Facultat de Nàutica de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE PROPULSORES ELÉCTRICOS SUMERGIDOS EN UN TANQUE DE TRES METROS DE DIÁMETRO

Proyecto Final de Carrera

Ingeniería Técnica Naval
especialidad en sistemas de propulsión
y servicios del buque

**Autor del PFC: Pedro Mas Bagant**

**Director del PFC: Dr. Ricard Bosch Tous**

**Convocatoria de entrega del PFC: Diciembre del 2010**

## ***INDICE***

**1. Introducción ..... pág. 4**

1.1 Motivación pág. 4

1.2 Objetivo pág. 5

1.3 Alcance pág. 5

1.4 Antecedentes pág. 5

**2. Propulsión y dinámicas de embarcaciones ..... pág. 6**

2.1 Fuerzas a vencer pág. 6

2.2 Sistemas de propulsión pág. 7

2.3 Estabilización dinámica pág. 11

**3. Motores e hidrogeneradores estudiados ..... pág. 13**

3.1 Tesla GF420T353 (motor1) pág. 13

3.2 ABB (motor2) pág. 14

3.3 Mavilor BF-083 (motor3) pág. 15

**4. Hélices estudiadas ..... pág. 17**

4.1 HSN 3 palas (hélice1) pág. 17

4.2 HSN 4 palas (hélice2) pág. 18

4.3 HSN 3 palas (hélice 3) pág. 18

4.4 Aluminio 4 palas (hélice4) pág. 19

**5. Planteo experimental en laboratorio ..... pág. 20**

5.1 Estructuras y montajes realizados pág. 20

*5.1.1 Piscina de tres metros de diámetro (EST1)* pág. 20

*5.1.2 Estructura dinamométrica abatible fijada sobre una mesa (EST2)* pág. 24

*5.1.3 Estructura dinamométrica sobre una botavara (EST3)* pág. 26

*5.1.4 Estructura para ensayo del motor ABB en vertical (EST4)* pág. 29

*5.1.5 Estructura pivotante en mesa y extraíble (EST5)* pág. 32

5.2 Ensayos realizados dentro de laboratorio pág. 34

*5.2.1 Ensayo con un propulsor montado en la estructura dinamométrica de la botavara* pág. 34

*5.2.2 Ensayo con dos propulsores, uno en la estructura dinamométrica de la botavara y el otro en la estructura pivotante de la mesa* pág. 61

*5.2.3 Ensayo con un propulsor colocado verticalmente* pág. 66

*5.2.4 Ensayo con un propulsor que acelera el agua para poder caracterizar un hidrogenerador* pág. 70

5.3 Análisis térmico del grupo electrógeno pág. 74

**6. Conclusiones ..... pág. 80**

**7. Futuras líneas de desarrollo ..... pág. 82**

**8. Bibliografía ..... pág. 84**

**9. Anexos ..... pág. 86**

9.1 Documentos anexos ..... pág. 86

9.2 Índices de figuras y tablas ..... pág. 90

# 1. INTRODUCCIÓN

En otros proyectos se han construido propulsores navales eléctricos cuyo diseño se basa en un motor que lleva una hélice directamente acoplada a su eje. Con esto se pretende mejorar el rendimiento, prestaciones y tiempo de respuesta en transitorios de régimen cíclicos como el paso de las olas.

Sin embargo, todos estos propulsores construidos no se han ensayado más allá del tiro estático. Este proyecto , pretende la caracterización de propulsores eléctricos cuando se encuentran sumergidos en un fluido con velocidad. Se explorará la viabilidad del ensayo en un tanque circular de 3 metros de diámetro y una profundidad de 0,7 metros, los cálculos previos del cual parecen permitir una velocidad del fluido de 5 nudos sin desbordarse. De este modo se puede caracterizar el conjunto del propulsor y su cadena energética hasta esa velocidad periférica.

Del mismo modo se indagará en el comportamiento de hidrogeneradores eléctricos en distintas condiciones, asociados a un propulsor que ponga en movimiento el agua del tanque.

## 1.1 Motivación

Este proyecto es la continuación de muchos relevos, y no es el fin, sino que necesita de su continuación para profundizar en una tecnología que aun no ha acabado de madurar.

Desde un inicio ya tenía claro realizar un proyecto en el que se abordara la tecnología eléctrica como fuente de energía capaz de ofrecer un alto rendimiento.

Al mismo tiempo, pretendía realizar un proyecto experimental y no tan solo a nivel teórico. Construir aquello que previamente se estudia y proyecta es un gran aliciente y permite conocer fallos y puntos débiles que no se verían si se abordasen solo sobre un papel.

Como consejo personal, diría que después de realizar este proyecto, hay que prestar especial atención a la hora de redactar la memoria y las prisas finales antes de su presentación. En primer lugar, es bueno que esta se vaya redactando a medida que se realizan los distintos ensayos por si hay que repetir alguno, o por si se plantean de nuevos. En segundo lugar, debe dejarse un generoso tiempo de maduración de la misma memoria, proceso en el que se consolidan y entienden muchos ensayos y mediciones, gracias al contacto entre tutor y estudiante.

## *1.2 Objetivo*

El objetivo principal de este proyecto es caracterizar propulsores e hidrogeneradores sumergidos en un fluido con velocidad, por tanto, más allá del tiro estático.

## *1.3 Alcance*

El alcance de este proyecto viene determinado por las posibilidades que brinda el tanque disponible de 3 metros de diámetro, cuyos cálculos previos parece permitir una velocidad del fluido en la periferia de unos 5 nudos sin desbordar.

## *1.4 Antecedentes*

Tal y como se ha mencionado, este proyecto toma el relevo de otros realizados anteriormente. De todos estos proyectos los más relevantes y que tratan los temas más relacionados son los siguientes:

- Sistema de propulsió elèctrica de 6,5kVA per embarcacions (Vicenç Olivella Blanco & Jordi Pou Pratdesaba, 2006).

- Diseño y construcción del sistema de propulsión eléctrica de un catamarán de 3,4m (Albert Peregrina Velasco, 2007).

- Hacia el barco de propulsión eléctrica (Gabriel Riera Navarro, 2007)

- Millores i anàlisi de la propulsió (Miquel J. Vidal Parreu, 2008).

- Cap al vaixell híbrid de propulsió elèctrica (Carles Bou Orench, 2010).

# ***2. PROPULSIÓN Y DINÁMICAS DE LAS EMBARCACIONES***

En este apartado se pretende hacer una pequeña evaluación o recordatorio de:

- Las fuerzas que hay que vencer para propulsar una embarcación por el agua.

- Los sistemas de propulsión más utilizados hasta el día de hoy.

- Sistemas más conocidos para la estabilización dinámica de las embarcaciones.

## ***2.1 Fuerzas a vencer***

Las fuerzas que hay que vencer en una embarcación se pueden dividir en dos grupos:

- Las que hay que vencer sobre la flotación, es decir, el aire.

- Las que hay que vencer bajo la flotación, es decir, el agua.

En ambos casos se genera una presión cuya resultante es una fuerza longitudinalmente opuesta al sentido de avance de la embarcación, y además también se generan esfuerzos tangenciales que se transforman en otra fuerza longitudinal opuesta al avance de la misma.

Sin embargo, como la densidad del agua es mucho mayor que la del aire, las fuerzas resultantes que hay que vencer, normalmente se hacen mucho mas importantes en la obra viva de la embarcación, por lo que son las que más debemos tener en cuenta.

Centrando el interés en la resistencia al avance que se genera en la obra viva, se podría descomponer en:

- Resistencia de fricción (suma de todas las componentes longitudinales generadas por los esfuerzos cortantes que actúan en la superficie del casco).

- Resistencia de presión (suma de todas las componentes generadas por las fuerzas de presión en cada punto del casco).

La resistencia de fricción se origina únicamente debido a la viscosidad y por lo tanto, esta será función del número de Reynolds.

La resistencia de presión, en cambio, se deberá en parte a efectos viscosos y en parte a la formación de olas del casco.

Para lograr conocer el valor de esta resistencia al avance, el método más usual es la comparación con otro casco, como por ejemplo con un modelo y un ensayo de canal. Otro método es hacer uso de series sistemáticas desarrolladas por investigadores a partir de muchos modelos estudiados.

En resumen podría decirse que la resistencia total al avance de una embarcación será función de la eslora i velocidad de la misma, la densidad y viscosidad del fluido por el que navega, la aceleración de la gravedad, la presión y las relaciones geométricas adimensionales entre los cascos que hay que comparar.

## ***2.2 Sistemas de propulsión***

Para poder vencer las resistencias descritas anteriormente y poder propulsar el buque hace falta una reacción ya sea contra el aire, el agua o la tierra.

La reacción de aire se logra a partir del aprovechamiento de la velocidad del aire para la propulsión. Es el claro ejemplo de la barcos de vela.

La reacción de tierra se logra a partir de la utilización de algún sistema que arrastre o empuje desde tierra, como por ejemplo un cable o una pértiga.

La reacción de agua sin embargo, es la más habitual, y proviene de la variación de la cantidad de movimiento inducida al fluido.

Dentro de la reacción de agua, hay muchas formas de producir esta variación en la cantidad de movimiento inducida al fluido, de las cuales las más habituales son:

**- Ruedas de paletas**

Se trata de un sistema que acelera la superficie del fluido

***Figura 1***
***Buque con propulsión mediante rueda de paletas***

**- Hélices**

Es una superficie helicoidal que cuando gira impulsa el agua hacia atrás generando un empuje hacia adelante. Dentro de las hélices además se pueden dividir entre subcavitantes y supercavitantes, dependiendo de la condición en la que trabajen.

- Hélices convencionales

Son hélices compuestas por partes fijas.

***Figura 2***
***Hélice convencional***

- Hélices de paso ajustable

Son hélices en las que el paso de la hélice se puede ajustar según necesidad y conseguir la máxima eficiencia propulsiva.

***Figura 3***
***Hélice de paso ajustable***

- Hélices con tobera

Son hélices que llevan instalada una tobera con las que a bajas revoluciones y con tiro fijo se puede aumentar mucho la eficiencia.

***Figura 4***
***Hélice con tobera***

- Hélices contra rotativas

Son hélices coaxiales que giran en sentidos opuestos i mediante las cuales se eliminan las fuerzas laterales concentrando el empuje longitudinalmente consiguiendo una mayor eficiencia.

***Figura 5***
***Hélices contra rotativas***

- Hélices de eje vertical

Consisten en un rotor en el fondo de la embarcación y que tiene palas axialmente paralelas y que giran alrededor de un eje vertical, de este modo se puede conseguir el mismo empuje en cualquier dirección.

***Figura 6***
***Hélices de eje vertical***

**- Propulsión a chorro**

En este tipo hay una entrada de agua por el fondo del casco y mediante una bomba se acelera el agua y se descarga por la popa.

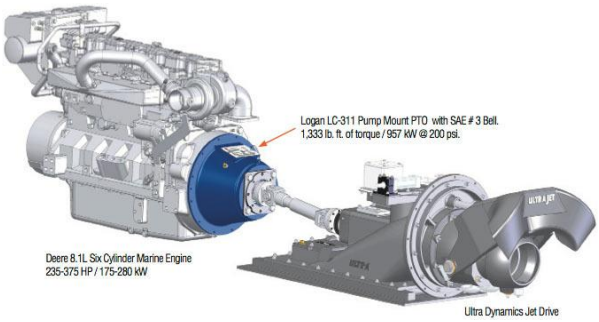



***Figura 7***
***Esquema de un sistema de propulsión a chorro***

***Figura 8***
***Propulsión a chorro***

A continuación se presenta una grafica que relaciona la eficiencia de algunos de los propulsores descritos anteriormente y la velocidad de la embarcación:

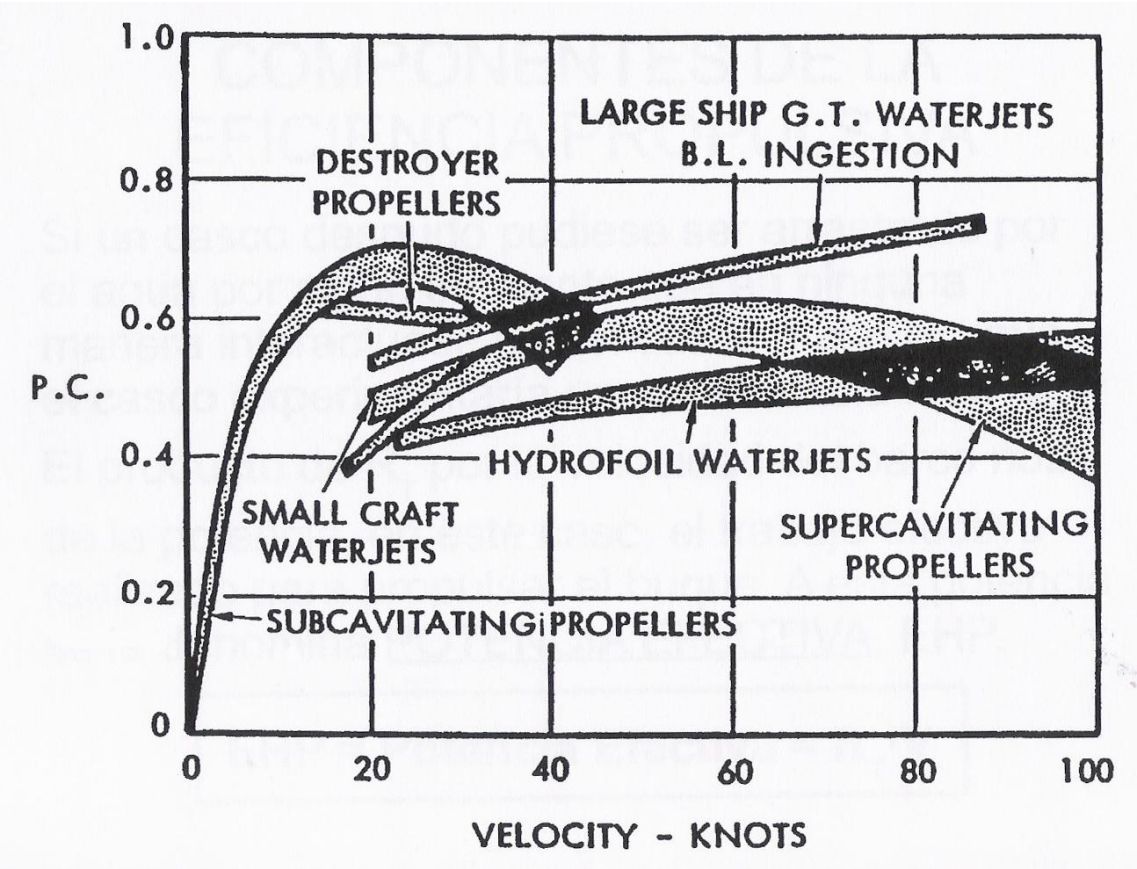



***Figura 9***
***Gráfica eficiencia-velocidad de propulsores***

## *2.3 Estabilización dinámica*

Tradicionalmente se ha trabajado en mejorar la comodidad de las embarcaciones cuando están navegando. El diseño de la obra viva es el primer factor a tener en cuenta, pero visto que no hay diseño de casco que pueda asumir las distintas condiciones de carga, viento, estado de la mar o velocidad, se han utilizado de forma tradicional los estabilizadores.

Los sistemas más habituales para estabilizar una embarcación son:

**- Flaps**

Se trata de unos apéndices que van situados en el espejo de popa de tal modo que permiten modificar el flujo de agua generado con el avance de la embarcación. Cuando el flap se baja, el agua ejerce una presión que levanta la popa y en consecuencia baja la proa. Bajando el flap de babor se produce entonces una reacción que hace descender la amura de estribor. Actualmente gracias a la utilización de sistemas de automatización, los flaps se controlan para establecer la mejor estabilidad posible en función de la velocidad y el estado de la mar.

Por lo tanto, los flaps son un sistema que no solo permiten modificar el asiento longitudinalmente, sino también transversalmente. Sin embargo, implica la necesidad de tener una buena velocidad para tener un efecto de estabilización y no tienen ninguna incidencia cuando la embarcación esta en reposo o a bajas velocidades.

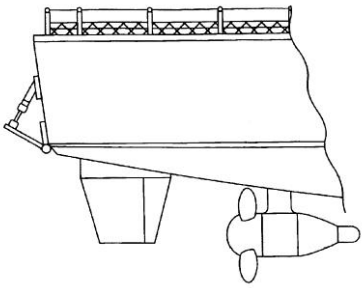


***Figura 10***
***Ejemplo de instalación de un flap en el espejo de popa***

***Figura 11***
***Flap para espejo de popa***

**- Estabilizadores convencionales**

Son quillas dispuestas en cada lado del pantoque y bajo el agua, de modo que el movimiento automático de estas grandes láminas estabilizan la embarcación durante su avance. Estas quillas se suelen mover mediante bombas hidráulicas en el interior del casco, por lo tanto, necesitan de una perforación en el mismo para pasar el eje que mueve cada una de ellas.

Los estabilizadores convencionales no necesitan de una velocidad tan elevada para producir una reacción que estabilice la embarcación, pero cuando ésta se encuentra en reposo no ejerce ningún efecto.

***Figura 12***
***Estabilizador convencional***

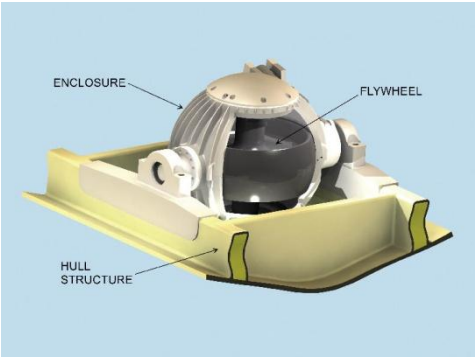
***Figura 13***
***Estabilizador convencional***

**- Estabilizadores giroscópicos**

Son elementos que consisten en un volante que gira a gran velocidad entorno a un eje que puede tomar cualquier dirección en el espacio. El eje del volante va montado sobre un anillo que puede girar en torno de otro eje perpendicular al anterior. Los cojinetes de este segundo eje van en los extremos de una horquilla, cuyo vástago es vertical y puede girar sobre sí mismo. Hay, pues, tres rotaciones posibles.

Cuando se aplica un par al giroscopio se produce un movimiento de resistencia que tiende a alinear el eje de giro del volante con el eje del par. En ausencia de par, la dirección en el espacio del eje del volante permanece constante. Por tanto, un estabilizador giroscópico consiste en un volante de inercia que, sólidamente unido al casco, no se deja inclinar y, en consecuencia, tampoco se inclina el barco. Son sistemas fáciles de instalar que no necesitan de apéndices ni piezas móviles a la vista y con un mantenimiento muy bajo.

Este tipo de estabilizadores ofrecen resistencia a la escora durante un breve lapso de tiempo, como el paso de una ola. De este modo el ángulo de viraje de la embarcación no se ve prácticamente afectado. Sin embargo, están pensados sobre todo para la estabilización de la embarcación cuando se encuentra en reposo. Su efecto suele reducir el balance pero no eliminarlo del todo, pero en determinadas ocasiones puede llegar a ser inapreciable.



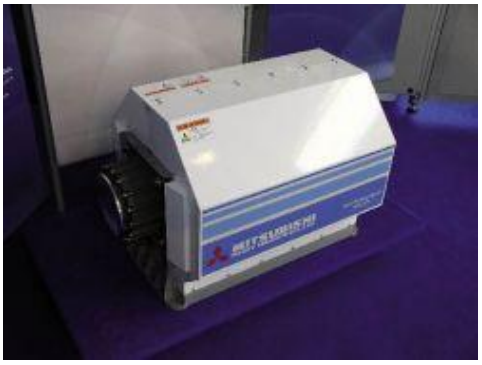



***Figura 14***
***Esquema despiece estabilizador giroscópico***

***Figura 15***
***Estabilizador giroscópico***

# 3. MOTORES E HIDROGENERADORES ESTUDIADOS

En este apartado se describen las características técnicas de los motores y generadores utilizados como propulsores o hidrogeneradores en los distintos ensayos que se han realizado en este proyecto.

## 3.1. Motor Tesla GF420T353 (motor1)

Este tipo de motor es el utilizado para la propulsión de la embarcación RAS. Concretamente lleva instalados dos de estos, cada uno de los cuales lleva montada una hélice en su eje.

Se trata de un motor trifásico asíncrono del tipo jaula de ardilla diseñado inicialmente como bomba sumergible y reaprovechado como propulsor.

Tabla de características:

| | |
|---|---|
| Potencia (kW) | 2,2 |
| Frecuencia (Hz) | 50 |
| Tensión (V) | 380 |
| Revoluciones (rpm) | 2830 |
| Intensidad nominal (A) | 5,5 |
| Intensidad arranque (A) | 23 |
| Rendimiento | 78% |
| Factor de potencia | 0,82 |
| Par nominal (Nm) | 6,2 |
| Par arranque (Nm) | 13,5 |
| Par máximo (Nm) | 18,5 |
| Empuje axial superior (N) | 750 |
| Empuje axial inferior (N) | 3000 |
| Masa (kg) | 13,9 |

Dimensiones:

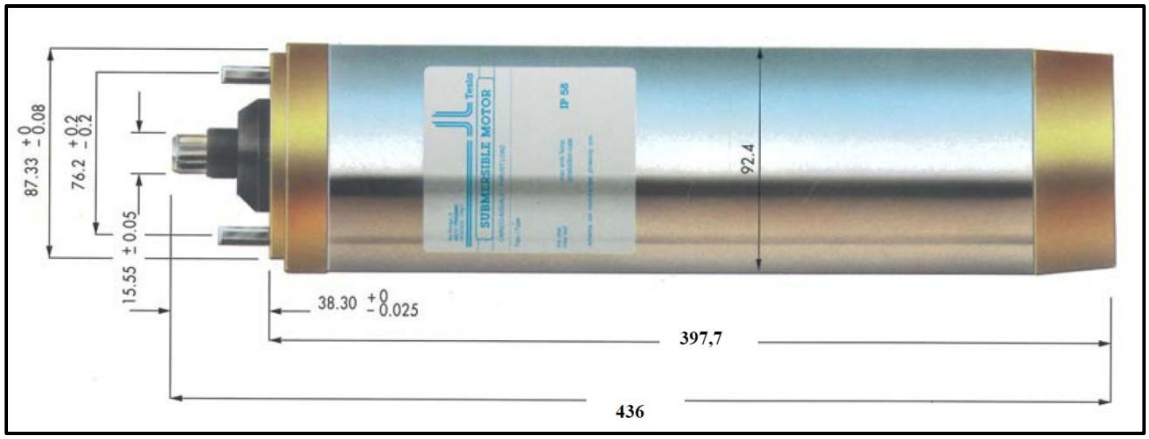



***Figura 16***
***Dimensiones motor Franklin GF420T353***

Imágenes del motor Tesla:

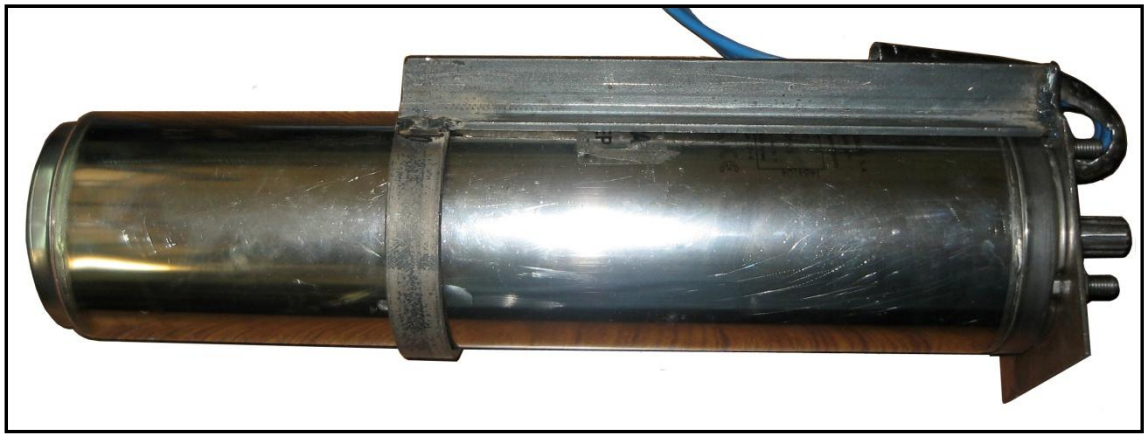


***Figura 17***
***Motor Franklin GF420T353***

## *3.2 Motor ABB (motor2)*

Se trata de otro motor trifásico asíncrono del tipo jaula de ardilla.

Tabla de características:

| | |
|---|---|
| Potencia (kW) | 2,16 |
| Frecuencia (Hz) | 60 |
| Tensión (V) | 460 |
| Revoluciones (rpm) | 1090 |
| Intensidad nominal (A) | 5,8 |
| Factor de potencia | 0,87 |

A partir de los datos de la placa de características se puede hacer una aproximación del par, ya que este es directamente proporcional a la potencia e inversamente a la velocidad angular.

Sabiendo esto, calculamos un par de 18,9Nm.

Se toma la extrapolación de trabajo a 50Hz realizada en el proyecto de Gabriel Riera, "Hacia el barco de propulsión eléctrica":

Trabajando a una frecuencia inferior se conseguirá un descenso en las revoluciones del motor i posiblemente también del rendimiento, obteniendo entonces las siguientes modificaciones:

| | |
|---|---|
| Frecuencia (Hz) | 50 |
| Revoluciones (rpm) | 908 |
| Potencia (kW) | 2 |

A partir de esta rectificación se calcula que el par será de 21,2Nm.

Imágenes del motor ABB:

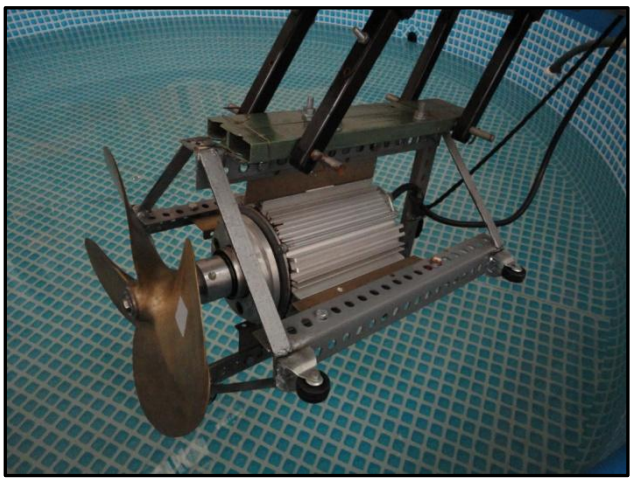


***Figura 18***
***Propulsor utilizando motor ABB***

## *3.3 Motor Mavilor (motor3)*

Se trata de un motor brushless de la marca Mavilor tipo BF-083.

Tabla de características:

| | |
|---|---|
| Tensión (V) | 400 |
| Intensidad nominal (A) | 7 |
| Intensidad max. durante 1 segundo (A) | 14 |
| Par nominal (Nm) | 2 |
| Par máx. (Nm) | 10,8 |
| Rpm máx. (rpm) | 11000 |
| $K_T$ (Nm/A) | 0,69 |
| $K_E$ (Vs/rad) | 0,4 |
| Nivel seguridad IP | IP67 |

A este motor, además, al tener un IP67 solo puede trabajar sumergido durante media hora, se le ha fabricado un sello para asegurar la estanqueidad del conjunto durante los ensayos. A continuación se muestran los planos de dicho sello en tamaño real:

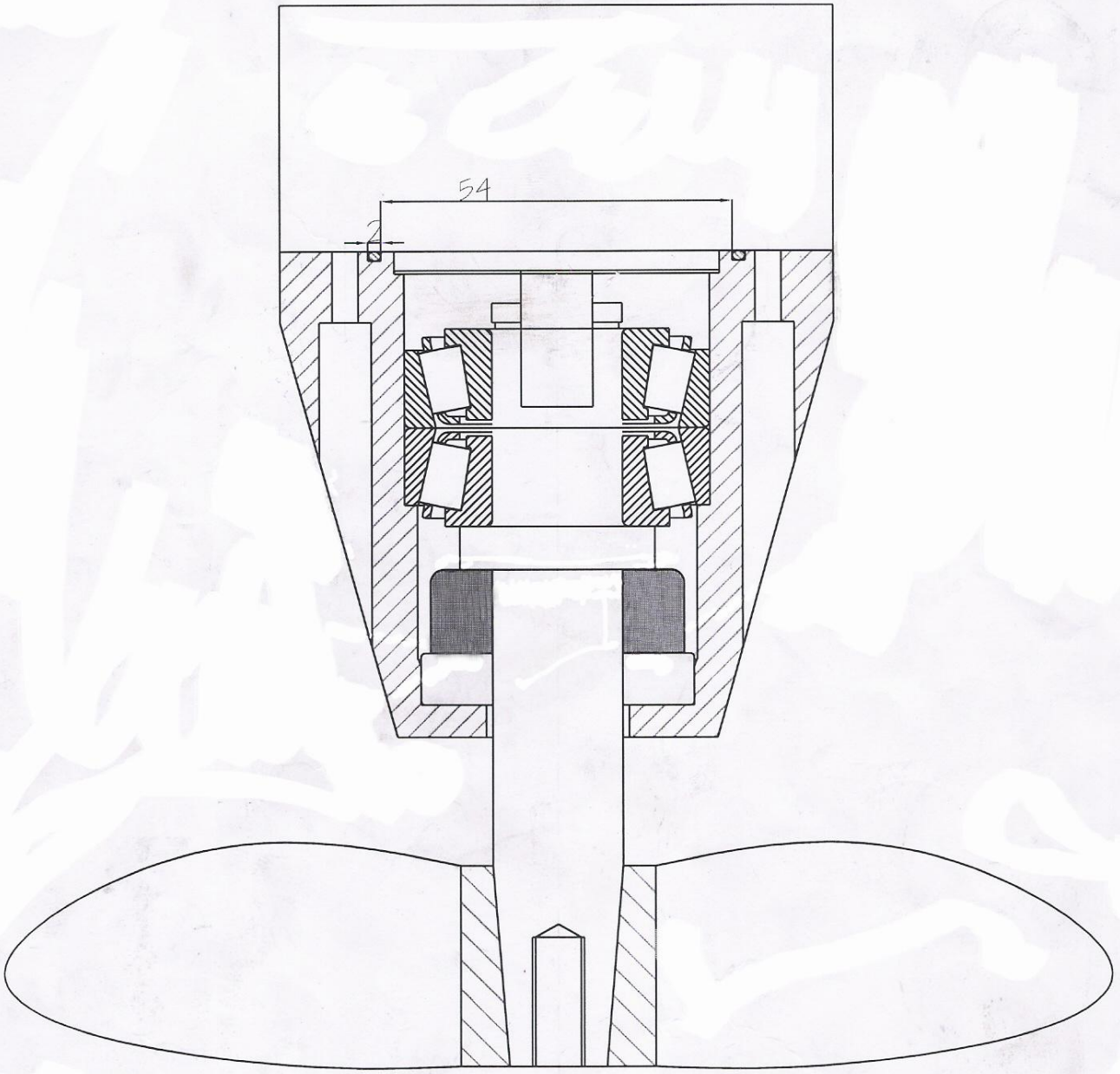



***Figura 19***
***Plano de despiece del sello del motor Mavilor BF-083***

Imágenes motor Mavilor:

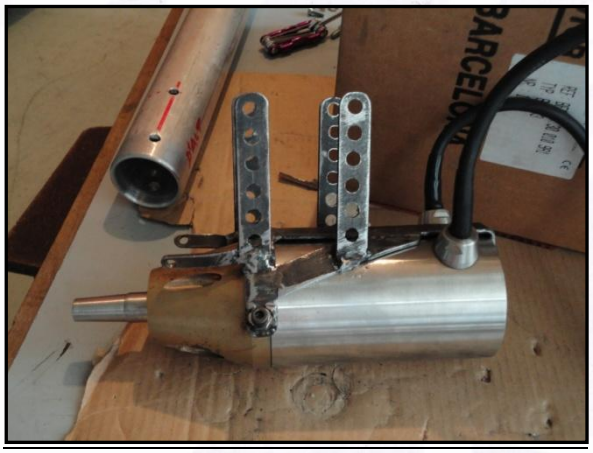


***Figura 20***
***Motor Mavilor BF-083***

# 4. HÉLICES ESTUDIADAS

En este aparatado se pretende mostrar las características de las hélices que se han utilizado para poder caracterizar los propulsores y a cada una de ellas se les asigna una referencia (por ejemplo (helice2) para poderlas relacionar en los ensayos.

