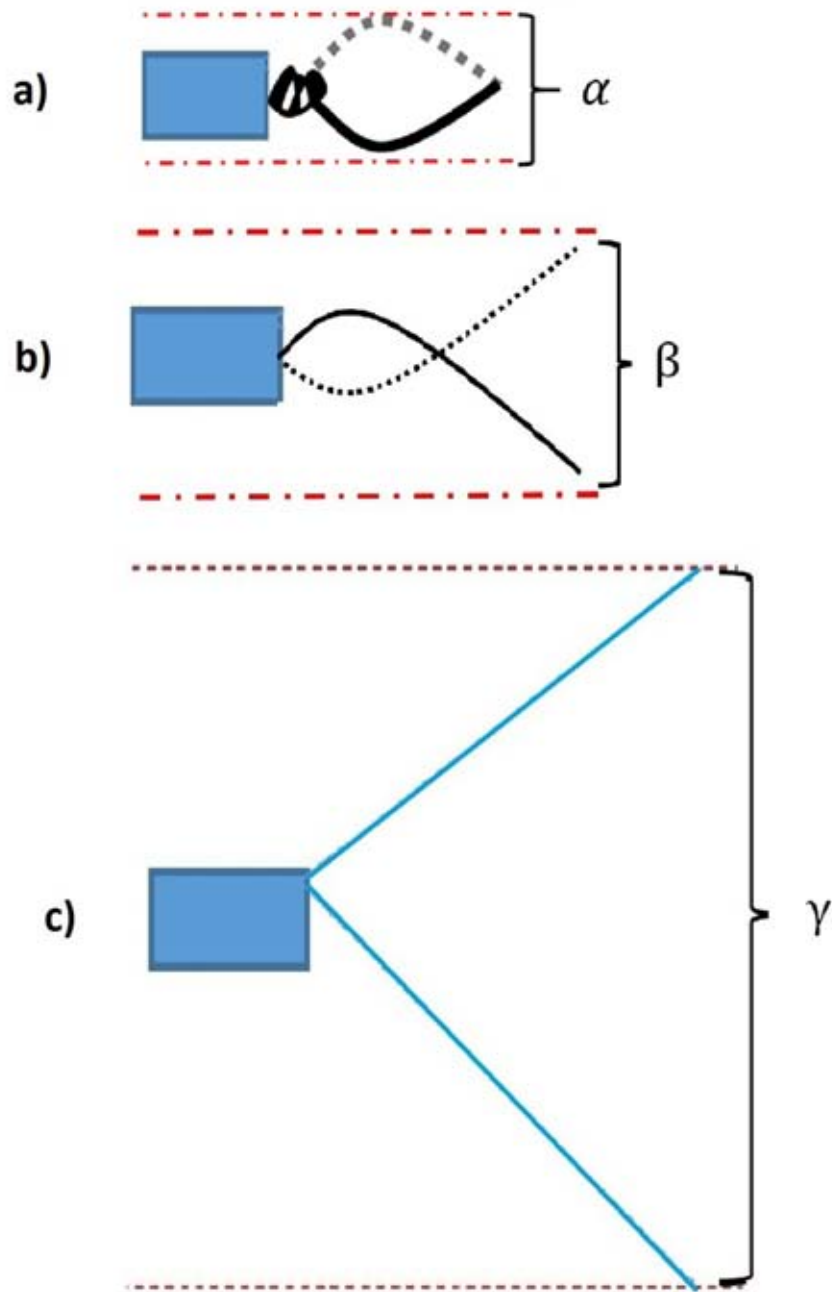
Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.4. El nadador de cola muy flexible prácticamente no nada a frecuencias menores a  $3[Hz]$ ; sin embargo a frecuencias mayores, se nota un incremento en la velocidad para el caso del nado en el fluido con partículas. Al hacer un análisis de imágenes se observa la forma que toma la cola al aumentar las revoluciones.

Para el caso del nado en el fluido sin partículas, al aumentar la frecuencia de giro de la bobina, parte de la cola se enrolla sobre sí misma formando un nudo cerca del cuerpo del nadador y quedando libre un extremo pequeño de la cola; al aumentar aún más las revoluciones de giro toda la cola se enrolla sobre sí misma formando un nudo por completo imposibilitando totalmente la propulsión. (ver figura 4.5).

Para el caso del nado en el fluido con partículas, también se observa que al ir aumentando las revoluciones la cola se enrolla sobre sí misma. Una parte cercana al cuerpo se anuda sin producir propulsión, y el resto queda como un extremo libre, cuya rigidez combinada con su movimiento es suficiente para producir empuje. Las partículas hacen que la porción libre de la cola alcance una configuración que le permita una rigidez capaz de generar nado. A diferencia del caso anterior (nado en el fluido sin partículas), esta configuración se mantiene incluso para las frecuencias de giro más altas, ver figura 4.6.

#### 4.1.2.2. Cola de flexibilidad media

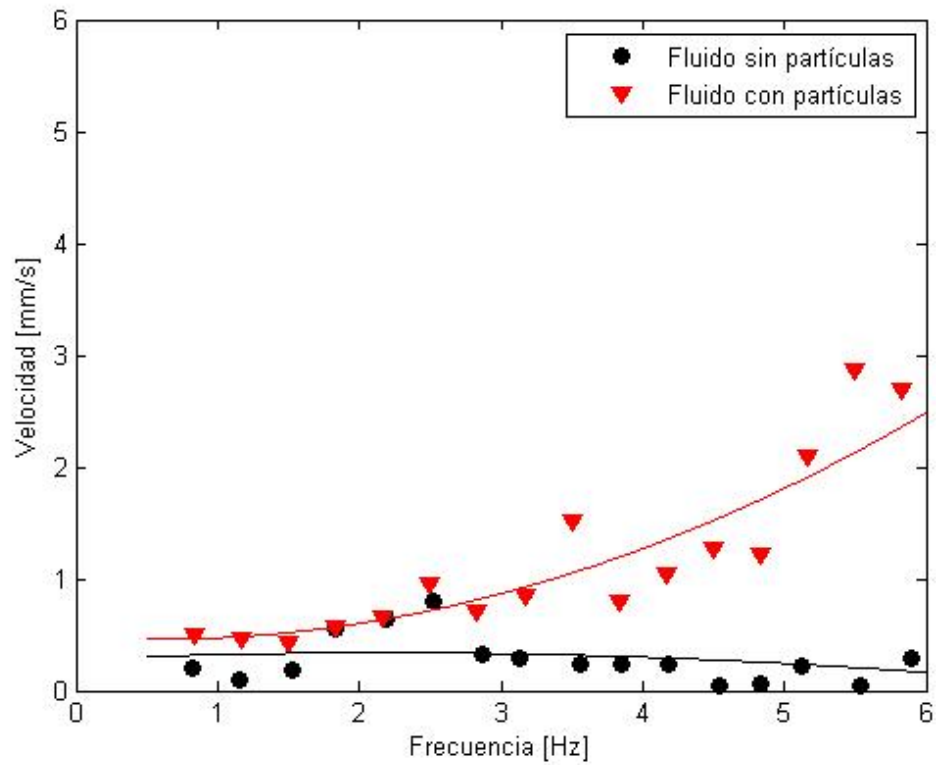
Se puede apreciar un claro incremento en la velocidad de nado del robot cuando éste nada en el fluido con partículas. Esto se asocia con una pendiente más alta en la gráfica de la figura 4.7. El incremento que se presenta en la velocidad de nado en el fluido con partículas es aproximadamente de 2.3, justo como se aprecia en el recuadro superior izquierdo de la figura 4.7.



