

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN DEL  
MINISUBMARINO Visor3**

**ESTEBAN VARGAS BOLÍVAR  
SANTIAGO VÉLEZ ZULUAGA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2015**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN DEL  
MINISUBMARINO Visor3**

**ESTEBAN VARGAS BOLÍVAR  
SANTIAGO VÉLEZ ZULUAGA**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director  
Juan Alberto Ramírez Macías  
Magíster en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2015**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Firma  
Nombre:  
Presidente del jurado

---

Firma  
Nombre:  
Jurado

---

Firma  
Nombre:  
Jurado

Medellín, Enero 29 de 2015

*Santiago Vélez Z.*

A toda mi familia de manera muy especial por apoyarme en todo el desarrollo de este trabajo de grado y en el trascurso de mi carrera y por brindarme la oportunidad de estudiar y de realizarme profesionalmente hasta alcanzar grandes logros académicos. A Dios por el permitirme estudiar en una universidad tan prestigiosa y católica como lo es la Universidad Pontificia Bolivariana, donde no sólo me formé en el ámbito estudiantil, sino también moral, y por ser el pilar en mi vida que me guía hasta alcanzar cada uno de los objetivos que me trazo.

*Esteban Vargas B.*

Dedico este logro a Dios por ser esperanza y aliento cada día de mi vida. También a mi gran familia, especialmente a mis padres y hermana quienes han sido luz y acierto en todo momento, para ellos que han creído en mí y me han brindado la oportunidad de realizar mi proyecto de vida, incansables, inagotables y siempre constantes.

Igualmente a la memoria de mis abuelos Gustavo y Gilberto.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado está enmarcado dentro del Programa Estratégico para el Desarrollo de Tecnología Robótica Orientada a la Exploración Petrolera de los Fondos Marinos Colombianos, Proyecto 1210-531-30550, contrato 0265-2013, y se desarrolla con recursos del Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas; ECOPETROL; la Universidad Pontificia Bolivariana—Sede Medellín, UPB; y la Universidad Nacional de Colombia—Sede Medellín, UNALMED.

Los autores agradecen especialmente a Juan A. Ramírez Macías director del presente trabajo de grado por su conocimiento, empeño y paciencia para con nosotros. De igual manera a todos los miembros del Grupo de Automática y Diseño A+D especialmente a los ingenieros Jose A. Escudero, David Rozo y Diego A. Acosta. Igualmente agradecer a Raúl A. Valencia por su apoyo y conocimiento en el área de simulación de fluidos, por su prestancia y amabilidad.

Queremos agradecer igualmente a la empresa ZUGOM y CIA. LTDA. por facilitar el equipo para el desarrollo de las simulaciones de fluidos.

A todas las personas que de alguna manera se hicieron partícipes en el desarrollo de este trabajo, mil gracias.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN . . . . .	14
1. SISTEMA DE PROPULSIÓN . . . . .	17
1.1. Propulsión Eléctrica . . . . .	17
1.2. Componentes del Sistema de Propulsión . . . . .	18
1.2.1. Motor . . . . .	19
1.2.2. Reductor de Velocidad . . . . .	20
1.2.3. Propela . . . . .	20
2. SIMULACIÓN . . . . .	25
2.1. OpenFOAM® . . . . .	25
2.1.1. Simulación en Software CFD . . . . .	26
2.1.2. Modelo de Propela . . . . .	27
2.1.3. Mallado . . . . .	28
2.1.4. Condiciones de Pre-Procesamiento . . . . .	30
2.1.5. Resultados . . . . .	32
2.2. Método Wageningen . . . . .	34
2.3. Comparación de Resultados . . . . .	37

3.	MODELO MOTOR-REDUCTOR . . . . .	41
3.1.	Modelo del Motor . . . . .	42
3.2.	Modelo del Motor-Reductor . . . . .	43
3.3.	Relación Motor-Propela . . . . .	44
4.	COMBINACIÓN DE MODELOS . . . . .	46
4.1.	Software . . . . .	47
4.2.	Resultados . . . . .	48
4.2.1.	Demanda de Corriente . . . . .	48
4.2.2.	Corriente Disponible . . . . .	50
4.2.3.	Demanda de Potencia Eléctrica . . . . .	51
4.2.4.	Torque y Empuje . . . . .	52
4.2.5.	Eficiencia Conjunto Motor-Reductor . . . . .	53
4.2.6.	Eficiencia de la Propela . . . . .	54
4.2.7.	Eficiencia Global del Sistema . . . . .	55
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS . . . . .	57
	CONCLUSIONES . . . . .	62
	BIBLIOGRAFÍA . . . . .	66
	ANEXOS . . . . .	69
A.	ARTÍCULO PUBLICABLE . . . . .	72
B.	ANTEPROYECTO . . . . .	78

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 Distribución de propulsores en el minisubmarino Visor3 . . . . .	18
2 Sistema de propulsión del minisubmarino Visor3 . . . . .	19
3 Curva típica $K_T$ , $K_Q$ y eficiencia . . . . .	21
4 Nomenclatura de la propela . . . . .	23
5 Estructura de trabajo en OpenFOAM <sup>®</sup> . . . . .	26
6 Modelo de propela <i>Harbor Models</i> 3540 utilizado en el Visor3 . . . . .	28
7 Refinamiento de malla de la propela . . . . .	30
8 Malla obtenida para la simulación . . . . .	30
9 Empuje generado por la propela obtenido en OpenFOAM <sup>®</sup> . . . . .	32
10 Torque generado por la propela obtenido en OpenFOAM <sup>®</sup> . . . . .	33
11 Coeficientes de torque y empuje para propelas Wageningen . . . . .	35
12 $K_T$ y $K_Q$ obtenidas por el método Wageningen . . . . .	37
13 Comportamiento del coeficiente de empuje $K_T$ en función de la velocidad angular. . . . .	38
14 Comparación de resultados de empuje teóricos, y obtenidos por simulación CFD . . . . .	39



15	Comparación de resultados de torque teóricos, y obtenidos por simulación CFD . . . . .	40
16	Comportamiento teórico de los motores según modelo de Maxon . . . . .	43
17	Comportamiento de los motores con acción del reductor de velocidad . . . . .	45
18	Combinación de modelos conjuntos motor-reductor y propela . . . . .	46
19	Diagrama de software desarrollado . . . . .	47
20	Corriente en función de la velocidad angular con limitación del <i>driver</i> . . . . .	49
21	Zonas de trabajo de corriente limitadas por acción del <i>driver</i> . . . . .	50
22	Corriente disponible para cada combinación motor-reductor . . . . .	51
23	Demanda de potencia eléctrica en función de la velocidad angular . . . . .	52
24	Relación entre torque y empuje en función de la velocidad angular . . . . .	53
25	Eficiencia del conjunto motor-reductor . . . . .	54
26	Eficiencia de la propela en función del coeficiente de avance . . . . .	55
27	Eficiencia global del sistema de propulsión . . . . .	56

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
1	Parámetros de malla obtenidos en SALOME . . . . . 29
2	Características geométricas de propela evaluada . . . . . 34
3	Parámetros de evaluación de motores . . . . . 41
4	Datos de evaluación de los motores seleccionados . . . . . 42
5	Parámetros de evaluación de conjunto motor-reductor-propela . . . . . 48
6	Parámetros de evaluación del sistema del sistema de propulsión . . . . . 57
7	Matriz de resultados totales . . . . . 58
8	Matriz de resultados depurada y filtrada . . . . . 59
9	Valores de ponderación . . . . . 60
10	Matriz de decisión conjunto motor-reductor . . . . . 61

## GLOSARIO

CAE (*Computer Aided Engineering*): siglas en inglés para Ingeniería Asistida por Computador. Es el uso de software para el análisis y simulación de procesos y diseños de ingeniería.

CFD (*Computational Fluid Dynamics*): siglas en inglés para Mecánica de Fluidos Computacionales. Rama de la mecánica de fluidos la cual mediante métodos numéricos resuelve y analiza problemas de flujo de fluidos, apoyados en software de simulación.

DRIVER: es un circuito que permite controlar el movimiento de un motor para garantizar su buen funcionamiento. Entre sus funciones están, limitar la corriente, proteger de sobrecalentamiento, impedir exceso de consumo, entre otros. Sirven para controlar motores DC, paso a paso y servomotores.

EFICIENCIA: relación que determina la potencia entregada por el sistema dada una potencia de alimentación suministrada.

EMPUJE: es la fuerza necesaria para desplazar un objeto en un espacio determinado.

NETGEN: es un generador automático de mallas tetraédricas en 3D para software de simulaciones numéricas o CAE.

PROPELA: también conocida como hélice, es un elemento mecánico conformado por palas o hojas que rotan en un mismo plano. Dispositivo que transforma gran parte de la potencia inducida en fuerza de empuje.

REDUCTOR DE VELOCIDAD: elemento mecánico conformado típicamente por un sistema de engranajes que permite reducir la velocidad de salida de un dispositivo que gira.

ROV (*Remoted Operated Vehicle*): siglas en inglés para Vehículo operado remotamente, ya sea por señales de radio o mediante un cable el cual va conectado a una estación

central.

SALOME: software de fuente y licencia abierta (*open source*) utilizado para el pre y post procesamiento de simulaciones numéricas.

TORQUE: Es el momento de una fuerza generado sobre un elemento que rota respecto a un eje.

UNV (*Universal File Format*): formato de archivos que estandariza la transmisión de datos entre software de diseño asistido por computador (CAD) y software de ingeniería asistida por computador (CAE).

Visor3: ROV desarrollado por el Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana.

## RESUMEN

En este trabajo se lleva a cabo el análisis del desempeño dinámico del sistema de propulsión del minisubmarino Visor3 mediante el uso de simulaciones. Este análisis tiene como objetivo encontrar la mejor combinación motor reductor para la propela instalada en el Visor3, usando diferentes criterios de selección (empuje, torque, eficiencia y parámetros del motor).

Esto implica como primera etapa modelizar el funcionamiento de la propela mediante el uso de software de simulación de fluidos CFD (OpenFOAM®) y el método de cálculo de la serie de propelas Wageningen. De los que se obtienen el torque, el empuje y la eficiencia de la propela como parámetros de comportamiento. Seguidamente, se procede a estructurar el modelo matemático del motor, incluyendo la acción del reductor y la restricción generada en la operación del motor por el uso del driver.

Conocidos los modelos matemáticos que permiten determinar el comportamiento de la propela, y el conjunto de motor-reductor-driver, se procede a obtener un modelo global que permita evaluar el propulsor como un conjunto. De este modelo obtenido, se procede a definir los parámetros de desempeño que permitan evaluar el propulsor.

Finalmente se procede a realizar un análisis de los resultados obtenidos usando matrices de selección con los criterios de evaluación seleccionados.

### **PALABRAS CLAVE:**

PROPELA; MOTOR; TORQUE; EMPUJE; EFICIENCIA; POTENCIA; CORRIENTE; CFD.

## INTRODUCCIÓN

El Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana ha trabajado durante más de 20 años en el desarrollo de vehículos sumergibles operados remotamente. De este proceso han surgido los vehículos Visor, VisorII y Visor3. Estos desarrollos han incluido todo el trabajo de ingeniería necesario para las funciones finales requeridas, además de generar un conocimiento que ha dado como productos finales trabajos de grado en los niveles de pregrado, especialización y maestría en la UPB.

En el año 2011 se realizó la formulación del Programa Estratégico para el desarrollo de Tecnología Robótica Orientada a la Exploración Petrolera de los Fondos Marinos Colombianos, entre el Grupo de Automática y Diseño A+D y el Grupo de Investigación en Oceanografía e Ingeniería Costera (OCEANICOS) de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; dentro de la convocatoria 531 de Colciencias. El desarrollo de este proyecto incluye entonces como uno de sus objetivos la generación de conocimiento dentro del país, que permita disminuir la brecha tecnológica frente a los países industrializados, mediante la inclusión de estudiantes de pregrado y posgrado, como fomento a la formación de capacidades técnicas y científicas.

El proyecto macro tiene como objetivo el desarrollar un minisubmarino para trabajar a profundidades de 500 m con todos sus sistemas auxiliares. Dentro de este interactúan una cantidad de sistemas que permiten que el vehículo cumpla con las tareas asignadas, algunos de estos sistemas son iluminación, propulsión, recolección de muestras, posicionamiento, entre otros. El presente trabajo de grado aborda el sistema de propulsión, el cuál es el encargado de desplazar el vehículo en una dirección requerida.

Para los diferentes desarrollos de ROV llevados a cabo por el grupo de Automática y Diseño A+D se avanzó en el conocimiento de los sistemas de propulsión, sin embargo es necesario expandir la frontera de lo que se sabe para generar un proceso de diseño más asertivo que alimente de manera eficaz el desarrollo del nuevo proyecto. Este proceso de diseño generará una metodología ordenada partiendo del Visor3 como base extrapolable

a los nuevos desarrollos.

La principal motivación de este trabajo es generar una metodología de selección de componentes que haga más eficaz y eficiente el proceso de diseño de sistemas de propulsión, además de la integración de herramientas de simulación de fluidos CFD, que contribuyen al desarrollo de las capacidades científicas del Grupo de Automática y Diseño A+D.