## 4.1 HSN de bronce de 3 palas (helice1)

Se dispone de dos hélices de estas características, pero una es de giro horario y la otra de giro antihorario. Para diferenciarlas, cada una de ellas lleva una inscripción en uno de los laterales del núcleo.

Corresponden al catalogo de la empresa de Barcelona "Hélices y Suministros Navales" con las siguientes características:

| Referencia | HSN207196208X05R | HSN207197208X05L |
|---|---|---|
| Diámetro hélice | 203,20 mm (8'') | 203,20 mm (8'') |
| Paso | 127 mm (5'') | 127 mm (5'') |
| Diámetro máx. eje | 25 mm | 25 mm |
| Ref. taladro guía | 3B-8x5R | 3B-8x5L |
| Giro | Antihorario | Horario |
| Inscripción eje | L4872 | L4873 |

***Figura 21***
***Hélice HSN de 3 palas (helice1)***

## *4.2 HSN de bronce de 4 palas (helice2)*

Se trata de una hélice fabricada en bronce por la empresa de Barcelona "Hélices y Suministros Navales" y correspondiente a su catalogo de acuerdo con las siguientes características:

| | |
|---|---|
| Diámetro hélice | 330,2 mm (13'') |
| Paso | 177,8 mm (7'') |
| Diámetro máx. eje | 30 mm |
| Ref. taladro guía | 4B-13x7L |
| Giro | Antihorario |

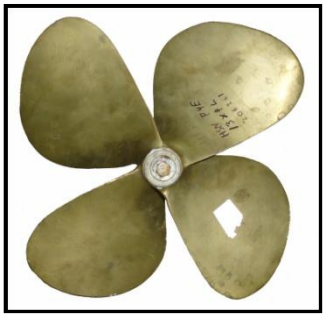


***Figura 22***
***Hélice HSN de 4 palas (helice2)***

## *4.3 HSN de bronce de 3 palas (helice3)*

Se trata de una hélice fabricada en bronce por la empresa de Barcelona "Hélices y Suministros Navales" y correspondiente a su catalogo de acuerdo con las siguientes características:

| | |
|---|---|
| Diámetro hélice | 200 mm |
| Paso | 264 mm |
| Giro | Antihorario |

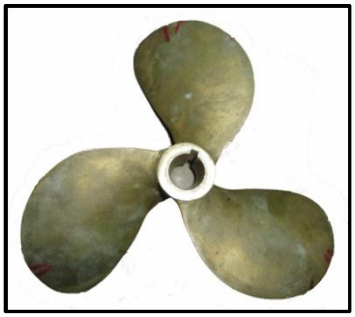


***Figura 23***
***Hélice de 3 palas (helice3)***

## ***4.4 Hélice de palas de aluminio (helice4)***

Esta es una hélice reaprovechada del taller fabricada con un núcleo de acero inoxidable y con palas de aluminio. Tiene las siguiente características:

| | |
|---|---|
| Diámetro hélice | 450 mm |
| Paso | 600 mm |
| Giro | Antihorario |

***Figura 24***
***Hélice de aluminio de 4 palas (helice4)***

# 5. PLANTEO EXPERIEMNTAL DENTRO DE LABORATORIO

## 5.1 Estructuras y montajes realizados

### 5.1.1 Piscina de tres metros de diámetro (EST1)

Se trata de una piscina de 3 metros de diámetro y 0,8 metros de altura, la cual se ha utilizado en todos los ensayos de este proyecto. Esta construida en plástico y sustentada por un perímetro tubular y patas de aluminio de 50mm de diámetro.

Conociendo el diámetro y altura de la piscina, se puede calcular una estimación de la velocidad lineal máxima que podremos conseguir sin desbordar, en función del nivel de agua inicial que tenga esta:

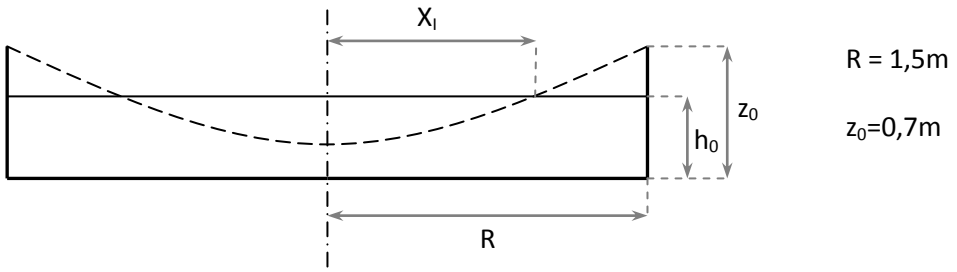



***Figura 25***
***Esquema para cálculos previos de la piscina***

Se considera una altura de la piscina de 0,7m ya que los 0,8m es la altura máxima de la misma, sin embargo, esta tiene unas aperturas para la estructura que la sustenta dando una altura máxima hasta desborde de 0,7m.

Se calcula entonces para una altura de 0,7m que a la piscina le caben unos 5m3 de agua, por tanto, estando llena tendría un peso de unos 5000kg.

Primeramente se determina la distancia del punto invariante respecto el centro de la piscina ($X_I$):

$$X_I = \frac{R}{\sqrt{2}} = \frac{1{,}5}{\sqrt{2}} = 1{,}06m$$

A continuación ya se puede estimar la velocidad lineal máxima que podrá alcanzar el fluido en la periferia de la piscina sin desbordar, en función del nivel de agua que tenga. Se hace el cálculo para 30cm, 40cm y 50cm de nivel de agua:

$$z_0 = h_0 + \frac{\omega^2 R^2}{4g}$$

$$\omega_{0,3} = \sqrt{\frac{4g(z_0 - h_0)}{R^2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}81(0{,}7 - 0{,}3)}{1{,}5^2}} = 2{,}64\, rad/s$$

Para 0,3m de nivel de agua, la velocidad lineal máxima del fluido en la periferia de la piscina será de 3,96m/s o 7,69 nudos.

$$\omega_{0,4} = \sqrt{\frac{4g(z_0 - h_0)}{R^2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}81(0{,}7 - 0{,}4)}{1{,}5^2}} = 2{,}29\, rad/s$$

Para 0,4m de nivel de agua, la velocidad lineal máxima del fluido en la periferia de la piscina será de 3,44m/s o 6,67 nudos.

$$\omega_{0,5} = \sqrt{\frac{4g(z_0 - h_0)}{R^2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}81(0{,}7 - 0{,}5)}{1{,}5^2}} = 1{,}86\, rad/s$$

Para 0,5m de nivel de agua, la velocidad lineal máxima del fluido en la periferia de la piscina será de 2,79m/s o 5,42 nudos.

El principal problema que se ha encontró a la hora de realizar los ensayos en la piscina, por varios motivos.

En primer lugar, tiene un diámetro muy pequeño. Esto limita la velocidad del fluido en la periferia de la misma, teóricamente será como máximo de 7,7 nudos para un nivel de agua inicial de 0,3m y como hemos visto en los ensayos, a partir de 4 nudos, las turbulencias y salpicaduras son muy acusadas y no se puede acelerar mas sin mojar todo el alrededor. A su vez, cuan menor sea el diámetro, mayor es el gradiente de velocidades que incide sobre la hélice, es decir, mayor es la diferencia entre la velocidad del fluido en la parte de hélice que da a la periferia y la parte de la hélice que queda en el centro. Este fenómeno se hace aún más acusado cuando se ensayan hélices de mayor diámetro como la de aluminio.

A continuación se muestra el cálculo de las velocidades máximas del fluido en la periferia de un tanque de 5m y de 10m y con dos alturas distintas para cada uno (1m y 2 m de altura):

- Tanque de 5 metros de diámetro, 1 metro de altura y 0,3m de nivel de agua

$$\omega = \sqrt{\frac{4g(z_0 - h_0)}{R^2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9{,}81(1 - 0{,}3)}{2{,}5^2}} = 2{,}09\, rad/s$$

Para 0,3m de nivel de agua, la velocidad lineal máxima del fluido en la periferia de la piscina será de 5,23m/s o 10,16 nudos.

- Tanque de 5 metros de diámetro, 2 metro de altura y 0,5m de nivel de agua

$$\omega = \sqrt{\frac{4g(z_0 - h_0)}{R^2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9{,}81(2 - 0{,}5)}{2{,}5^2}} = 3{,}06\, rad/s$$

Para 0,3m de nivel de agua, la velocidad lineal máxima del fluido en la periferia de la piscina será de 7,65m/s o 14,87 nudos.

- Tanque de 10 metros de diámetro, 1 metro de altura y 0,3m de nivel de agua

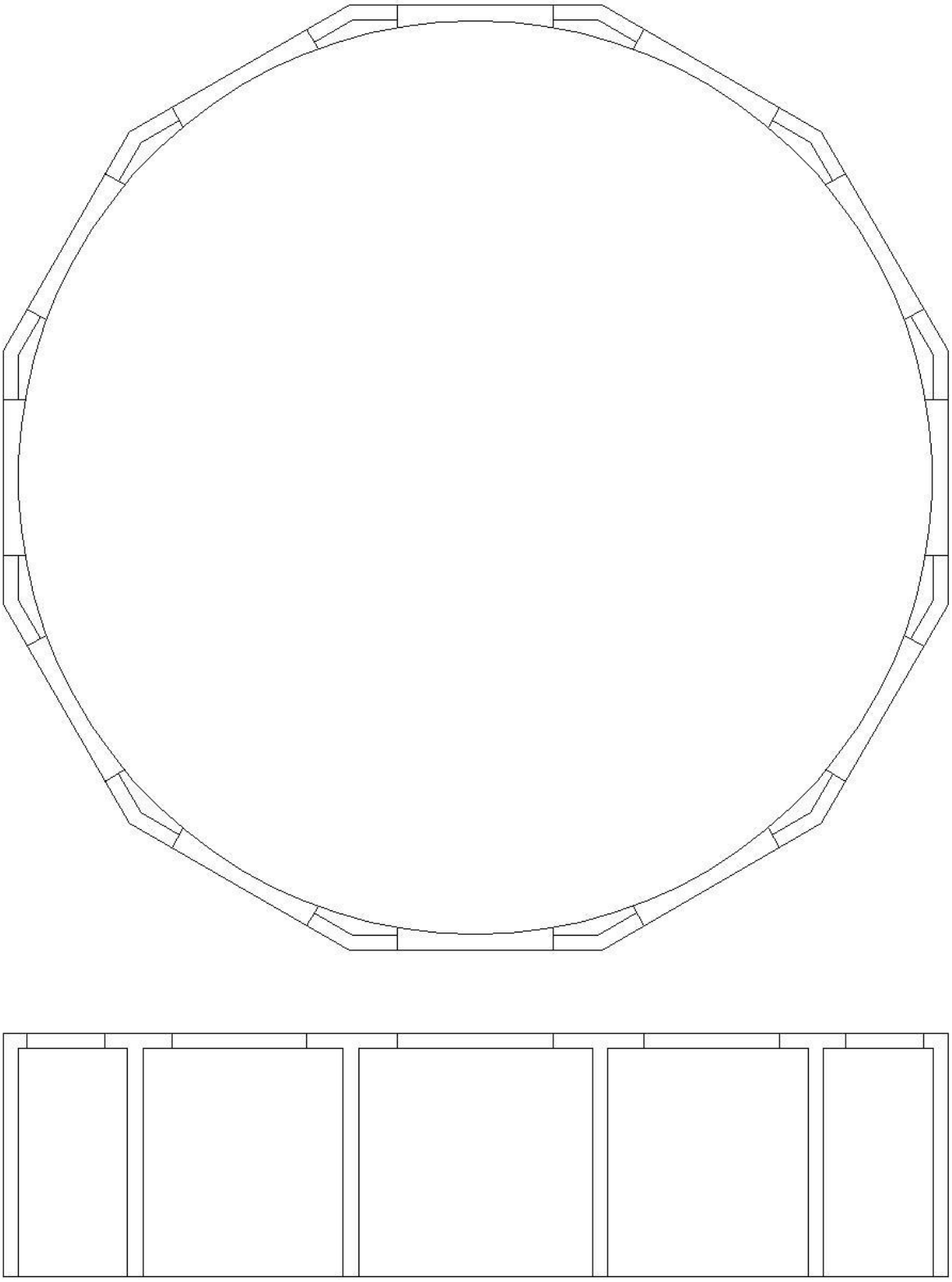
$$\omega = \sqrt{\frac{4g(z_0 - h_0)}{R^2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9{,}81(1 - 0{,}3)}{5^2}} = 1{,}04\, rad/s$$

Para 0,3m de nivel de agua, la velocidad lineal máxima del fluido en la periferia de la piscina será de 5,2m/s o 10,1 nudos.

- Tanque de 10 metros de diámetro, 2 metro de altura y 0,5m de nivel de agua

$$\omega = \sqrt{\frac{4g(z_0 - h_0)}{R^2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9{,}81(2 - 0{,}5)}{5^2}} = 1{,}53\, rad/s$$

Para 0,3m de nivel de agua, la velocidad lineal máxima del fluido en la periferia de la piscina será de 7,65m/s o 14,87 nudos.



| | |
|---|---|
| PEDRO MAS BAGANT | 15/07/2010 |
| Caracterización hidrodinámica en un tanque de tres metros de diámetro de propulsores eléctricos sumergidos | |
| Pisicina de 3 metros de diámetro | ESCALA 1/20 |

***Figura 26***
***Planos de la estructura 1 (EST1)***

### 5.1.2 Estructura dinamométrica abatible fijada sobre una mesa (EST2)

El montaje de esta estructura es la modificación de otra que se había utilizado anteriormente para realizar ensayos dinamométricos con motores eléctricos.

La parte principal está hecha a partir de perfiles de acero en L de 40mm de ancho y alto, y un grosor de 2mm. Es regulable en altura (para poder subir o bajar el propulsor a la altura que se desee) y en profundidad (para permitir alejar o acercar el propulsor de la mesa según la necesidad). En esta parte es donde se encuentra el sistema dinamométrico para la lectura del empuje del propulsor en un solo sentido.

La parte principal de esta estructura está fijada mediante bisagras a una mesa robusta de 2000x1000mm con una madera de 40mm de grosor y patas de acero de perfil rectangular. Gracias a las bisagras que unen ambas partes, permite que la parte principal se pueda abatir para dejar el propulsor fuera del agua, o bien, para cambiarlo por otro con mayor facilidad. El sistema la lectura dinamométrica se consigue instalando un dinamómetro en la prolongación de las guías de las bisagras que sustentan el propulsor.

La idea es que dicha estructura quede distribuida de modo que la mesa esté fuera de la piscina pero que la parte principal pueda entrar dentro del agua con facilidad.

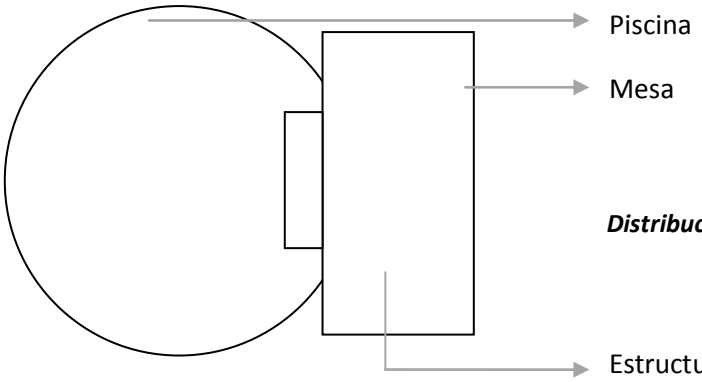



***Figura 27***
***Distribución de la estructura 2 (EST2)***

Finalmente este montaje no resultó ser viable ya que las bisagras que se utilizaron inicialmente cedían con el empuje que ejercía el propulsor Tesla. Se optó entonces por utilizar unas bisagras mucho más resistentes, pero eso implicaba replantear desde 0 la estructura y construir otra que en todo su conjunto fuera más resistente para tener la posibilidad de ensayar propulsores de mayor potencia.

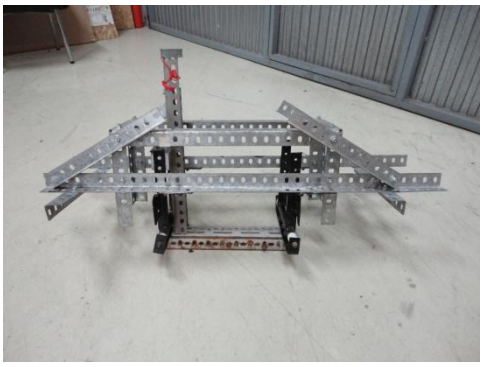


***Figura 28***
***Soporte abatible de la estructura 2 (EST2)***

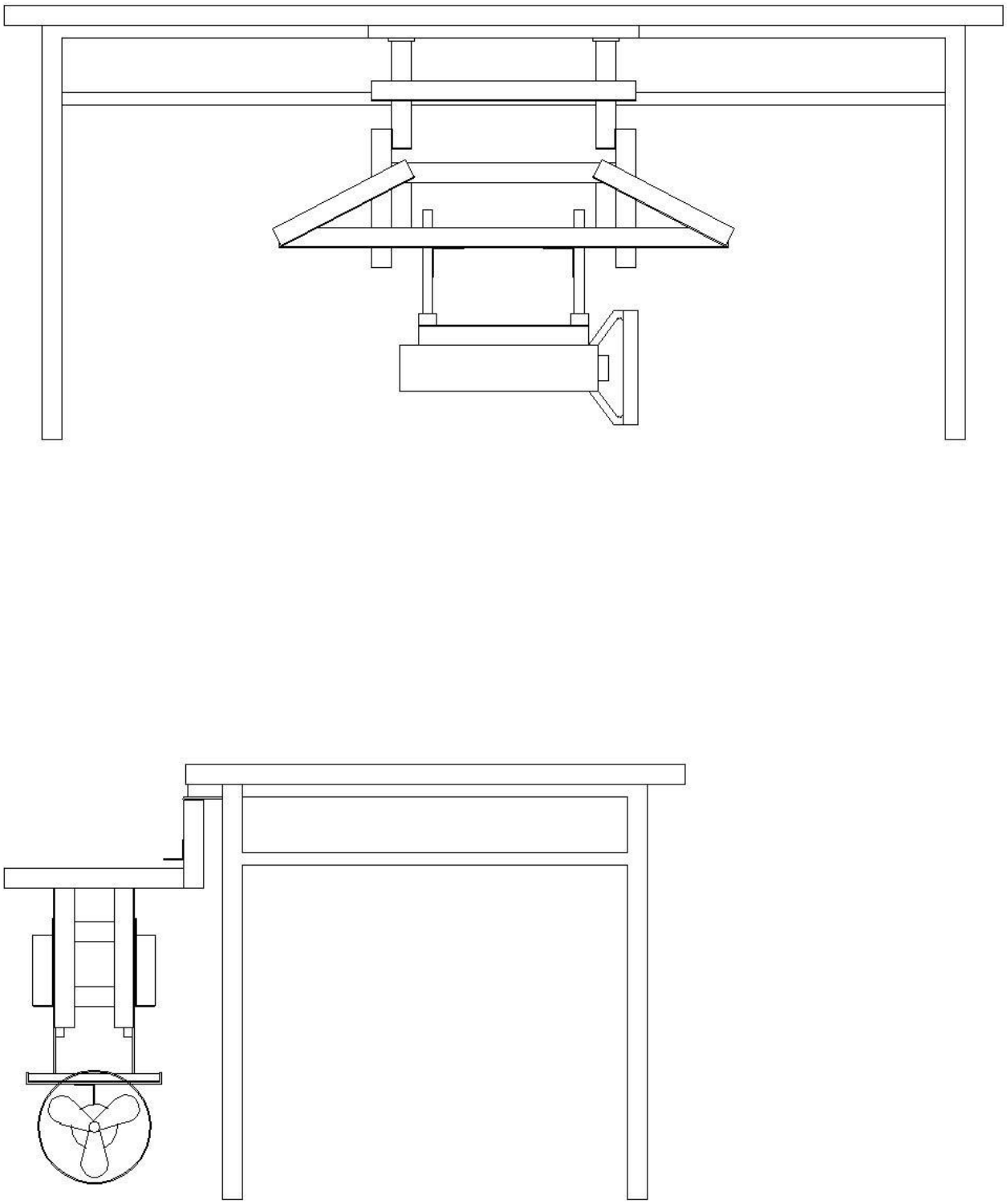


***Figura 29***
***Planos de la estructura 2 (EST2)***

| | |
|---|---|
| PEDRO MAS BAGANT | 19/07/2010 |
| Caracterización hidrodinámica en un tanque de tres metros de diámetro de propulsores eléctricos sumergidos | |
| Estructura abatible regulable (descartada) | ESCALA 1/12 |

### 5.1.3 Estructura dinamométrica sobre una botavara (EST3)

En el caso de esta estructura se diseñó desde cero con la idea de poder ensayar la mayor variedad de propulsores posibles. Debía ser por tanto una estructura muy resistente, que incorporara un sistema de lectura dinamométrica lo suficientemente preciso como para obtener unos resultados satisfactorios tanto si se ensayaban propulsores que ejerzan un empuje relativamente bajo, como propulsores mayores que ejerzan más empuje.

Se utilizó una botavara de velero de 115mm de alto y 90mm de ancho como soporte de la estructura. Esta quedaba por un lado fija a un eje instalado en la pared más cercana a la piscina, y por el otro simplemente apoyada sobre una mesa. De este modo quedaba la botavara cruzando por encima la piscina y la estructura debía montarse verticalmente bajo la botavara y que el propulsor quedara dentro del agua.

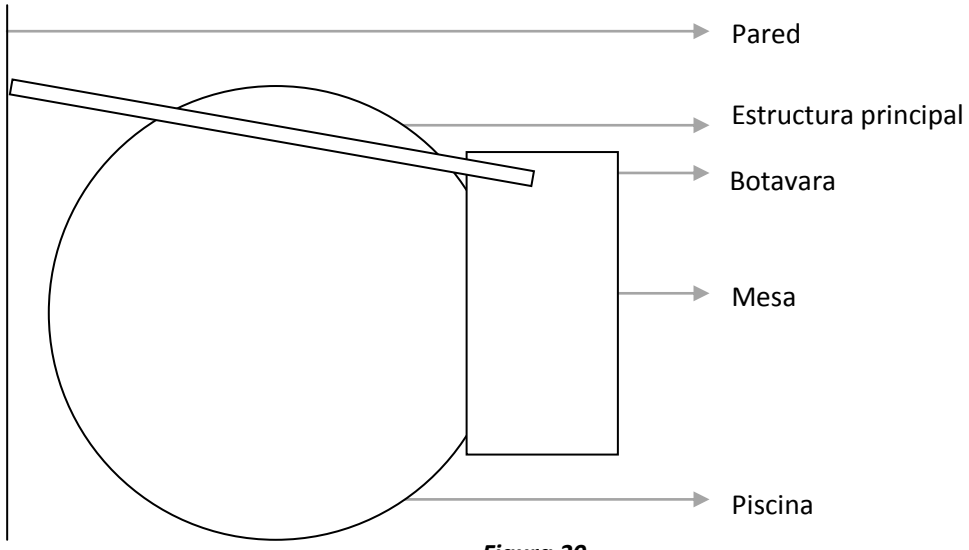



***Figura 30***
***Distribución de la estructura 3 (EST3)***

La estructura principal se montó utilizando principalmente perfil de acero en L de dos tipos:

- De 40x60mm y 2mm de grosor

- De 40x40mm y 2mm de grosor

Para la parte dinamométrica se aprovecharon unas bisagras robustas de acero con un eje de 6mm de diámetro y la lectura se hizo mediante una varilla que amplificaba el movimiento del propulsor a una tabla de metacrilato donde había calibrada la escala dinamométrica. Como elemento tensor del dinamómetro se utilizaron dos muelles para estachas de embarcaciones.

El resultado del conjunto botavara y estructura fue muy útil pues es la estructura que más se ha utilizado para la caracterización de los propulsores en este proyecto ya que se puede regular la altura del propulsor y el punto en el que queda respecto de la piscina con el

movimiento de la botavara. Además se instalaron un conjunto de poleas para poder izar la botavara y la estructura para sacarla de la piscina y poder hacer ajustes o cambios de propulsores, y que el propulsor no esté en contacto con el agua mientras no se realicen ensayos.

El único inconveniente fue la necesidad de tener que calibrar de nuevo la escala dinamométrica cada vez que se realiza un ajuste en la precarga de los muelles o cada vez que se cambia un propulsor.

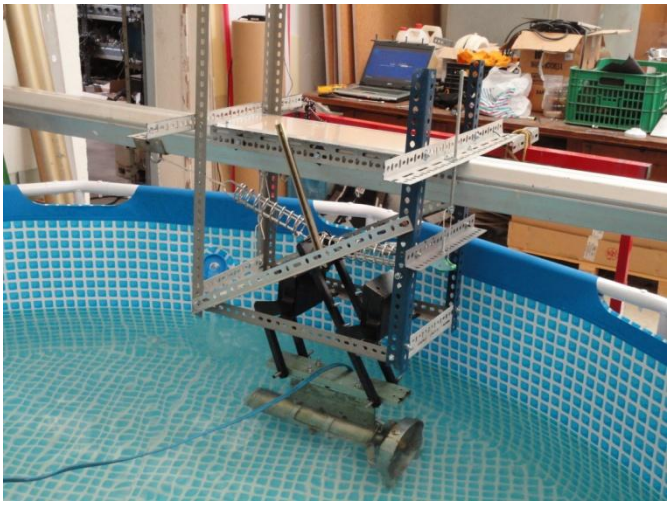


***Figura 31***
***Estructura 3 (EST3) con propulsor Franklin instalado***

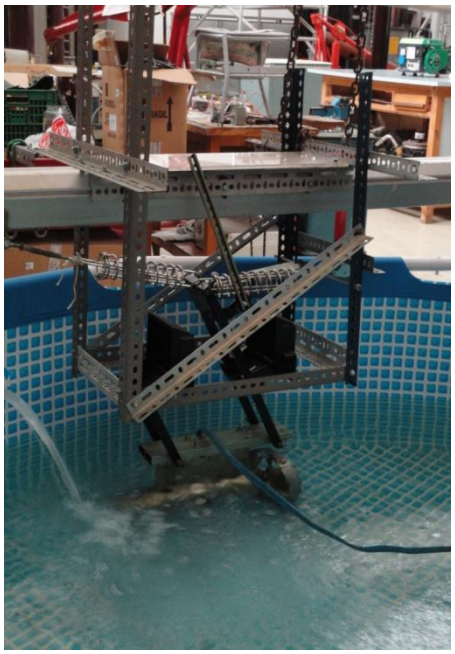
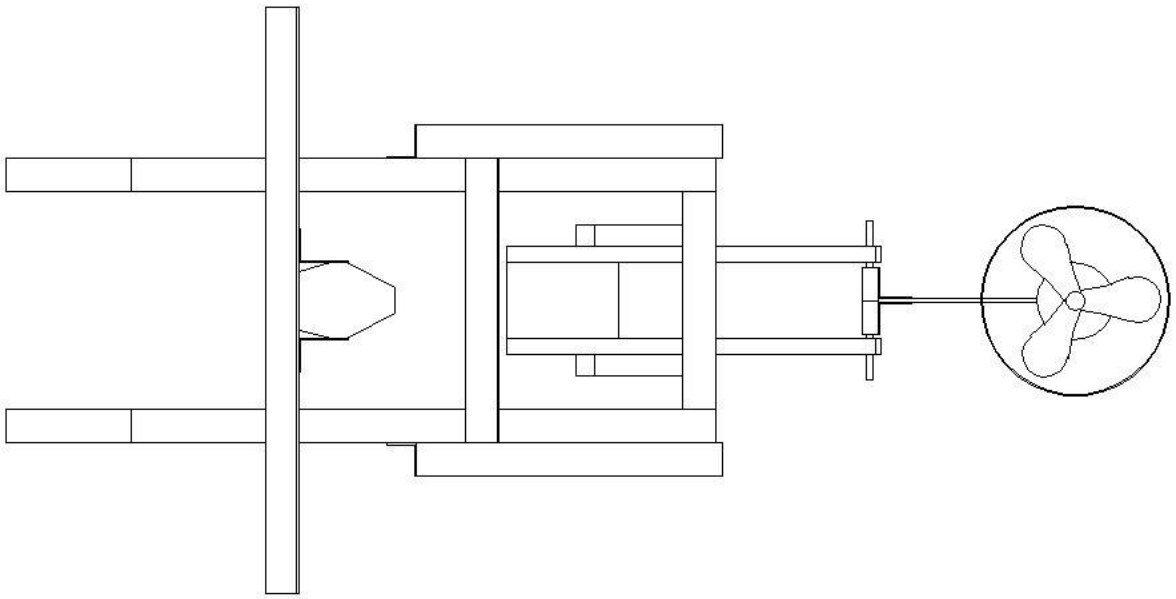
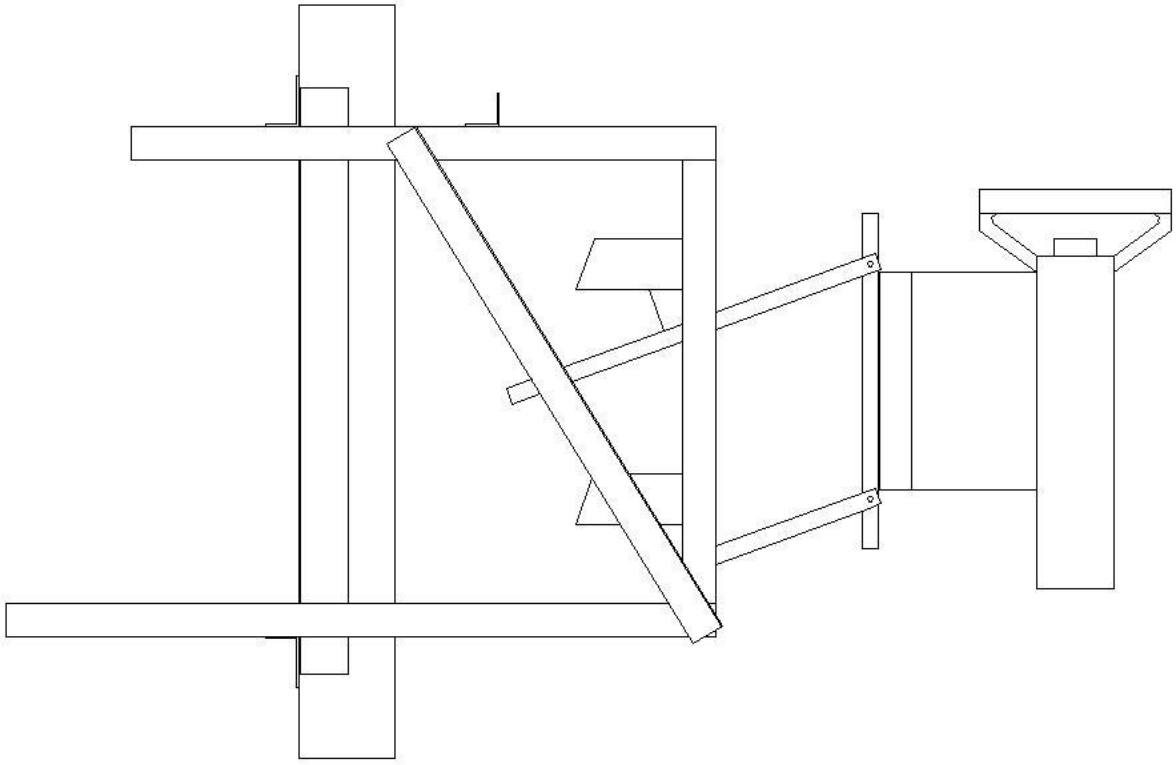


***Figura 32***
***Estructura 3 (EST3) con propulsor Franklin instalado***





| | |
|---|---|
| PEDRO MAS BAGANT | 05/08/2010 |
| Caracterización hidrodinámica en un tanque de tres metros de diámetro de propulsores eléctricos sumergidos | |
| Estructura dinamométrica sobre una botavara | ESCALA 1/9 |

***Figura 33***
***Planos de la estructura 3 (EST3)***

### 5.1.4 Estructura para ensayo del propulsor ABB en vertical (EST4)

Esta estructura es la modificación de una que se había montado anteriormente para el ensayo del propulsor ABB en vertical por Pedro González Melis.