**Figura 4.3:** a) Nadador de cola muy flexible, b) nadador de cola flexible, c) nadador de cola rígida. Espacio requerido para cada uno de los nadadores para su nado, donde  $\alpha = 0.47[cm]$ ,  $\frac{\beta}{\alpha} = 1.43$  y  $\frac{\gamma}{\alpha} = 5.48$

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

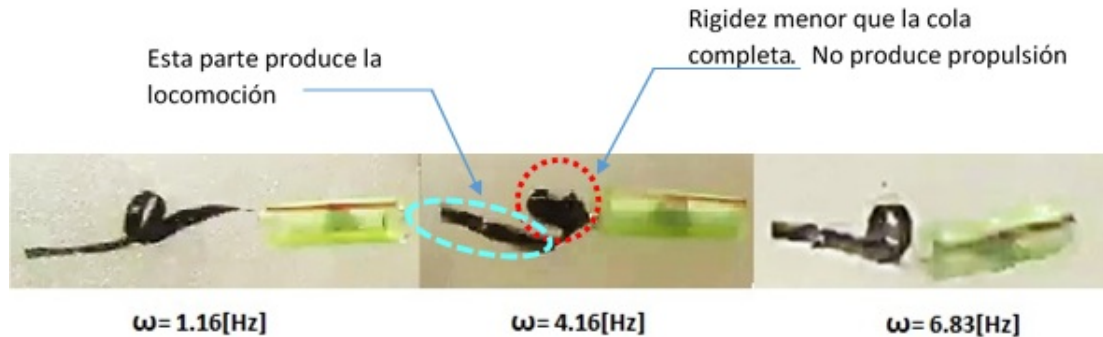
---



**Figura 4.4:** Nadador de cola muy flexible en el fluido con partículas y sin partículas.



**Figura 4.5:** Nadador de cola muy flexible en el fluido sin partículas.



**Figura 4.6:** Nadador de cola muy flexible en el fluido con partículas.

Haciendo un análisis de capturas de vídeo, se observa que para el caso del nado con partículas, la deformación de la cola se mantiene prácticamente igual al aumentar la frecuencia de giro de la bobina lo que le permite nadar más rápido además de mantener constante la propulsión, figura 4.8.

Para el caso del fluido sin partículas, la forma de la cola si sufre un cambio al aumentar la frecuencia; hay que notar que el extremo libre de la cola va tomando una posición horizontal cuando la frecuencia va en aumento, generando cada vez un mayor arrastre y disminuyendo la velocidad de nado del robot (ver figura 4.9).

Al superponer las imágenes de las colas se puede apreciar mejor el cambio en la forma de la cola cuando no hay partículas en el fluido (figura 4.10) y como la forma se mantiene prácticamente igual cuando si hay (figura 4.11).

#### 4.1.2.3. Cola rígida

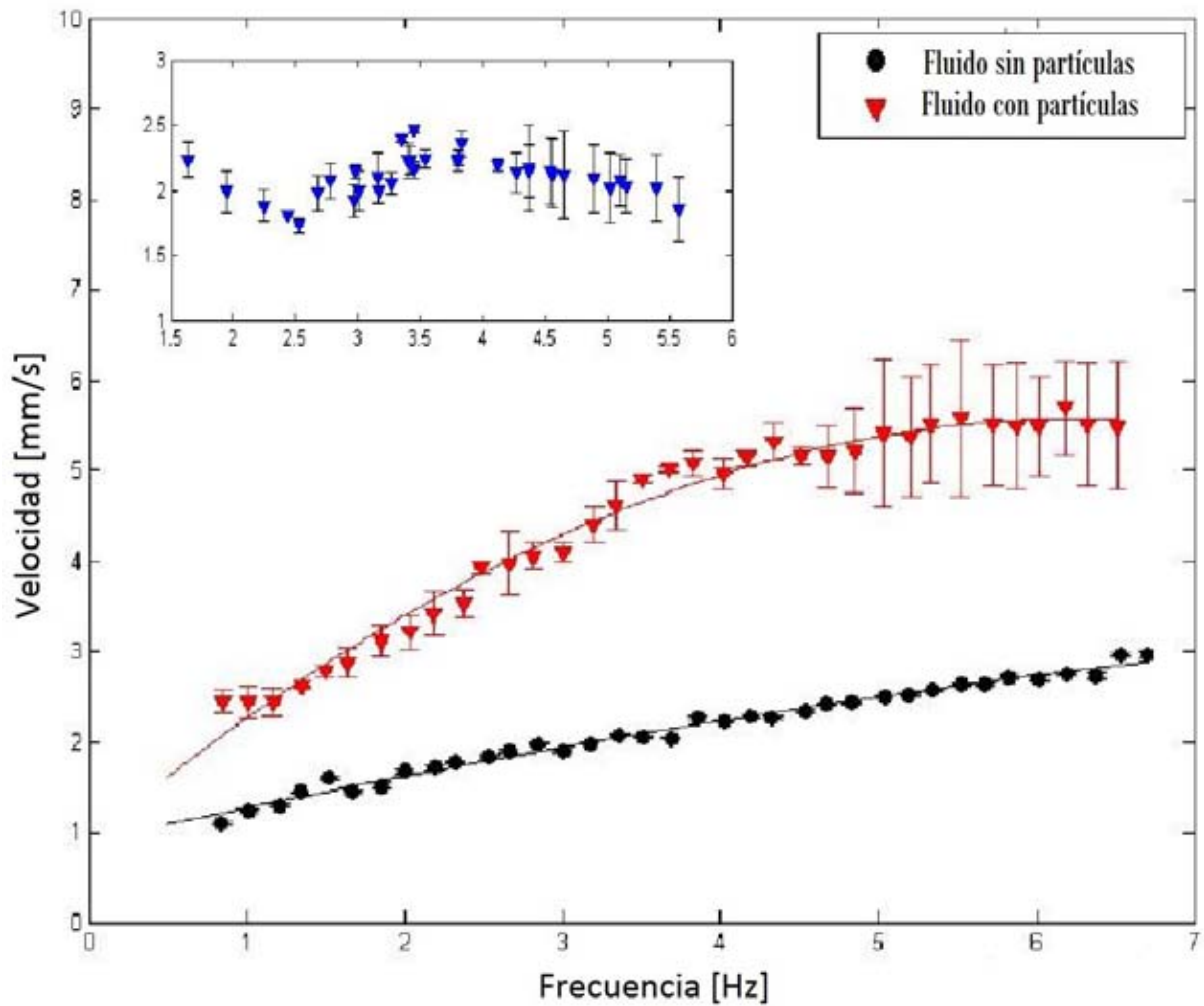
Como en los dos casos anteriores, se puede observar una mayor velocidad de nado en el robot, cuando este se encuentra en el fluido con partículas, figura 4.12. El incremento que se presenta en la velocidad de nado en el fluido con partículas es aproximadamente de 2 veces la velocidad en el fluido sin partículas (pasados los  $2[\text{Hz}]$ ), justo como se aprecia en el recuadro superior izquierdo de la figura 4.7.