El objetivo principal planteado es elaborar un análisis detallado del desempeño dinámico de los propulsores del minisubmarino Visor3. Para alcanzar este objetivo se definen como objetivos específicos el determinar el modelo de cálculo que permita predecir el comportamiento de este sistema propulsivo a partir de la revisión bibliográfica e identificar los parámetros físicos que alimentan el modelo de cálculo seleccionado.

Otro de los objetivos planteados es desarrollar un programa de software que permita resolver numéricamente el modelo de cálculo seleccionado. Al conocer el comportamiento físico del sistema propulsivo del minisubmarino Visor3 se deben definir o enunciar parámetros que permitan hacer evaluaciones de conjuntos o escenarios.

Por último, como objetivos específicos se definen el evaluar alternativas o escenarios que puedan mejorar el comportamiento de los propulsores a través de estudios comparativos que usen el software desarrollado y simulaciones en un software de fluidos, además de proponer experimentos que permitan la validación futura del modelo matemático seleccionado.

El sistema de propulsión del minisubmarino Visor3 está compuesto por una cantidad de componentes que interactuando entre sí permiten el desplazamiento del vehículo. Este trabajo se centra en estudiar la interacción de tres componentes principales: motor, reductor de velocidad y propela.

Para alcanzar los objetivos planteados, la metodología definida parte del desarrollo de simulaciones en software de fluidos en las que se analiza el comportamiento dinámico de la propela instalada en el Visor3. Por otro lado, se estudiará el comportamiento del motor y del conjunto motor-reductor, en el que se determinará su modelo matemático y los parámetros físicos que lo alimentan. Se procede entonces a generar un modelo único alimentado por los datos obtenidos en el software de simulación de fluidos y el modelo matemático para el conjunto motor-reductor.

Los escenarios de evaluación del modelo planteado serán la selección de un grupo de motores del mismo rango de operación de los instalados en el Visor3 con diferentes valores de reducción de velocidad sin variación de la propela. Para evaluar estos escenarios se definen unos parámetros que permitirán determinar mediante el uso de matrices de selección cuál es el mejor conjunto motor-reductor para la propela instalada en el Visor3.



## 1. SISTEMA DE PROPULSIÓN

Se define el sistema de propulsión como la composición de todos los sistemas requeridos para mover el sumergible bajo condiciones normales o de emergencia [1]. Se encarga de convertir la energía de la cuál se alimenta el vehículo en trabajo mecánico.

El principal objetivo de un sistema de propulsión es obtener alto empuje en relación al tamaño y arrastre del vehículo, esto a su vez en función de la potencia de entrada [2]. Este empuje debe vencer las fuerzas de arrastre generadas por el casco del vehículo, sostener una velocidad de avance y permitir el alcance de las profundidades de trabajo según el arreglo o configuración de los propulsores.

Los principales componentes de los sistemas de propulsión del vehículo están en función del tipo de sistema de propulsión seleccionado. Existen en el mercado una variedad de sistemas de propulsión, entre los que se pueden destacar los sistemas de a chorro o *Water-Jet*, hidráulicos y los sistemas de tipo eléctrico [2].

### 1.1. PROPULSIÓN ELÉCTRICA

La propulsión eléctrica es la más usada para la categoría de minisubmarinos. Sus componentes principales son un motor eléctrico, que viene configurado para soportar las condiciones de uso bajo el agua a las que será sometido, y una propela o elemento de acción final. Se encuentra en un gran rango de potencias, y según su alimentación y configuración se obtienen multiplicidad de aplicaciones finales. Los parámetros de trabajo más usuales, bajo los cuales se usa este tipo de sistema de propulsión suelen ser bajas velocidades ( $< 6$  nudos) [3] y potencias de trabajo menores a 10 *hp* [4].

Se puede clasificar según el tipo de configuración y cantidad de propulsores [2]. Estas configuraciones permiten definir el control que se tiene sobre el movimiento espacial del

vehículo, además de ser determinados por el sistema de control, la aplicación específica, y costo económico. La Figura 1, presenta el arreglo de propulsores definido para el minisubmarino Visor3.

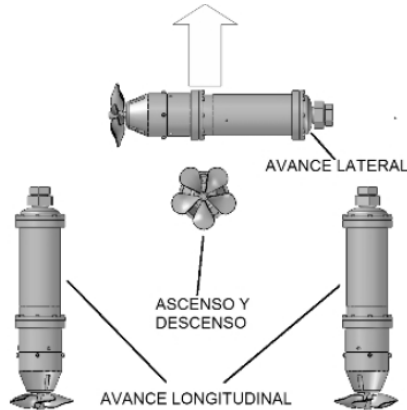


Figura 1. Distribución de propulsores en el minisubmarino Visor3. Tomado de J. A. Ramírez-Macías, Diseño Mecánico de un Vehículo Sumergible Operado Remotamente. Universidad Pontificia Bolivariana, 2007, trabajo de Grado para aspirar al título de Especialista en Automática, pág. 59.

Este tipo de sistema de propulsión es el objeto de estudio de este trabajo dado que es el que se encuentra en el Visor3, por lo cual se presentan a continuación sus componentes y características, y la modelización encontrada para definir su comportamiento dinámico.

## 1.2. COMPONENTES DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN

Los sistemas de propulsión eléctricos se componen básicamente de motor, reductor (en caso de ser necesario), compartimientos estancos con los elementos de transmisión de potencia, propela y elementos de control [1].

- Fuente de potencia (*power source*).
- Motor eléctrico.
- Alojamiento del propulsor y acople a la estructura del vehículo.
- Caja reductora.

- Ejes, sellos y acoples.
- Propela.
- Ductos para propelas (*kort nozzles*).

La Figura 2, muestra el diseño de detalle del sistema de propulsión definido para el Visor3. Esta configuración de propulsor no difiere en gran medida de los elementos anteriormente mencionados.

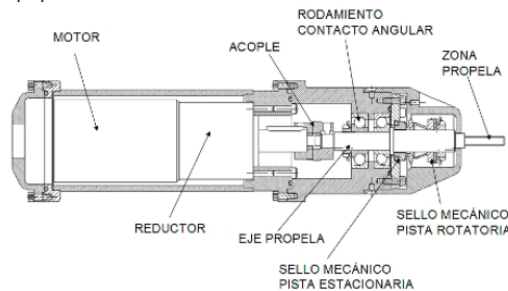


Figura 2. Diseño de detalle del sistema de propulsión del minisubmarino Visor3. Tomado de J. A. Ramírez-Macías, Diseño Mecánico de un Vehículo Sumergible Operado Remotamente. Universidad Pontificia Bolivariana, 2007, trabajo de Grado para aspirar al título de Especialista en Automática, pág. 78.

Para el análisis en detalle del comportamiento dinámico del propulsor instalado actualmente en el Visor3, se utilizarán tres elementos de este conjunto de partes. Estos son, el motor, el reductor de velocidad (caja reductora) y la propela como efector final.

### 1.2.1. Motor

Los motores son los elementos encargados de convertir la potencia eléctrica entregada por la fuente de poder del vehículo, en potencia mecánica. Junto con la propela, constituyen los elementos centrales del sistema de propulsión.

El principal objetivo de la selección de un motor apropiado para la aplicación es que cumpla con el empuje requerido para vencer las fuerzas inerciales y de arrastre propias de la geometría del vehículo, las condiciones del fluido en el entorno de trabajo y que entregue la mejor relación de torque en función de la velocidad de giro y del avance del vehículo.

Para el desarrollo de este trabajo se eligieron 10 motores de la marca Maxon, que trabajan todos con una potencia máxima de 150 W y que están en un intervalo de voltaje de 12 V a 48 V, con el fin de realizar diferentes análisis y comparaciones hasta encontrar el motor que tiene la mejor eficiencia al operar en conjunto con la propela. La selección de esta familia de motores se debe a que pertenece a este grupo el motor instalado en el Visor3, con características similares.

### *1.2.2. Reductor de Velocidad*

En esta investigación se tomó el reductor planetario GP 42 C de Maxon para realizar los cálculos, con un torque máximo continuo de 3.0 Nm y un torque máximo intermitente permisible de 4.5 Nm y evaluando las relaciones de 1, 4.3:1 y 3.5:1. Los reductores de este tipo de mayor tamaño están normalmente equipados con rodamientos de bolas en la salida del reductor. Nuevamente la selección de este componente se debe a que es el instalado en el Visor3 y recomendado por Maxon para esta familia de motores.

### *1.2.3. Propela*

Una propela es el mecanismo que se encarga de transformar la potencia que se le aplica en empuje. Generalmente esta fuerza que se le induce proviene de un motor eléctrico o hidráulico al cual está conectada la propela [2].

Las propelas pueden venir en muchos tamaños y formas dependiendo del empuje requerido. Adicionalmente, pueden tener hojas de diferentes formas y materiales que influyen en su desempeño. Según la dirección de rotación, las propelas pueden ser de rotación izquierda (contrario a las manecillas del reloj) o de rotación derecha.

En algunas ocasiones, estas hojas son intercambiables permitiendo cambiar el ángulo en el que operan. Generalmente, un ángulo más pequeño provee una mejor aceleración y un ángulo mayor permite una velocidad final máxima.

Para aplicaciones marinas, hay tres tipos de propelas que son las más adecuadas para utilizar:

- Las propelas de paso fijo, las cuales son más comúnmente utilizadas en barcos y

sumergibles y suelen ser más económicas.

- Las propelas de paso variable, las cuales proporcionan en general mayor eficiencia en la propulsión en un intervalo amplio de velocidades y condiciones de carga.
- También existen unas propelas en las cuales el paso es controlado por mecanismos mecánico-hidráulicos que permiten variar la velocidad del ROV, sin embargo suelen ser más costosas.

Las propelas tienen una velocidad operacional donde la eficiencia es mayor. Algunas propelas están optimizadas para un cierto empuje en una dirección específica. Un propulsor pequeño para un ROV generalmente tiene una propela para generar empuje principalmente hacia adelante y hacia abajo, aunque se sacrifique el desempeño en reversa y hacia arriba.

Los principales parámetros de evaluación de una propela son el torque entregado, el empuje generado y la eficiencia. Estos tres parámetros de la propela se pueden representar en un gráfica que contiene una familia de curvas en función de parámetros geométricos de la propela. Un ejemplo de este tipo de curva es la mostrada en la Figura 3.

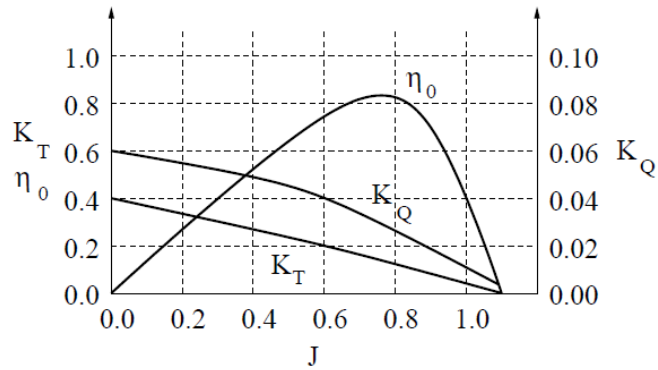


Figura 3. Tomado M.I.T.(2004) Propellers and propulsion. Maneuvering and Control of Surface and Underwater Vehicles. [Online]. Available: <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-154-maneuvering-and-control-of-surface-and-underwater-vehicles-13-49-fall-2004/lecture-notes/lec12.pdf>.

La Figura 3 muestra el comportamiento del torque y del empuje para una propela usando dos coeficientes, un coeficiente de torque y un coeficiente de empuje denotados respectivamente por  $K_Q$  y  $K_T$ . Este par de coeficientes se puede calcular según,

$$K_T = \frac{T}{D^4 \rho n^2}, \quad (1)$$

$$K_Q = \frac{Q}{D^5 \rho n^2}, \quad (2)$$

donde  $D$  es el diámetro de la propela,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $n$  es la velocidad angular de la propela y  $T$  y  $Q$  son el empuje y el torque respectivamente.

La eficiencia es señalada por  $\eta_0$ , además de encontrarse la gráfica en función de un término conocido como coeficiente de avance  $J$ , dado por,

$$J = \frac{V_a}{nD}, \quad (3)$$

donde  $V_a$  es la velocidad de avance de la propela en  $m/s$ .

La obtención de las curvas se realiza mediante pruebas de laboratorio, y el uso de modelos de cálculo que predicen para una familia de curvas el comportamiento del torque y el empuje. Este método es descrito en detalle en la sección 2.2.

### *Características geométricas de la propela*

La Figura 4 presenta las características geométricas y nomenclatura de las secciones de una propela típica, sin *nozzle*.

La información suministrada por la Figura 4, permite realizar la definición de los siguientes elementos.

- $D$ : diámetro de la propela.
- (*Boss*): conexión entre las hojas y el eje de la propela.
- Extremo de la hoja (*blade tip*): punto más lejano de la hoja desde la caja del eje.
- Raíz de la hoja (*blade root*): punto en el que las hojas se unen con la caja del eje.
- Trayectoria circular extrema (*tip circle*): círculo descrito por los puntos de la hoja.
- Área del disco de la propela (*propeller disc area*): es el área del círculo definido por la trayectoria de los extremos de la hoja.