Lo que se hizo es realizar modificaciones sobre esta para que vaya solidaria a una botavara y facilitar la entrada y salida de la estructura en la piscina. Dicha estructura apoya también sobre el fondo de la piscina por lo que se le añadió un trozo de lamina de caucho de 2mm de grosor para evitar agujeros o rascadas en el fondo.

La estructura está compuesta básicamente por perfiles en L de dos tipos:

- De 40x60mm y 2mm de grosor

- De 40x40mm y 2mm de grosor

Gracias a la utilización de la botavara se pudo ensayar el propulsor ABB en vertical en distintas posiciones de la piscina.

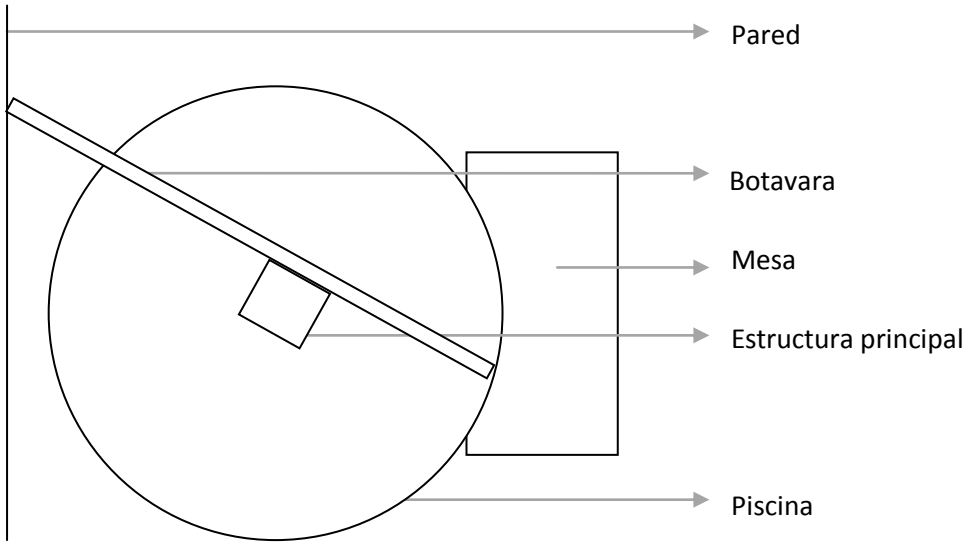



***Figura 34***
***Distribución de la estructura 4 (EST4)***

***Figura 35***
***Estructura 4 (EST4)***

***Figura 36***
***Estructura 4 (EST4)***

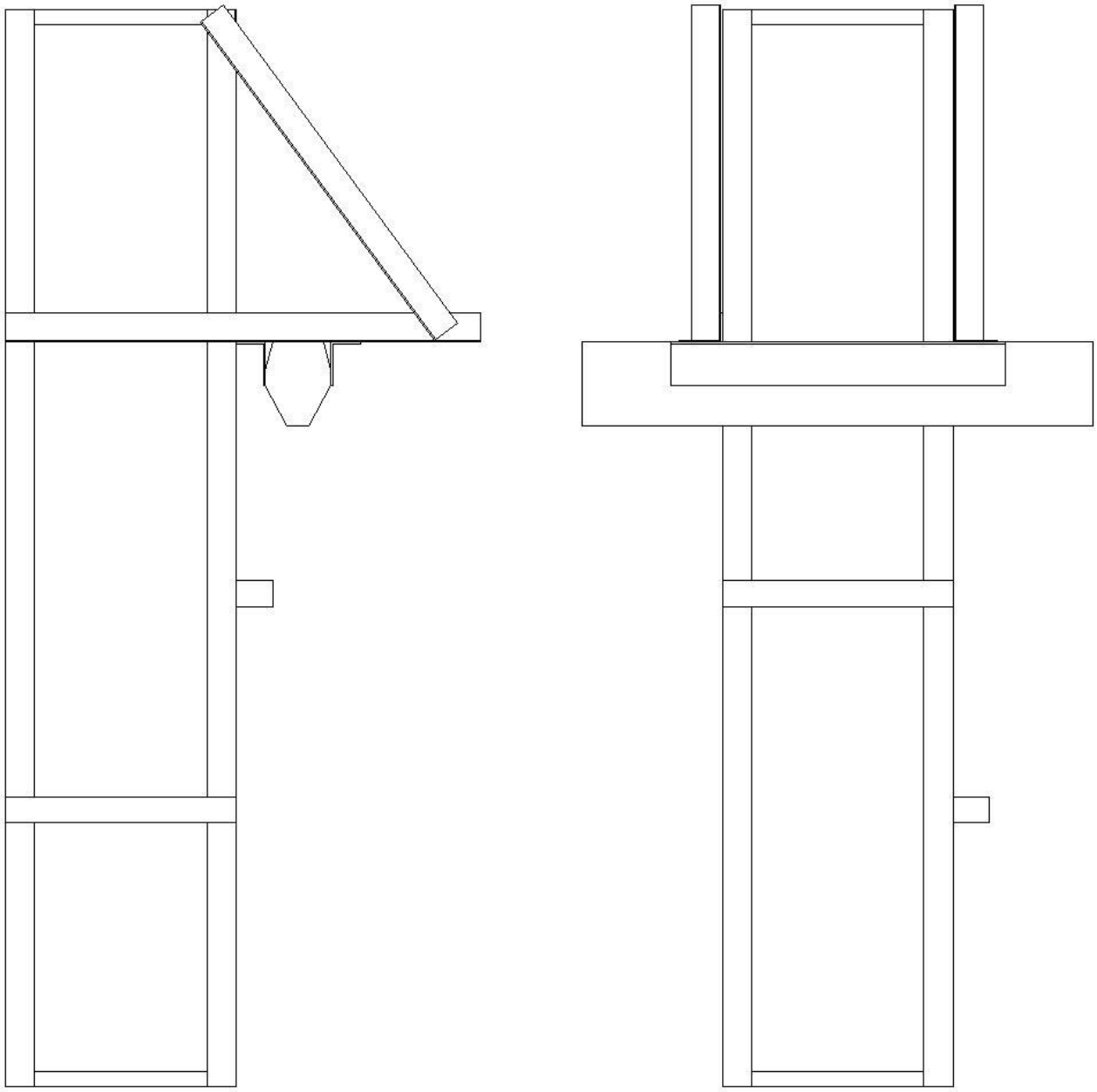


***Figura 37***
***Planos de la estructura 4 (EST4)***

| | |
|---|---|
| PEDRO MAS BAGANT | 09/08/2010 |
| Caracterización hidrodinámica en un tanque de tres metros de diámetro de propulsores eléctricos sumergidos | |
| Estructura vertical | ESCALA 1/9 |

### 5.1.5 Estructura pivotante en mesa y extraíble (EST5)

Esta estructura se diseñó desde cero al tener la necesidad de una estructura para poder hacer ensayos con dos propulsores al mismo tiempo.

Se ha montado a partir del aprovechamiento de una bisagra muy resistente con un eje de 20mm de diámetro.

La estructura es básicamente dos barras de acero de 40x30mm que se apoyan sobre una mesa y que llevan instalada una bisagra de modo que su eje quedan posicionado longitudinalmente a dichas barras. Bajo esta bisagra va montado un soporte que va a sostener el propulsor dentro del agua.

Se trata de una estructura muy simple se puede retirar de la piscina a peso entre dos personas o bien con la ayuda de una grúa. Se ha instalado el sistema con una bisagra pues con una pequeña modificación puede hacerse dinamométrica en caso de necesidad.

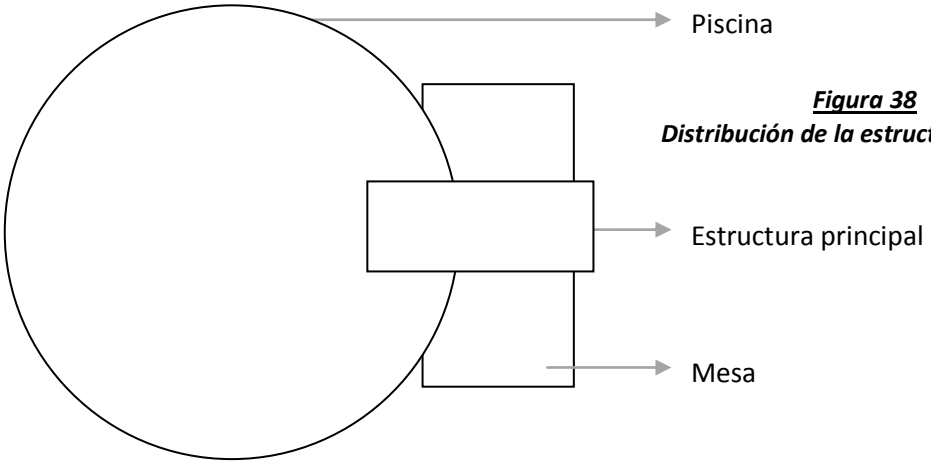
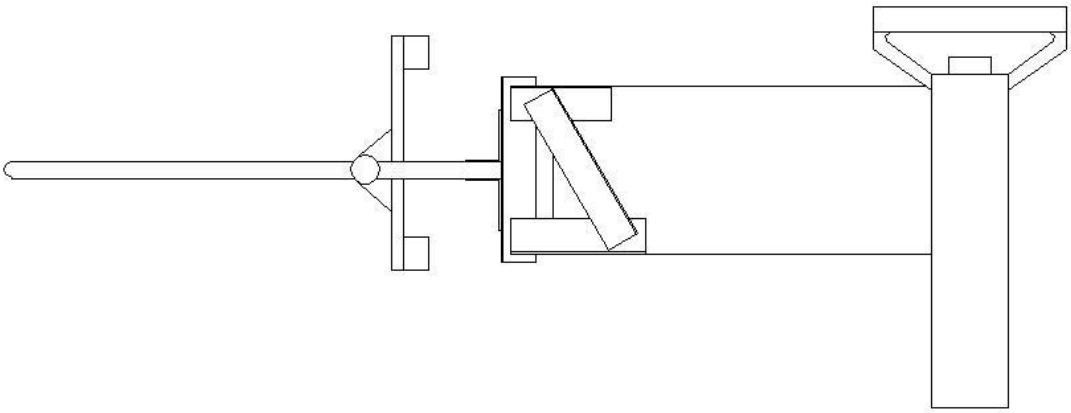



***Figura 38***
***Distribución de la estructura 5 (EST5)***

***Figura 39***
***Estructura 5 (EST5) con propulsor Franklin instalado***



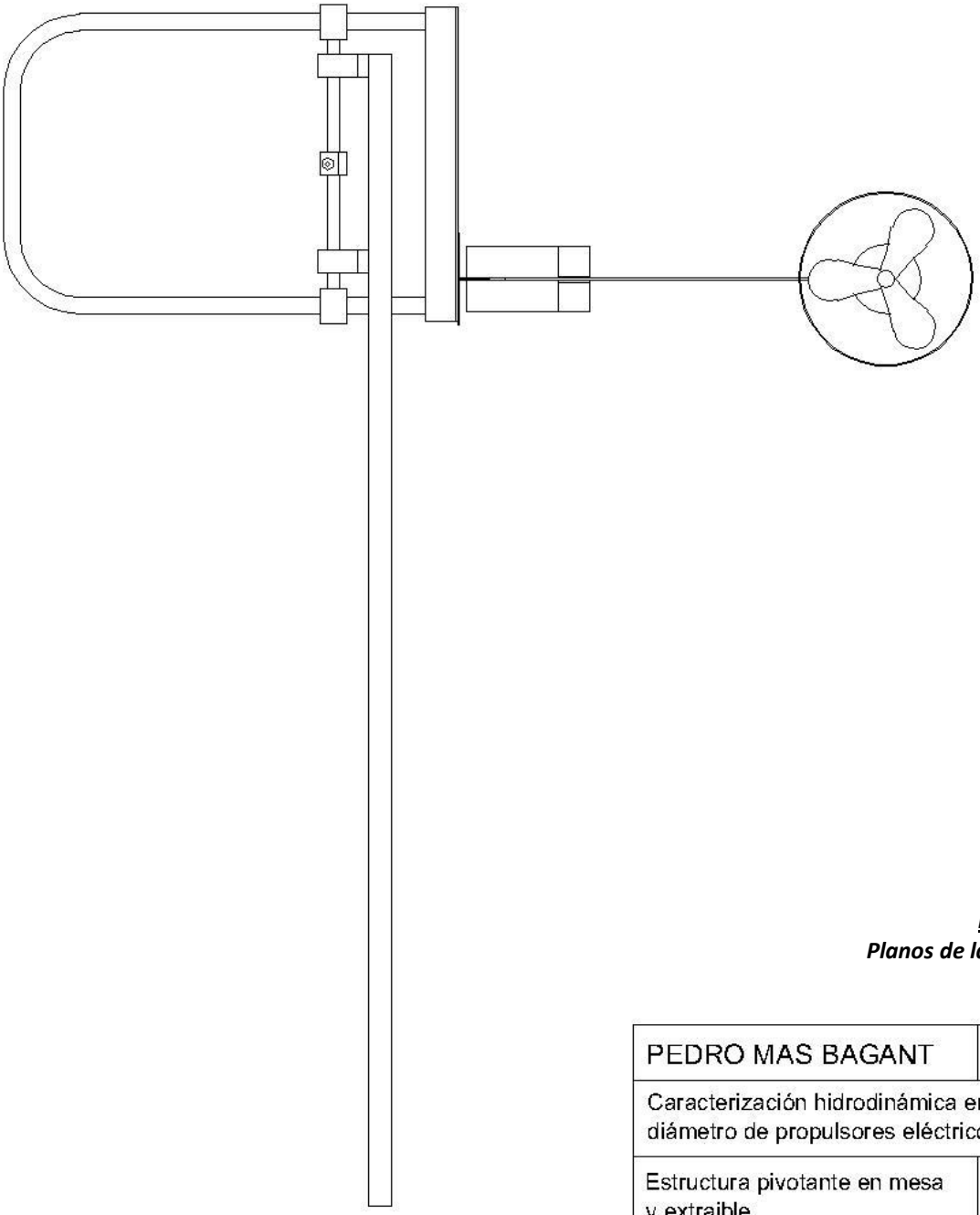


***Figura 40***
***Planos de la estructura 5 (EST5)***

| | |
|---|---|
| PEDRO MAS BAGANT | 16/09/2010 |
| Caracterización hidrodinámica en un tanque de tres metros de diámetro de propulsores eléctricos sumergidos | |
| Estructura pivotante en mesa y extraible | ESCALA 1/9 |

## *5.2 Ensayos realizados dentro de laboratorio*

Tal y como se ha mencionado, el objetivo de este proyecto es poder conocer el comportamiento de propulsores e hidrogeneradores en diferentes condiciones y obtener una caracterización de los mismos. Para conocer dicho comportamiento se han planteado varios ensayos y se han llevado a cabo gracias a las distintas estructuras que se han construido y explicado anteriormente.

A continuación se describe todo lo relacionado con esos ensayos, incluyendo las condiciones iniciales del ensayo, el motivo y los resultados.

### 5.2.1 Ensayo con un propulsor montado en la estructura dinamométrica de la botavara.

En este ensayo se va a caracterizar un propulsor sumergido en fluido que tiene una velocidad.

Hasta ahora, únicamente se habían ensayado propulsores sumergidos en un tanque pequeño, o por lo general, en recipientes cerrados en los cuales no se permitía que el fluido alcanzara velocidad. Teniendo el fluido sin velocidad, se conseguían caracterizar estos propulsores, pero solo hasta el tiro estático.

El empuje que ejerce un propulsor será función del diámetro de la hélice, la velocidad de avance, las revoluciones y la densidad del fluido en que se encuentra sumergida. Por este motivo se ha planteado este experimento, pretendiendo simular la velocidad de avance de la hélice, a partir de tener el agua ya con una velocidad. Se va a caracterizar el propulsor más allá del tiro estático, consiguiendo valores como el empuje, consumos, par, revoluciones, etc. para las distintas velocidades del fluido en que se encuentra sumergido.

Utilizando la curva par-revoluciones se podrá comparar el punto de trabajo alcanzado en los ensayos, siendo el modelo teórico el descrito por la Figura 41:

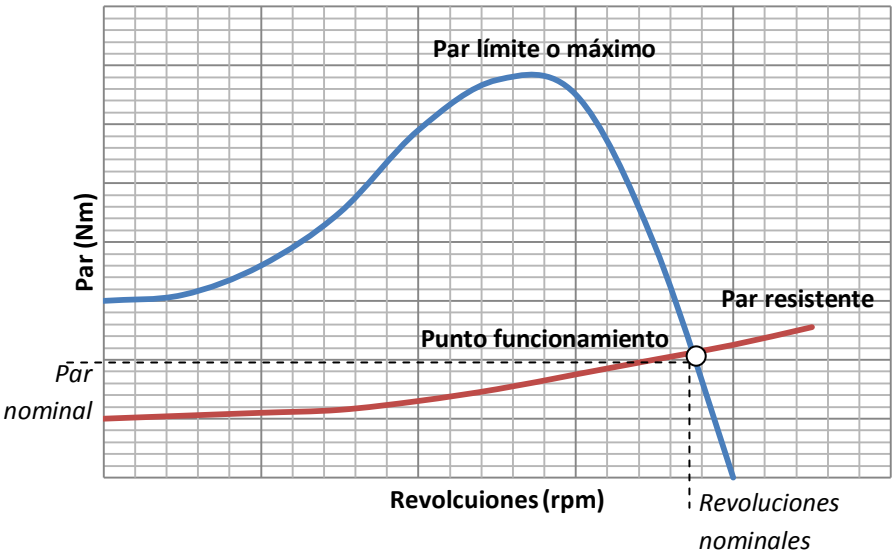



***Figura 41***
***Curva par-revoluciones teórica de una máquina asíncrona***

Tal y como se puede observar, en el arranque el par es pequeño y empieza a aumentar a medida que suben las revoluciones, hasta un punto máximo llamado par limite o máximo. Pasado este punto máximo, el par se reduce hasta cero.

El punto de funcionamiento del motor que se debe buscar, es la intersección entre la curva característica del motor y la curva de par resistente.

Condiciones y procedimiento del ensayo

Se utilizará como propulsor uno de los instalados en la embarcación RAS, compuesto por un motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1),* acoplada directamente en el eje del rotor. Este propulsor, a su vez, se instalará en la estructura dinamométrica de la botavara (EST3) para poder tener una lectura del empuje que ejerce para las distintas velocidades y condiciones.

Las condiciones iniciales del ensayo son las siguientes:

- Nivel de agua en la piscina de 350mm

- Altura del eje del propulsor respecto del fondo de la piscina de 135mm.

- Propulsor a unos 300mm de la periferia de la piscina, es decir, a unos 1200mm del centro de la piscina.

Para realizar el ensayo se ha empezado por anotar todas las condiciones iniciales ya descritas y que puedan influenciar en las lecturas que se van a tomar.

Una vez se encuentra todo preparado se empieza a acelerar el agua poco a poco. De este modo, se pretende que el flujo se vaya estabilizando lo más posible y poder tomar las lecturas de empuje, velocidad del fluido , corrientes, revoluciones, potencias, par y tensiones de la forma más precisa posible. Se va aumentando la velocidad del fluido hasta conseguir 2,08m/s (4 nudos aproximadamente) a la altura del propulsor y a partir de este punto se puede considerar el desbordamiento de la piscina.

Resultados del ensayo:

Se registran los parámetros y consumos más significativos de estudio en 6 situaciones de carga del motor, los cuales se agrupan en la siguiente tabla:

| | Em (kg) | T (s) | Vl.p (m/s) | Ig (A) | RPM (rpm) | LCr (A) | Opr (%) | Otr (%) | V (V) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 3 | 6,5 | 1,16 | 0,5 | 830 | 4,1 | 14 | 46 | 395 |
| **2** | 8 | 5,5 | 1,37 | 1 | 1144 | 4,5 | 29 | 70 | 394 |
| **3** | 12 | 4,4 | 1,71 | 1,5 | 1359 | 4,8 | 42 | 90 | 394 |
| **4** | 14 | 4,1 | 1,84 | 2 | 1505 | 5 | 56 | 98 | 395 |
| **5** | 16 | 3,8 | 1,98 | 2,5 | 1670 | 5,5 | 70 | 115 | 394 |
| **6** | 18 | 3,67 | 2,08 | 3 | 1760 | 5,9 | 89 | 135 | 395 |

***Tabla 1***
***Datos originales registrados en el ensayo de un propulsor montado en la estructura dinamométrica de la botavara (ensayo 5.2.1)***

*Leyenda:*

*Em = Empuje en kg que ofrece el propulsor en la condición correspondiente.*

*T = Tiempo en segundos que tarda una partícula en dar una revolución en la piscina.*

*Vl.p = Velocidad lineal en m/s del fluido a la altura del propulsor.*

*Ig = Corriente en Amper de una fase en la salida del generador.*

*RPM = Revoluciones por minuto del rotor del motor (extraída del display del variador de frecuencia).*

*LCr = Corriente en Amper del motor (extraída del display del variador de frecuencia).*

*Opr = % de potencia consumida por el motor (extraída del display del variador de frecuencia).*

*Otr = % del par nominal del motor (extraída del display del variador de frecuencia).*

*V = Tensión en Volt entre fases en el generador.*

Para tener unos valores más útiles como referencia se ha desarrollado la siguiente tabla que recoge todos los valores:

| | RPM(rpm) | Vlf.p(m/s) | IG(A) | IM(A) | V(V) | P(W) | Par(Nm) | Empuje(kg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | 830 | 1,16 | 0,5 | 4,1 | 395 | 308 | 2,9 | 3 |
| **2** | 1144 | 1,37 | 1 | 4,5 | 394 | 638 | 4,3 | 8 |
| **3** | 1359 | 1,71 | 1,5 | 4,8 | 394 | 924 | 5,6 | 12 |
| **4** | 1505 | 1,84 | 2 | 5 | 395 | 1232 | 6,1 | 14 |
| **5** | 1670 | 1,98 | 2,5 | 5,5 | 394 | 1540 | 7,1 | 16 |
| **6** | 1760 | 2,08 | 3 | 5,9 | 395 | 1958 | 8,4 | 18 |

***Tabla 2***
***Datos relevantes registrados en el ensayo de un propulsor montado en la estructura dinamométrica de la botavara (ensayo 5.2.1)***

*Leyenda:*

*RPM = Revoluciones por minuto del rotor del motor (extraída del display del variador de frecuencia).*

*Vlf.p = Velocidad lineal del fluido a la altura del propulsor en m/s.*

*IG = Corriente en Amper en una de las fases de salida del generador.*

*IM = Corriente en Amper del motor (extraída del display del variador de frecuencia).*

*V = Tensión en Volt entre fases del generador.*

*P = Potencia consumida en Watt del motor en la condición correspondiente (extraída del display del variador de frecuencia).*

*Par = Par en Nm del motor en la condición correspondiente (extraída del display del variador de frecuencia).*

*Empuje = Empuje en kg que ofrece el propulsor en la condición correspondiente.*

De esta última tabla podemos sacar varias graficas donde se relacionen los parámetros estudiados y compararlos con los valores nominales que da de referencia el fabricante:

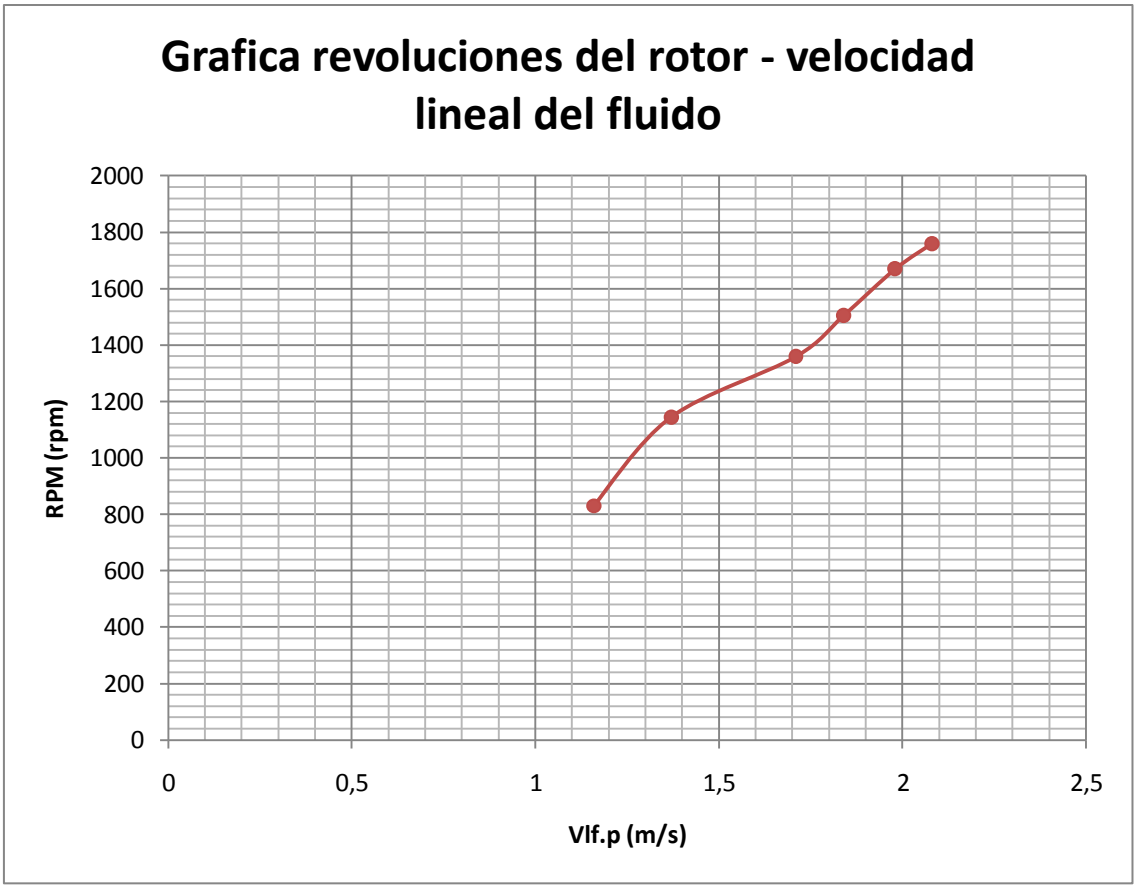



***Figura 42**: Grafica revoluciones/velocidad del fluido, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 42 se relacionan las revoluciones de rotor del propulsor o revoluciones de la hélice en rpm, con la velocidad lineal del fluido a la altura del propulsor en m/s.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

Las revoluciones del rotor se obtienen a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Spd3".

La velocidad del fluido se calcula a partir de obtener el tiempo que tarda una partícula flotante en realizar una revolución  a la piscina. A partir del tiempo la velocidad angular del fluido y en consecuencia, se calcula la velocidad lineal del fluido para el radio en el que se encuentra el propulsor.