El porqué de la mayor velocidad de nado en el fluido con partículas, puede explicarse pensando que las partículas se pegan a la cola del nadador aumentando ligeramente la superficie de la cola e incrementando por lo tanto la cantidad de fluido que esta puede desplazar. Este efecto es mayor que el arrastre que las partículas le generan al nadador, de modo que el resultado final es un incremento en la velocidad de nado.

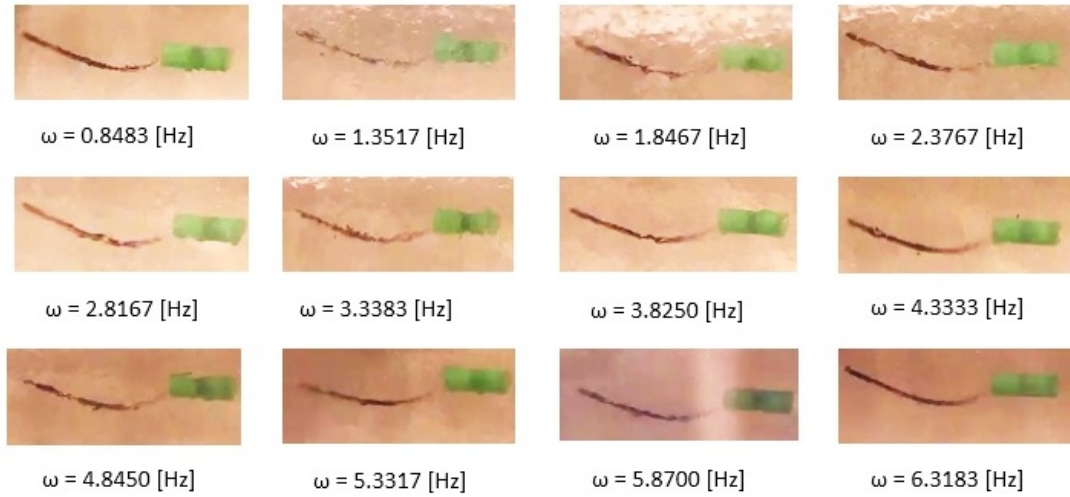
Si se asume que las partículas no pueden mantenerse pegadas a la cola cuando el nadador empieza a girar más rápido, se puede explicar de igual forma la caída



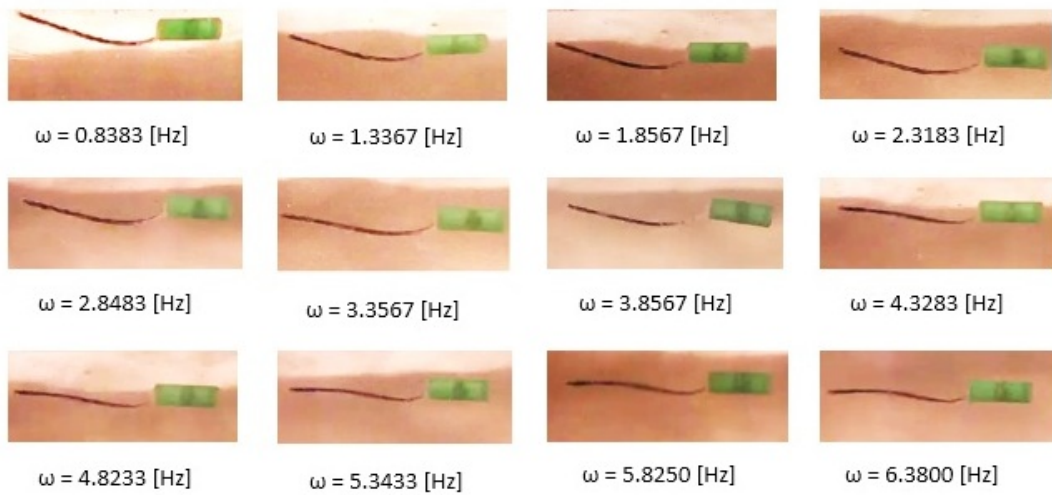
#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS



**Figura 4.7:** Nadador con cola de flexibilidad media en los fluidos con y sin partículas. Las líneas continuas representan ajustes polinomiales de segundo orden. El recuadro superior izquierdo de la figura muestra la relación de velocidades,  $R = \frac{V_{cp}}{V_{sp}}$ , contra la frecuencia adimensional,  $f^* = \frac{f \cdot D}{V_{cp}}$ , donde  $D$  es el diámetro de la cabeza,  $V_{cp}$  y  $V_{sp}$  las velocidades en el fluido con y sin partículas respectivamente.



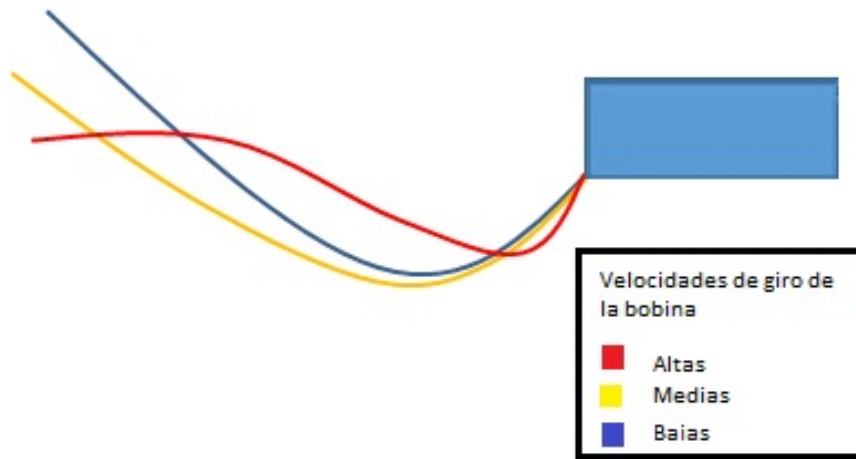
**Figura 4.8:** Nadador con cola de flexibilidad media en el fluido con partículas.