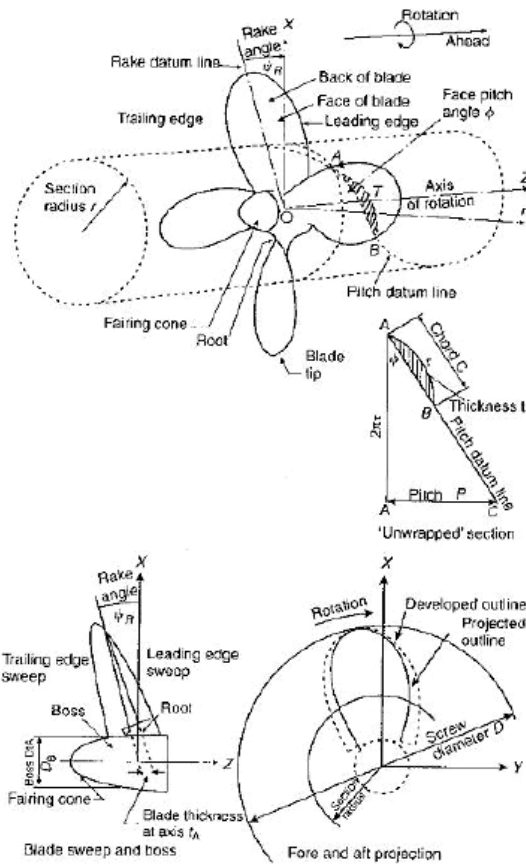


Figura 4. Nomenclatura básica de las partes de la propela. Tomado de G. Griffiths, Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles, ser. Ocean science and technology. Taylor & Francis, 2002.

- Lado delantero de la hoja (*leading edge*).
- Lado trasero de la hoja (*trailing edge*).
- Cara de succión (*suction back*): lado de la hoja de la propela de baja presión.
- P: paso de la propela (*pitch*).

El paso de la propela se define como la distancia lineal generada por una rotación  $360^\circ$  (revolución) a una velocidad angular y de avance constantes [5]. Al reducir el paso se puede reducir la cavitación generada, si se reduce en exceso disminuye la eficiencia de la propela.

De los anteriores parámetros es posible establecer una relación entre el paso y el diámetro de la propela dado por

$$R_{\text{paso}} = P/D. \quad (4)$$

La relación dada en (4) incide directamente en el comportamiento de la propela, ya que a mayor paso es mayor el empuje generado, a costa de una reducción del diámetro para mantener dicha relación constante [6].

El área proyectada (5) se define cómo el área generada por la proyección en un plano normal a la dirección del vector de empuje (*thrust vector*) [7].

$$A_o = \frac{\pi D^2}{4}. \quad (5)$$

$$a_e = \frac{A_E}{A_o} \quad (6)$$

La ecuación (6) es conocida como *Blade Area Ratio* y es la relación entre el área proyectada de la propela dada en (5) y el área de contacto de las hojas. El aumento de la relación de área entre la propela y las hojas disminuye la eficiencia de la propela, aumentando las pérdidas por fricción. Su disminución influye directamente en el empuje total entregado por la propela, siendo esta relación proporcional [5, 6].



## 2. SIMULACIÓN

### 2.1. OPENFOAM<sup>®</sup>

OpenFOAM<sup>®</sup> (*Open Field Operation and Manipulation*) es un paquete de software libre y abierto que permite resolver problemas de mecánica de medios continuos, entre los que se incluyen problemas de mecánica de fluidos. Sin embargo, OpenFOAM<sup>®</sup> es más claramente una librería de código C++ que permite crear archivos ejecutables. Estos ejecutables son conocidos como aplicaciones divididas en dos categorías principales, *solvers* y *utilities* [8].

Los *solvers* son los encargados de resolver problemas específicos, contienen estructuras capaces de discretizar y resolver ecuaciones. Por su lado las *utilities* son utilizadas en procesos donde se requiera manipulación de datos o pre-procesamiento de la información, entre éstas se encuentran la manipulación y generación de malla, visualización de resultados, entre otros.

Al ser OpenFOAM<sup>®</sup> un *software* de código abierto, existe una gran cantidad de aplicaciones capaces de resolver problemas tales como cavitación, arrastre y sustentación, hasta resolver problemas de deformación de sólidos y análisis financiero.

El desarrollo de un caso de simulación en OpenFOAM<sup>®</sup> parte de la definición de tres carpetas de trabajo, señaladas en la Figura 5.

La carpeta *case* agrupa todos las subcarpetas y archivos necesarios para crear, ejecutar y resolver problemas de toda índole en OpenFOAM<sup>®</sup>. Por lo general el nombre *case* es reemplazado por el nombre del problema a solucionar, el nombre de las subcarpetas mostradas debe ser igual en cualquier caso que se pretenda solucionar en este *software*.

La carpeta *system* contiene los archivos necesarios para resolver el modelo numérico que simula el problema definido, igualmente allí se define el control de la simulación en

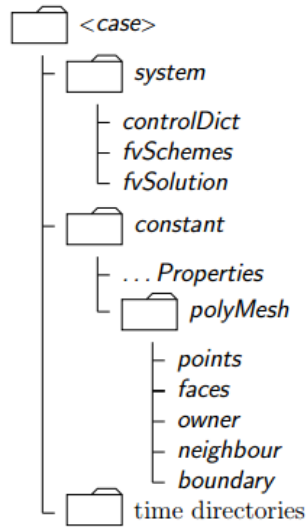


Figura 5. Estructura de trabajo y administración de carpetas en OpenFOAM®. Tomado de OpenFOAM Foundation, OpenFOAM User Guide. Version 2.3.0, OpenCFD, Febrero 2014, U-103.

cuanto a iteraciones, tolerancias de resultados y criterios de convergencia. Por su parte *constant* contiene todos los archivos que definen la malla y los valores de las propiedades del fluido y las superficies del modelo. Finalmente la carpeta *time directories* contiene las condiciones iniciales de la simulación, y una vez iniciado el proceso de simulación se crearán allí nuevas carpetas que contienen los resultados de cada iteración del proceso.

### 2.1.1. Simulación en Software CFD

El análisis de propelas en herramientas de CFD permite estudiar fenómenos de cavitación en la propela, analizar el comportamiento de los diseños generados y como uso más extensivo permite el cálculo de empuje y torque, que permiten por último, obtener valores de eficiencia. Para este punto, es importante diferenciar los distintos tipos de simulaciones en CFD para propelas, ya que existen dos tipos de análisis; análisis de la propela en aguas abiertas ó *Open Water Condition* y el análisis que considera el arrastre producido por el casco del vehículo en la propela, conocido como *Behind Hull Condition* [7].

Para el presente caso, y dado la necesidad de conocer el torque y el empuje generado por la propela sin interacción con el casco del vehículo y en un fluido uniforme, se procede a realizar la simulación bajo condición *Open Water*, por lo que la influencia del arrastre del vehículo es cero.

La mayoría de los análisis mediante simulación en fluidos van de la mano con una comprobación experimental, e inclusive, los métodos de análisis han permitido validar los valores de referencia comercial de las propelas. Para este caso, la ITTC [9] ha definido un procedimiento experimental que permite obtener correlaciones numéricas en cuanto al torque, empuje y eficiencia de las propelas en aguas abiertas.

Las condiciones definidas para encontrar el torque y el empuje están dadas por la velocidad de avance del fluido  $V$  y por la velocidad de giro de la propela  $n$ . Sin embargo existe una relación entre la velocidad de avance del fluido y la velocidad de avance de la propela dada por,

$$V = V_a(1 - w), \quad (7)$$

donde  $w$  es una cantidad conocida como *wake fraction*. Esta relación indica que la velocidad del fluido que llega a la propela es menor que la velocidad del vehículo [1]. El término *wake fraction* se calcula mediante pruebas experimentales, pero para el presente caso será igual a cero, por lo que la velocidad de avance del vehículo será igual a la velocidad de avance del fluido.

Para el desarrollo de las simulaciones se establecen variaciones de la velocidad de giro de la propela para una velocidad de avance dada. En este sentido se simuló velocidades de avance de 0, 1, 1.2 y 1.5  $m/s$ , y velocidades de giro desde 500  $rpm$  hasta 10000  $rpm$  con intervalos constantes de división entre los datos.

### 2.1.2. Modelo de Propela

Los componentes del sistema de propulsión fueron señalados anteriormente en la Figura 2, y la propela instalada en el Visor3 es el modelo *Harbor Models 3540* de cuatro hojas, con diámetro de 3.5", un paso de 4", y una razón de área de hoja ( $a_e$ ) de 0.7, la relación de paso ( $P/D$ ) es de 1.1 [10].

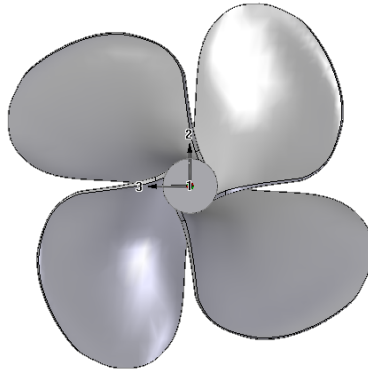


Figura 6. Modelo de propela *Harbor Models 3540* utilizado en el Visor3

### 2.1.3. Mallado

El desarrollo de simulaciones en software CFD requiere el proceso de mallado de las superficies y volúmenes que interactúan en la simulación. Este proceso para OpenFOAM<sup>®</sup> se puede realizar desde malladores externos de tipo libre o software comercial, o utilizando la aplicación *snappyHexMesh* propia de OpenFOAM<sup>®</sup>. Para el caso particular, se utilizó el mallador externo SALOME<sup>®</sup>.

El uso de SALOME se definió luego de la exploración con el software de mallado libre GMSH, el cual presentó problemas al importar archivos .STP ó .IGS en su entorno. Caso contrario al de SALOME en el que las limitaciones presentadas al importar el archivo CAD fueron mínimas. Otra de las ventajas de SALOME, es que permite refinar la geometría en su mismo entorno, sin la necesidad de realizar las modificaciones en un software CAD externo.

En esta aplicación se importa el archivo CAD que define el volumen de control y señala físicamente las fronteras del dominio trabajado en la simulación. Para definir la longitud del volumen de control se toma el tamaño determinado en [11] en el que la longitud aguas abajo de la propela es de  $5D$  y aguas arriba de la propela es de  $3D$ .

Para definir la zona de rotación en el volumen de control se determina un volumen interior cilíndrico, con un diámetro de  $1.2D$ . Allí mismo en SALOME se determina que debe existir una conexión entre los nodos del cilindro exterior y el cilindro interior definido como zona de rotación. En este caso, el procedimiento en vías de reducir el

tiempo de cómputo se inclina por mover el volumen de control definido, es decir, que no rota la propela como tal sino el fluido.

Finalmente se genera la malla en formato *UNV*. La Tabla 1 señala los valores de los parámetros de malla.

Tabla 1. Parámetros de malla obtenidos en SALOME

Parámetros de Malla	
Nodos	127234
Caras	51036
Volumenes	677860
Tamaño Máximo	15.834
Tamaño Mínimo	0.001022
Max Aspect Ratio Volume	2
Min Aspect Ratio Volume	1.3
Max Aspect Ratio Caras	1.6
Min Aspect Ratio Caras	1

Se debe anotar que la malla es generada con elementos tetraédricos, bajo el formato *NETGEN* y que el grado de finura de la misma se determinó como medio. Lo anterior, para disminuir el tiempo de cómputo, sin embargo se realizó un refinamiento en la hoja de la propela, cómo se muestra en la Figura 7. Este refinamiento también es visible en la unión entre las hojas de la propela y el eje de la misma. Estos refinamientos pretenden afectar el comportamiento de la continuidad de la simulación [12].

La Figura 8 muestra la malla final obtenida. En ésta se puede observar con detalle el nivel de refinamiento obtenido alrededor de la propela, donde el tamaño de elemento de malla es más pequeño, además que permite observar el tamaño de malla global obtenido, en relación al tamaño de la propela.

La importación de la malla dentro del entorno de OpenFOAM<sup>®</sup> se realizó utilizando el comando *ideasUNVToFoam*.