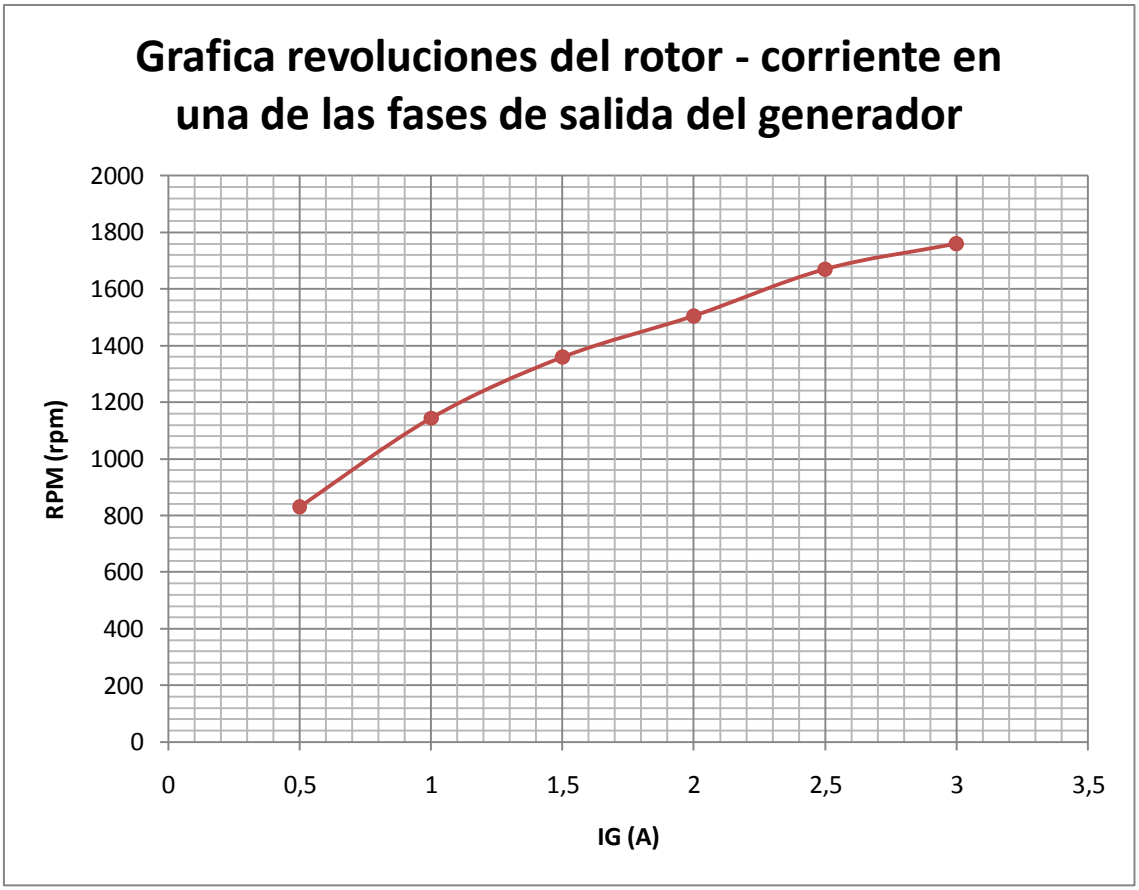



***Figura 43**: Grafica revoluciones/corriente en fase del generador, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 43 se relacionan las revoluciones de rotor del propulsor o revoluciones de la hélice en rpm, con la corriente que circula en una de las fases de salida del generador en Ampere.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

Las revoluciones del rotor se obtienen a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Spd3".

La corriente que circula en una de las fases de salida del generador se lee mediante una pinza amperimétrica.

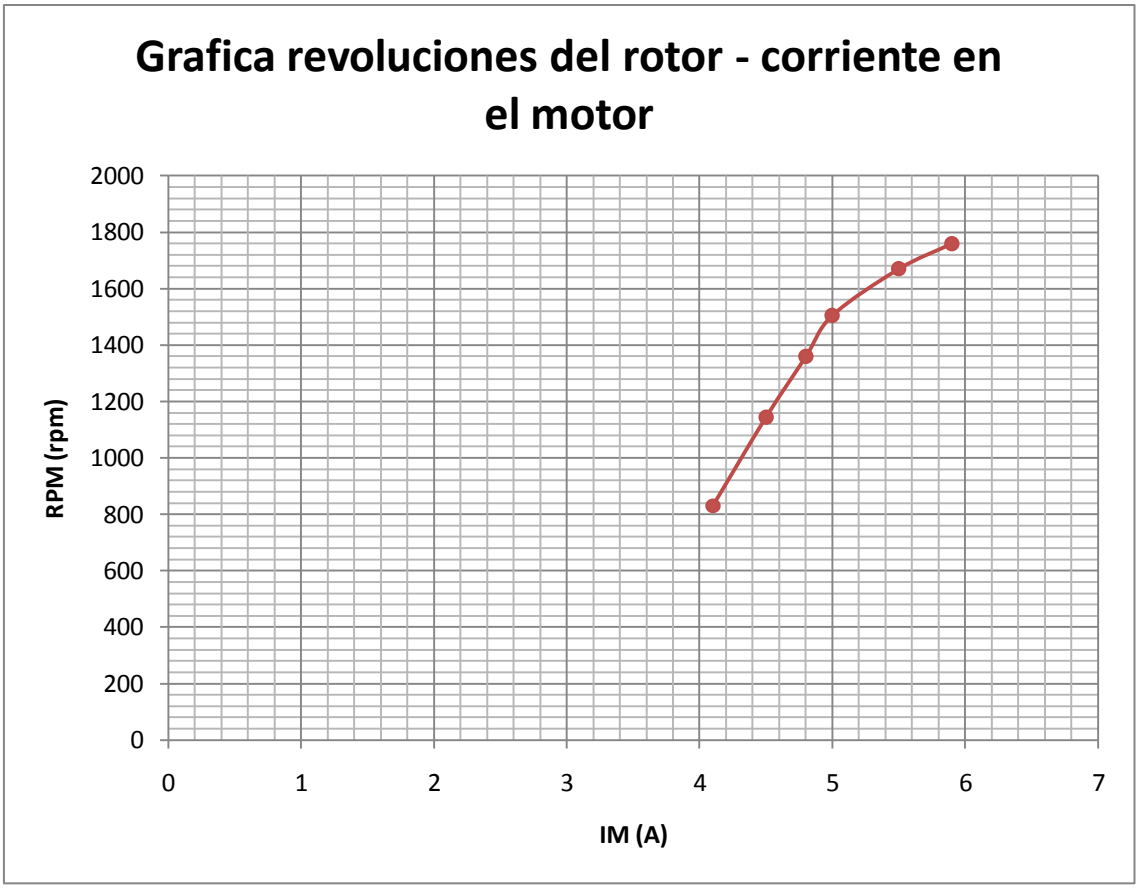



***Figura 44**: Grafica revoluciones/corriente en el motor, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 44 se relacionan las revoluciones de rotor del propulsor o revoluciones de la hélice en rpm, con la corriente que hay en el motor Tesla en Ampere.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

Las revoluciones del rotor se obtienen a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Spd3".

La corriente en el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "LCr".

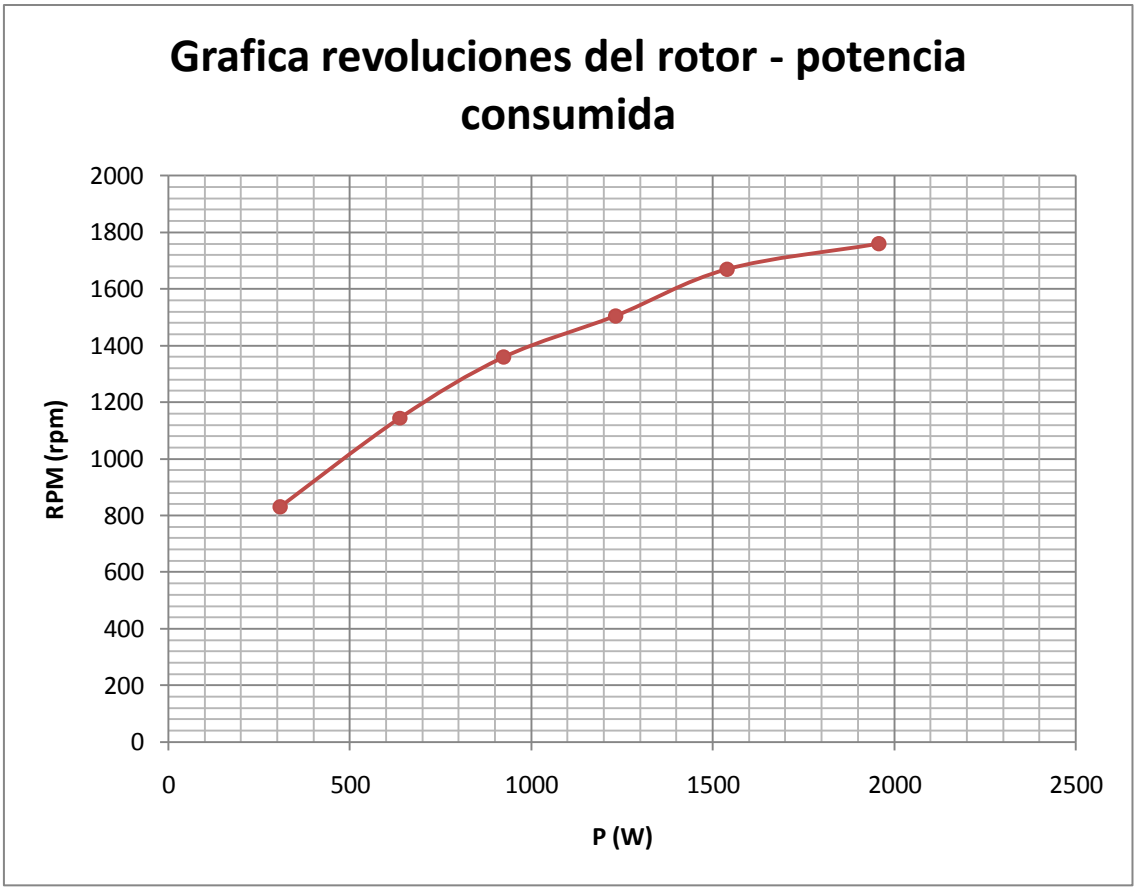



***Figura 45**: Grafica revoluciones/potencia consumida, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 45 se relacionan las revoluciones de rotor del propulsor o revoluciones de la hélice en rpm, con la potencia consumida por el motor en Watt.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

Las revoluciones del rotor se obtienen a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Spd3".

La potencia consumida por el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Opr".

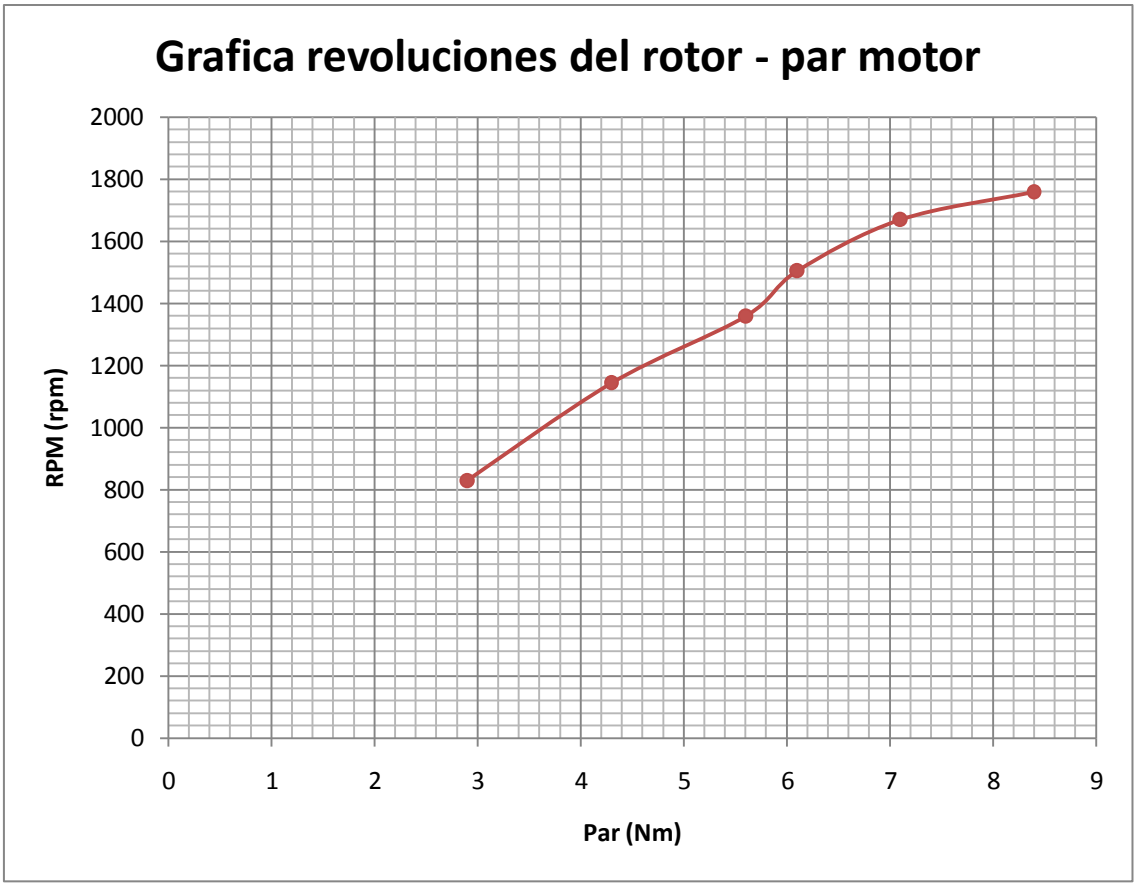



***Figura 46**: Grafica revoluciones/par motor, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 46 se relacionan las revoluciones de rotor del propulsor o revoluciones de la hélice en rpm, con el par motor en N·m.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

Las revoluciones del rotor se obtienen a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Spd3".

El par motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Otr".

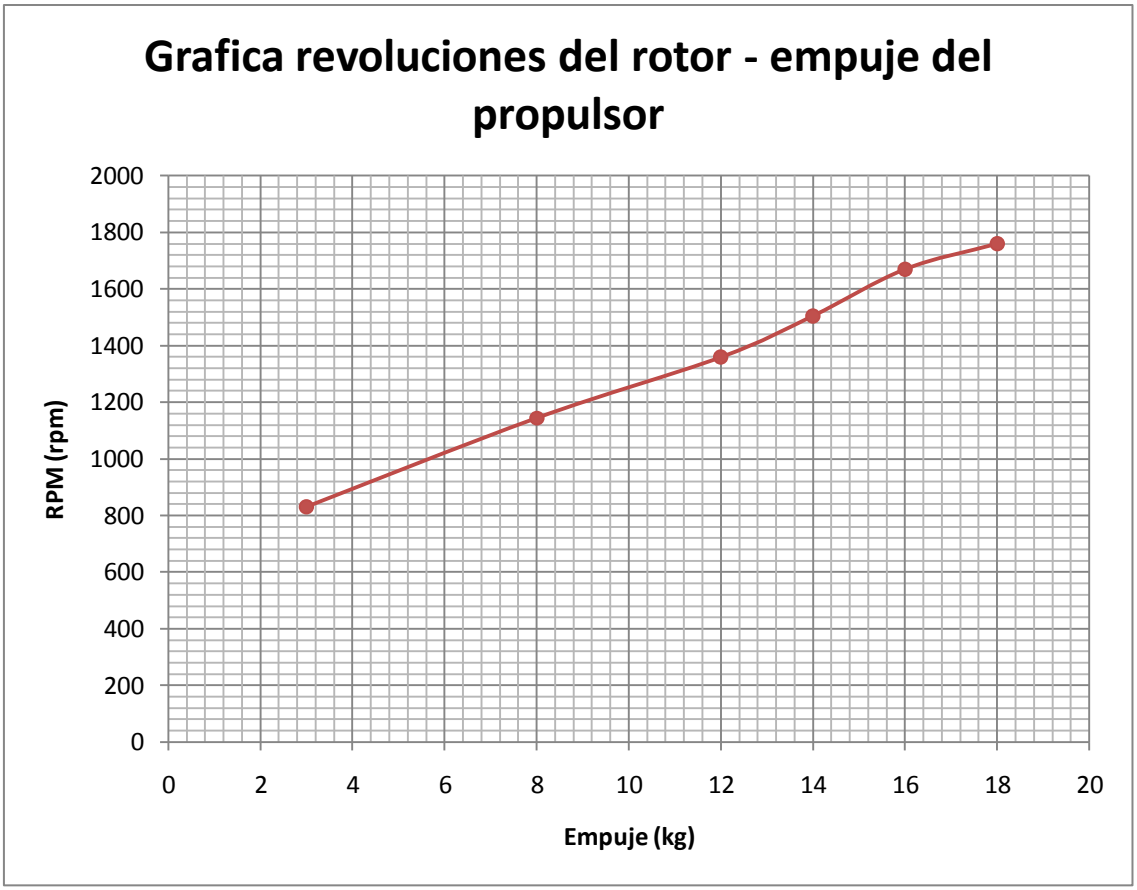



***Figura 47**: Grafica revoluciones/empuje, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 47 se relacionan las revoluciones de rotor del propulsor o revoluciones de la hélice en rpm, con el empuje que ejerce el propulsor en kg.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

Las revoluciones del rotor se obtienen a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Spd3".

El empuje se obtiene a partir de la lectura del sistema dinamométrico calibrado construido en la estructura dinamométrica de la botavara (EST3).

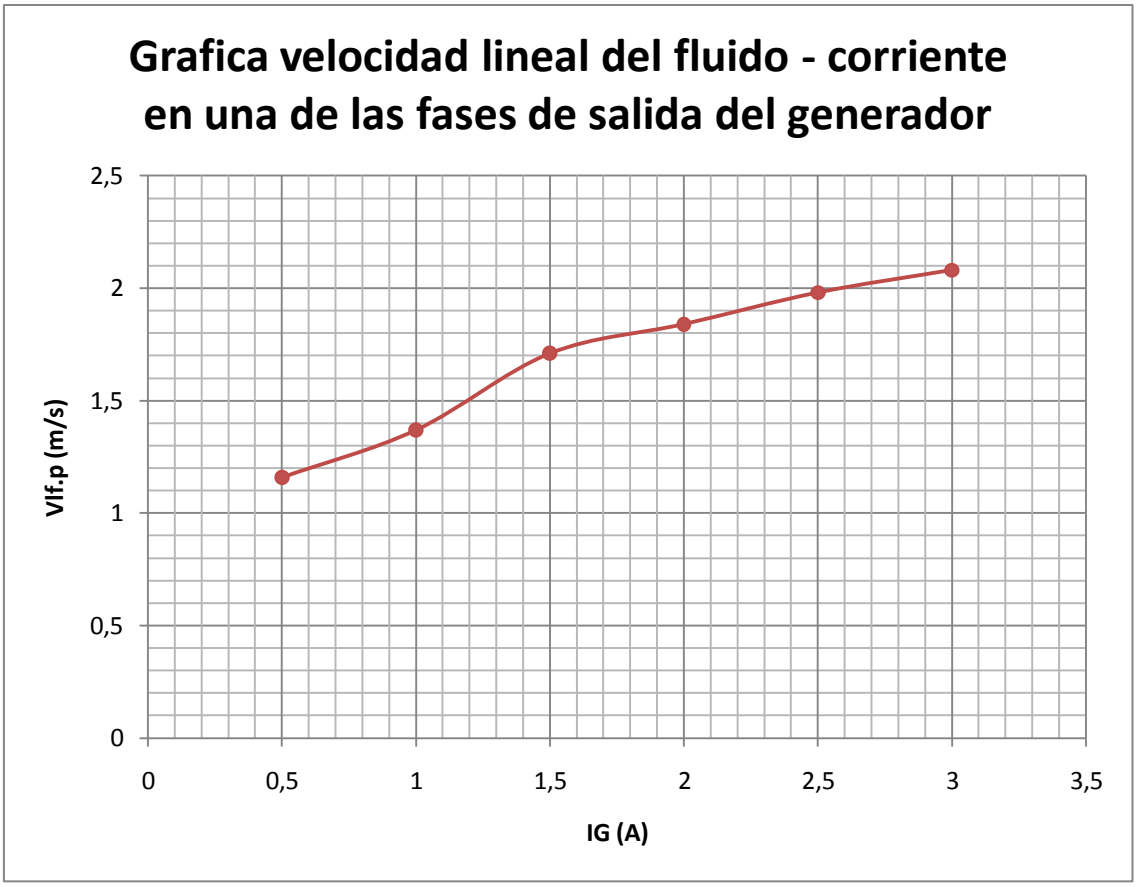



***Figura 48**: Grafica velocidad/corriente en fase de generador, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 48 se relacionan la velocidad del fluido a la altura del propulsor en m/s, con la corriente que circula en una de las fases de salida del generador en Ampere.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La velocidad del fluido se calcula a partir de obtener el tiempo que tarda una partícula flotante en realizar una revolución  a la piscina. A partir del tiempo la velocidad angular del fluido y en consecuencia, se calcula la velocidad lineal del fluido para el radio en el que se encuentra el propulsor.

La corriente que circula en una de las fases de salida del generador se lee mediante una pinza amperimétrica.

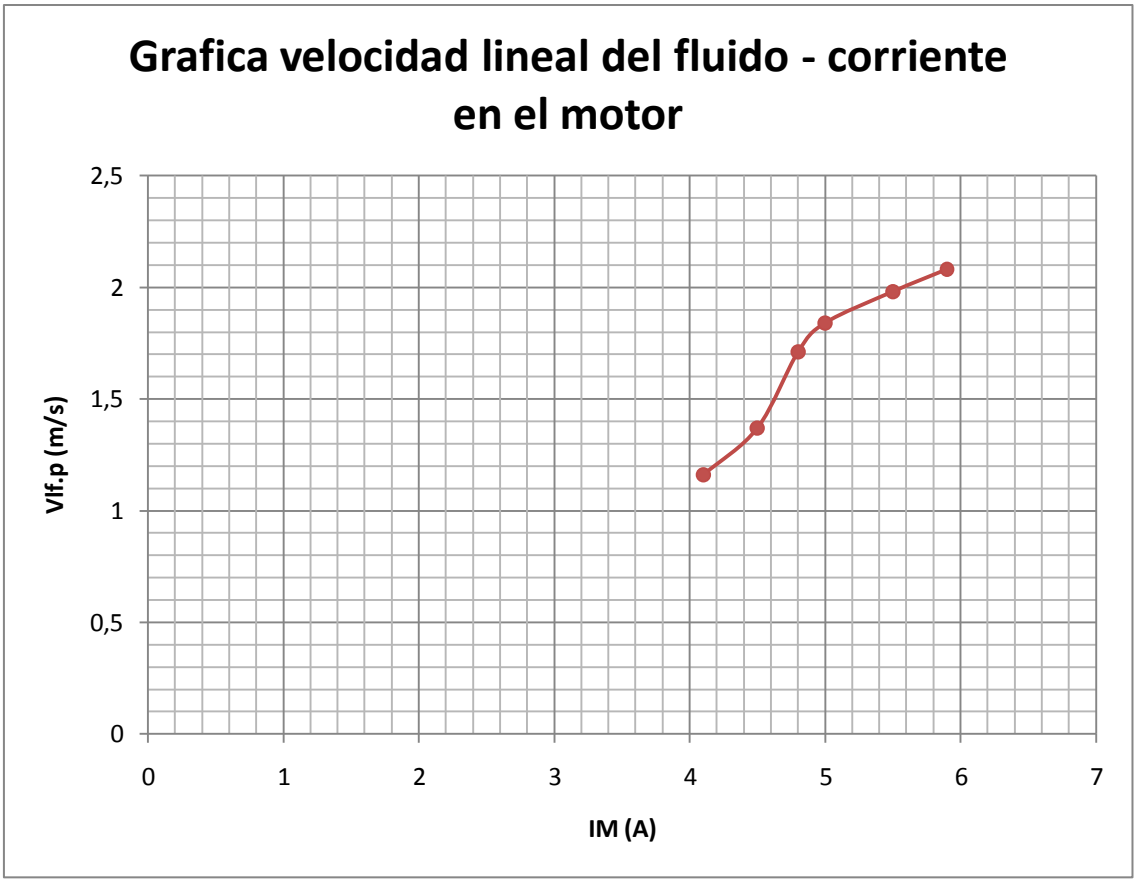



***Figura 49**: Grafica velocidad/corriente en el motor, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 49 se relacionan la velocidad del fluido a la altura del propulsor en m/s, con la corriente que hay en el motor en Ampere.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La velocidad del fluido se calcula a partir de obtener el tiempo que tarda una partícula flotante en realizar una revolución  a la piscina. A partir del tiempo la velocidad angular del fluido y en consecuencia, se calcula la velocidad lineal del fluido para el radio en el que se encuentra el propulsor.

La corriente en el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "LCr".

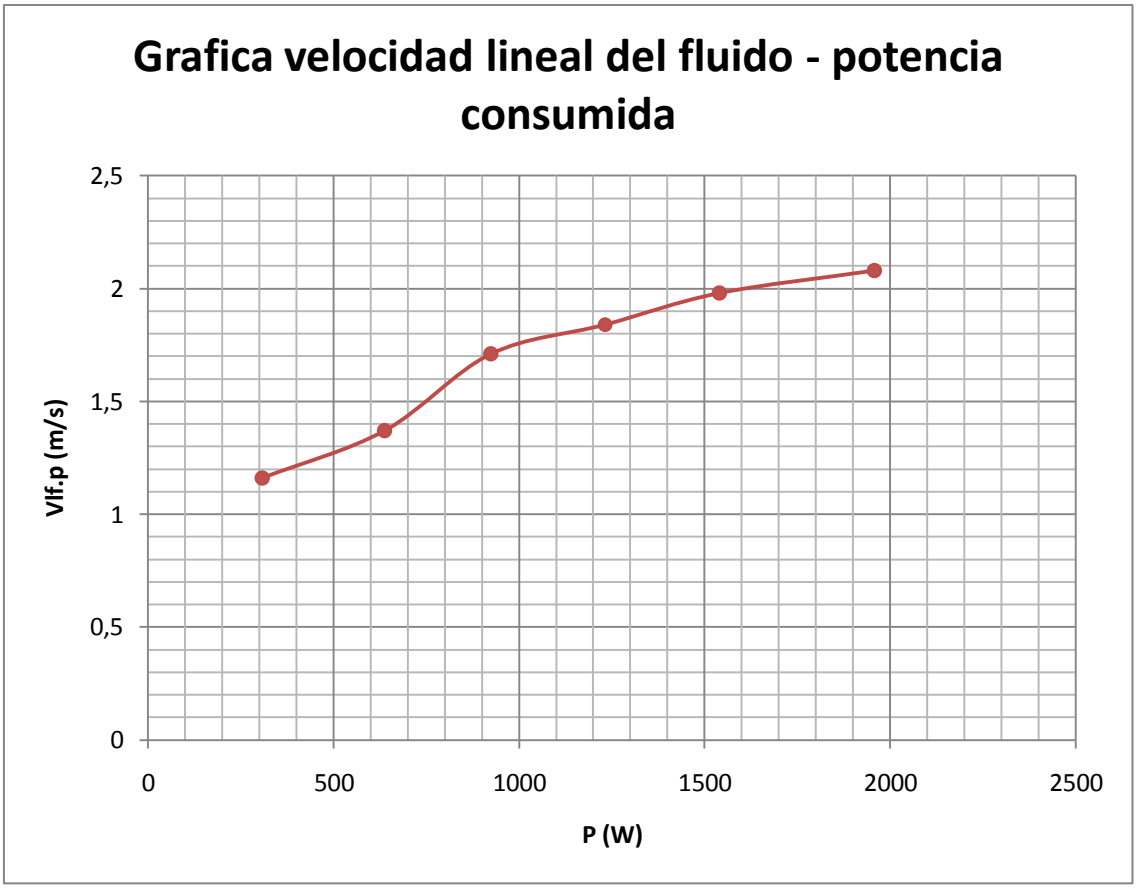



***Figura 50**: Grafica velocidad/potencia consumida, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 50 se relacionan la velocidad del fluido a la altura del propulsor en m/s, con la potencia consumida por el motor en Watt.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La velocidad del fluido se calcula a partir de obtener el tiempo que tarda una partícula flotante en realizar una revolución  a la piscina. A partir del tiempo la velocidad angular del fluido y en consecuencia, se calcula la velocidad lineal del fluido para el radio en el que se encuentra el propulsor.

La potencia consumida por el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Opr".

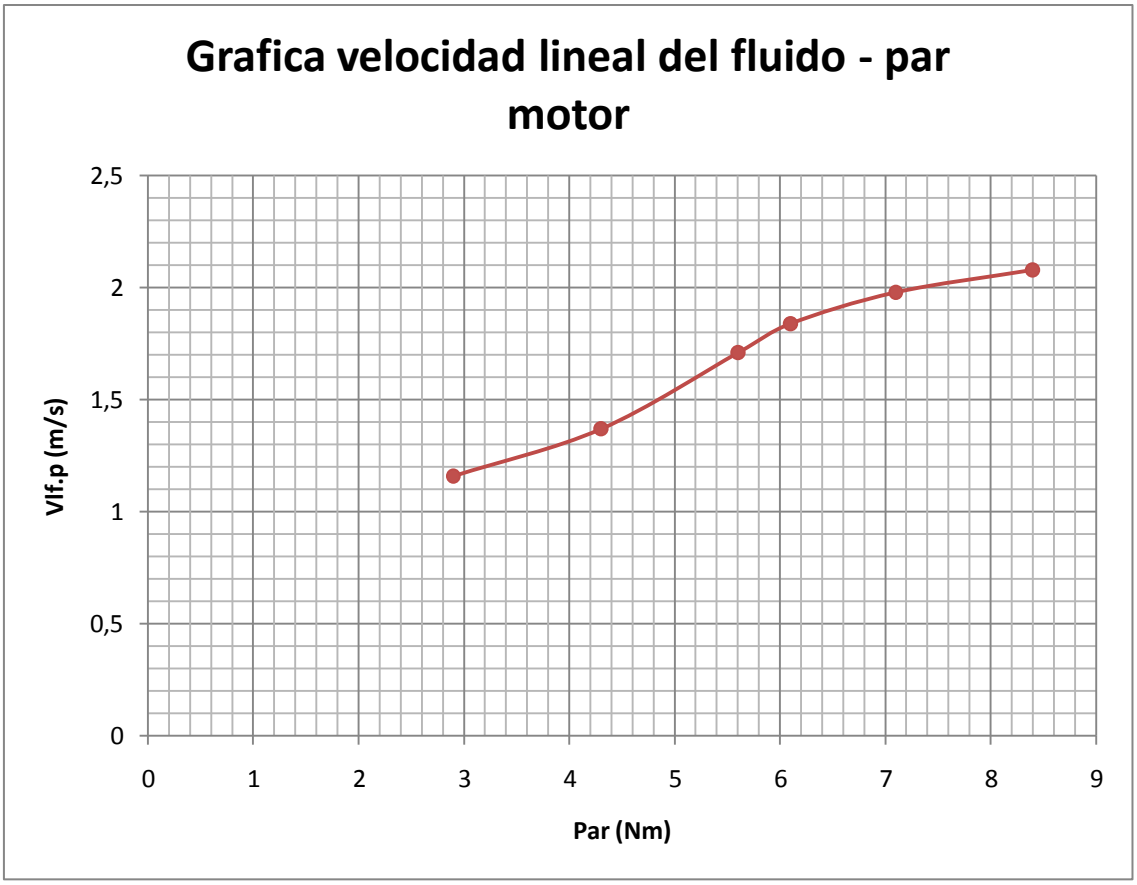



***Figura 51**: Grafica velocidad/par motor, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 51 se relacionan la velocidad del fluido a la altura del propulsor en m/s, con el par motor en N·m.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La velocidad del fluido se calcula a partir de obtener el tiempo que tarda una partícula flotante en realizar una revolución  a la piscina. A partir del tiempo la velocidad angular del fluido y en consecuencia, se calcula la velocidad lineal del fluido para el radio en el que se encuentra el propulsor.