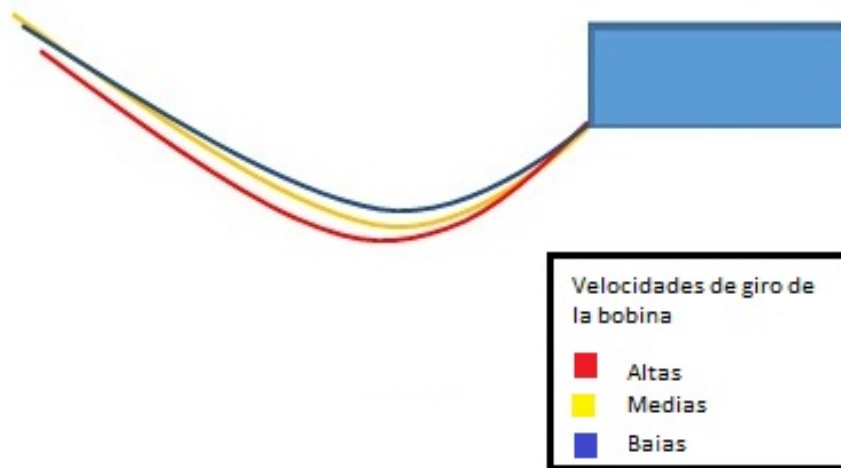
**Figura 4.9:** Nadador con cola de flexibilidad media en el fluido sin partículas.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

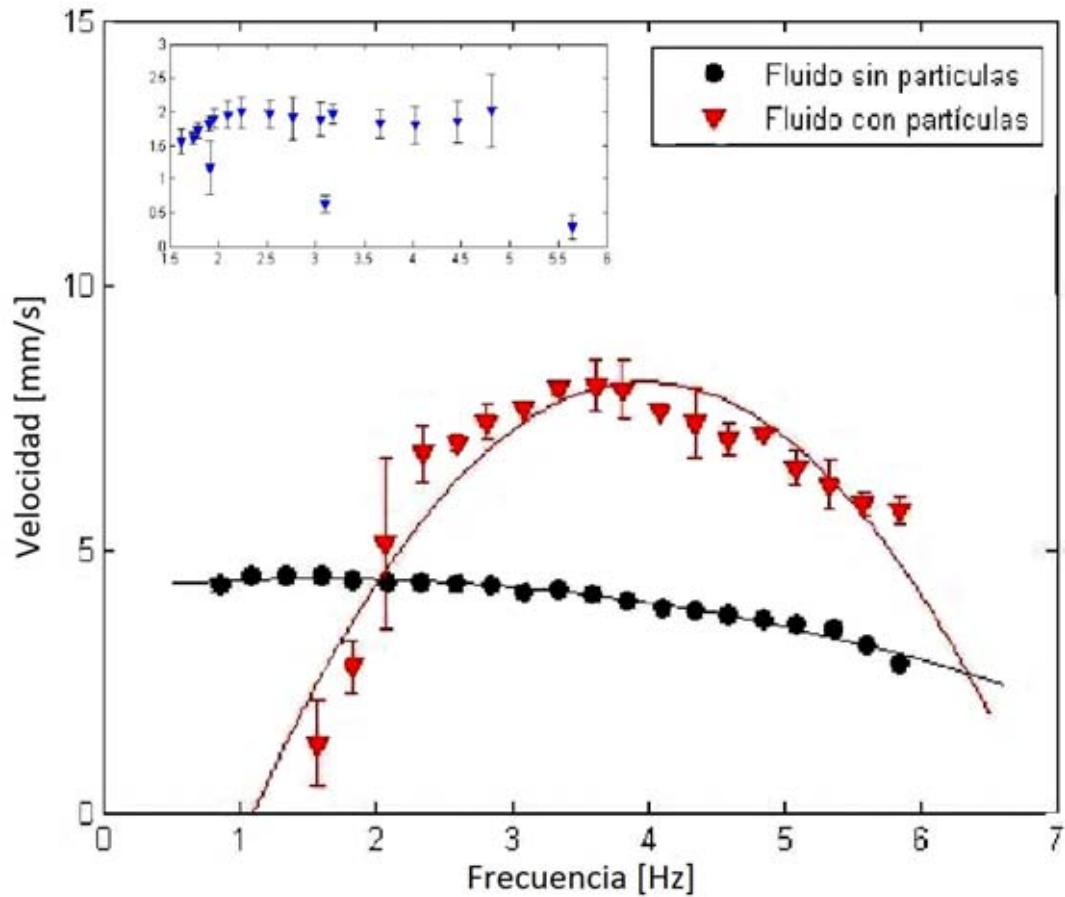
---



**Figura 4.10:** Nadador con cola de flexibilidad media en el fluido sin partículas. La imagen es una representación a escala del fenómeno observado guardando las proporciones con el nadador real.



**Figura 4.11:** Nadador con cola de flexibilidad media en el fluido con partículas. La imagen es una representación a escala del fenómeno observado guardando las proporciones con el nadador real.



**Figura 4.12:** Nadador de cola rígida en el fluido con y sin partículas. Las líneas continuas representan ajustes polinomiales de segundo orden. El recuadro superior izquierdo de la figura muestra la relación de velocidades,  $R = \frac{V_{cp}}{V_{sp}}$ , contra la frecuencia adimensional,  $f^* = \frac{f \cdot D}{V_{cp}}$ , donde  $D$  es el diámetro de la cabeza,  $V_{cp}$  y  $V_{sp}$  las velocidades en el fluido con y sin partículas respectivamente.

de velocidad pasados los 4 [Hz] en la figura 4.12.

### 4.1.3. Efecto del cambio en la concentración de partículas

Como último experimento, se varió la concentración de las partículas en el fluido únicamente para el caso del nadador con cola de flexibilidad media. Se prepararon tres fluidos con diferente concentración de partículas:

- 1) Concentración baja (0.09 [g] de partículas por cada mililitro de fluido).
- 2) Concentración media (0.18 [g] de partículas por cada mililitro de fluido. Igual a la del fluido usado en los experimentos anteriores).
- 3) Concentración alta (0.36 [g] de partículas por cada mililitro de fluido).

En los resultados mostrados en la figura 4.13, se puede notar un aumento en la velocidad de nado cuando la concentración de partículas se duplica y una disminución cuando la concentración es reducida a la mitad.