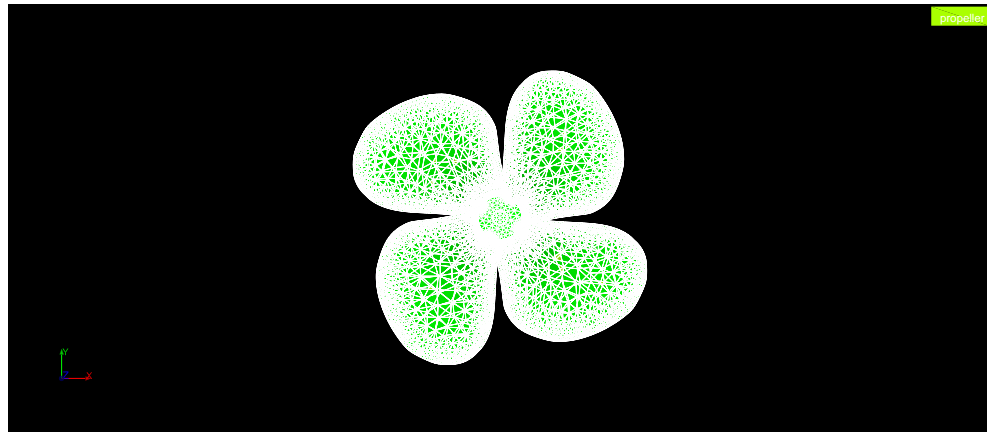


Figura 7. Refinamiento de malla de la propela

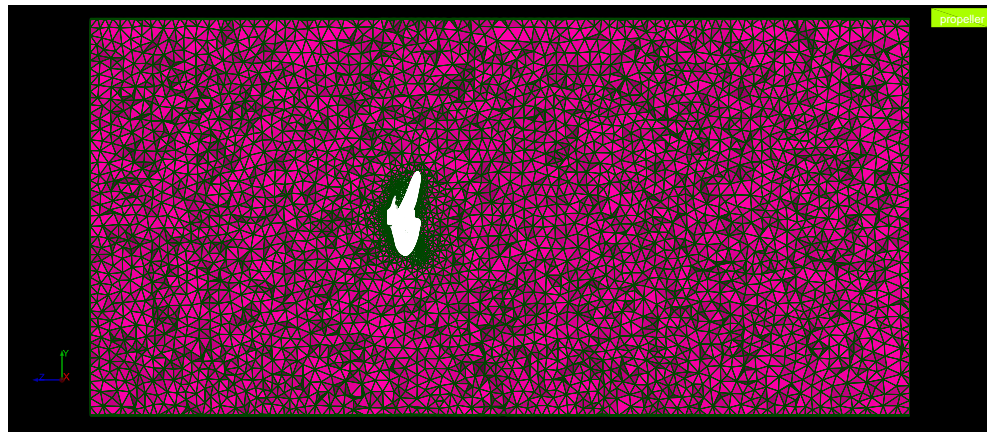


Figura 8. Malla obtenida para la simulación

#### 2.1.4. Condiciones de Pre-Procesamiento

##### *Régimen de Flujo*

La primera característica para definir las condiciones de flujo y el método de solución del problema rotacional de la propela, es definir el régimen al cuál se encuentra el flujo con las condiciones iniciales definidas, determinado por la ecuación de Reynolds como,

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}, \quad (8)$$

donde,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $v$  es la velocidad lineal,  $D$  es el diámetro mojado y

$\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido.

Para algunos valores de velocidad lineal y de rotación los valores del régimen lo establecen como régimen laminar. Sin embargo a partir de velocidades angulares de 570 *rpm*, es necesario considerar el flujo como turbulento. Definido el régimen de trabajo del flujo en la simulación es pertinente ahora seleccionar el modelo de cálculo que permita obtener los resultados buscados.

Para la solución del flujo en los regímenes turbulentos, los modelos de cálculo se basan en el desarrollo de los planteamientos de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en esfuerzos de Reynolds (RANS del inglés Reynolds-Averaged Navier-Stokes), para flujo tridimensional estacionario. Para solucionar la ecuación de Navier-Stokes se decide utilizar el modelo de turbulencia  $\kappa$ - $\epsilon$  [11].

### *Flujo Rotacional*

La definición de flujo rotacional se determina mediante la selección de zonas MRF (*Multi Reference Frame*) en las cuáles se seleccionan las *cellZones* definidas por el volumen interior de la malla [8]. Aquí mismo se definen las diferentes velocidades de rotación y sentidos de giro.

### *Método Numérico*

El método numérico seleccionado para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes es el método *simpleFoam*. Este *solver* es el indicado para la solución de problemas de flujo turbulento en estado estacionario [8].

### *Condiciones de Frontera*

Para cada caso se determinaron las condiciones de frontera según la velocidad de avance, y definiendo una intensidad de turbulencia entre el 0% y el 5%. Los valores de  $\kappa$  y  $\epsilon$  fueron calculados según,

$$\kappa = \frac{3}{2}(\bar{u}I)^2, \quad (9)$$

y

$$\epsilon = \frac{0.1643\kappa^{1.5}}{l} \quad (10)$$

donde,  $\bar{u}$  es el valor de la magnitud de la velocidad media,  $I$  es la intensidad de turbulencia y  $l$  es la longitud de la escala de la turbulencia.

Se definen entonces las variaciones de la velocidad angular, la velocidad lineal y presión inicial de 0  $Pa$ . La viscosidad dinámica del fluido, en este caso agua a  $20^\circ C$  se definió en  $1.005 \times 10^{-3} Ns/m^2$  para todos los casos de velocidad simulados.

### 2.1.5. Resultados

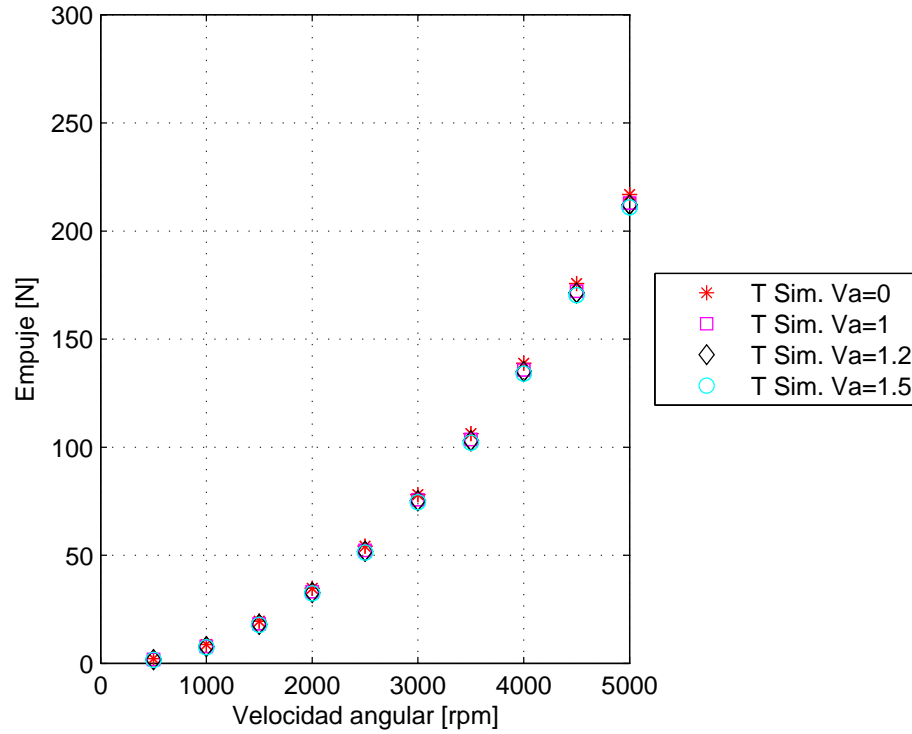


Figura 9. Empuje generado por la propela obtenido en OpenFOAM<sup>®</sup>

La Figura 9 muestra los resultados obtenidos en la simulación para el empuje generado



por la propela en función de la velocidad angular y la velocidad de avance. Se ve claramente que el empuje aumenta en función de la velocidad angular, sin embargo su comportamiento no es lineal, lo que puede dar una idea general del comportamiento de la constante de empuje para la propela. La diferencia entre los valores de empuje obtenidos en función de la velocidad lineal no supera el 6% por lo que la variación de las velocidades de avance en las cuáles se simula la propela no afectan en gran medida los valores de empuje obtenidos.

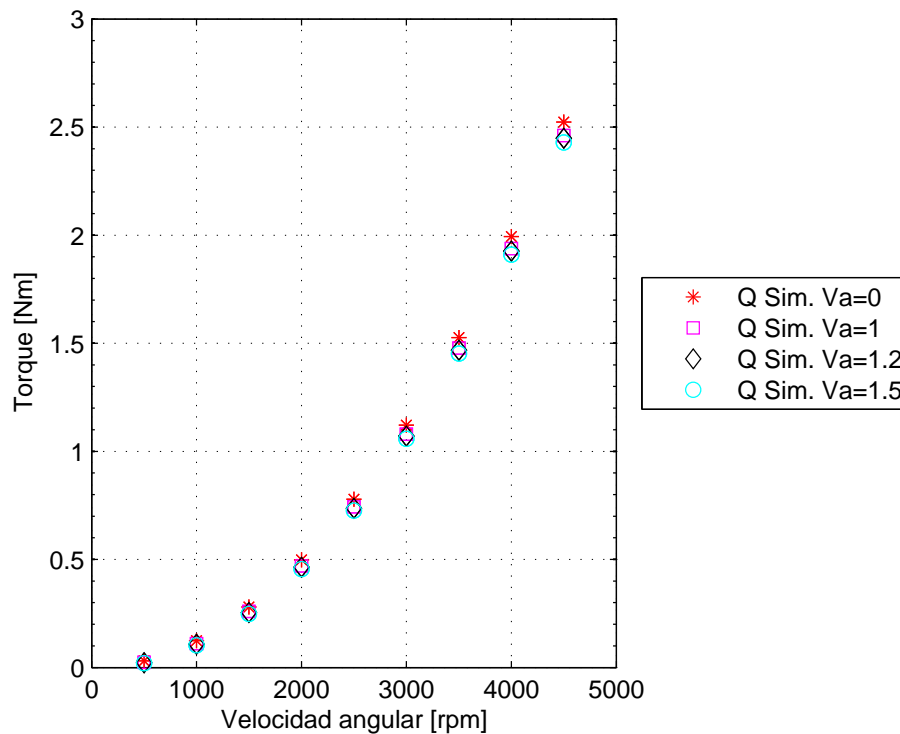


Figura 10. Torque generado por la propela obtenido en OpenFOAM<sup>®</sup>

Los valores de torque obtenidos mediante simulación en OpenFOAM<sup>®</sup> se muestran en la Figura 10, en la que nuevamente la variación del torque se ve afectada principalmente por la variación de la velocidad angular, y la influencia de la velocidad de avance es poca.

Los resultados se acotaron en una región de validez hasta 5000 *rpm*. La selección de esta región de validez se hace debido a que pertenecen allí los rangos de trabajo de velocidades angulares de los motores seleccionados para la evaluación, además de que

el método utilizado en la simulación probó ser estable y con resultados que convergen.

## 2.2. MÉTODO WAGENINGEN

El método Wageningen fue establecido para la selección y cálculo de propelas en función de las necesidades de empuje que requiera una aplicación [13]. Este método es exclusivo para la serie de propelas Wageningen, y más aún el método desarrollado en este trabajo es el indicado para la serie B. Este método usa una aproximación polinomial para obtener los valores de los coeficientes de empuje ( $K_T$ ) y torque ( $K_Q$ ) en función del coeficiente de avance, de la relación entre el paso de la propela y el diámetro de la misma, la relación de área de la propela y el número de hojas. Para el presente caso, la propela instalada en el Visor3 tiene las características geométricas señaladas en la Tabla 2.

Tabla 2. Características geométricas de propela evaluada

Paso [in]	4
Diámetro [in]	3.5
No. de Hojas	4
Relación de área	0.7

Para analizar el comportamiento de la propela, se definen tres parámetros principales de desempeño. Estos son el torque generado [ $Q$ ], el empuje como fuerza que permite vencer el arrastre generado por el casco del vehículo [ $T$ ] y la eficiencia como la relación entre el empuje generado y el torque necesario para crear este empuje.

El empuje generado  $T$  y el torque requerido  $Q$  estan en función de la velocidad angular con que rota la propela y pueden ser calculados de forma general de la siguiente manera [7, 14, 15, 16, 17, 11],

$$T = K_T D^4 \rho n^2, \quad (11)$$

$$Q = K_Q D^5 \rho n^2, \quad (12)$$

donde  $K_T$  y  $K_Q$  son los coeficientes de empuje y torque respectivamente,  $D$  es el diámetro de la propela y  $n$  es la velocidad angular de la propela. El coeficiente de empuje está en función del coeficiente de avance  $J$  (3).

La relación entre  $K_T$  y  $J$  se obtiene por pruebas de laboratorio definidas por el ITTC [9] bajo la condición *open water* y están en función de la geometría de la propela. La Figura 11 representa la curva que relaciona  $K_T$  y  $K_Q$  en función de  $J$ , para la propela instalada en el Visor3.