El par motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Otr".

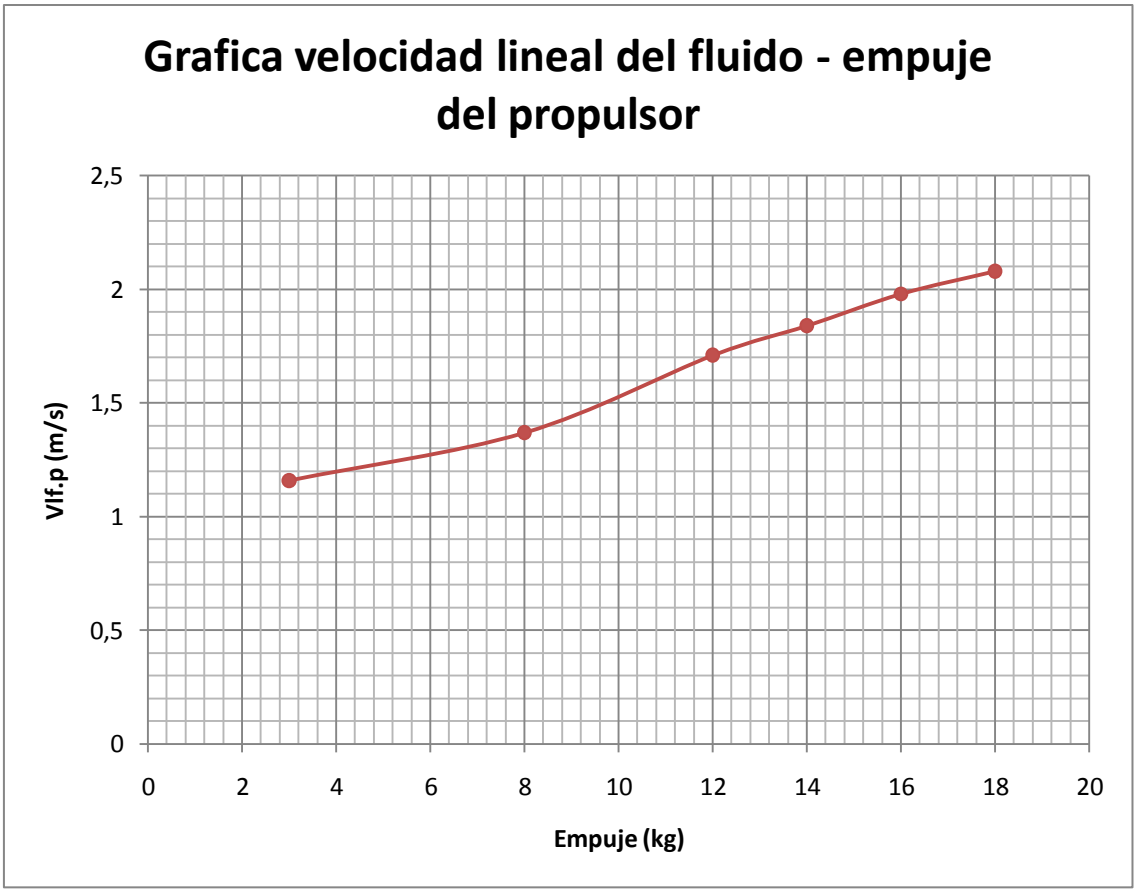



***Figura 52**: Grafica velocidad/empuje, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 52 se relacionan la velocidad del fluido a la altura del propulsor en m/s, con el empuje que ejerce el propulsor en kg.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La velocidad del fluido se calcula a partir de obtener el tiempo que tarda una partícula flotante en realizar una revolución  a la piscina. A partir del tiempo la velocidad angular del fluido y en consecuencia, se calcula la velocidad lineal del fluido para el radio en el que se encuentra el propulsor.

El empuje se obtiene a partir de la lectura del sistema dinamométrico calibrado construido en la estructura dinamométrica de la botavara (EST3).

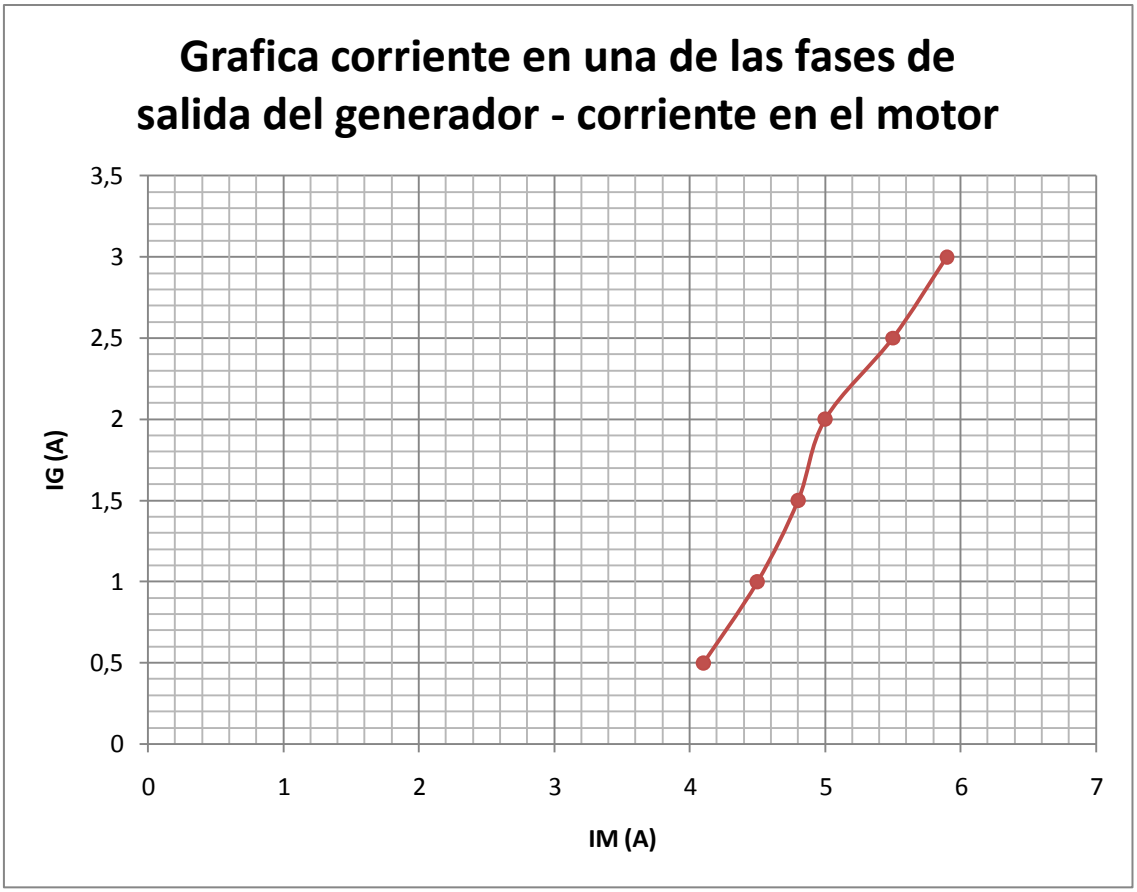



***Figura 53**: Grafica corriente en fase generador/corriente motor, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 53 se relacionan la corriente que circula en una de las fases de salida del generador en Ampere, con la corriente que hay en el motor en Ampere.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La corriente que circula en una de las fases de salida del generador se lee mediante una pinza amperimétrica.

La corriente en el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "LCr".

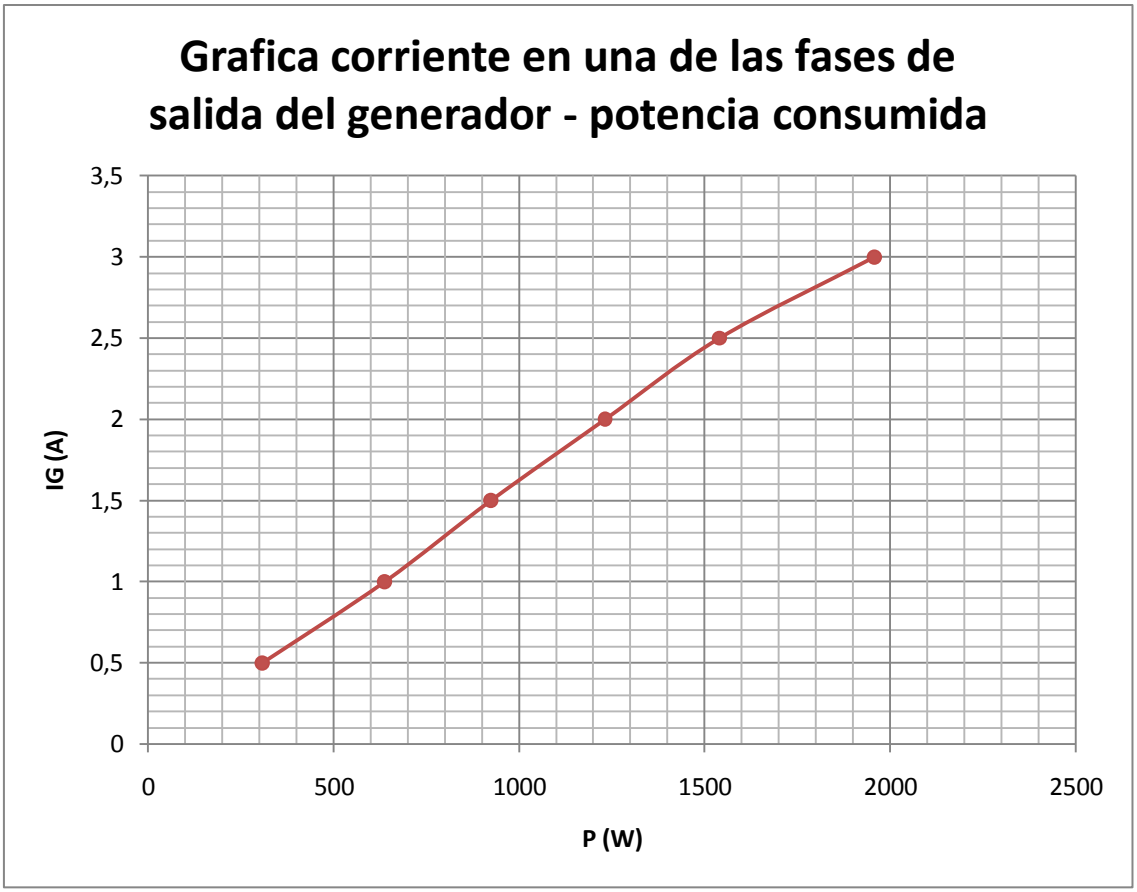



***Figura 54**: Grafica corriente en fase generador/potencia consumida, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 54 se relacionan la corriente que circula en una de las fases de salida del generador en Ampere, con la potencia consumida por el motor en Watt.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La corriente que circula en una de las fases de salida del generador se lee mediante una pinza amperimétrica.

La potencia consumida por el motor se obtienen a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Opr".

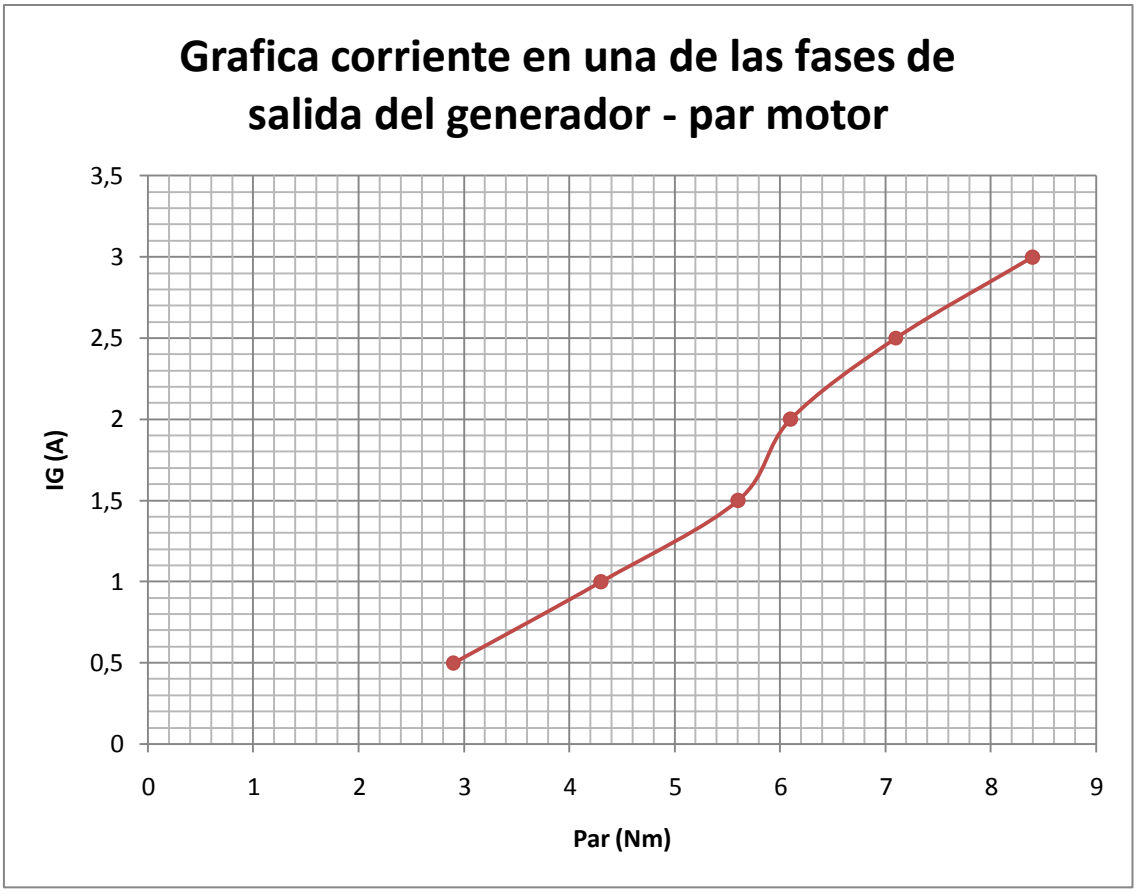



***Figura 55**: Grafica corriente en fase generador/par motor, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 55 se relacionan la corriente que circula en una de las fases de salida del generador en Ampere, con el par motor en N·m.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La corriente que circula en una de las fases de salida del generador se lee mediante una pinza amperimétrica.

El par motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Otr".

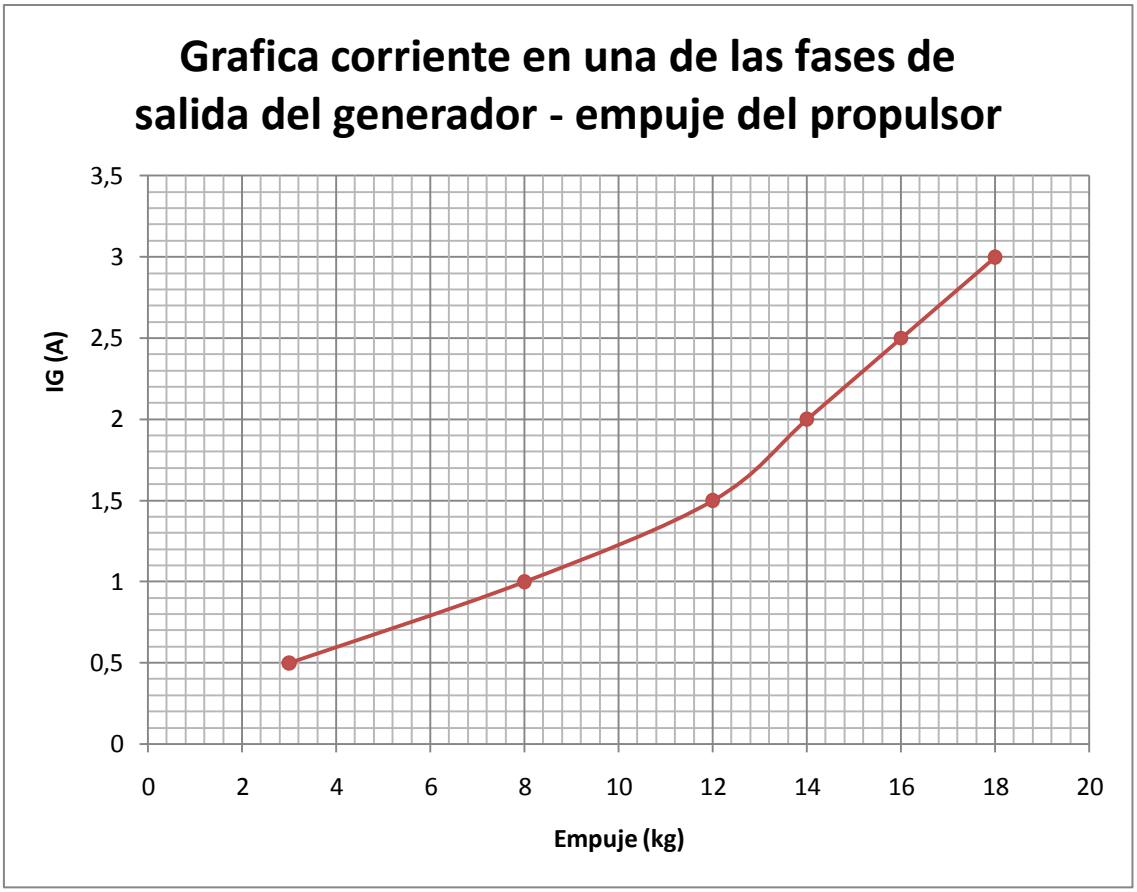



***Figura 56**: Grafica corriente en fase generador/empuje, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 56 se relacionan la corriente que circula en una de las fases de salida del generador en Ampere, con el empuje que ejerce el propulsor en kg.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La corriente que circula en una de las fases de salida del generador se lee mediante una pinza amperimétrica.

El empuje se obtiene a partir de la lectura del sistema dinamométrico calibrado construido en la estructura dinamométrica de la botavara (EST3).

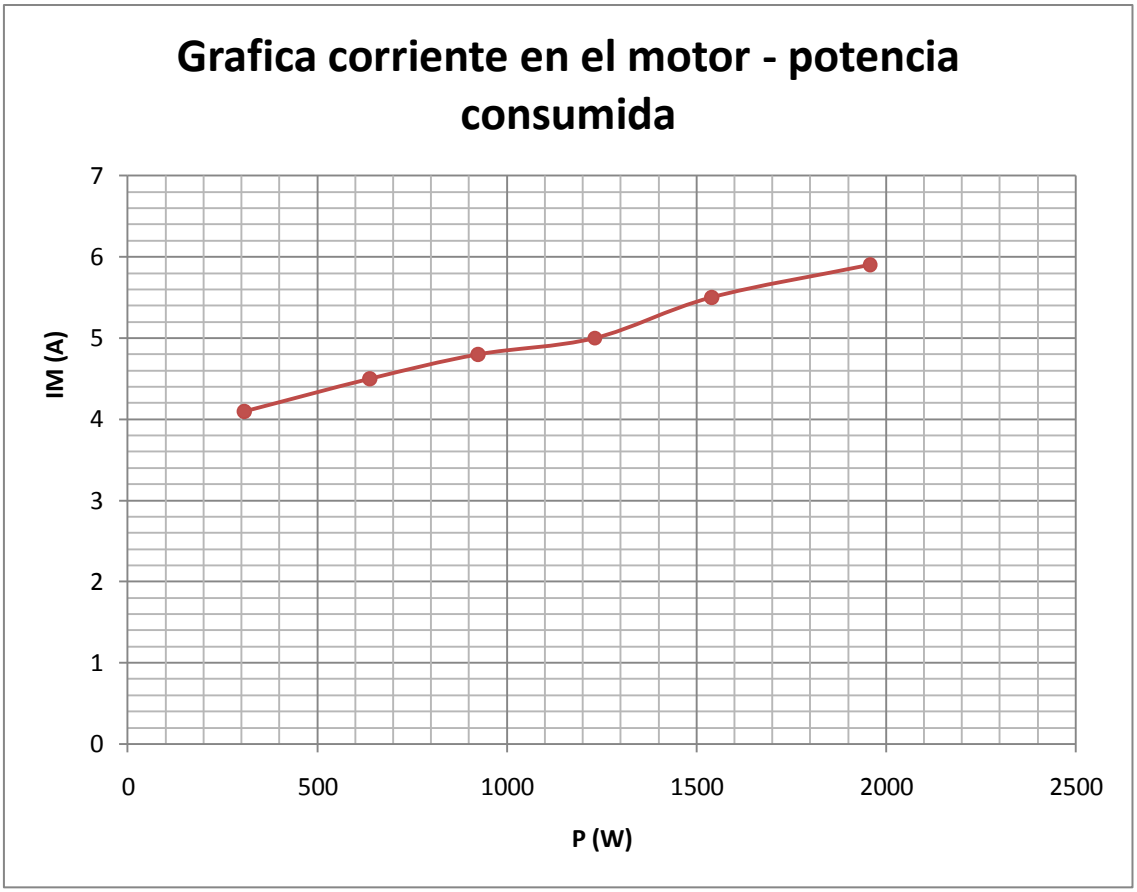



***Figura 57**: Grafica corriente en motor/potencia consumida, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 57 se relacionan la corriente que hay en el motor en Ampere, con la potencia consumida por el motor en Watt.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La corriente en el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "LCr".

La potencia consumida por el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Opr".

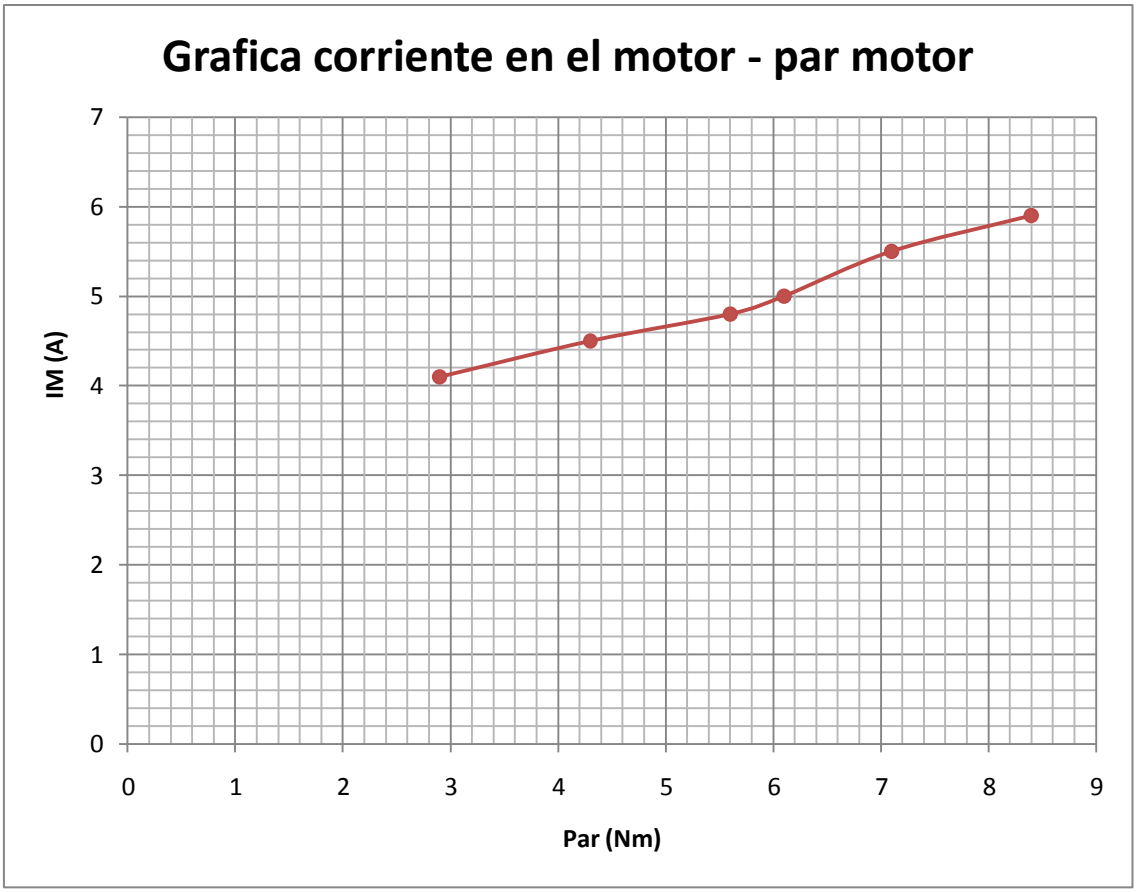



***Figura 58**: Grafica corriente en motor/par motor, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 58 se relacionan la corriente que hay en el motor en Ampere, con el par motor en N·m.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La corriente en el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "LCr".

El par motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Otr".

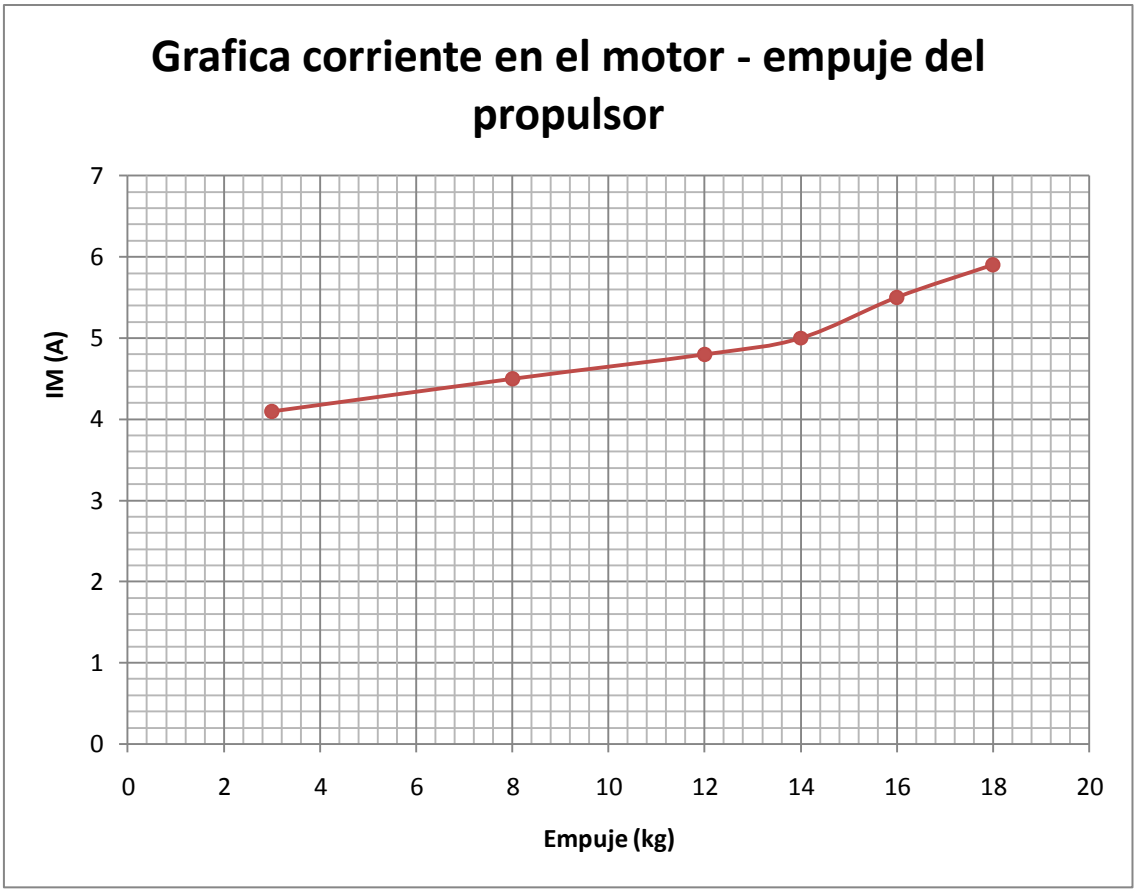



***Figura 59**: Grafica corriente en motor/empuje, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 59 se relacionan la corriente que hay en el motor en Ampere, con el empuje que ejerce el propulsor en kg.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La corriente en el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "LCr".

El empuje se obtiene a partir de la lectura del sistema dinamométrico calibrado construido en la estructura dinamométrica de la botavara (EST3).

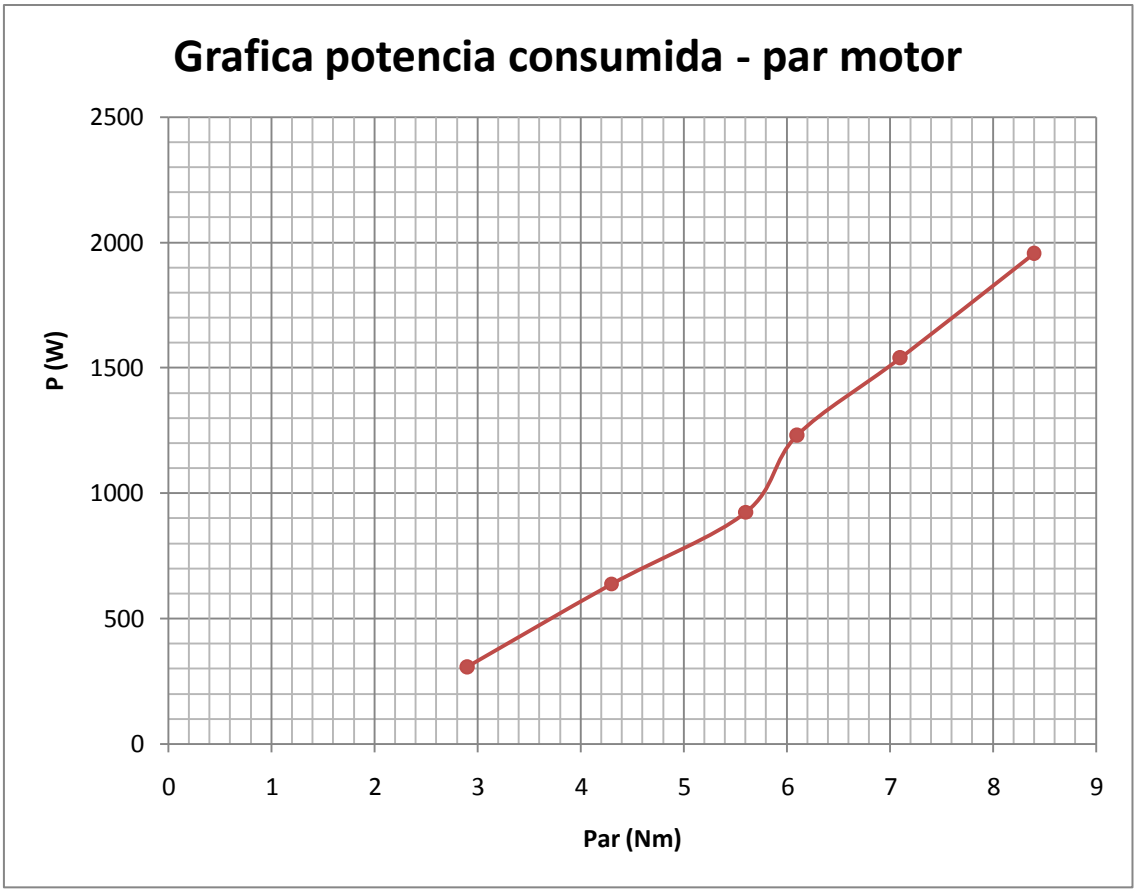



***Figura 60**: Grafica potencia consumida/par motor, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 60 se relacionan la potencia consumida por el motor en Watt, con el par motor en N·m.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La potencia consumida por el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Opr".