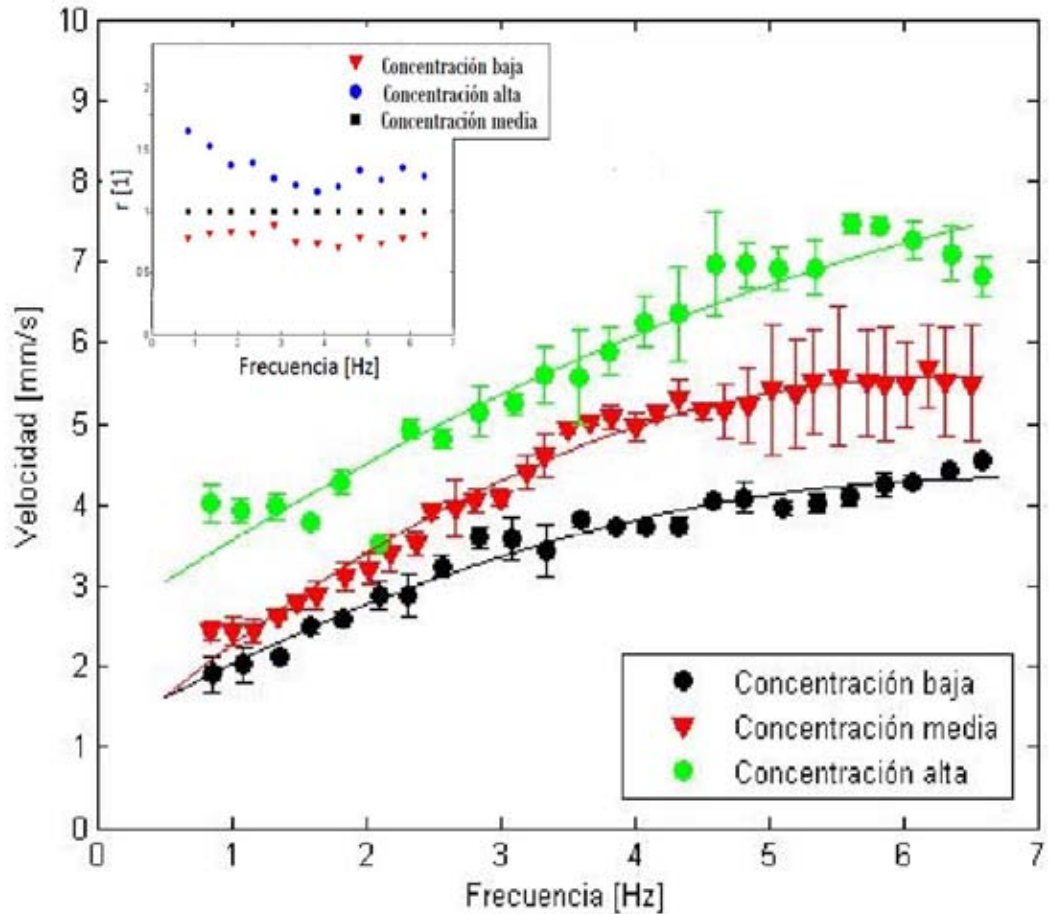
La existencia de las partículas ciertamente tiene un efecto positivo en la velocidad de nado. En la sección 4.1.2.2 se discute como las partículas no permiten que la cola del nadador se siga deformando, generando más propulsión que arrastre y obteniéndose una mayor velocidad. Cuando se duplica la cantidad de partículas, el efecto se incrementa y se obtiene un aumento de velocidad incluso mayor (en promedio 1.34 veces la velocidad en el fluido con concentración media de partículas).

En caso contrario al reducir la cantidad de partículas a la mitad, el efecto que se menciona disminuye y las condiciones de nado se parecen más al caso del nado en el fluido newtoniano sin partículas. Esto disminuye la velocidad de nado (en promedio a 0.78 veces la velocidad en el fluido con concentración media de partículas), debido en parte a los efectos que se observan en la imagen 4.9.

## 4.2. Nadador de cola helicoidal

Para este nadador se realizó únicamente un tipo de experimento. Al igual que en el caso de los nadadores con cola tipo flagelo flexible, se tiene intención de observar el efecto de las partículas en la velocidad del nadador.

Los robots nadaron a  $Re < 0.07$  y desarrollaron una velocidad de corte  $\gamma < 1.17[s^{-1}]$ . Así pues, se puede considerar que el nado se desarrolla a bajo número de Reynolds y que durante el mismo la viscosidad del fluido es la que se determinó.



**Figura 4.13:** Variación de la velocidad del nadador de cola con flexibilidad intermedia al cambiar la concentración de partículas. El recuadro superior izquierdo de la figura muestra la relación de velocidades,  $r = \frac{V_{cp}}{V_{sp}}$ , contra la frecuencia de giro de la bobina. Siendo  $V_{cp}$  y  $V_{sp}$  las velocidades en el fluido con y sin partículas respectivamente.

### 4.2.1. Efecto de la adición de partículas al fluido.

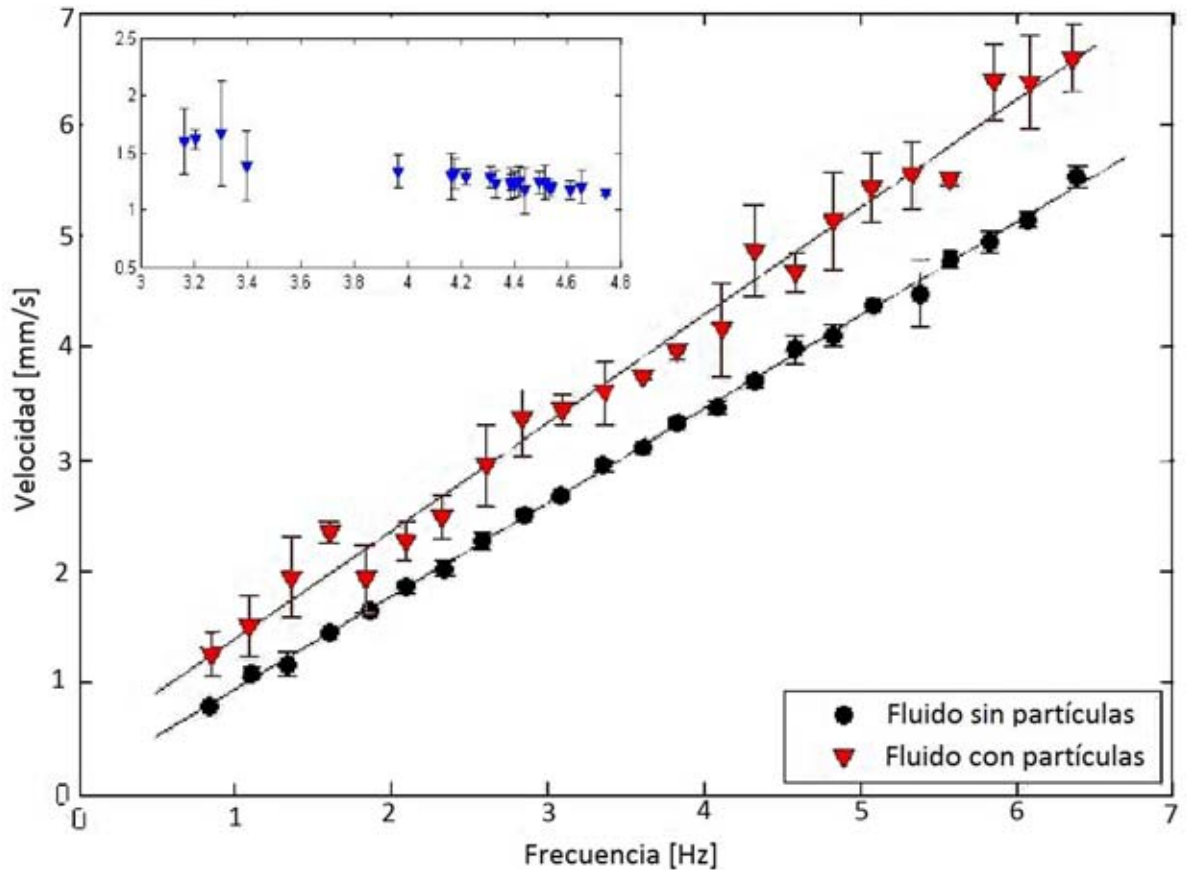
Se observa al igual que en los casos anteriores que las partículas en el fluido hacen que el nadador avance más rápido. Esto se asocia a una pendiente más grande para la curva de la figura 4.14. Se presenta un incremento en la velocidad de nado para el fluido con partículas de aproximadamente 1.2 veces la velocidad de nado en el fluido sin partículas. Esto se aprecia en el recuadro superior izquierdo de la figura 4.14.