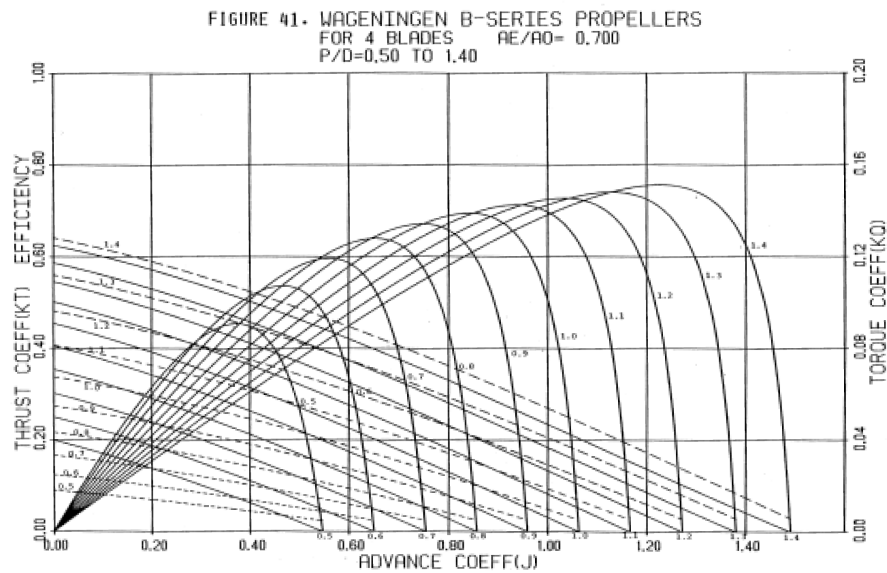


Figura 11. Coeficientes  $K_T$  y  $K_Q$  para propelas con relación de área de 0.7 y Relación de paso ( $P/D$ ) desde 0.5 a 1.4, de cuatro hojas. Tomado de M. Bernitsas, D. Ray, and P. Kinley,  $K_T$ ,  $K_Q$  and efficiency curves for the Wageningen b-series propellers. University of Michigan, Ann Arbor, Report 237, 1981, pág. 47.

Los valores de  $K_T$  y  $K_Q$  pueden ser aproximados mediante el uso de polinomios [13]. Para la serie B de Wageningen, los coeficientes de estos polinomios están disponibles y se encuentran en función de los siguientes parámetros:

- Relación de paso ( $P/D$ ).
- Relación de áreas de la propela ( $A_e/A_o$ ).

- Coeficiente de avance ( $J$ ).

Los coeficientes se calculan de la siguiente manera:

$$K_T = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v}^T (J)^s (P/D)^t (A_E/A_o)(z)^v \quad (13)$$

$$K_Q = \sum_{s,t,u,v} C_{s,t,u,v}^Q (J)^s (P/D)^t (A_E/A_o)(z)^v \quad (14)$$

De (13) y (14),  $C^Q$  y  $C^T$  son los coeficientes iniciales de la ecuación,  $P/D$  es la relación entre el paso de la propela y el diámetro de la misma,  $A_E/A_o$  es la relación de área de la propela y  $z$  es el número de hojas de la misma. Los valores de  $s$ ,  $t$ ,  $u$  y  $v$  son indicados en las tablas disponibles en [18].

Los valores obtenidos por la anterior regresión polinomial se pueden usar para valores de Reynolds hasta de  $2 \times 10^6$ , para corregir los valores de los coeficientes de empuje y torque por encima de este valor, se utilizan los términos  $\Delta_T$  y  $\Delta_Q$  disponibles en [13, 18].

### *Resultados*

La simulación arroja un archivo que contiene los resultados de torque y empuje de la propela en función del número de iteraciones del proceso, su post-procesamiento se realizó en el software MATLAB<sup>®</sup>.

La Figura 12 muestra los resultados obtenidos para los coeficientes de empuje  $K_T$  y torque  $K_Q$  según el método Wageningen, calculados a partir de (13) y (14). Conocidos los valores de los coeficientes de torque y empuje, es posible conocer los valores de torque ( $Q$ ) y empuje ( $T$ ) para la propela de forma teórica.

El comportamiento del coeficiente de empuje en función de la velocidad angular se muestra en la Figura 13, en esta se muestra que para el rango de velocidades lineales trabajadas la variación se encuentra entre 0.4 y 0.5 lo que corresponde a valores del coeficiente de avance entre 0 y 0.322.

El cambio en los valores del coeficiente de avance en relación a la velocidad lineal es

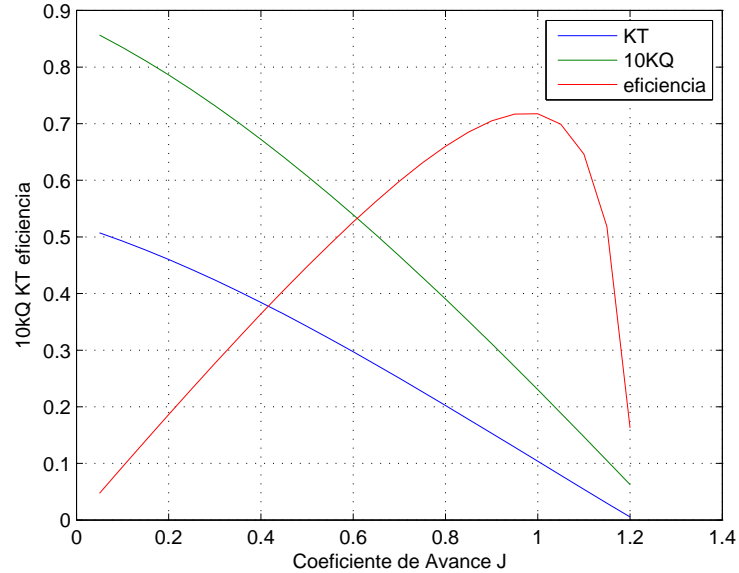


Figura 12.  $K_T$  y  $K_Q$  obtenidas por el método Wageningen

mayor a valores bajos de velocidad angular. En relación a la figura 12, es posible determinar entonces que  $K_T$  aumenta al aumentar la velocidad angular, ya que el coeficiente de avance  $J$  se hace más pequeño, caso contrario al comportamiento de  $K_T$  cuando se presenta un incremento en los valores de la velocidad de avance.

### 2.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

La Figura 14, presenta los resultados del empuje obtenidos en la simulación de CFD y en el cálculo teórico a través del método Wageningen. Los resultados obtenidos en la simulación son señalados en la gráfica como  $TSimVa$  donde  $Va$  señala la velocidad de avance simulada, por su parte los resultados teóricos son señalados por  $TteoVa$ .

Los resultados en cuanto a empuje difieren alrededor de un 6% para todos los valores con velocidad de avance cero. Sin embargo para velocidades de avance mayores, la diferencia de los resultados obtenidos mediante simulación llegan a diferir hasta en un 20%, presentándose la máxima variación a velocidad de avance de 1.5  $m/s$  y una

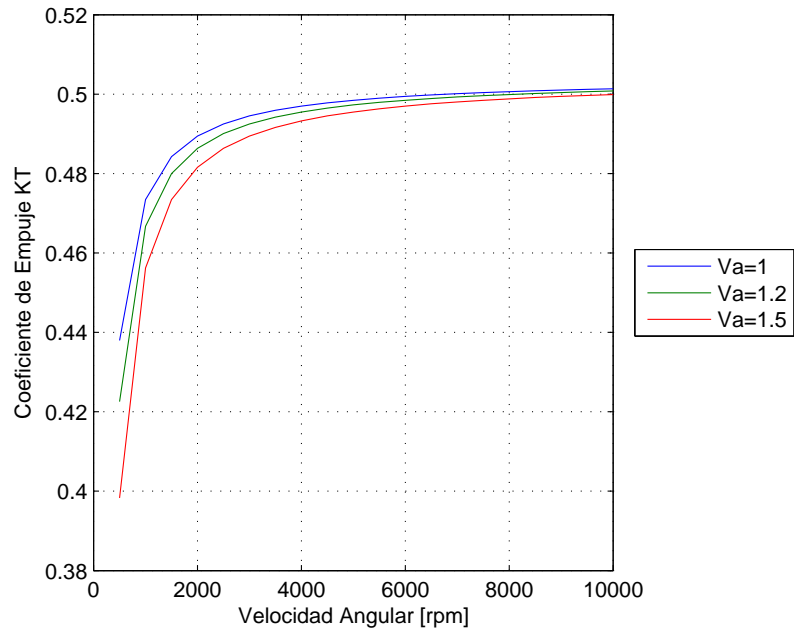


Figura 13. Comportamiento del coeficiente de empuje  $K_T$  en función de la velocidad angular.

velocidad de rotación de 10000 *rpm*. Las diferencias más notorias se encuentran para las velocidades de giro de la propela mayores a 8000 *rpm*, lo cuál sustenta algunas investigaciones en las cuáles la velocidad de giro alta puede influir negativamente en la obtención de resultados satisfactorios para el método  $\kappa$ - $\epsilon$ . Sin embargo, para el rango de trabajo del minisubmarino, entre los 1000 y 4000 *rpm* los resultados obtenidos para empuje, presentan una diferencia media del 8%, por lo que indica que los resultados obtenidos en la simulación pueden alimentar de manera correcta el modelo de cálculo que predice el comportamiento dinámico del propulsor.

La Figura 15 permite realizar una visualización de los resultados de torque producidos por la propela tanto en simulación CFD como los obtenidos de forma teórica.

Es de notar que la Figura 15 muestra un comportamiento uniforme para los resultados obtenidos hasta valores de 7000 *rpm*, donde la diferencia media entre los datos obtenidos teóricamente y los obtenidos mediante simulación se encuentran alrededor del 9%. Sin embargo, se evidencia que para valores cercanos a las 10000 *rpm* la diferencia aumenta, encontrando diferencias entre los datos de hasta el 28%, puntualmente para la velocidad

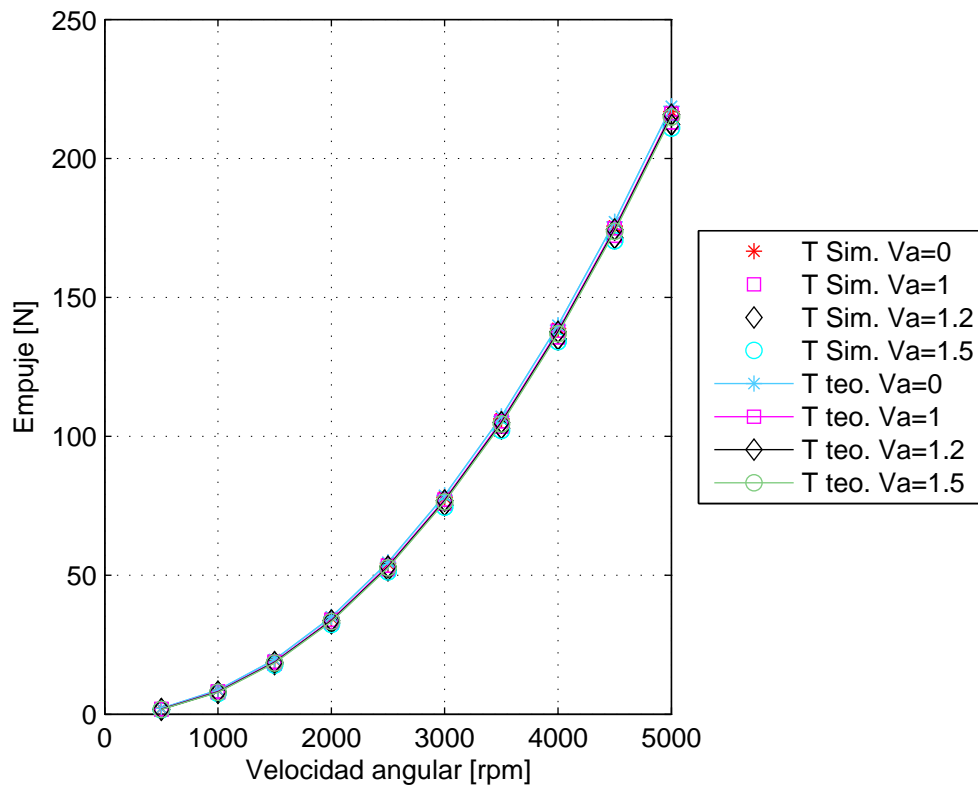


Figura 14. Comparación de resultados de empuje teóricos, y obtenidos por simulación CFD

de avance de  $1.5 \text{ m/s}$  y velocidad de giro de  $10000 \text{ rpm}$ .

Un posible factor que puede incidir en las diferencias obtenidas en el desarrollo de las simulaciones a valores de velocidad de rotación mayores a  $7000 \text{ rpm}$ , es la selección apropiada de los valores iniciales para cada iteración de la simulación, en este sentido la aproximación realizada de  $\kappa$  y  $\epsilon$  presentó en valores altos de velocidades de rotación errores que no permitían la convergencia del método, por lo que se reducían los valores de intensidad de turbulencia para permitir que el método encontrara respuesta al problema.