El par motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Otr".

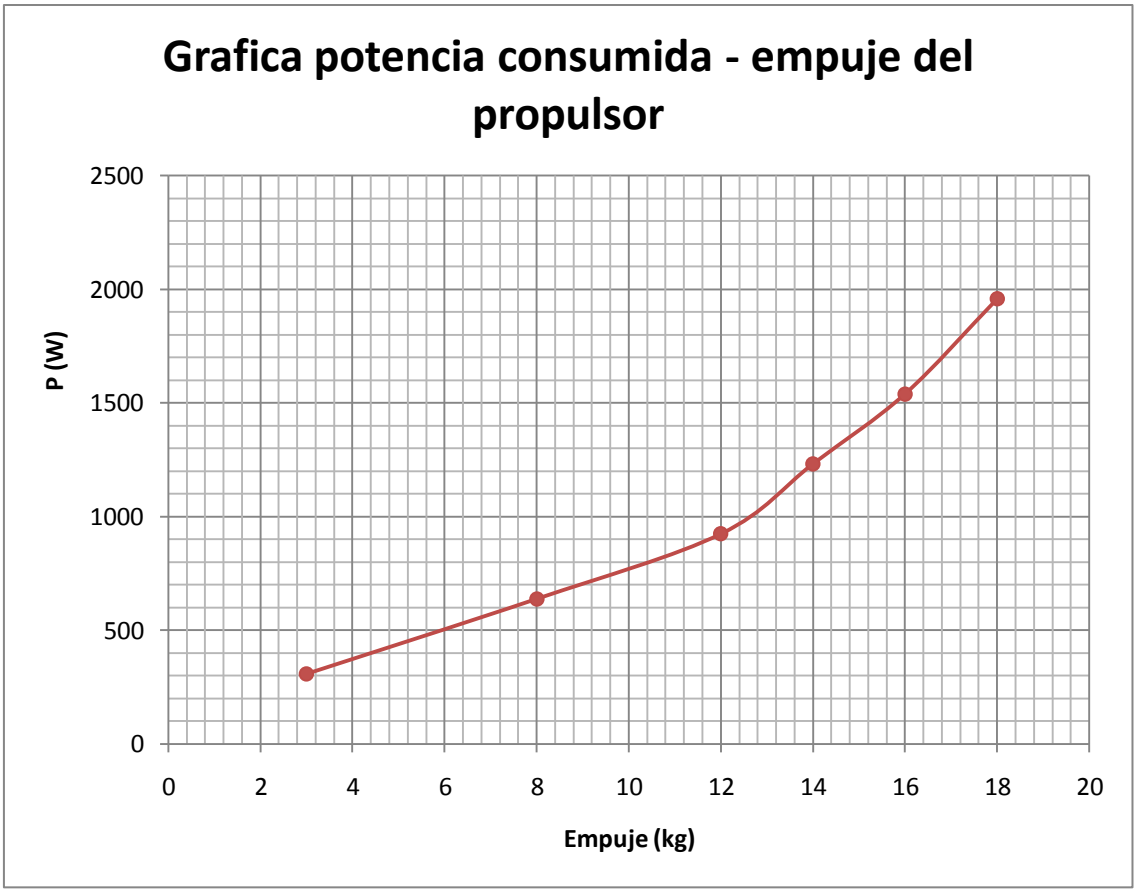



***Figura 61**: Grafica potencia consumida/empuje, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 61 se relacionan la potencia consumida por el motor en Watt, con el empuje que ejerce el propulsor en kg.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

La potencia consumida por el motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Opr".

El empuje se obtiene a partir de la lectura del sistema dinamométrico calibrado construido en la estructura dinamométrica de la botavara (EST3).

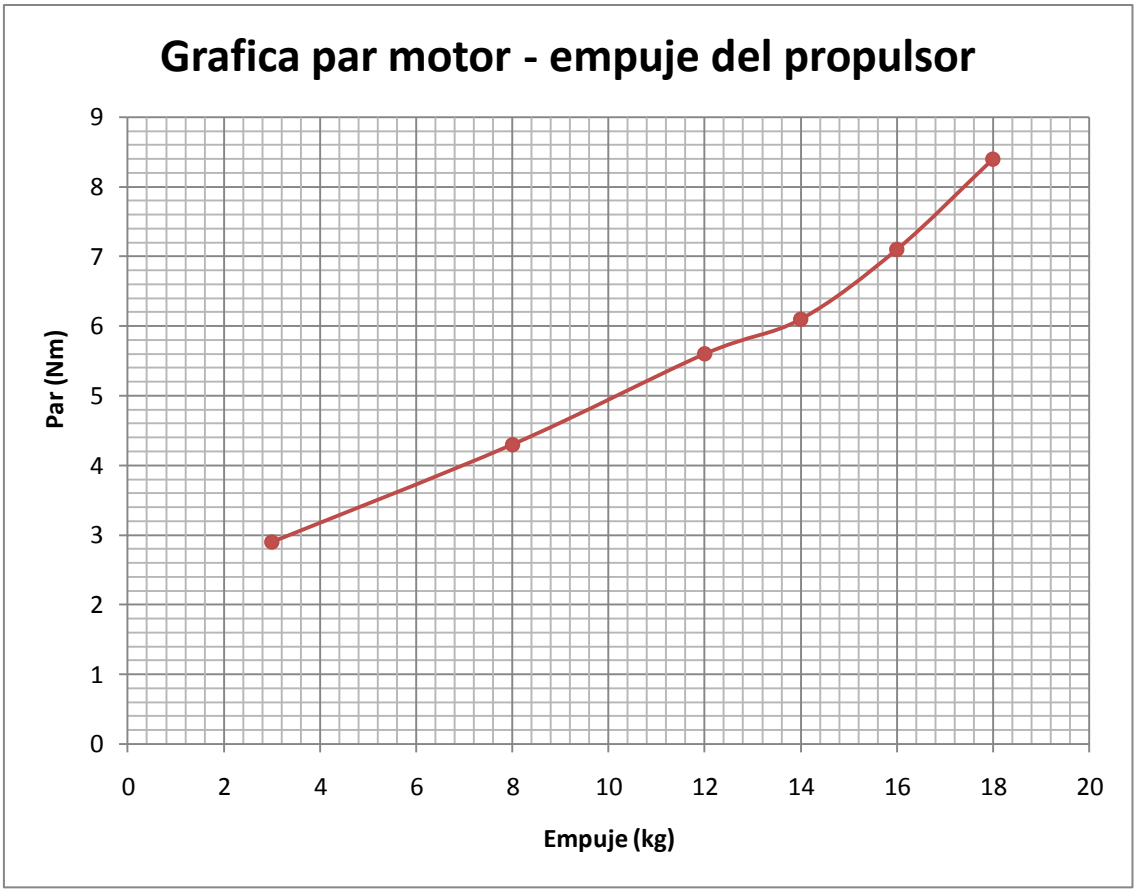



***Figura 62**: Grafica par motor/empuje, del ensayo 5.2.1*

En la Figura 62 se relacionan el par motor en N·m, con el empuje que ejerce el propulsor en kg.

Para obtener esta gráfica se utiliza el motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(helice1).*

El par motor se obtiene a partir de la lectura del display del variador de velocidad Altivar31, en el modo de supervisión "Otr".

El empuje se obtiene a partir de la lectura del sistema dinamométrico calibrado construido en la estructura dinamométrica de la botavara (EST3).

En este ensayo, además de extraer las graficas que relacionan los distintos parámetros se ha utilizado la pinza Fluke para poder ver la forma que tiene el señal eléctrico en una de las fases que salen del driver del motor Tesla:

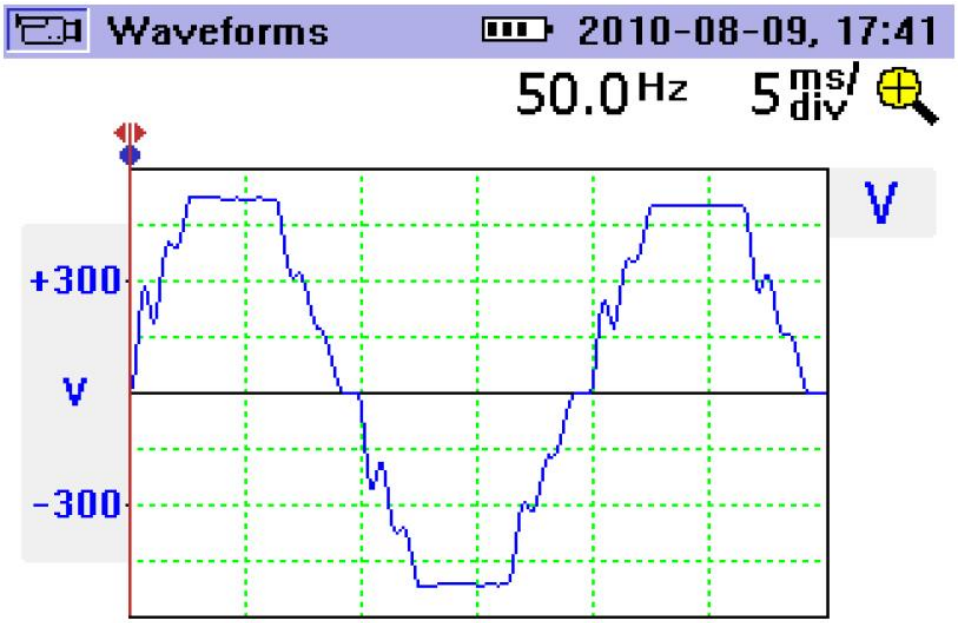



***Figura 63***
***Señal eléctrico captado en una de las fases de salida del driver del motor Franklin***

Conclusiones del ensayo

En primer lugar, la piscina ha supuesto una limitación ya que si seguíamos acelerando el agua, esta desbordaba. A causa de esto, tal y como se puede apreciar en las gráficas, solo hemos podido llegar a las 1760rpm frente a las 2800 que establece como nominales el fabricante. Del mismo modo que con las revoluciones ha ocurrido con otros valores como la potencia, que ha permitido alcanzar el 89% de la nominal. No obstante, no ha ocurrido los mismo con el par generado por el propulsor, que ha llegado al 135% del nominal cuando este giraba a 1760rpm.

Se ha podido observar que a 1505rpm se alcanzó un 98% del par nominal del motor, mientras que la potencia nominal se mantiene tan solo al 56%. A partir de este punto, con la hélice que lleva montada el propulsor, se podría decir que el motor empieza a trabajar fuera de las características nominales de diseño y habría que analizar las condiciones en las que va a trabajar el motor valorando si realmente es capaz de trabajar en ellas.

Tal y como se ha mencionado, en cuanto a la potencia, se ha registrado un 89% del nominal a 1760rpm, de modo que se podría estimar que a partir de las 1820rpm ocurrirá lo mismo que con el par y a partir de este punto el motor empezará a trabajar en sobrecarga.

Con todo esto, se puede hacer una aproximación de la curva par-revoluciones del motor Franklin, haciendo una comparación entre la curva de par resistente proporcionada por el fabricante y la que ha dado como resultado en este ensayo (Figura 64).En ella también se remarca la zona a partir de donde desbordaba la piscina, por lo que no se ha podido ensayar.

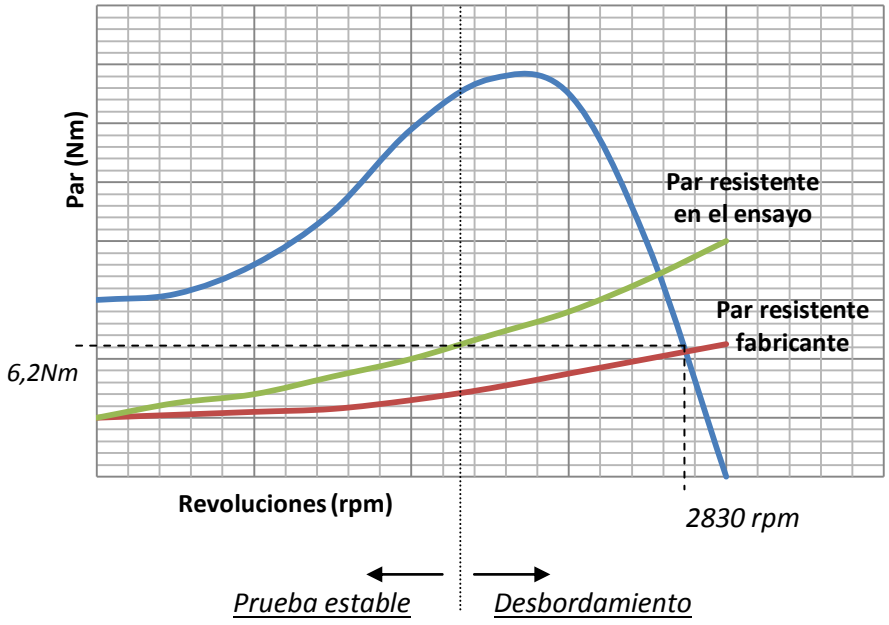



***Figura 64***
***Comparación entre curvas de par resistente del fabricante y la obtenida en el ensayo 5.2.1***

Por otro lado, conociendo las revoluciones del eje del motor y la velocidad lineal del agua se puede hacer una aproximación bastante buena del resbalamiento o deslizamiento que tiene la hélice: a 1760rpm, con una velocidad lineal del fluido de 2,08m/s se ha calculado una velocidad de deslizamiento de 1,64m/s y un coeficiente de deslizamiento de 0,44.

En la siguiente gráfica se puede ver la evolución del deslizamiento de la hélice en función de las revoluciones de la misma. En ella se relacionan la velocidad de descarga teórica de la hélice en un medio rígido (producto del paso y las revoluciones de la hélice), y la velocidad lineal real que tiene el fluido en el ensayo.

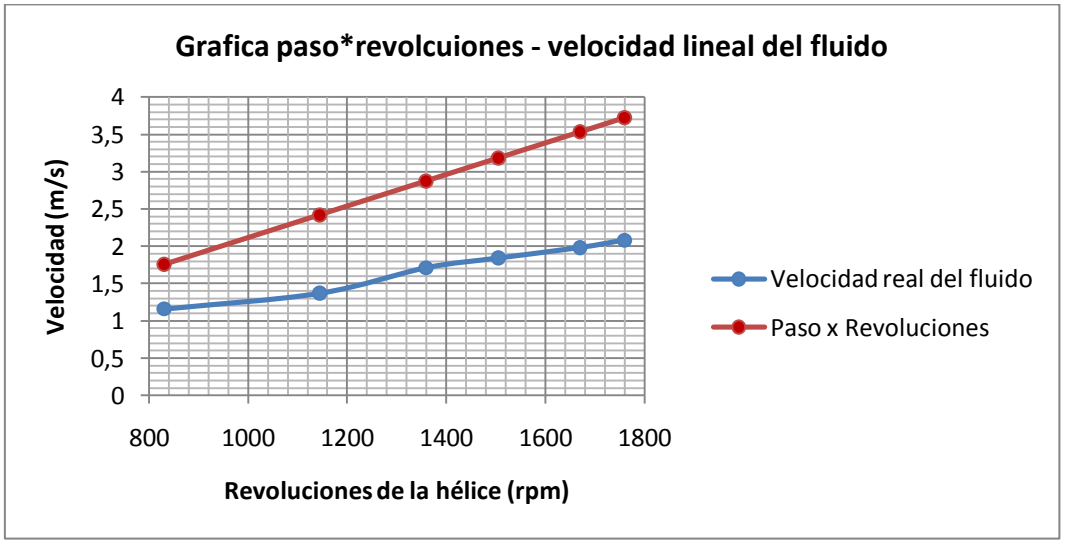



***Figura 65***
***Grafica evolución del deslizamiento de la hélice instalada (helice1)***

### 5.2.2 Ensayo con 2 propulsores, uno en la estructura dinamométrica de la botavara y el otro en la estructura pivotante de la mesa.

Después de realizar un ensayo para caracterizar un propulsor en el que el solo acelera el agua y se caracteriza, se propone este experimento.

Se pretende caracterizar el mismo propulsor que antes, pero esta vez, va a ser otro el que acelere el agua. De este modo, el propulsor que se va a caracterizar va a encontrarse sumergido en un fluido cuya velocidad es superior que la de descarga de la propia hélice en un medio sólido (producto de las revoluciones y el paso). Esta condición quiere asemejarse a algunas situaciones puntuales en las que se pueda encontrar la embarcación, como por ejemplo en un giro brusco, momento en el que el propulsor que queda en la parte exterior de la curva alcanzaría mayor velocidad que el que se encuentra en la parte interior.

Se puede hacer una predicción de que cuando la velocidad del fluido sea mayor que la de descarga de hélice, tanto los consumos como el par deberían bajar de una forma apreciable. Esto se debería a que el fluido arrastra a la hélice para que gire más rápido y no al revés como ocurre la mayor parte del tiempo que el propulsor se encuentra en funcionamiento.

<u>Condiciones y procedimiento del ensayo</u>

Para realizar el ensayo se han utilizado los dos propulsores gemelos de la embarcación RAS. Cada uno de ellos está compuesto por un motor Tesla GF420T353 *(motor1)* con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(hélice1)* acoplada directamente en el eje del rotor. No obstante, uno de los propulsores lleva instalada una hélice de giro horario y el otro una hélice de giro antihorario.

El propulsor que va a acelerar el agua (propulsor 1) se instala en la estructura pivotante de la mesa (EST5) y el que vamos a caracterizar (propulsor 2) se instala en la estructura dinamométrica de la botavara (EST3). Ambos quedan distribuidos a 90º uno del otro respecto a la piscina.

Las condiciones iniciales del ensayo son las siguientes:

- Nivel de agua en la piscina de 350mm.

- Altura del eje del propulsor 1 respecto del fondo de la piscina de 135mm.

- Altura del eje del propulsor 2 respecto del fondo de la piscina de 135mm.

- Propulsor 1 a unos 300mm de la periferia de la piscina, es decir, a unos 2700mm del centro de la piscina.

- Propulsor 2 a unos 300mm de la periferia de la piscina, es decir, a unos 2700mm del centro de la piscina.

Una vez esta todo preparado, el procedimiento que se sigue es similar al del ensayo 5.2.1 con un propulsor, pero a su vez algo más complicado por tener dos propulsores.

Se empieza acelerando el agua a una velocidad del agua relativamente baja, mediante el propulsor 1 y una vez el flujo es estable, se caracteriza el propulsor 2 a las velocidades deseadas anotando todas las variaciones. A continuación se incrementa ligeramente la velocidad del fluido mediante el propulsor 1, y de nuevo se caracteriza el propulsor 2 a las revoluciones que se quiera y anotando todas las variaciones. Se van repitiendo las mismas operaciones una y otra vez hasta que la velocidad del agua provoque el desbordamiento de la piscina.

En el caso de este ensayo se realizan 6 incrementos de velocidad del fluido con el propulsor 1 (1,15; 1,35; 1,7; 1,8; 1,95 y 2 m/s). Para cada uno de estos incrementos se ha caracterizado el propulsor 2 asegurando que la velocidad de descarga de la hélice de este no sea superior a la velocidad del fluido en el que se encuentra sumergido. A continuación, en los resultados del ensayo se hace una tabla con todos los incrementos mencionados y donde se pueden apreciar numéricamente con más facilidad.

Resultados del ensayo:

El registro de los parámetros y consumos más significativos de estudio en las distintas situaciones de carga del motor, se agrupan en la siguiente tabla:

| **Vlf.p (m/s)** | **RPM1 (rpm)** | **RPM2 (rpm)** | **IG1 (A)** | **IG2 (A)** | **IM1 (A)** | **IM2 (A)** | **P1 (W)** | **P2 (W)** | **Par1 (Nm)** | **Par2 (Nm)** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,15 | 830 | 0 | 0,5 | 0 | 4,1 | 0 | 308 | 0 | 2,9 | 0 |
| 1,15 | 830 | 830 | 0,5 | 0,5 | 4,1 | 3,9 | 292 | 242 | 2,7 | 2,23 |
| 1,35 | 1144 | 0 | 1 | 0 | 4,5 | 0 | 638 | 0 | 4,3 | 0 |
| 1,35 | 1144 | 830 | 1 | 0,4 | 4,5 | 3,8 | 638 | 220 | 4,3 | 2 |
| 1,35 | 1144 | 1144 | 0,9 | 0,8 | 4,5 | 4 | 596 | 374 | 3,7 | 2,67 |
| 1,7 | 1359 | 0 | 1,5 | 0 | 4,8 | 0 | 924 | 0 | 5,6 | 0 |
| 1,7 | 1359 | 830 | 1,5 | 0,4 | 4,8 | 3,9 | 924 | 198 | 5,6 | 1,92 |
| 1,7 | 1359 | 1144 | 1,5 | 0,8 | 4,8 | 4,1 | 924 | 362 | 5,6 | 2 |
| 1,7 | 1359 | 1359 | 1,4 | 1,4 | 4,7 | 4,4 | 919 | 856 | 4,8 | 2,57 |
| 1,8 | 1505 | 0 | 2 | 0 | 5 | 0 | 1232 | 0 | 6,1 | 0 |
| 1,8 | 1505 | 830 | 2 | 0,4 | 5 | 3,9 | 1232 | 198 | 6,1 | 1,92 |
| 1,8 | 1505 | 1144 | 2 | 0,8 | 5 | 4,1 | 1232 | 360 | 6,1 | 2 |
| 1,8 | 1505 | 1359 | 2 | 1,2 | 5 | 4,3 | 1232 | 847 | 6,1 | 2,57 |
| 1,8 | 1505 | 1505 | 1,8 | 1,6 | 4,9 | 4,7 | 1157 | 986 | 5,2 | 4,1 |
| 1,95 | 1670 | 0 | 2,5 | 0 | 5,5 | 0 | 1540 | 0 | 7,1 | 0 |
| 1,95 | 1670 | 830 | 2,5 | 0,4 | 5,5 | 3,9 | 1540 | 198 | 7,1 | 1,90 |
| 1,95 | 1670 | 1144 | 2,5 | 0,8 | 5,5 | 4,1 | 1540 | 360 | 7,1 | 2 |
| 1,95 | 1670 | 1359 | 2,5 | 1,2 | 5,5 | 4,3 | 1540 | 845 | 7,1 | 2,57 |
| 1,95 | 1670 | 1505 | 2,5 | 1,6 | 5,5 | 4,7 | 1540 | 980 | 7,1 | 4,3 |
| 1,95 | 1670 | 1670 | 2,3 | 2,1 | 5,3 | 5,2 | 1498 | 1315 | 6,3 | 5,9 |
| 2 | 1760 | 0 | 3 | 0 | 5,9 | 0 | 1958 | 0 | 8,4 | 0 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 1760 | 830 | 3 | 0,4 | 5,9 | 3,9 | 1958 | 198 | 8,4 | 1,90 |
| 2 | 1760 | 1144 | 3 | 0,8 | 5,9 | 4,1 | 1958 | 360 | 8,4 | 2 |
| 2 | 1760 | 1359 | 3 | 1 | 5,9 | 4,3 | 1958 | 843 | 8,4 | 2,57 |
| 2 | 1760 | 1505 | 3 | 1,4 | 5,9 | 4,6 | 1958 | 980 | 8,4 | 4,3 |
| 2 | 1760 | 1670 | 3 | 2,1 | 5,9 | 4,9 | 1958 | 1310 | 8,4 | 5,8 |
| 2 | 1760 | 1760 | 2,7 | 2,5 | 5,7 | 5,3 | 1873 | 1588 | 7,9 | 6,8 |

***Tabla 3***
***Datos originales registrados en el ensayo con dos propulsores***
***(ensayo 5.2.2)***

*Leyenda:*

*Vlf.p = Velocidad lineal del fluido en m/s a la altura del propulsor 2.*

*RPM1 = Revoluciones por minuto del rotor del motor 1 (extraída del display del variador de frecuencia).*

*RPM2 = Revoluciones por minuto del rotor del motor 2 (extraída del display del variador de frecuencia).*

*IG1 = Corriente en amperios consumidos por el motor 1 con lectura realizada en una de las fases de salida del generador.*

*IG2 = Corriente en amperios consumidos por el motor 1 con lectura realizada en una de las fases de salida del generador.*

*IM1 = Corriente en amperios del motor 1 (extraída del display del variador de frecuencia).*

*IM2 = Corriente en amperios del motor 2 (extraída del display del variador de frecuencia).*

*P1 = Potencia consumida en watt del motor 1 en la condición correspondiente (extraída del display del variador de frecuencia).*

*P2 = Potencia consumida en watt del motor 2 en la condición correspondiente (extraída del display del variador de frecuencia).*

*Par1 = Par en Nm del motor 1 en la condición correspondiente (extraída del display del variador de frecuencia).*

*Par2 = Par en Nm del motor 2 en la condición correspondiente (extraída del display del variador de frecuencia).*

En las siguientes gráficas se intenta comparar el consumo de corriente en una de las fases de la salida del generador, potencias y pares entre el propulsor que arrastra y genera el movimiento del fluido (propulsor 1) y el propulsor que se caracteriza en un fluido cuya velocidad ya es de 2m/s (propulsor 2).

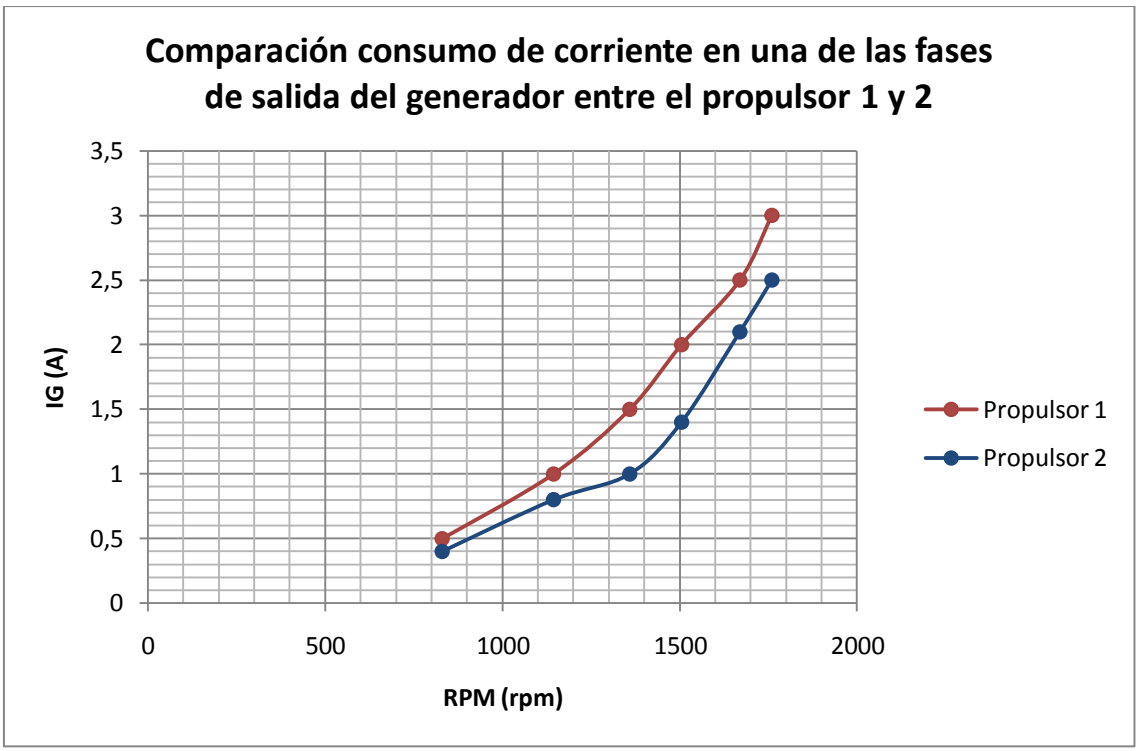



***Figura 66**: Comparación corriente entre propulsor 1 y 2, del ensayo 5.2.2*

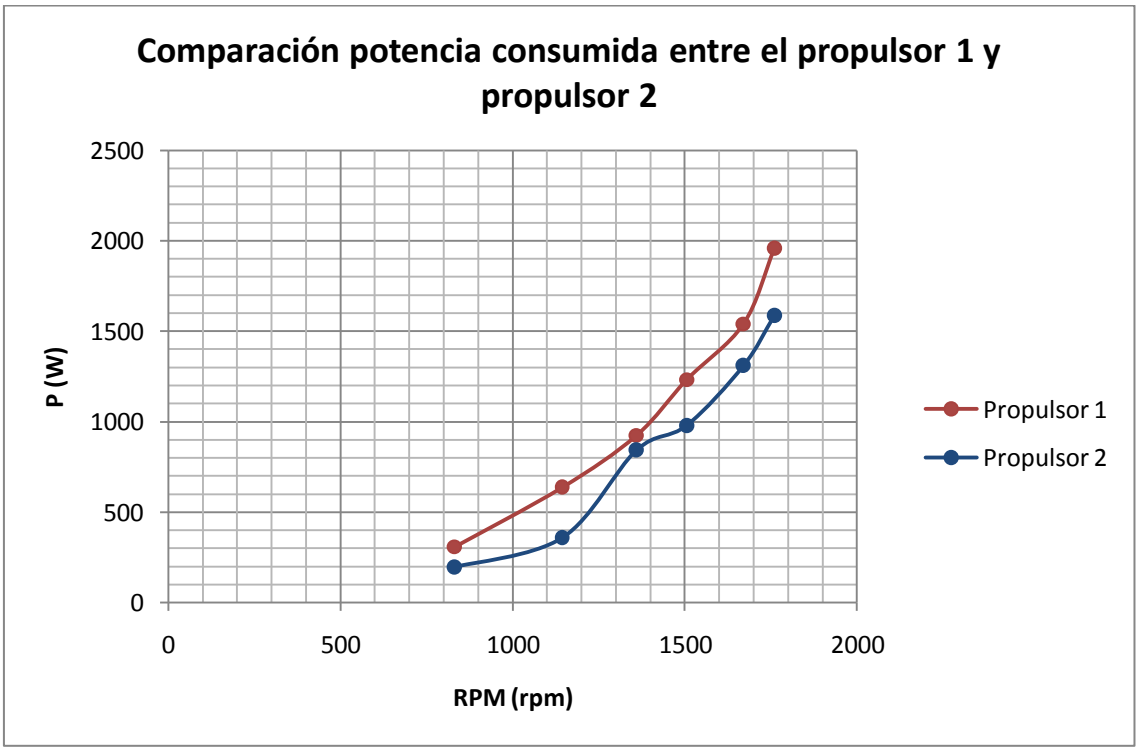



***Figura 67**: Comparación potencia consumida entre propulsor 1 y 2, del ensayo 5.2.2*

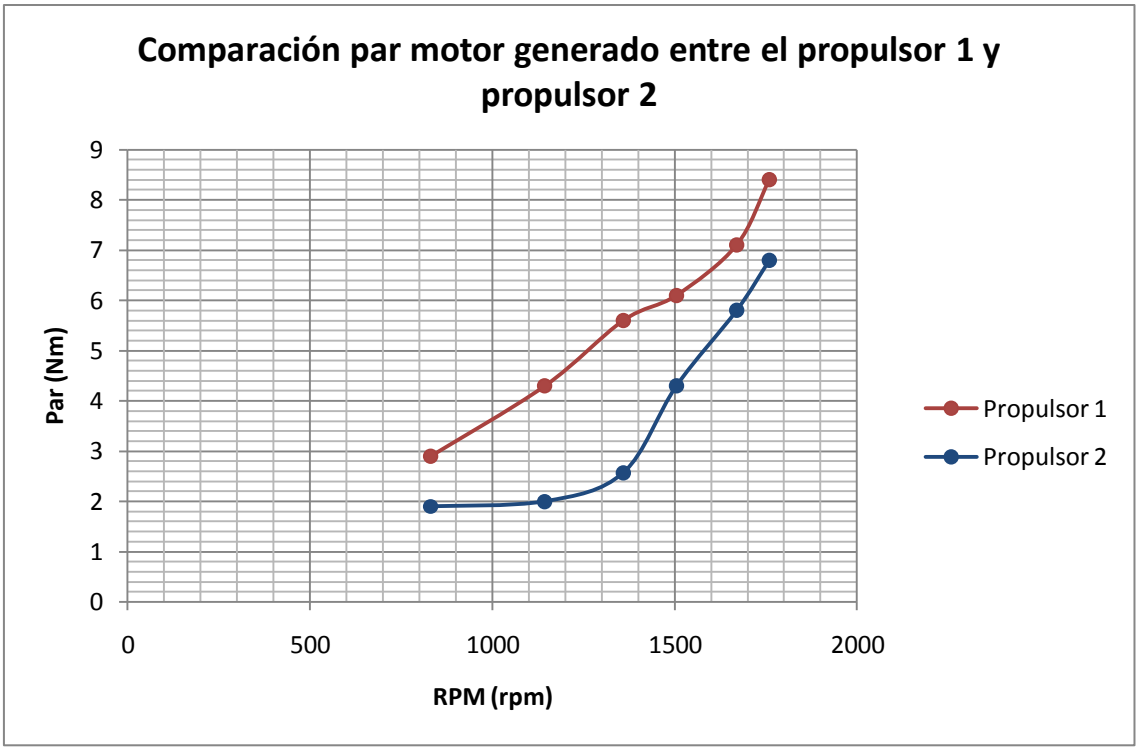



***Figura 68*: Comparación par motor entre propulsor 1 y 2, del ensayo 5.2.2**

Conclusiones del ensayo

Tal i como se puede apreciar en las graficas adjuntas en los resultados de este ensayo, existe un ligero descenso del consumo de la corriente del propulsor 2 al ser arrastrado por el agua, y por tanto, también queda reflejado en la potencia consumida.