El aumento se debe, posiblemente, a un fenómeno parecido al que ocurre en el nadador tipo flagelo de cola rígida. Las partículas se adhieren a la cola aumentando la superficie que desplaza el fluido generando mayor velocidad de nado. Puede ser que la diferencia con el nadador de cola rígida se deba a que por la forma de la cola y el movimiento del nadador, las partículas tienden a desprenderse menos de la cola de forma que no se produce un decaimiento en la velocidad.

### 4.3. Comparación global

En este apartado se comparan las velocidades de nado de los nadadores de cola helicoidal y de tipo flagelo para ambos fluidos. En las gráficas para el nado en el fluido sin partículas (figura 4.15) el nadador de cola helicoidal y el nadador de cola rígida son los más rápidos en casi todo el rango de frecuencias en que se realizaron los experimentos. Entonces pues si no hay partículas, el factor de peso parece ser la rigidez de la cola. Se observan comportamientos interesantes; por ejemplo aproximadamente a  $4.5[Hz]$  el nadador de cola helicoidal y el de cola rígida tienen el mismo desempeño. A frecuencias menores,  $\omega < 4.5[Hz]$ , el nadador de cola rígida tiene mejor desempeño y a frecuencias mayores,  $\omega > 4.5[Hz]$ , el helicoidal.

La gráfica para el nado con partículas (figura 4.16) muestra una tendencia parecida, a un valor de frecuencia de aproximadamente  $5.5[Hz]$  el nadador de cola helicoidal y el nadador de cola rígida parecen tener el mismo desempeño. La adición de las partículas parece darle al nadador de cola flexible la capacidad de superar en desempeño al nadador de cola helicoidal a frecuencias menores a  $5.5[Hz]$ . Algo curioso pasa una vez que nos aproximamos a esa frecuencia; a frecuencias mayores el nadador de cola helicoidal supera tanto al nadador de cola rígida (cuya velocidad disminuye conforme se acerca a ese valor) y al de cola flexible (cuya velocidad parece hacerse asintótica a un valor).

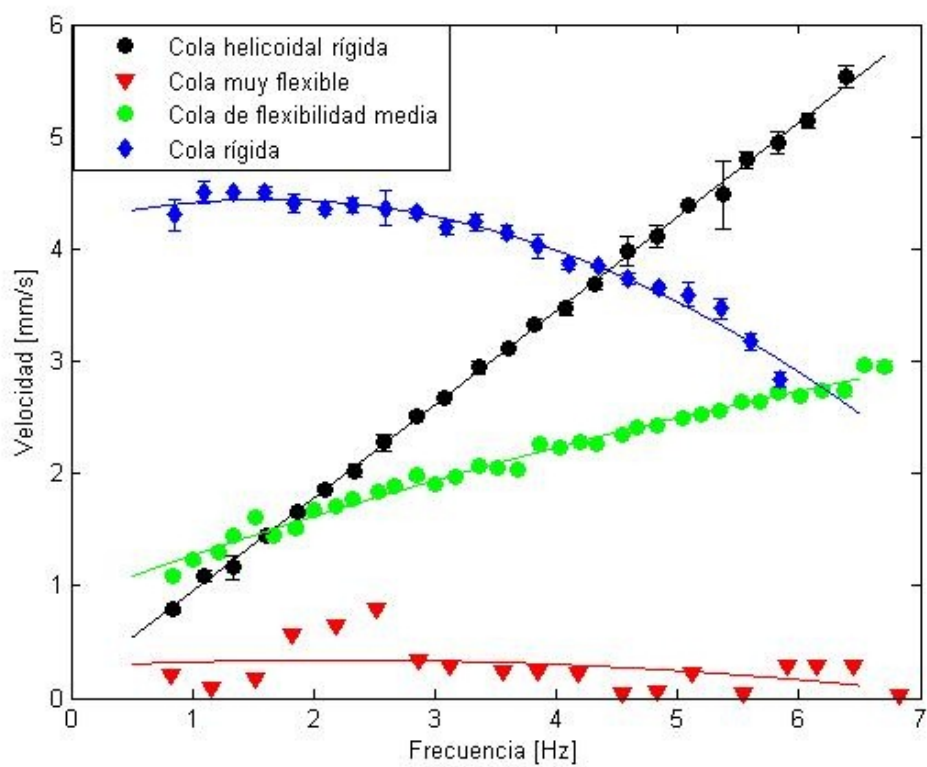


**Figura 4.14:** Comparación de la velocidad de nado en el fluido con partículas y sin partículas para el caso del nadador de cola helicoidal. Las líneas continuas representan ajustes lineales. El recuadro superior izquierdo de la figura muestra la relación de velocidades,  $R = \frac{V_{cp}}{V_{sp}}$ , contra la frecuencia adimensional,  $f^* = \frac{f * D}{V_{cp}}$ , donde  $D$  es el diámetro de la cabeza,  $V_{cp}$  y  $V_{sp}$  las velocidades en el fluido con y sin partículas respectivamente.