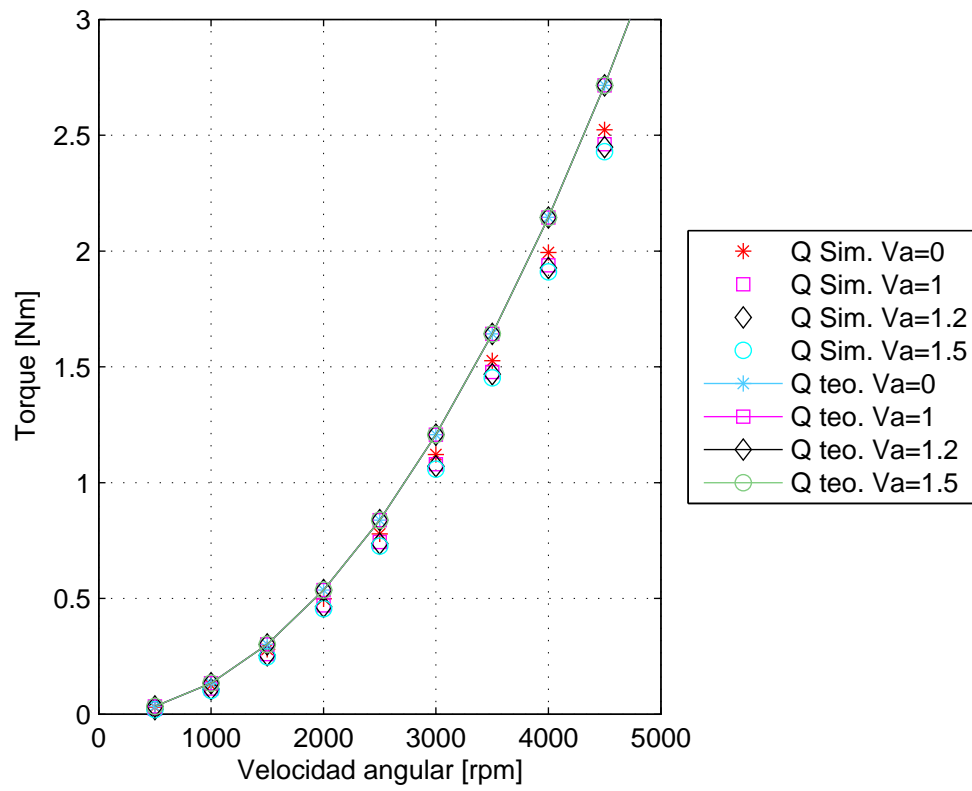


Figura 15. Comparación de resultados de torque teóricos, y obtenidos por simulación CFD



### 3. MODELO MOTOR-REDUCTOR

#### MODELO MATEMÁTICO

Determinados los elementos de análisis principal en el sistema de propulsión del mini-submarino, y conocidas sus tareas dentro del conjunto y principios de funcionamiento básicos, es necesario definir los modelos matemáticos que permiten conocer y predecir su comportamiento, y a su vez determinar las variables que alimentan estos modelos. El modelo utilizado es un modelo estático, por lo tanto el comportamiento dinámico es despreciado.

Para el desarrollo del modelo, es necesario el uso de los parámetros teóricos de los motores a evaluar dados por MAXON. La Tabla 3 presenta los datos usados y la simbología correspondiente para su uso a lo largo del desarrollo del modelo.

Tabla 3. Parámetros de evaluación de motores

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>
Voltaje nominal [V]	V
Torque nominal [mNm]	$M_n$
Corriente nominal [A]	$I_n$
Torque de arranque [mNm]	$M_s$
Corriente de arranque [A]	$I_s$
Resistencia [ $\Omega$ ]	$\Omega$
Constante de torque [mNm/A]	$K_n$
Constante de velocidad [rpm/v]	$K_m$
Gradiente [rpm/mNm]	G

En la Tabla 4 se presentan los datos teóricos característicos de los diez motores evaluados, obtenidos de Maxon Motors. Sus parámetros y unidades se encuentran señalados en la Tabla 3.

Tabla 4. Datos de evaluación de los motores seleccionados

N° Motor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V	12	12	18	18	24	24	36	36	48	48
$M_n$	168	182	165	181	163	179	174	188	168	183
$I_n$	16	9.61	11.1	6.69	8.45	5.1	5.24	3.13	4.16	2.51
$M_s$	1590	916	1650	955	1670	965	1590	916	1670	965
$I_s$	138	45.8	100	33.4	78	26	43.8	14.6	37.6	12.5
$\Omega$	0.0873	0.262	0.18	0.539	0.308	0.923	0.823	2.47	1.28	3.83
$K_n$	11.5	20	16.5	28.6	21.4	37.1	36.3	62.8	44.5	77.1
$K_m$	827	478	579	334	445	257	263	152	214	124
$G$	6.25	6.25	6.3	6.3	6.39	6.39	5.97	5.97	6.16	6.16

### 3.1. MODELO DEL MOTOR

Para la selección de este componente es necesario tener en cuenta el torque que requiere la propela para su buen funcionamiento. Teniendo en cuenta esto, es necesario saber cuánto es el torque que se entrega en el motor según su modelo, y cómo se puede afectar éste mediante la aplicación de una reducción de velocidad.

El torque entregado por el motor depende del gradiente de velocidad y torque y la velocidad angular la que está girando el motor. Esto está gobernado por la siguiente ecuación,

$$\omega = \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{\Delta m} M, \quad (15)$$

donde  $\omega_0$  es la velocidad sin carga del motor en *rpm*,  $\omega$  es la velocidad del giro del motor en *rpm*,  $\Delta\omega/\Delta m$  es el gradiente de velocidad y torque en *rpm/mNm* y está representado en la Tabla 4 por  $G$  y  $M$  es el torque de la carga en el eje del motor en *mNm*. Este modelo de comportamiento del motor es el indicado por Maxon Motors para motores de corriente directa [19].

La Figura 16 muestra el comportamiento del torque en función de la velocidad angular dado por el modelo de Maxon Motors en (15) para cinco motores que pertenecen al

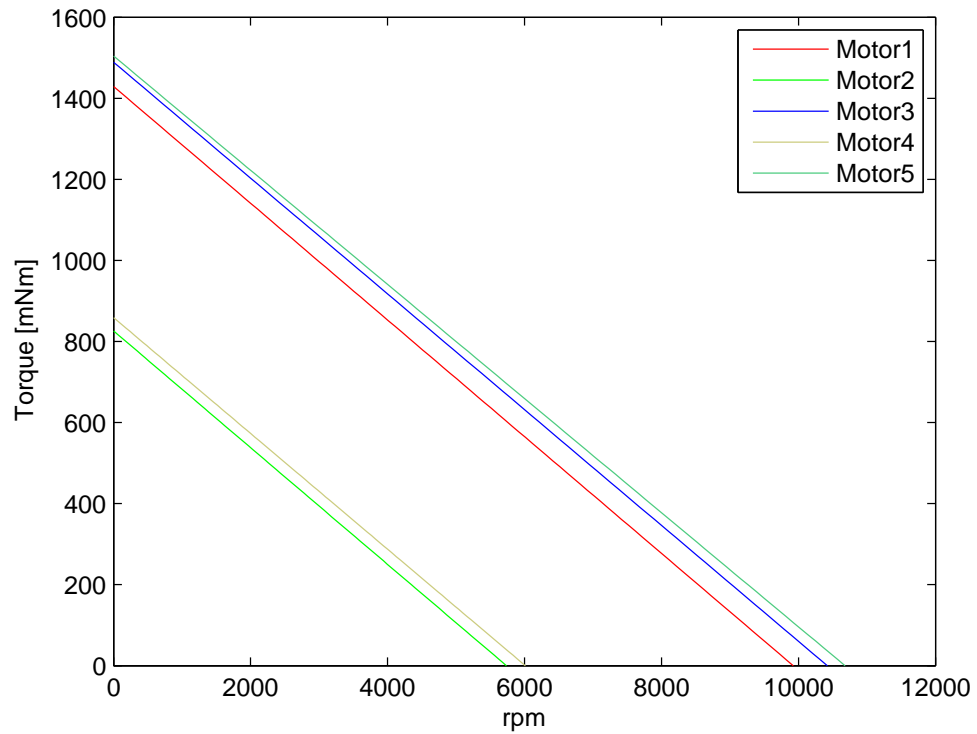


Figura 16. Comportamiento teórico de los motores según modelo de Maxon

grupo de los seleccionados.

### 3.2. MODELO DEL MOTOR-REDUCTOR

El reductor de velocidad usado GP 42 C de la marca Maxon tiene las reducciones de 1, 4.3 : 1 y 3.5 : 1. La ecuación (16) modela el comportamiento del reductor de velocidad,

$$Q = \eta_r Z M, \tag{16}$$

en la cual  $Q$  es el valor del torque a la salida del reductor de velocidad,  $\eta_r$  es la eficiencia del reductor de velocidad definida en porcentaje, y  $Z$  es el factor de reducción.

Según (16) y la información suministrada anteriormente se puede evidenciar que la labor del reductor de velocidad es generar un aumento en el torque entregado por el motor, mientras se sacrifica la velocidad angular. Usando (15) y (16) se obtiene,

$$\omega = \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{\Delta m} \frac{Q}{\eta_r Z}, \quad (17)$$

### 3.3. RELACIÓN MOTOR-PROPELA

Para conocer cómo funciona la propela partiendo desde el motor, es necesario saber cuál es la relación que tiene la velocidad angular de la propela con la velocidad angular del motor. Esta relación está en función de la reducción que realiza el reductor de velocidad, como se evidencia en la siguiente ecuación,

$$\omega = Zn. \quad (18)$$

Remplazando (18) en (15), se obtiene,

$$Zn = \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{\Delta m} \frac{Q}{\eta_r Z} \quad (19)$$

La Figura 17 muestra el comportamiento del modelo de los motores cuando actúa el reductor de velocidad, señalado por (19). De esta misma se observa que a una mayor relación de reducción, el torque entregado a la salida del reductor es mayor, esto ocurre a una menor velocidad angular.

Al cambiar el torque a la salida del reductor de velocidad por el torque requerido por la propela, el cual está en función de la velocidad angular y la velocidad de avance de la propela, se logra conocer la ecuación que rige el sistema de propulsión, dando como respuesta el rango de funcionamiento del motor para dicha propela. Es decir, a qué velocidades angulares trabaja el motor para satisfacer el torque que se genera en la propela. Esa ecuación se presenta de la siguiente forma,

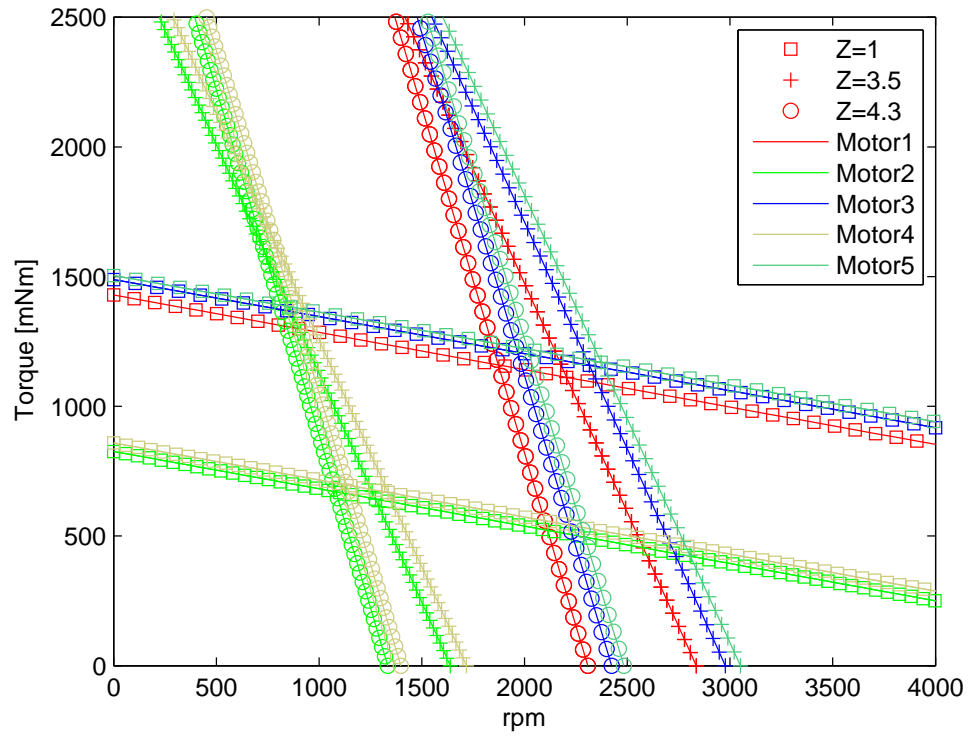


Figura 17. Comportamiento de los motores con acción del reductor de velocidad

$$Zn = \omega_0 - \frac{\Delta\omega}{\Delta m} \frac{1}{\eta_r Z} Q(n, Va), \quad (20)$$

donde  $Q(n, Va)$  es el valor del torque de la propela, que se encuentra en función de la velocidad de giro de la propela  $n$  y la velocidad de avance del vehículo  $V_a$ .

#### 4. COMBINACIÓN DE MODELOS

La Figura 18 muestra el comportamiento de algunos conjuntos motor-reductor empleados en la evaluación del desempeño del sistema de propulsión a su vez que muestra los resultados de torque obtenidos mediante la simulación del comportamiento de la propela para las cuatro velocidades de avance simuladas. Esta figura permite evidenciar los puntos de operación de cada conjunto motor-reductor para la propela evaluada, los cuáles se encuentran en la intersección de cada línea de conjunto motor-reductor y las líneas que definen el comportamiento del torque de la propela para cada velocidad de avance.