Es el par el que se ve más afectado, ya que prácticamente no aumenta hasta que el propulsor no pasa de las 1300rpm. A bajas revoluciones se llega a reducir el par hasta un 40% respecto al registrado en el propulsor 1. En comparación, la potencia solo llega a reducirse un 15% respecto a la registrada en el propulsor 1.

### 5.2.3 Ensayo con un propulsor colocado verticalmente

El fin de este ensayo es caracterizar un propulsor situado verticalmente. Con esto se pretende obtener resultados orientativos para la utilización de un propulsor vertical como estabilizador dinámico en embarcaciones. Tal y como se ha descrito anteriormente, la estabilización de una embarcación cuando esta tiene una velocidad no es difícil y se logran buenos resultados con los estabilizadores convencionales y los flaps, sin embargo, cuando la embarcación se encuentra en reposo solo ofrecen algún resultado los llamados giroscópicos.

Siendo unos propulsores colocados verticalmente (por ejemplo 2 en popa a cada costado y uno en proa), mediante un driver que los controle y que sea capaz de analizar la posición y balanceo instantáneo de la embarcación, podría llegar a reducirse mucho el balance tan molesto que se produce con el oleaje cuando la embarcación esta en reposo. La idea es que cada uno de estos propulsores sea capaz de generar un momento sobre la embarcación capaz de adrizar-la, manteniendo el estado de reposo incluso cuando está pasando una ola.

<u>Condiciones y procedimiento del ensayo</u>

Para este ensayo se ha utilizado la estructura vertical soportada en la botavara (EST4). El propulsor que se va a utilizar es el conjunto montado con el motor ABB *(motor2)* y la hélice HSN de bronce de 4 palas de 330,2mm de diámetro y 177,8mm de paso *(hélice2)*.

El propulsor va a ir colgado de la grúa del laboratorio con un dinamómetro para poder calcular el empuje que va a generar y conectado a la línea del propulsor de babor. A su vez, el propulsor correrá libremente por dentro de la estructura vertical de modo que esta simplemente sirve como guía.

Durante el experimento surgen algunas dificultades que se irán resumiendo a continuación, sin embargo, cabe destacar que después de realizar una primera prueba, obliga a cambiar algunas de las condiciones iniciales, pasando el propulsor y la estructura del centro a la periferia de la piscina. Por este motivo, el primer ensayo en el cual el propulsor y la estructura se encuentran el centro lo llamaremos "ensayo A". El segundo ensayo, en el que el propulsor y la estructura se encuentran en la periferia lo llamaremos "ensayo B".

Las condiciones iniciales del ensayo A son las siguientes:

- Nivel de agua en la piscina de 350mm.

- Estructura situada aproximadamente en el centro de la piscina.

- Masa del conjunto del propulsor inicialmente registrado en el dinamómetro sin encender el propulsor 55kg.

- La hélice queda a unos 170mm de altura desde el fondo de la piscina.

Las condiciones iniciales del ensayo B son las siguientes:

- Nivel de agua en la piscina de 350mm.

- Estructura situada lo más alejada posible del centro de la piscina, quedando el eje del propulsor a unos 350mm de la periferia.

- Masa del conjunto del propulsor inicialmente registrado en el dinamómetro sin encender el propulsor 55kg.

Hay que tener en cuenta que los variadores instalados en la embarcación RAS son para los motores Tesla, por lo que este propulsor solo se puede conectar en mando directo.

El procedimiento que se sigue en el ensayo es muy simple. Una vez se encuentra todo preparado y el propulsor en el centro de la piscina se arranca en mando directo y se registran todos los datos más significativos como consumos de corriente y empuje generado por el propulsor en vertical. Después de esto, se pasa el propulsor a la periferia por los motivos que se agrupan en los resultados y se ensaya de nuevo y del mismo modo pero a dos alturas diferentes.

Resultados del ensayo A:

Con la hélice a 170mm del fondo se registra en un primer instante que la lectura del dinamómetro pasa a ser de 20kg, por tanto, el empuje vertical generado por el propulsor en estas condiciones es de 35kg.

Después de tener aproximadamente 1 minuto el motor en marcha aparece un nuevo fenómeno: el agua entra en resonancia subiendo y bajando el nivel (como una batidora), de modo que el empuje vertical que genera el propulsor empieza a variar también. Se estima que la oscilación del agua tiene un período de aproximadamente 1 segundo. Mientras se produce este efecto se registran unos consumos de 2,8 amperios de pico en una de las fases y una oscilación de entre 2 y 2,5 amperios en la misma fase. A continuación, el fluido empieza a girar y coger velocidad en la piscina y el propulsor empieza a generar cada vez menos empuje hasta que este es 0.

A causa de este fenómeno se replantea el ensayo y se propone pasar a ensayar el propulsor lo más alejado posible del centro de la piscina. Con esto se pretende evitar que el agua empiece a subir y bajar, y al mismo tiempo dificultar su giro.

Dado el resultado obtenido se replantea el ensayo y se pasa a provar la misma metodología pero trasladando la estructura y el propulsor a la periferia. Con esto se pretende evitar que el agua empiece a subir y bajar, y al mismo tiempo dificultar su giro. Además se realizarán dos pruebas con distintas alturas del propulsor para tener una referencia de cuan critica es la profundidad a la que queda la hélice.

Con esto se vuelven a anotar las nuevas condiciones iniciales.

Resultados del ensayo B:

Después del fenómeno que aparece en el ensayo A se coloca el propulsor y la estructura que sirve como guía lo más a la periferia posible de la piscina.

Esta vez sin embargo, se va a realizar el ensayo en dos partes. Primero el propulsor se va a dejar a 100mm del fondo, de modo que la columna de agua que tiene por encima es de unos 250mm. A continuación, y en condición de finalizar el experimento, se va a realizar el ensayo con la hélice a 150mm del fondo, de modo que la columna de agua que le queda por encima es de unos 200mm.

Con esta configuración se registra un empuje vertical del propulsor de 55kg y un consumo de corriente de 4A cuando la hélice se encuentra a 100mm del fondo; por otro lado, se registra un empuje de 35kg de empuje vertical y un consumo de 4,2A cuando el propulsor se encuentra a 150mm del fondo.

En la siguiente tabla se intentan agrupar los resultados en función de la altura del propulsor y la situación de la estructura en la piscina:

| Distancia entre la hélice y el fondo de la piscina | Situación de la estructura en la piscina | Corriente registrada en una de las fases de salida del generador | Empuje vertical | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| 170mm | Centrada | 2,8A | 35kg | Con esta configuración el agua empieza a girar, reduciendo el empuje que genera el propulsor |
| 100mm | En la periferia | 5A | 55kg | El flujo del agua es turbulento pero sin afectar al régimen del propulsor |
| 150mm | En la periferia | 4,2A | 35kg | El flujo del agua es turbulento pero sin afectar al régimen del propulsor |

***Tabla 4***
***Datos originales registrados en el ensayo con el propulsor vertical (ensayo 5.2.3)***

*<u>*Fallo del propulsor al acabar el segundo ensayo</u>*

*Mientras se realizó el segundo ensayo, estando el propulsor en estado estacionario y el flujo estabilizado el consumo de corriente se disparó hasta los 30A y por tanto se procedió al apagado del propulsor. No saltó ninguna protección. Al volverlo a encender la corriente vuelve a subir hasta los mismos valores y la hélice gira muy lentamente, por tanto desconectamos la instalación.*

*Se hizo una comprobación sin detectar el motivo de este comportamiento, se hizo una prueba en vacío dando como resultado un comportamiento normal. Se revisa la conexión del propulsor buscando alguna anomalía sin encontrarla. En vacio, la hélice gira libremente con normalidad. Se instala uno de los motores Franklin y se prueba la instalación dando un comportamiento normal y esperado. El problema debía estar en la línea entre la conexión macho y el propulsor y dado el comportamiento parece un fallo en la estanqueidad del mismo.*

<u>Conclusiones del ensayo</u>

En este ensayo se ha pretendido conocer el comportamiento de un propulsor colocado en vertical de cara a la utilización de los mismos como estabilizadores dinámicos para embarcaciones en reposo.

El resultado fue prometedor ya que se consiguieron unos empujes de 55kg de empuje con un propulsor lento de 1000rpm y una hélice de 330mm de diámetro y 177mm de paso.

Cabe destacar que la altura del propulsor, y por tanto, la columna de agua que queda por encima de la hélice es muy significativa. Tal y como se ve en los ensayos, con una simple variación de 50mm el empuje llega a reducirse alrededor de uno 20kg, lo que significa una reducción de empuje de hasta un 40%.

Posiblemente podría plantearse otro ensayo con una columna de agua superior a los 150mm y ver si se puede aumentar aún más el empuje vertical generado.

### 5.2.4 Ensayo con un propulsor que acelera el agua para poder caracterizar un hidrogenerador

Hasta el día de hoy los únicos hidrogeneradores disponibles comercialmente para el aprovechamiento de energía en una embarcación, son dispositivos mixtos de aerogeneración e hidrogeneración que por lo general son muy voluminosos y de baja potencia. Además, suponen un estorbo al tener un elemento en la popa, que puede dificultar el gobierno de la embarcación.

En este ensayo se pretende caracterizar un motor brushless que lleva instalado en su rotor una hélice. La idea es que este propulsor pueda ir instalado por ejemplo en el casco de la embarcación a modo de propulsor azimutal, en vez del convencional eje con hélice. A su, vez este motor puede utilizarse para propulsión en maniobra o bien como generador durante la navegación a vela.

Condiciones y procedimiento

En este ensayo se va a utilizar el motor Mavilor BF-083 *(motor3).*

Se van a ensayar dos hélices totalmente distintas, por lo que vamos a dividir los resultados como ensayos A y B, en función de la hélice que se utilice para caracterizar el hidrogenerador:

- Ensayo A; se va a instalar en el eje del motor Mavilor BF-083 una hélice de bronce de 200mm de diámetro y un paso de 264mm *(hélice3).*

- Ensayo B; se va a instalar en el eje del motor Mavilor BF-083 una hélice de aluminio de 450mm de diámetro y un paso de 600mm *(hélice4).*

Para poder llevarlo a cabo, se utiliza un propulsor Tesla GF420T353 *(motor1)* para que acelere el agua con una hélice de 3 palas HSN modelo HSN2071962 08X05 de 203,2mm de diámetro y 127mm de paso *(hélice1)* acoplada directamente en el eje de su rotor. El hidrogenerador Mavilor va a ir instalado en la estructura pivotante de la mesa (EST5) y el propulsor en la estructura dinamométrica de la botavara (EST3). Se colocan ambas estructuras desfasadas 90º respecto del eje de la piscina.

Las condiciones iniciales del ensayo A son las siguientes:

- Nivel de agua en la piscina de 350mm.

- Altura del eje del propulsor respecto del fondo de la piscina de 135mm.

- Altura del eje del hidrogenerador respecto del fondo de la piscina de 135mm.

- Propulsor a unos 300mm de la periferia de la piscina, es decir, a unos 2700mm del centro de la piscina.

- Hidrogenerador a unos 300mm de la periferia de la piscina, es decir, a unos 2700mm del centro de la piscina.

- Se utiliza una hélice de bronce de 200mm de diámetro y un paso de 264mm *(hélice3)*.

Las condiciones iniciales del ensayo B son las siguientes:

- Nivel de agua en la piscina de 350mm.

- Altura del eje del propulsor respecto del fondo de la piscina de 135mm.

- Altura del eje del hidrogenerador respecto del fondo de la piscina de 255mm.

- Propulsor a unos 300mm de la periferia de la piscina, es decir, a unos 2700mm del centro de la piscina.

- Hidrogenerador a unos 300mm de la periferia de la piscina, es decir, a unos 2700mm del centro de la piscina.

- Se utiliza una hélice de aluminio de 450mm de diámetro y un paso de 600mm *(hélice4).*

Una vez preparado todo el equipo, se procede a empezar el experimento. En ambos ensayos (A y B) se procede del mismo modo. Se va acelerando el agua poco a poco mediante el propulsor Tesla mientras se anotan los valores de tensión en vacío y al final se hace una prueba para conocer la corriente de cortocircuito.

Resultados del ensayo A:

Los parámetros relevantes que se han tomado durante el ensayo se agrupan en la siguiente tabla. A partir de las tensiones y conociendo el valor de $K_E = 0{,}4\ V \cdot s/rad$ se pueden estimar las revoluciones del eje a esa velocidad. También se incluyen en la tabla el nivel de estabilidad de la tensión a esa velocidad.

| Velocidad del fluido (m/s) | $V_0$ Mavilor | Variación $V_0$ | Rad/s Mavilor | RPM Mavilor |
|---|---|---|---|---|
| 0,92 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,99 | 4,9 | Inestable | 12,25 | 117 |
| 1,12 | 8 | Inestable | 20 | 190 |
| 1,25 | 10,5 | +- 1V | 26,25 | 250 |
| 1,44 | 14 | +- 1V | 35 | 334 |
| 1,76 | 18 | +- 1V | 45 | 430 |
| 1,92 | 20 | +- 1V | 50 | 477 |
| 2,16 | 22 | +- 1V | 55 | 525 |

***Tabla 5***
***Datos originales registrados en el hidrogenerador con la hélice de bronce instalada (ensayo 5.2.4)***

Se realiza un ensayo de cortocircuito a una velocidad del fluido de 1,92m/s pero al realizarla la hélice se para, dando un corriente de cortocircuito de 0A. Se puede deducir por tanto que la hélice no es la más adecuada ya que el paso de la hélice no es suficientemente largo para mantenerse girando en el ensayo de cortocircuito.

Resultados del ensayo B:

Los parámetros relevantes que se han tomado durante el ensayo se agrupan en la siguiente tabla. A partir de las tensiones y conociendo el valor de $K_E = 0{,}4\ V \cdot s/rad$ se pueden estimar las revoluciones del eje a esa velocidad. También se incluyen en la tabla el nivel de estabilidad de la tensión a esa velocidad.

| Velocidad del fluido (m/s) | $V_0$ Mavilor | Variación $V_0$ | Rad/s Mavilor | RPM Mavilor |
|---|---|---|---|---|
| 0,92 | 2,1 | +- 1V | 5,25 | 50 |
| 1,25 | 5,6 | +- 1V | 14 | 134 |
| 1,44 | 6,5 | +- 1V | 16,25 | 155 |
| 1,76 | 7 | +- 1V | 17,5 | 167 |
| 1,92 | 8 | +- 1V | 20 | 191 |
| 2,08 | 8,5 | +- 1V | 21,25 | 203 |

***Tabla 6***
***Datos originales registrados en el hidrogenerador con la hélice de aluminio instalada (ensayo 5.2.4)***

Se realiza un ensayo de cortocircuito cuando hay una velocidad del fluido de 1,92m/s dando una corriente de cortocircuito de 0,25A y la tensión pasa a ser de 0,5V.

**Arañazo en fondo de la piscina y vaciado de la misma.*

*En el proceso de finalización de este ensayo se produjo un arañazo de unos 15cm$^2$ justo debajo de la hélice del hidrogenerador.*

*Este arañazo provocó una fuga bastante grande de agua siendo imposible sellarla bien sin que la piscina este vacía y seca, por tanto, se vacía del todo y se deja secar para posteriormente poder repararla.*

*Se comprueba que la estructura en la que está instalado el hidrogenerador no ha podido ceder, permitiendo que este baje hasta el fondo. La hipótesis es que con la velocidad del fluido arrastrando y haciendo girar la hélice del hidrogenerador, se ha generado suficiente succión como para levantar el fondo de la piscina hasta llegar a cortarla.*

*Se advierte también que durante el secado de la misma se han detectado otros arañazos más pequeños de 1 o 2 cm$^2$ en su mayoría por toda la superficie de la piscina.*

Conclusiones del ensayo

Después de hacer las primeras pruebas con el hidrogenerador se obtuvieron resultados interesantes.

En primer lugar hay que destacar que las hélices utilizadas no fueron del todo adecuadas. La primera de bronce tenía muy poco diámetro y poco paso, con lo que solo se logró una tensión en vacío de unos 20V y al hacer el ensayo de cortocircuito la hélice se frenó. En la hélice de aluminio logramos algo más prometedor para el ensayo de cortocircuito, sin embargo, una tensión en vacío menor que con la otra hélice a pesar de tener más paso. Esto se debe posiblemente a causa del gradiente de velocidad que se forma al trabajar con una piscina de poco diámetro y una hélice tan grande. Además también puede afectar el hecho que al ser una hélice con mucho diámetro, el nivel de agua no llegaba a cubrirla por completo, una parte de la hélice no trabaja sumergida.

En cuanto a la estructura soportó perfectamente, pero sería recomendable lastrar la mesa en futuros ensayos.

## *5.3 Análisis térmico de la instalación y el grupo electrógeno*

En este apartado se hace una colección de las lecturas térmicas que se han ido realizando en los ensayos. La embarcación RAS lleva escritas las temperaturas en diferentes puntos, sin embargo, las lecturas que se han ido realizando en los ensayos de este proyecto son superiores a las generalmente determinadas por la embarcación. Se deduce entonces que la lectura de las antiguas temperaturas se había realizado encontrándose el grupo electrógeno al ralentí, las que se van a mostrar a continuación, en cambio, se realizaron después de tener el grupo electrógeno funcionando durante bastante tiempo y con un consumo de corriente importante.

Para hacer esta lectura térmica se utilizó una cámara térmica de infrarrojos FLIR i5. A continuación se muestran algunas de las imágenes tomadas junto a una fotografía de la zona donde se hizo la lectura térmica y un breve comentario.

- Muelles utilizados para la lectura dinamométrica en la estructura dinamométrica de la botavara. No se aprecia un aumento de temperatura considerable después de estar trabajando intensamente:

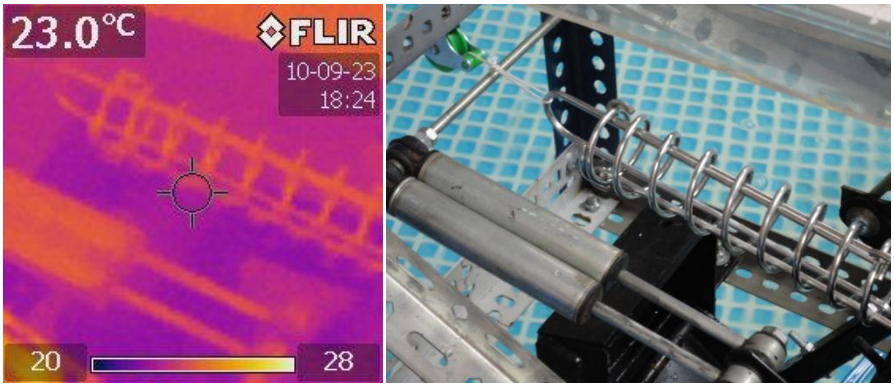



***Figura 69**: Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara*

- Depósito de combustible en el interior de la embarcación. Después de funcionar un tiempo considerable, la lectura térmica es inferior a los 60ºC anotados en el depósito:

***Figura 70**: Imágenes térmica y normal del depósito de combustible del grupo electrógeno*

- Cableado en la parte de popa del grupo electrógeno. Al ser una zona poco ventilada y estar tan cerca del grupo electrógeno la temperatura de los cables es bastante elevada:

***Figura 71*: Imágenes térmica y normal de los cables a popa de la embarcación**

- Conexiones e interruptores automáticos en el interior de la embarcación. Como se puede ver en la imagen, hay una de las conexiones que tiene un ligero aumento de temperatura respecto a las otras. El resto de conexiones e interruptores tenian una temperatura normal:

***Figura 72*: Imágenes térmica y normal de los interruptores y conexiones de la embarcación**

- Cableado en la zona de conexiones e interruptores automáticos. Todos los cables presentaron una temperatura normal. La parte con temperatura más elevada correspondía a la plancha del lado de babor de la embarcación:

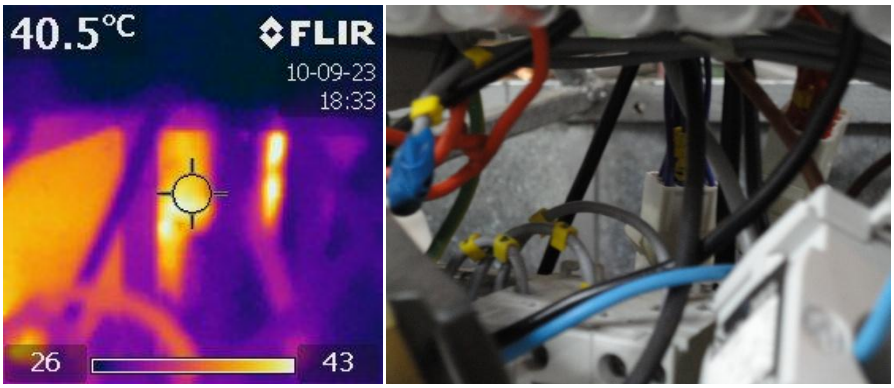



***Figura 73*: Imágenes térmica y normal del cableado de los interruptores y conexiones de la embarcación**

- Panel de instrumentos de la embarcación y vista general de conexiones e interruptores. No se apreció ningún punto con mayor temperatura de lo normal. Únicamente tenía una temperatura ligeramente superior el instrumento de la corredera por tener la bombilla dentro:

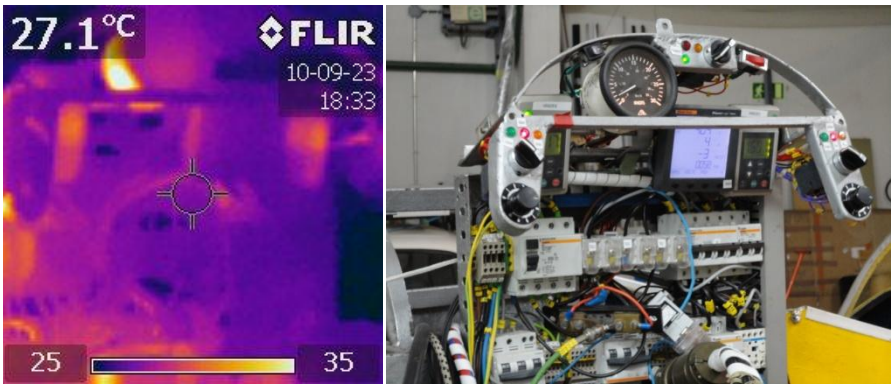



***Figura 74*: Imágenes térmica y normal del panel de instrumentos**

- Cubierta negra del generador. No había ninguna inscripción de temperatura en ese punto y resultó ser uno de los más calientes de toda la embarcación, siendo esta mayor de 270ºC:

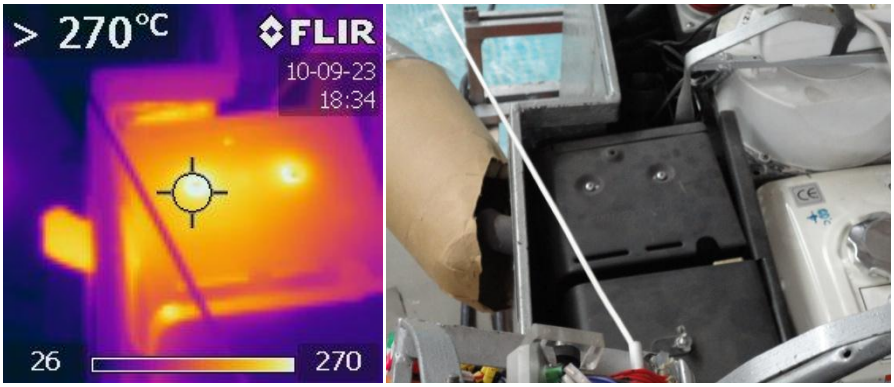



***Figura 75*: Imágenes térmica y normal de la cubierta negra del grupo electrógeno**

- Juntas de la chapa del costado de babor de la embarcación:

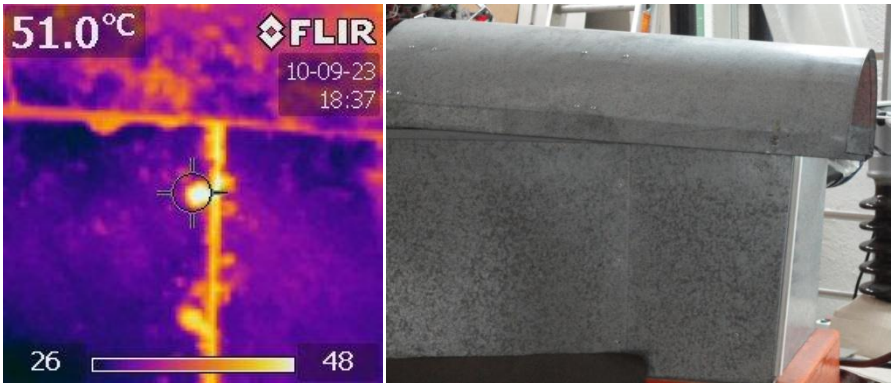



***Figura 76*: Imágenes térmica y normal de la chapa del costado de la embarcación**

- Cubierta superior de chapa de la embarcación:

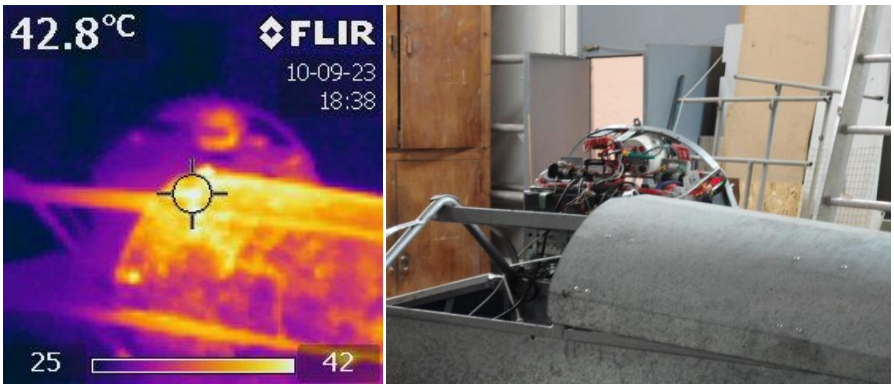



***Figura 77*: Imágenes térmica y normal de la chapa superior de la embarcación**

- Conexión del cable del propulsor de babor de la embarcación. No se apreció aumento anormal de la temperatura:

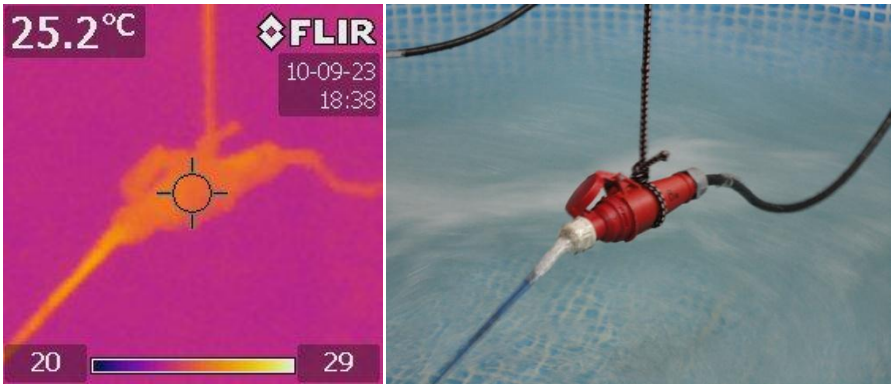



***Figura 78*: Imágenes térmica y normal de la conexión del propulsor de babor**

- Conexión del cable del propulsor de estribor de la embarcación. No se apreció aumento anormal de la temperatura:

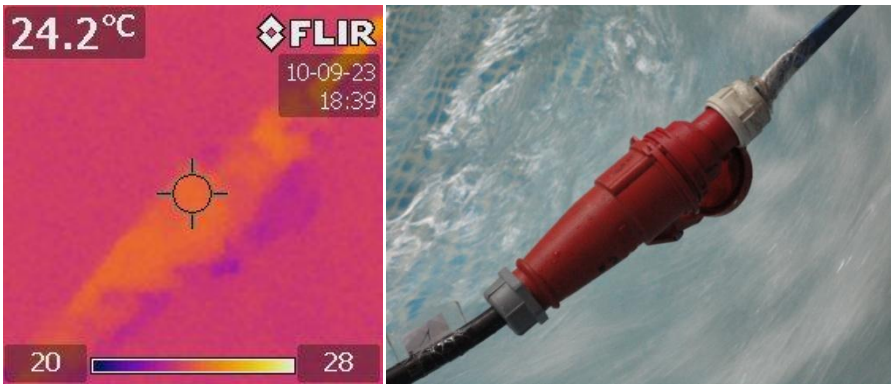



***Figura 79*: Imágenes térmica y normal de la conexión del propulsor de estribor**

- Tensor de la estructura de popa de los propulsores. Tenía un ligero aumento de temperatura respecto a la ambiental, posiblemente debido a las vibraciones:

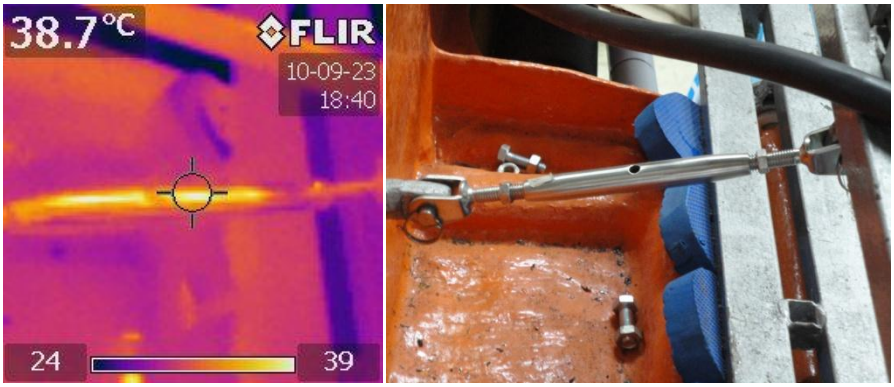



***Figura 80*: Imágenes térmica y normal del tensor de la estructura de popa de la embarcación**

- Compartimento interior del grupo electrógeno con la cuberita cerrada:

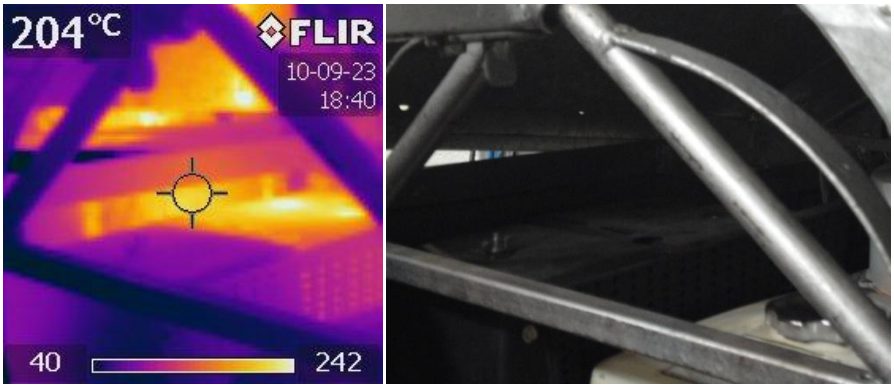



***Figura 81*: Imágenes térmica y normal del compartimento cerrado de la embarcación (grupo electrógeno)**

- Escape del grupo electrógeno. Tal y como se puede observar hay anotado que la temperatura en esa zona debería ser de 100ºC mientras que la lectura térmica dio que era de 252ºC en el punto más caliente:

***Figura 82*: Imágenes térmica y normal del escape del grupo electrógeno**

- Estructura tubular a proa de la cubierta del grupo electrógeno:

***Figura 83*: Imágenes térmica y normal de la estructura de la embarcación**

- Cuberita del grupo electrógeno:

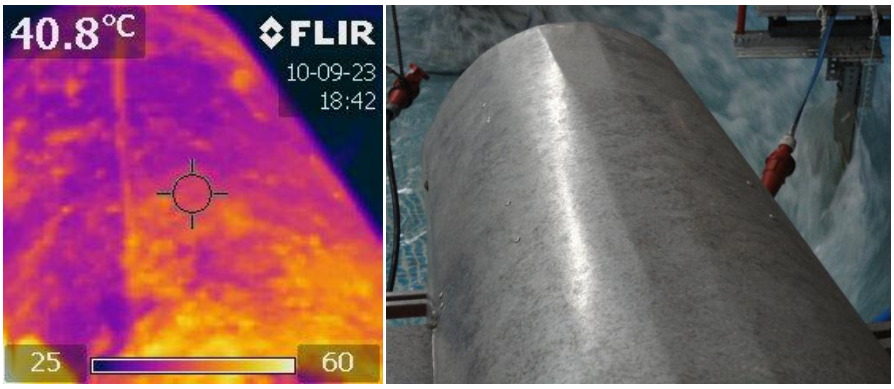



***Figura 84*: Imágenes térmica y normal de la cubierta superior de la embarcación**

- Sistema de extracción de gases del laboratorio:

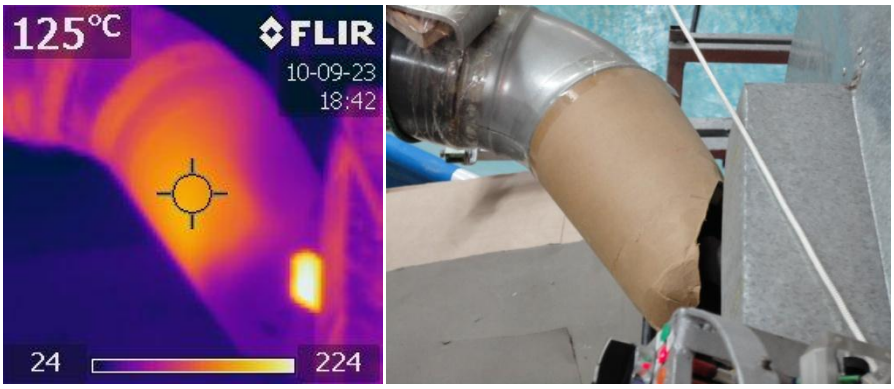



***Figura 85*: Imágenes térmica y normal del sistema de extracción de gases del laboratorio**

# ***6. CONCLUSIONES***

Como conclusiones finales de este proyecto se pueden dividir varios grupos.

En cuanto a las estructuras que se han montado y utilizado:

- La piscina (EST1), tal y como se la ha mencionado anteriormente, ha supuesto una gran limitación en cuanto a la velocidad máxima del fluido que se podía alcanzar al caracterizar un propulsor. Por otro lado, a causa de su elasticidad y poca resistencia, ha acabado arañada en varios puntos tanto por las hélices como por el hecho de trabajar cerca de ella.

- La estructura dinamométrica abatible fijada sobre una mesa (EST2), que era la modificación de una que se había construido en el proyecto de Vicenç Olivella y Jordi Pou "Sistema de propulsió elèctrica de 6,5 kVA per embarcacions", no ha resultado viable. Las bisagras que se instalaron para hacerla abatible cedieron a causa del empuje del propulsor. Al ver la necesidad de una estructura más resistente para poder probar propulsores mayores, se replanteo una nueva desde cero en vez de reparar esta.

- La estructura dinamométrica sobre una botavara (EST3) ha resultado ser la más fiable durante este proyecto, tanto por su rigidez como por su versatilidad. Permite ensayar propulsores relativamente grandes sin problemas y si se desea hacer lecturas de empuje mayores, basta con poner unos mulles más duros. El único inconveniente es la necesidad de calibrarla dinamométricamente cada vez que se va a realizar una prueba y que hay que lastrarla para impedir su movimiento en la dirección radial. Además, al ir instalada en la botavara permite una gran movilidad y maniobrabilidad, permitiendo levantar pesos considerables con sus sistema de poleas.

- La estructura para el ensayo del propulsor ABB en vertical (EST4), que es una modificación de la que había construido Pedro González Melis es una estructura muy simple y fiable sin partes móviles. Ha dado buenos resultados dentro de los fines para que había estado diseñada, servir como guía vertical al propulsor ABB. Al mismo tiempo, al ir colgada de la botavara, era muy fácil su movimiento y maniobra mediante el sistema de poleas.

- La estructura pivotante en mesa y extraíble (EST5) resulta ser una estructura bastante cómoda en cuanto a utilización. Además, no tiene apéndices planos que frenen el agua. Uno de sus principales problemas es que cada vez que se quiere utilizar hay que levantarla para ponerla dentro la piscina y después volver a sacarla. A pesar de poder realizarse la operación entre 2 personas, el conjunto tiene un peso considerable y es más recomendable utilizar la grúa. Para futuros ensayos sería conveniente el diseño de algún sistema para poder realizar la lectura dinamométrica del empuje.

En cuanto a las hélices, cabe destacar que los propulsores Tesla trabajan por encima del par nominal que indica el fabricante, por lo que habría que valorar si son adecuadas o no en función de la utilidad que se vaya a dar a los propulsores. Las hélices que se han ensayado con el hidrogenerador no se podría decir que son las más adecuadas por su bajo paso. Sin embargo, habría que realizar un nuevo ensayo con mayor nivel de agua y la hélice de aluminio y analizar si hay variaciones respecto a los resultados obtenidos en este proyecto.

En cuanto al análisis térmico que se ha realizado, hay que valorar las lecturas térmicas que se han tomado respecto a las que hay escritas en la embarcación. Sería conveniente etiquetar los puntos más calientes como medida de seguridad.

# *7. FUTURAS LINEAS DE DESARROLLO*

En este apartado se van a resumir algunas de las ideas que se han planteado como continuación de este proyecto y poder sacar más resultados y con mayor precisión

Estas ideas las vamos a dividir según el tema que tratan:

Tanque de ensayo

Tal y como se ha calculado en el apartado 5.1.1, la piscina ha supuesto una limitación en cuanto a la velocidad del fluido que se puede alcanzar.

Habría que valorar la construcción de una de mayor diámetro y más altura, en función de la velocidad que se quiera llegar a conseguir. En el mismo apartado se hacen los cálculos para piscinas de 5 y 10 metros de diámetro dando como resultados teóricos entre los 10 y 15 nudos

Otro aspecto a tener en cuenta es que la piscina es de un material plástico muy poco resistente. Esto implica que cuando la velocidad del fluido aumenta las paredes de la piscina empiezan a deformarse. Además, tal y como hemos podido comprobar, ensayando con hélices es muy fácil que se produzca un corte y tener una fuga de agua grande.

Lo más adecuado sería plantear un nuevo tanque de mayor diámetro y a poder ser rígido de algún material más resistente, como chapa galvanizada corrugada. Además también se podría incluir un sistema para provocar pérdidas de carga y frenar la velocidad del fluido en caso de necesidad para futuros ensayos.

Corredera

Otro de los problemas que se han encontrado es para medir la velocidad instantánea del fluido. Se disponía de la corredera de la embarcación RAS, pero esta es muy imprecisa y de baja fiabilidad. En este proyecto el método que se utilizó fue soltar una partícula flotante en el agua que giraba y gravarlo para posteriormente calcular el tiempo que tarda en dar una revolución, y a partir de ahí la velocidad lineal. Resultó ser un método bastante fiable, sin embargo, es dificultoso conocer la velocidad del fluido mientras se está realizando el ensayo con una buena exactitud.

Se propone buscar un nuevo sistema para calcular esta velocidad, ya sea con una corredera de mano nueva, fabricar una o plantear un nuevo método de medida.

Ensayo de otras hélices más adecuadas

Recordamos que en los ensayos de los propulsores formados por el motor Tesla (motor1) y la hélice HSN de 3 palas (hélice1), el par subía hasta el 135% del nominal, mientras que la potencia solo se encontraba al 89% del nominal. Habría que plantear ensayos con nuevas hélices que logren nivelar mas estos valores.

Por otro lado, la hélices del hidrogenerador que se han ensayado dan un voltaje muy bajo porque solo llegamos a las 500rpm de las 11000 máximas capaces por el motor, dando un voltaje de unos 20V. Habría que plantear en este caso ensayos con hélices de mayor paso para lograr más revoluciones y más tensión.

Sistema de extracción de gases de escape del laboratorio

Durante los últimos ensayos realizados en este proyecto, después de tener el grupo electrógeno mucho tiempo en funcionamiento, se deshizo el plástico que conduce los gases al exterior del laboratorio.

En una futura reparación sería preferible utilizar algún material resistente a la temperatura, por lo menos en el primer tramo de conducto para que no se deshaga.

# *8. BIBLIOGRAFÍA*


## *Libros:*

V.Lewis; **Principles of Naval Architecture**; Ed. SNAME

P. A. Tipler, G. Mosca; **Física para la ciencia y la tecnología**; Ed. Reverté; Barcelona 2005

F. M. White; **Mecánica de Fluidos**; Ed. McGraw Hill 2005

O. Boix, F. Corcoles, L. Sainz, F. J. Suelves; **Tecnología eléctrica**; Ceysa edicions; Barcelona 2002

J. V. Meizoso; **Principios de ingeniería naval**; Tórculo edicions 1997

P. Casals, R. Bosch; **Máquinas eléctricas, aplicaciones de ingeniería eléctrica a instalaciones navales y marinas**; Edicions UPC; Barcelona 2005

I. H. Shames; **Mecánica de Fluidos**; Ed. McGraw Hill; Colombia 1995

R. Arguelles; **Cálculo de estructuras**; Madrid 1991

R. J. Perez; **Diccionari de l'aparell i velam dels grans velers**; Barcelona 2006

J. Martell, A. Rodriguez; **Elementos de máquinas**; Madrid 1983

V. L. Streeter; **Mecánica de fluidos**; Ed. McGraw Hill; 9a Edición 2000

## *Manuales:*

6. Manual del motor Mavilor BF-083

7. Manual del motor Tesla GF420T353

## *Páginas web:*

http://www.mavilor.es (consultado en agosto y octubre de 2010)

http://www.franklin-electric.com (consultado en agosto y octubre de 2010)

http://www.abb.es(consultado en agosto y octubre de 2010)

***Proyectos de referencia:***

**Diseño y construcción del sistema de propulsión eléctrica de un catamarán de 3,4m** (Albert Peregrina Velasco; 2007)

**Sistema de propulsió elèctrica de 6,5kVA per embarcacions** (Vicenç Olivella Blanco y Jordi Pou Prtadesaba; 2006)

**Hacia el barco de propulsión eléctrica** (Gabriel Riera Navarro; 2007)

# *9. ANEXOS*

## *9.1 Documentos anexos*

Los documentos anexos de este proyecto van incluidos en soporte digital (CD adjunto a este trabajo). En él se incluyen los siguientes archivos:

1. Imágenes

En el nombre del archivo viene definido el numero de la foto y del día que es, por ejemplo:

*"jpg 18.09.2010 (3)"* será la tercera imagen tomada el día 18 de octubre del 2010.

A continuación se plantea un pequeño índice de las imágenes facilitadas con una breve descripción:

1. jpg 01.09.2010 (1) - Estructura vertical con el propulsor instalado, en el centro de la piscina

2. jpg 01.09.2010 (2) - Detalle del propulsor situado en el centro de la piscina.

3. jpg 01.09.2010 (3) - Vista general del conjunto de la estructura vertical y el propulsor aguantados por la grúa del laboratorio.

4. jpg 05.08.2010 (1) - Detalle del flujo del agua en el ensayo con un solo propulsor.

5. jpg 05.08.2010 (2) - Detalle del flujo de agua sobre el propulsor en el ensayo con un solo propulsor

6. jpg 05.08.2010 (3) - Vista general del flujo de agua en la descarga del propulsor en el ensayo con un solo propulsor

7. jpg 05.08.2010 (4) - Sistema de filtrado de agua instalado en la piscina para limpiar el agua

8. jpg 05.08.2010 (5) - Lastre utilizado para evitar el movimiento radial de la estructura dinamométrica de la botavara

9. jpg 05.08.2010 (6) - Detalle de la estructura dinamométrica de la botavara i el motor Tesla instalado y preparado para ensayar

10. jpg 05.08.2010 (7) - Detalle de la lectura dinamométrica de la estructura, recién calibrada

11.jpg 05.08.2010 (8) - Detalle de la estructura dinamométrica de la botavara i el motor Tesla instalado y preparado para ensayar

12. jpg 05.08.2010 (9) - Detalle de la estructura dinamométrica de la botavara i el motor Tesla instalado y preparado para ensayar

13. jpg 05.08.2010 (10) - Vista de la grúa aguantando el cable que va del motor Tesla a la embarcación RAS y del sistema de paro de seguridad a distancia

14. jpg 05.08.2010 (11) Interior de la embarcación RAS

15. jpg 05.08.2010 (12) - Parte trasera del panel de instrumentos

16. jpg 05.08.2010 (13) - Vista general del panel de instrumentos, conexiones e interruptores

17. jpg 05.08.2010 (14) - Panel de instrumentos

18. jpg 05.08.2010 (15) - Panel de instrumento e interruptores

19. jpg 05.08.2010 (16) - Variadores de velocidad Altivar31 y conexiones

20. jpg 05.08.2010 (17) - Panel de instrumentos encendido

21. jpg 05.08.2010 (18) - Display del generador Power Meter PM700

22. jpg.05.08.2010 (19) - Flujo de agua turbulento a punto de desbordar

23. jpg 05.08.2010 (20) - Detalle de la estructura dinamométrica de la botavara i el motor Tesla instalado y en funcionamiento

24. jpg 10.08.2010 (1) - Distribución de la estructura de la botavara y la mesa respecto de la piscina

25. jpg 13.10.2010 (1) - Estructura para el ensayo del propulsor en vertical

26. jpg 13.10.2010 (2) - Estructura para el ensayo del propulsor en vertical

27. jpg 13.10.2010 (3) - Soporte dinamométrica del propulsor de la estructura abatible de la mesa, parcialmente desmontado

28. jpg 16.11.2010 (1) - Hélice de aluminio de 4 palas instalada en el hidrogenerador

29. jpg 16.11.2010 (2) - Hélice de aluminio de 4 palas instalada en el hidrogenerador

30. jpg 16.11.2010 (3) - Hélice de bronce de 3 palas desmontada

31. jpg 16.11.2010 (4) - Hélice de bronce de 4 palas instalada en el motor ABB

32. jpg 16.11.2010 (5) - Arañazo provocado por la hélice de aluminio, tapado con caucho mientras se vaciaba la piscina.

33. jpg 16.11.2010 (6) - Sifones colocados para vaciar la piscina más rápidamente

34. jpg 16.11.2010 (7) - Piscina secándose para la posterior reparación

35. jpg 16.11.2010 (8) - Piscina secándose para la posterior reparación

36. jpg 16.11.2010 (9) - Arañazo provocado por la hélice de aluminio del hidrogenerador

37. jpg 21.09.2010 (1) - Estructura vertical con el propulsor instalado, en la periferia de la piscina

38. jpg 21.09.2010 (2) - Detalle del propulsor vertical con masas encima y a punto para ensayar

39. jpg 21.09.2010 (3) - Estructura vertical con el propulsor instalado, con las masas encima, en la periferia de la piscina

40. jpg 21.09.2010 (4) - Propulsor vertical el pleno ensayo

41. jpg 22.10.2010 (1) - Hidrogenerador con la hélice de bronce, instalado en la estructura pivotante de la mesa

42. jpg 22.10.2010 (2) - Conjunto de la estructura pivotante de la mesa, lastrada para que no se mueva

43. jpg 22.10.2010 (3) - Vista general de la distribución del propulsor y el hidrogenerador antes de realizar el ensayo

44. jpg 22.10.2010 (4) - Instrumentos de medición para el ensayo del hidrogenerador y bobina de cable del motor Mavilor

45. jpg 27.09.2010 (1) - Distribución de las estructuras en el ensayo con dos propulsores

46. jpg 27.09.2010 (2) - Propulsor Tesla montado en la estrctura dinamométrica de la botavara

47. jpg 27.09.2010 (3) - Propulsor Tesla montado en la estructura pivotante de la mesa

48. jpg 27.09.2010 (4) - Distribución de las estructuras en el ensayo con dos propulsores

49. jpg 27.09.2010 (5) - Soporte del hidrogenerador durante su montaje

50. jpg 27.09.2010 (6) - Distribución de las estructuras en el ensayo con dos propulsores en pleno ensayo

51. jpg 27.09.2010 (7) - Soporte del hidrogenerador durante su montaje

52. jpg 27.09.2010 (8) - Soporte del hidrogenerador durante su montaje

53. jpg 27.09.2010 (9) - Soporte del hidrogenerador durante su montaje

54. jpg 27.09.2010 (10) - Detalle de la estructura pivotante de la mesa con el propulsor Tesla montado

2. Videos

Los videos que contiene el CD son 3 y todos pertenece al ensayo de un solo propulsor (ensayo 5.2.1)

1. wmv (ensayo 5.2.1 a 1,16) - Se puede apreciar el flujo del agua y el conjunto de la estructura con el propulsor, cuando el agua tiene una velocidad lineal de 1,16 m/s a la altura del propulsor.

2. wmv (ensayo 5.2.1 a 1,71) - Se puede apreciar el flujo del agua y el conjunto de la estructura con el propulsor, cuando el agua tiene una velocidad lineal de 1,71 m/s a la altura del propulsor.

3. wmv (ensayo 5.2.1 a 2) - Se puede apreciar el flujo del agua y el conjunto de la estructura con el propulsor, cuando el agua tiene una velocidad lineal de 2 m/s a la altura del propulsor.

3. Planos en CAD

Se incluyen los planos hecho de todas las estructuras en CAD, en formato .dxf y cada uno de ellos lleva definido el tipo de plano, autor, proyecto, fecha y escala a que está hecho.

4. Manuales

Se incluyen los manuales que se han necesitado de los dispositivos usados para los ensayos de este proyecto, que son:

- Manual del variador de velocidad Altivar31

- Manual del motor Tesla

## *9.2 Índice de figuras y tablas*

**Figuras:**

1. Figura 1 - Buque con propulsión mediante rueda de paletas (página 7)

2. Figura 2 - Hélice convencional (página 8)

3. Figura 3 - Hélice de paso ajustable (página 8)

4. Figura 4 - Hélice con tobera (página 9)

5. Figura 5 - Hélices contra rotativas (página 9)

6. Figura 6 - Hélice de eje vertical (página 9)

7. Figura 7 - Esquema de un sistema de propulsión a chorro (página 10)

8. Figura 8 - Propulsión a chorro (página 10)

9. Figura 9 - Grafica eficiencia-velocidad en propulsores (página 10)

10. Figura 10 - Ejemplo de instalación de un flap en el espejo de popa (página 11)

11. Figura 11 - Flap para espejo de popa (página 11)

12. Figura 12 - Estabilizador convencional (página 12)

13. Figura 13 - Estabilizador convencional (página 12)

14. Figura 14 - Esquema despiece estabilizador giroscópico (página 12)

15. Figura 15 - Estabilizador giroscópico (página 12)

16. Figura 16 - Dimensiones motor Franklin (página 13)

17. Figura 17 - Motor Franklin GF420T353 (página 14)

18. Figura 18 - Propulsor utilizando el motor ABB (página 15)

19. Figura 19 - Plano de despiece del sello del motor Mavilor BF-083 (página 16)

20. Figura 20 - Motor Mavilor BF-083 (página 16)

21. Figura 21 - Hélice HSN de 3 palas "helice1" (página 17)

22. Figura 22 - Hélice HSN de 4 palas "helice2" (página 18)

23. Figura 23 - Hélice de 3 palas "helice3" (página 18)

24. Figura 24 - Hélice de aluminio de 4 palas "helice4" (página 19)

25. Figura 25 - Esquema para cálculos previos de la piscina (página 20)

26. Figura 26 - Planos de la estructura 1 "EST1" (página 23)

27. Figura 27 - Distribución de la estructura 2 "EST2" (página 24)

28. Figura 28 - Soporte abatible de la estructura 2 "EST2" (página 24)

29. Figura 29 - Planos de la estructura 2 "EST2" (página 25)

30. Figura 30 - Distribución de la estructura 3 "EST3" (página 26)

31. Figura 31 - Estructura 3 "EST3" con propulsor Franklin instalado (página 27)

32. Figura 32 - Estructura 3 "EST3" con propulsor Franklin instalado (página 27)

33. Figura 33 - Planos de la estructura 3 "EST3" (página 28)

34. Figura 34 - Distribución de la estructura 4 "EST4" (página 29)

35. Figura 35 - Estructura 4 "EST4" (página 30)

36. Figura 36 - Estructura 4 "EST4" (página 30)

37. Figura 37 - Planos de la estructura 4 "EST4" (página 31)

38. Figura 38 - Distribución de la estructura 5 "EST5" (página 32)

39. Figura 39 - Estructura 5 "EST5" con propulsor Franklin instalado (página 32)

40. Figura 40 - Planos de la estructura 5 "EST5" (página 33)

41. Figura 41 - Curva par-revoluciones teórica de una máquina asíncrona (página 34)

42. Figura 42 - Grafica revoluciones/velocidad del fluido, del ensayo 5.2.1 (página 38)

43. Figura 43 - Grafica revoluciones/corriente en fase de salida del generador, del ensayo 5.2.1 (página 39)

44. Figura 44 - Grafica revoluciones/corriente en motor, del ensayo 5.2.1 (página 40)

45. Figura 45 - Grafica revoluciones/potencia consumida, del ensayo 5.2.1 (página 41)

46. Figura 46 - Grafica revoluciones/par motor, del ensayo 5.2.1 (página 42)

47. Figura 47 - Grafica revoluciones/empuje, del ensayo 5.2.1 (página 43)

48. Figura 48 - Grafica velocidad del fluido/corriente en fase de salida del generador, del ensayo 5.2.1 (página 44)

49. Figura 49 - Grafica velocidad del fluido/corriente en motor, del ensayo 5.2.1 (página 45)

50. Figura 50 - Grafica velocidad del fluido/potencia consumida, del ensayo 5.2.1 (página 46)

51. Figura 51 - Grafica velocidad del fluido/par motor, del ensayo 5.2.1 (página 47)

52. Figura 52 - Grafica velocidad del fluido/empuje, del ensayo 5.2.1 (página 48)

53. Figura 53 - Grafica corriente en fase de salida del generador/corriente en motor, del ensayo 5.2.1 (página 49)

54. Figura 54 - Grafica corriente en fase de salida del generador/potencia consumida, del ensayo 5.2.1 (página 50)

55. Figura 55 - Grafica corriente en fase de salida del generador/par motor, del ensayo 5.2.1 (página 51)

56. Figura 56 - Grafica corriente en fase de salida del generador/empuje, del ensayo 5.2.1 (página 52)

57. Figura 57 - Grafica corriente en motor/potencia consumida, del ensayo 5.2.1 (página 53)

58. Figura 58 - Grafica corriente en motor/par motor, del ensayo 5.2.1 (página 54)

59. Figura 59 - Grafica corriente en motor/empuje, del ensayo 5.2.1 (página 55)

60. Figura 60 - Grafica potencia consumida/par motor, del ensayo 5.2.1 (página 56)

61. Figura 61 - Grafica potencia consumida/empuje, del ensayo 5.2.1 (página 57)

62. Figura 62 - Grafica par motor/empuje, del ensayo 5.2.1 (página 58)

63. Figura 63 - Señal eléctrico captado en una de las fases de salida del driver del motor Franklin (página 59)

64. Figura 64 - Comparación entre curvas de par resistente del fabricante y la obtenida en el ensayo 5.2.1 (página 60)

65. Figura 65 - Grafica de evolución del deslizamiento de la hélice instalada "helice1" (página 60)

66. Figura 66 - Comparación corriente entre propulsor 1 y propulsor 2, del ensayo 5.2.2 (página 64)

67. Figura 67 - Comparación potencia consumida entre propulsor 1 y propulsor 2, del ensayo 5.2.2 (página 64)

68. Figura 68 - Comparación par motor entre propulsor 1 y propulsor 2, del ensayo 5.2.2 (página 65)

69. Figura 69 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 74)

70. Figura 70 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 74)

71. Figura 71 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 75)

72. Figura 72 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 75)

73. Figura 73 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 75)

74. Figura 74 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 76)

75. Figura 75 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 76)

76. Figura 76 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 76)

77. Figura 77 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 77)

78. Figura 78 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 77)

79. Figura 79 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 77)

80. Figura 80 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 78)

81. Figura 81 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 78)

82. Figura 82 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 78)

83. Figura 83 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 79)

84. Figura 84 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 79)

85. Figura 85 - Imágenes térmica y normal del muelle dinamométrico de la estructura de la botavara (página 79)

**Tablas:**

86. Tabla 1 - Datos originales registrados en el ensayo de un propulsor montado en la estructura dinamométrica de la botavara, en el ensayo 5.2.1 (página 36)

87. Tabla 2 - Datos relevantes registrados en el ensayo de un propulsor montado en la estructura dinamométrica de la botavara, en el ensayo 5.2.1 (página 36)

88. Tabla 3 - Datos originales registrados en el ensayo con dos propulsores, en el ensayo 5.2.2 (página 62)

89. Tabla 4 - Datos originales registrados en el ensayo con el propulsor vertical, en el ensayo 5.2.3 (página 68)

90. Tabla 5 - Datos originales registrados en el ensayo del hidrogenerador con la hélice de bronce de tres palas instalada, en el ensayo 5.2.3 (página 71)

91. Tabla 6 - Datos originales registrados en el ensayo del hidrogenerador con la hélice de aluminio de cuatro palas instalada, en el ensayo 5.2.3 (página 72)