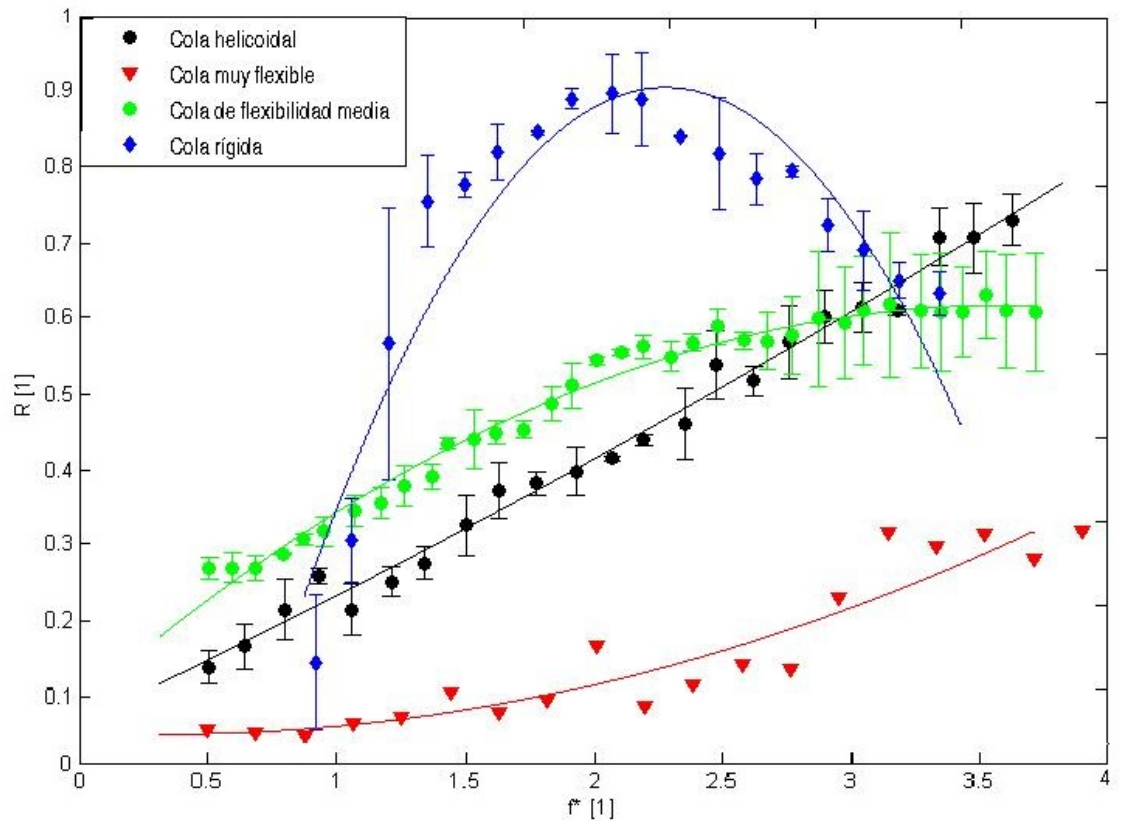


#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---



**Figura 4.15:** Comparación de la velocidad de nado en el fluido sin partículas para todos los nadadores.



**Figura 4.16:** Comparación de la velocidad de nado en el fluido con partículas para todos los nadadores. La gráfica muestra la relación de velocidades  $R = \frac{V_{cp}}{V_{max}}$ , contra la frecuencia adimensional,  $f^* = \frac{f * D}{V_{max}}$ , donde  $D$  es el diámetro de la cabeza,  $V_{cp}$  la velocidad en el fluido con partículas y  $V_{max}$  la velocidad máxima desarrollada en el fluido con partículas.



## Conclusiones

---

El objetivo principal de esta tesis fue investigar el efecto de la presencia de partículas en el fluido sobre la velocidad de nado de robots milimétricos impulsados magnéticamente.

Al comparar los resultados del fluido con y sin partículas, concluimos que la adición de partículas aumenta la velocidad de nado en todos los robots. La razón del aumento de la velocidad depende de las características de cada nadador. Para el nadador de cola muy flexible la razón parece ser la formación de un nudo que permite una rigidez mayor. Para el nadador de cola flexible, el motivo son los efectos que se plantean en la sección 4.1.2.2, las partículas le permiten a la cola seguirse deformando y mantener una configuración, independiente de la velocidad de giro, en donde genera más propulsión que arrastre (a diferencia de lo que se observa con la ausencia de partículas). Para los nadadores de cola rígida y cola helicoidal, creemos que las partículas de alguna forma se adhieren a la superficie de la cola durante el movimiento (parecido a lo que se aprecia en [24]), otorgándole por momentos una mayor superficie a la cola, lo que les permite desplazar una mayor cantidad de fluido y aumentar su velocidad.

Para el nadador de cola flexible, se realizó un experimento variando la concentración de las partículas para ver el efecto de esta variación en la velocidad de nado. De los resultados concluimos que a mayor concentración de partículas en el fluido, mayor es la velocidad de nado y a menor concentración menor también la velocidad. El motivo pensamos que puede ser el incremento o decremento, según el caso, de los efectos que se explican en la sección 4.1.3.

Cuando se analizan los resultados obtenidos únicamente para los nadadores de tipo flagelo flexible, es fácil notar que la rigidez de la cola parece ser el factor determinante. A mayor rigidez de la cola, mayor es la velocidad de nado del robot. Esta afirmación es verdadera para los dos tipos de fluido. La hipótesis planteada, es que una cola más rígida permite desplazar una mayor cantidad de fluido y generar una mayor propulsión. Si bien es cierto que se genera un arrastre, el

## 5. CONCLUSIONES

---

resultado neto observable de ambas contribuciones es una mayor velocidad.

Al comparar los nadadores de cola flexible con el nadador de cola helicoidal, podemos notar que el nadador de cola helicoidal presenta una mayor velocidad de nado que los nadadores de cola flexible y muy flexible. Si se le compara con el nadador de cola rígida, se observa que el helicoidal tiene un desempeño mejor pero solo a partir de cierta frecuencia (este hecho sucede en ambos tipos de fluido). Se tiene entonces que la configuración de cola helicoidal es mejor que la de cola flexible cuando la rigidez de esta última no es muy grande (otro punto más que refleja la importancia de la rigidez de la cola).

El incremento en la velocidad de nado es lineal para el nadador de cola helicoidal; por otro lado, los nadadores de cola flexible se ajustan muy bien a un modelo polinomial de segundo orden (haciéndose asintóticos a un determinado valor). De las afirmaciones anteriores podemos concluir que el nadador de cola helicoidal tiene un mejor desempeño si las frecuencias de giro de la bobina son muy altas. Por otro lado si se quiere tener mayores velocidades pero a menores frecuencias, el nadador de cola rígida es mejor opción. Sin embargo si hay partículas, el nadador de cola flexible también es mejor opción que el de cola helicoidal (de nuevo, a frecuencias de giro muy altas podemos inferir que el nadador de cola helicoidal ganará en velocidad).