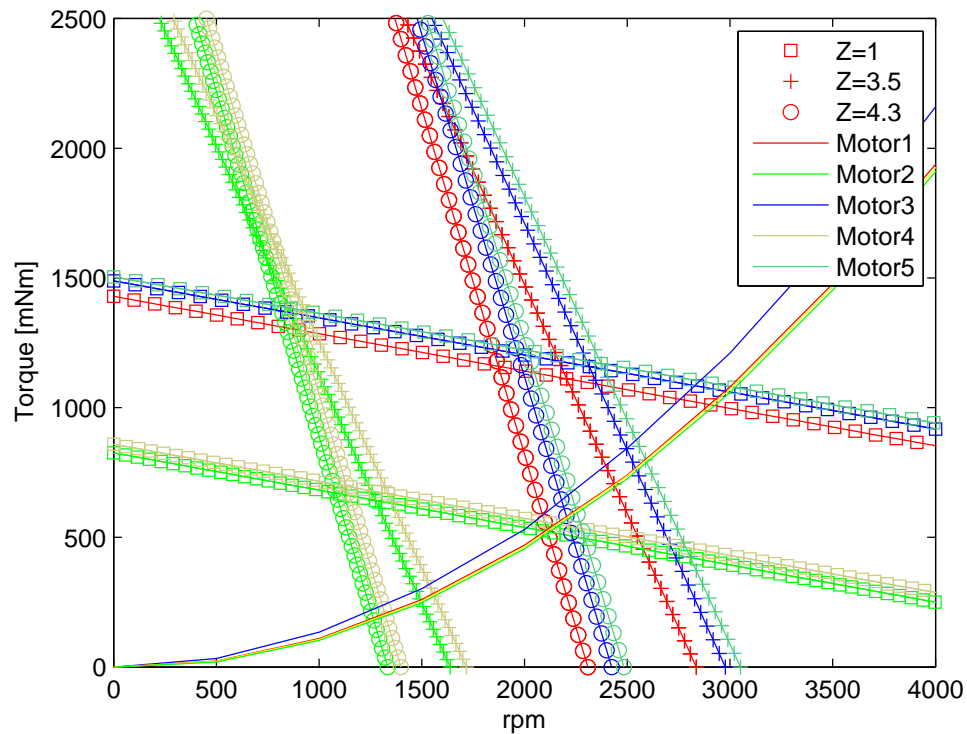


Figura 18. Combinación de modelos conjuntos motor-reductor y propela

Partiendo de la Figura 18, y usando (20) es posible encontrar numéricamente el rango de operación de cada conjunto motor-reductor al máximo voltaje de operación del motor.

#### 4.1. SOFTWARE

Para encontrar el rango de operación de cada conjunto motor-reductor con la propela instalada en el Visor3, se procede al desarrollo de un programa en MATLAB®. Este programa no solo calcula el rango de operación para cada conjunto motor-reductor, sino que permite obtener parámetros de evaluación para estos conjuntos, incluida la propela. El funcionamiento de este programa se indica en la Figura 19.

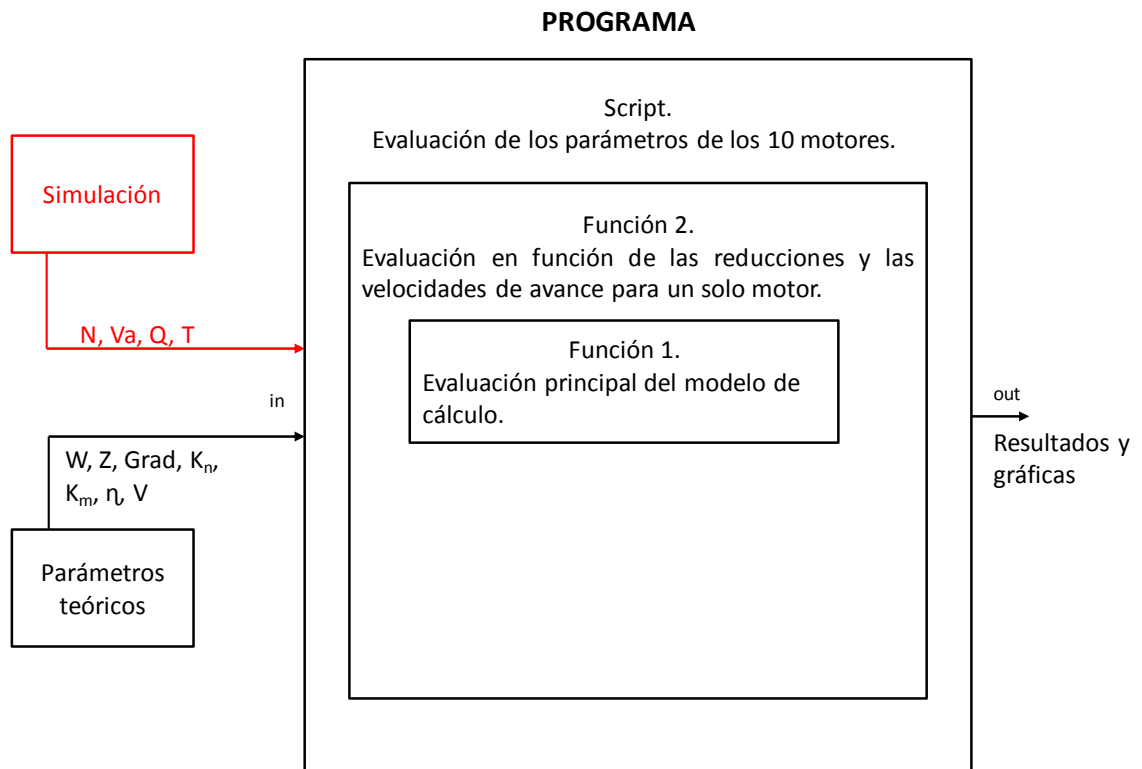


Figura 19. Diagrama de flujo de *software* para evaluación de conjunto motor-reductor-propela

Partiendo de la Figura 19, es posible identificar una tres etapas dentro del programa macro, estas son:

- Función 1: es la función que contiene la ecuación dada por (20).
- Función 2: evalúa la Función 1 para un solo motor en función de las reducciones y las velocidades de avance.
- *Script*: permite evaluar la Función 2 para todo el rango de valores de los parámetros de los motores seleccionados. Este a su vez arroja los resultados para los parámetros señalados en la Tabla 5 para cada conjunto motor-reductor, presentados en forma de gráficas.

Tabla 5. Parámetros de evaluación de conjunto motor-reductor-propela

<b>Parámetros</b>	<b>Unidades</b>
Torque	[mNm]
Empuje	[N]
Corriente	[A]
Potencia shaft	[W]
Potencia eléctrica	[W]
Potencia propela	[W]
Eficiencia shaft	[%]
Eficiencia propela	[%]
Eficiencia del sistema	[%]
Corriente Disponible	[A]

## 4.2. RESULTADOS

### 4.2.1. Demanda de Corriente

Partiendo de la Figura 20 se puede realizar una primera depuración de los motores adecuados para el proyecto. Dentro de la gráfica se presentan dos líneas horizontales, las cuales hacen referencia a la máxima corriente entregada por el *driver* (10A) y la corriente entregada por este en continuo (5A). Las demás líneas representan la corriente a la que trabaja cada una de las combinaciones motor reductor. De la Figura 20 se puede



deducir que si la corriente de la combinación está por encima de la corriente entregada por el driver, esta conjunto motor-reductor no puede ser seleccionado, ya que físicamente es imposible que esa combinación trabaje, así numéricamente esté entregando dichos resultados.

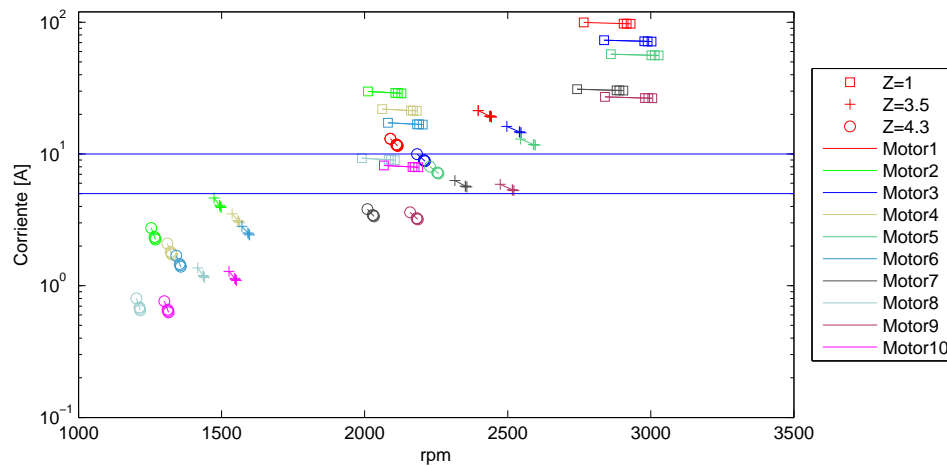


Figura 20. Corriente en función de la velocidad angular con limitación del *driver*

Por lo mencionado anteriormente se puede concluir de la Figura 20 que el motor 1, sin importar su combinación de reducción, se puede descartar ya que no trabaja a una corriente adecuada para el sistema. Además de concluir que es importante el uso de un reductor de velocidad, ya que para casi todos los motores sin reducción se presenta un sobrepaso de corriente al máximo valor suministrado por el *driver*, exceptuando los motores 8 y 10 sin reducción, los cuales están por debajo de la corriente máxima suministrada, pero muy cercanos a ésta. Adicionalmente, es importante resaltar que los motores 3 y 5 sólo funcionan para el máximo valor de reducción de velocidad.

La Figura 21 es una versión más acotada de la 20, pues en ésta se pueden diferenciar dos zonas, señaladas por colores, brindando información importante para la selección del motor ideal. La zona roja, que se encuentra entre 5 y 10 amperios, muestra un rango de corriente que el driver es capaz de entregar, pero que no es lo más recomendable. Por otro lado, la zona verde, es decir la que va hasta 5 amperios, que es la corriente en continuo que puede entregar el *driver*, muestra la zona más adecuada de funcionamiento.

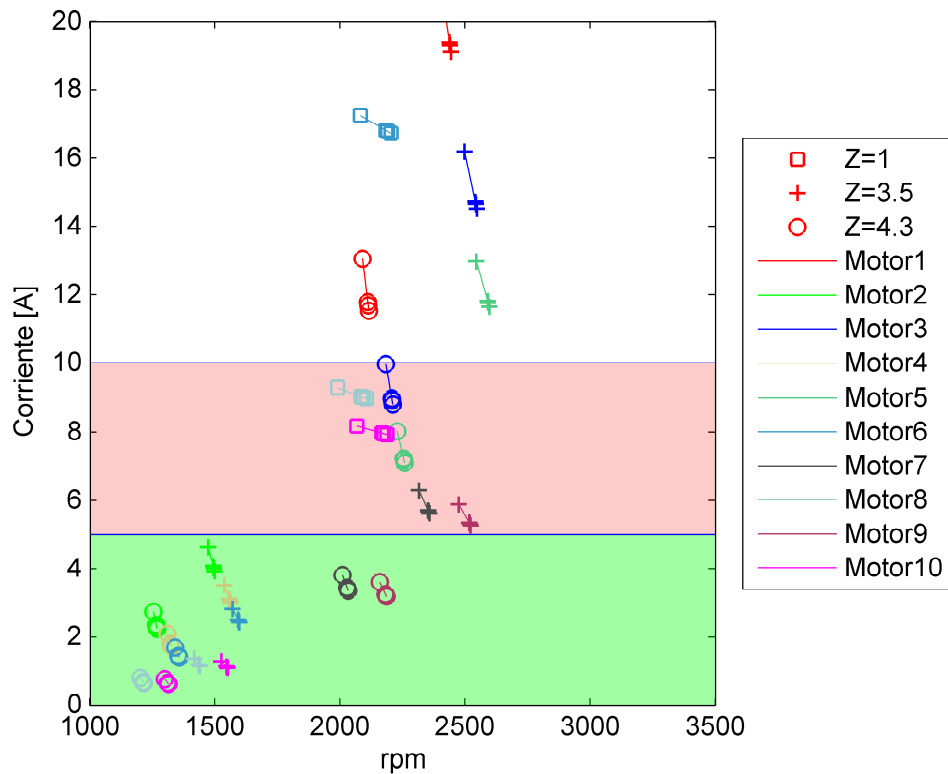


Figura 21. Corriente en función de la velocidad angular con las zonas de trabajo recomendables para los conjuntos motor-reductor, limitada por la acción del *driver*.

#### 4.2.2. Corriente Disponible

Cada uno de los motores cuenta con una corriente nominal señalada en la Tabla 4 y una corriente máxima de operación mostradas en las Figuras 20 y 21, las cuales son valores diferentes. Si al restar de la corriente nominal de un motor su corriente máxima de operación, y el resultado obtenido es positivo, dicho motor tiene un rango de corriente de operación, es decir tiene disponibilidad de corriente. Estos motores son los que se encuentran en la Figura 22 por encima de la línea de cero. Si por el contrario, esta diferencia de corrientes da negativa, el motor está trabajando con una corriente mayor a la nominal, por lo cual se exigiría una mayor potencia de él. Estos motores se observan por debajo del cero en la misma figura.