La presente investigación ayuda a entender mejor algunos de los parámetros que afectan el desempeño de nado de robots magnéticos a bajo número de Reynolds. Las conclusiones pueden permitir elegir la mejor configuración (de las aquí consideradas) en función de las condiciones del medio en el que estos robots deban desempeñar su función y las velocidades requeridas.

En caso de realizar experimentos en condiciones similares y dada la experiencia ganada con el trabajo realizado, me permito dar las siguientes recomendaciones:

- Si se hacen mezclas para la preparación de fluidos, mezclar vigorosamente y por suficiente tiempo para asegurar una mezcla homogénea.
- Fijar una temperatura, o un rango de temperaturas a las cuales realizar los experimentos para evitar variaciones en la viscosidad.
- Al trabajar con fluidos que se degraden, sellar bien los depósitos del fluido para evitar la descomposición y el consecuente cambio en sus propiedades. Pueden usarse pequeñas cantidades de benzoato de sodio para conservar el fluido.
- Si se añaden partículas, procurar que tengan un índice de refracción similar al del fluido de modo que permita la observación.

- 
- Si las partículas se degradan rápidamente, realizar las mediciones necesarias el mismo día.
  - En cada evento agitar el fluido para asegurar una distribución homogénea de las partículas.
  - Asegurar la flotación neutra de los nadadores. Lograr además que el nado sea lo más alejado posible de las paredes del contenedor. Si se detecta lo contrario, descartar el evento y repetirlo.
  - Si se usa algún medio para calentar el fluido a una temperatura de trabajo, tener cuidado con las transformaciones que puedan ocurrir en el fluido por el incremento de temperatura.
  - Evitar en la medida de lo posible las perturbaciones externas (como las vibraciones) que puedan alterar el nado de los robots.

Si bien es cierto que los robots milimétricos que usamos nadan en un régimen a bajo número de Reynolds ( $Re < 0.08$ ), me parece que para obtener resultados más representativos, debería disminuirse aún más este número. Esto porque, aunque los microorganismos nadan a números de Reynolds muy bajos, la diferencia que hay con el de nuestros experimentos es de varios órdenes de magnitud. Sugiero para eso disminuir el tamaño de los nadadores y/o usar fluidos más viscosos (se requiere un Newtoniano para este experimento, si se consigue con alta viscosidad ayudaría mucho a disminuir el Reynolds).

El siguiente paso de esta investigación podría consistir en hacer experimentos en más tipos de fluidos (viscoelásticos, booger, adelgazantes, etcétera) cada uno de preferencia emulando las condiciones que enfrentarían los robots nadadores en una aplicación práctica, que como vimos en la sección 1.4 va encaminada en gran parte a procedimientos en el cuerpo humano. Sabiendo que la mayoría de los fluidos biológicos son no Newtonianos, resultaría de gran utilidad realizar mayor investigación considerando estos aspectos.



## Bibliografía

---

- [1] Pat Willmer, Graham Stone, and Ian Johnston. *Environmental Physiology of Animals*. Wiley, 2009. XI, 3
- [2] Hitech-Project. Low reynolds number flows. <http://bit.ly/1zgn3zg>, October 2014. XI, 2, 4
- [3] Edward M Purcell. Life at low reynolds number. *Am. J. Phys*, 45(1):3–11, 1977. XI, 3, 5, 9, 11
- [4] Neil A. Campbell and Jane B. Reece. *Biología*. Editorial Medica Panamericana Sa de, 2007. XI, 1, 9, 10
- [5] Efraín G Arias, Jorge Andaverde, Edgar Santoyo, and Gustavo Urquiza. Determinación de la viscosidad y su incertidumbre en fluidos de perforación usados en la construcción de pozos geotérmicos: aplicación en el campo de los humeros, puebla, méxico. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 26(2):516–529, 2009. XI, 13
- [6] Hitech-Project. Rheology, October 2014. XI, 13
- [7] Francisco A Godínez, Oscar Chávez, and Roberto Zenit. Note: Design of a novel rotating magnetic field device. *Review of Scientific Instruments*, 83(6):066109, 2012. XI, XI, 17, 21, 22
- [8] Eric Lauga and Thomas R Powers. The hydrodynamics of swimming microorganisms. *Reports on Progress in Physics*, 72(9):096601, 2009. 1
- [9] Theodore L Jahn and John J Votta. Locomotion of protozoa. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 4(1):93–116, 1972. 3
- [10] James Lighthill. *Mathematica) Biofluidodynamics*. SIAM, 1975. 3



## BIBLIOGRAFÍA

---

- [11] Christopher Brennen and Howard Winet. Fluid mechanics of propulsion by cilia and flagella. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 9(1):339–398, 1977. 3
- [12] Saverio E Spagnolie, Bin Liu, and Thomas R Powers. Locomotion of helical bodies in viscoelastic fluids: enhanced swimming at large helical amplitudes. *Physical review letters*, 111(6):068101, 2013. 3
- [13] Mark P Curtis and Eamonn A Gaffney. Three-sphere swimmer in a nonlinear viscoelastic medium. *Physical Review E*, 87(4):043006, 2013. 3, 5
- [14] Bin Liu, Thomas R Powers, and Kenneth S Breuer. Force-free swimming of a model helical flagellum in viscoelastic fluids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49):19516–19520, 2011. 3
- [15] Rodrigo M Rojano. *Estudio del efecto de la geometría en la eficiencia de nado de un microrobot en flujo Stokes*. Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2014. 5
- [16] Julian E Garcia, Eric Lauga, and Roberto Zenit. Fluid elasticity increases the locomotion of flexible swimmers. *Physics of Fluids (1994-present)*, 25(3):031701, 2013. 5
- [17] Bradley J Nelson, Ioannis K Kaliakatsos, and Jake J Abbott. Microrobots for minimally invasive medicine. *Annual review of biomedical engineering*, 12:55–85, 2010. 5
- [18] Isaac Newton. Principia mathematica. *Newton's principia (ed. F. Cajori)*, page 634, 1964. 9
- [19] Robert L. Mott and Javier E. Brito. *Mecánica de fluidos*. Pearson Educación, 2006. 9
- [20] Eduardo R Sandoval, Alejandro F Quintero, Lisímaco A Alcalá, and Bernardo O Patiño. Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 19(19):17–30, 2011. 12
- [21] Octave Levenspiel. *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. Reverté, 1993. 12
- [22] R Benedict Seymour and Carraher E. Carraher. *Introducción a la química de los polímeros*. Reverté, 1995. 17
- [23] ProjectTracker. Software. <https://www.cabrillo.edu/dbrown/tracker/>, October 2014. 27

- [24] Brian J Williams, Sandeep V Anand, Jagannathan Rajagopalan, and M Taher A Saif. A self-propelled biohybrid swimmer at low reynolds number. *Nature communications*, 5, 2014. 49