En la Figura 22, cada color representa un motor diferente según se observa en el cuadro

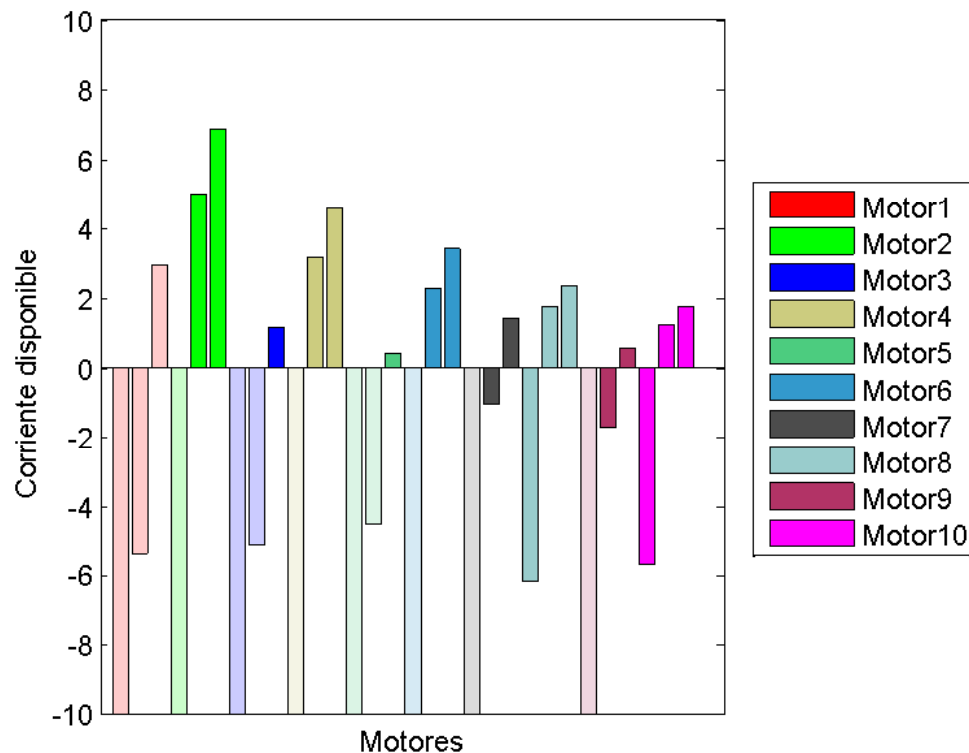


Figura 22. Corriente disponible para cada combinación motor-reductor

de convenciones, y se muestran en orden de reducción de velocidad siendo estos valores de izquierda a derecha 1, 3.5:1 y 4.3:1. Si en un determinado motor, alguna barra se encuentra con un tono más claro, esto quiere decir que éste motor ya fue descartado en análisis anteriores debido al valor demandado de corriente por este.

#### 4.2.3. Demanda de Potencia Eléctrica

El grupo de motores sujeto a evaluación en el presente trabajo, funcionan a una potencia nominal de 150 Watts. En la Figura 23 se observa la demanda de potencia eléctrica de cada motor, y se evidencia que ciertos motores trabajan por encima de este valor de potencia. Para este caso, los motores que más exceden este valor de 150 Watts son los motores 7 y 9 con reducciones de 3.5, y los motores 8 y 10 sin reducción. Estos mismos motores, son los que en la Figura 22, se encontraban por debajo de cero y con su color

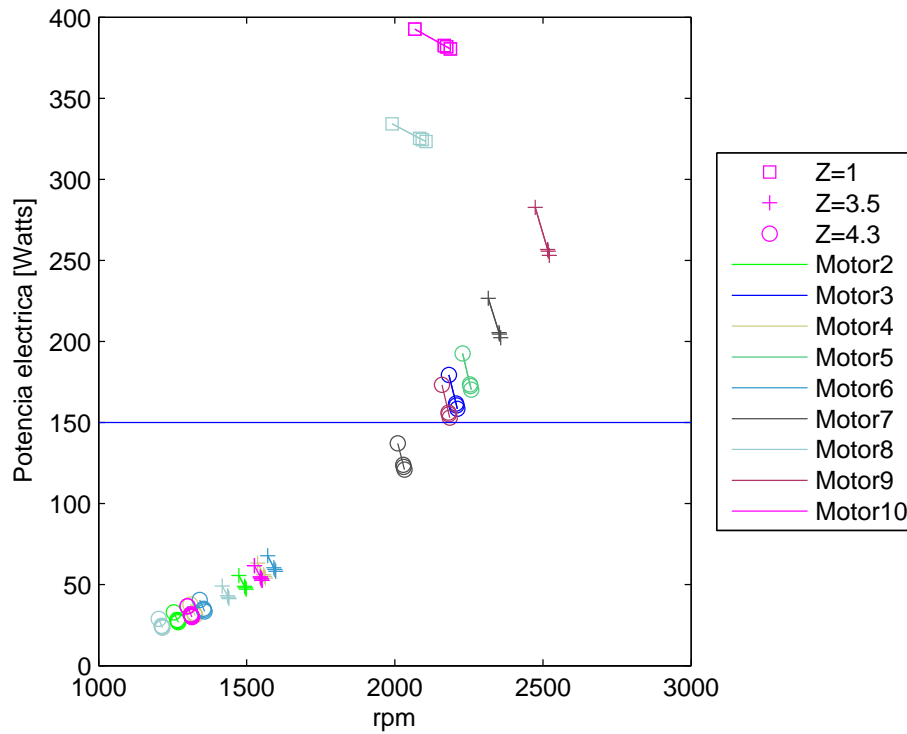


Figura 23. Demanda de potencia eléctrica en función de la velocidad angular

en tono original, pues demandaban una corriente mayor a la nominal. Éste es un factor importante a tener en cuenta al momento de seleccionar el motor ideal.

#### 4.2.4. Torque y Empuje

En la Figura 24 se muestran únicamente los motores con los cuales se podría trabajar, es decir, no se muestran los que previamente fueron eliminados. En la gráfica superior se muestra el torque que genera cada motor al trabajar con un determinado valor de velocidad angular, mostrando que a mayor velocidad angular, se genera un mayor torque. Si se proyectan estos valores a la gráfica inferior, la cual muestra el empuje de cada motor según la velocidad angular, se puede evidenciar que a mayor torque se genera un mayor empuje.

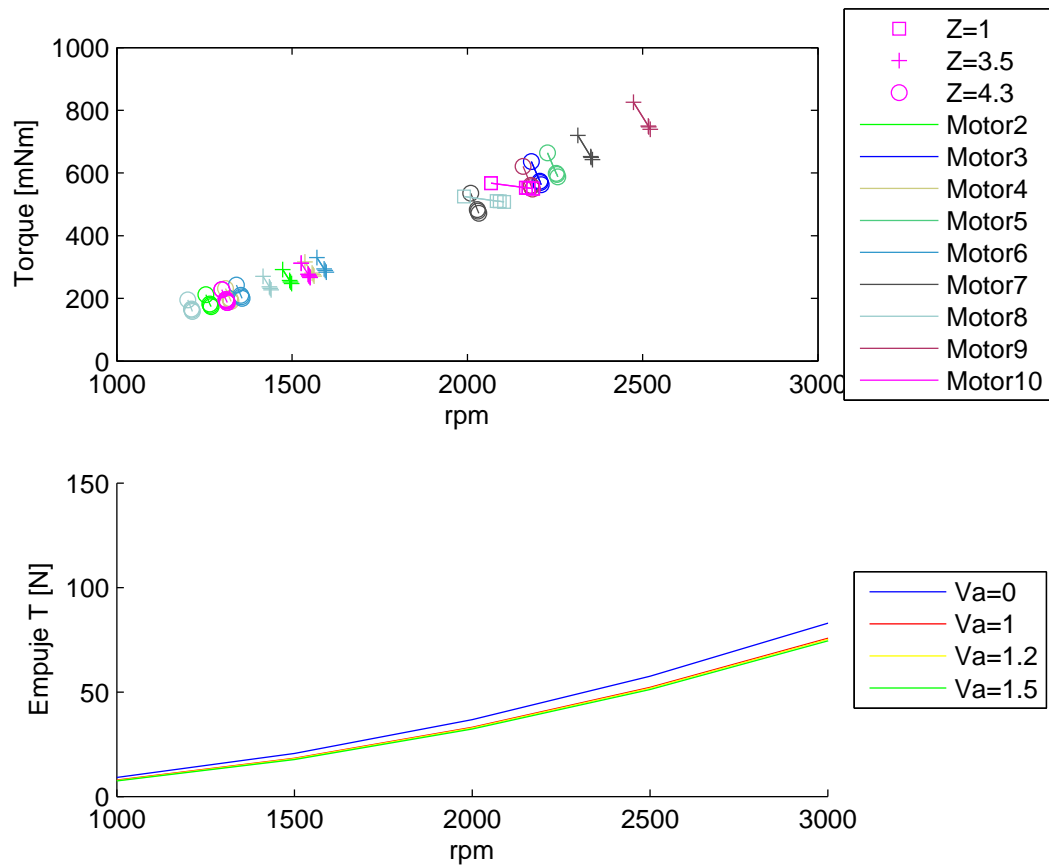


Figura 24. Relación entre torque y empuje en función de la velocidad angular

#### 4.2.5. Eficiencia Conjunto Motor-Reductor

Teniendo en cuenta cuál es el motor que genera más empuje según la Figura 24 y analizando las demás opciones de conjuntos motor-reductor, se procede a observar la eficiencia de cada conjunto admisible para el sistema, buscando identificar cuál de ellos sería el más eficiente.

Se puede identificar según la Figura 25 el motor más eficiente, para este caso el motor 8 con reducción de 4.3. Sin embargo, comparado con los resultados obtenidos en la Figura 24, se evidencia que dicho motor es el que genera menor empuje. Por otro lado el motor 9 con reducción de 3.5, siendo uno de los de mayor empuje, presenta una eficiencia más baja. Por lo anterior se puede inferir que la eficiencia de cada motor se va haciendo más grande a medida que se evalúa con velocidades angulares más bajas.

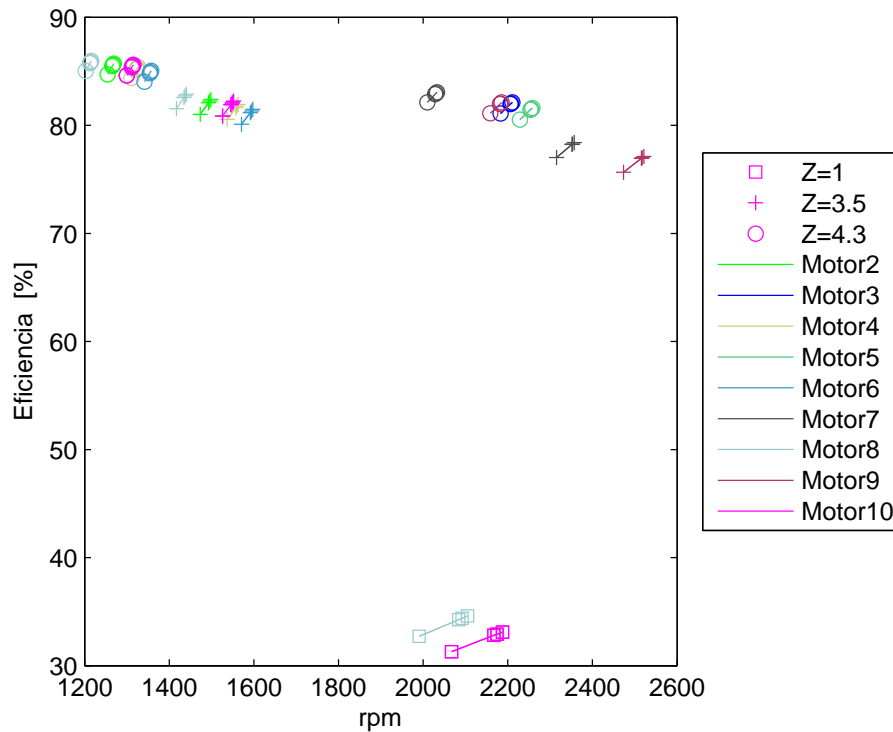


Figura 25. Eficiencia del conjunto motor-reductor

En este punto es importante identificar según la necesidad, cuáles son los parámetros de selección que deben tener mayor peso en la selección del conjunto motor-reductor.

La Figura 25 también entrega información importante sobre el uso del reductor, pues como se evidencia, los motores que no tienen reducción son los que presentan una menor eficiencia, cercanas al 30%. Por lo tanto, se infiere que el uso del reductor es adecuado para el funcionamiento del sistema.

#### 4.2.6. Eficiencia de la Propela

Como efector último del sistema de propulsión se encuentra la propela. La Figura 26 presenta los resultados obtenidos para la eficiencia de la propela tanto del modelo numérico presentado en la sección 3.3. como los resultados obtenidos en la sección 2.2. Se muestra que el rango de operación de los motores abarca un valor máximo del coeficiente de avance de 0.3, por lo que el aprovechamiento de la capacidad total de la

propela es poca. El valor máximo alcanzado de eficiencia de la propela es cercano al 15%.

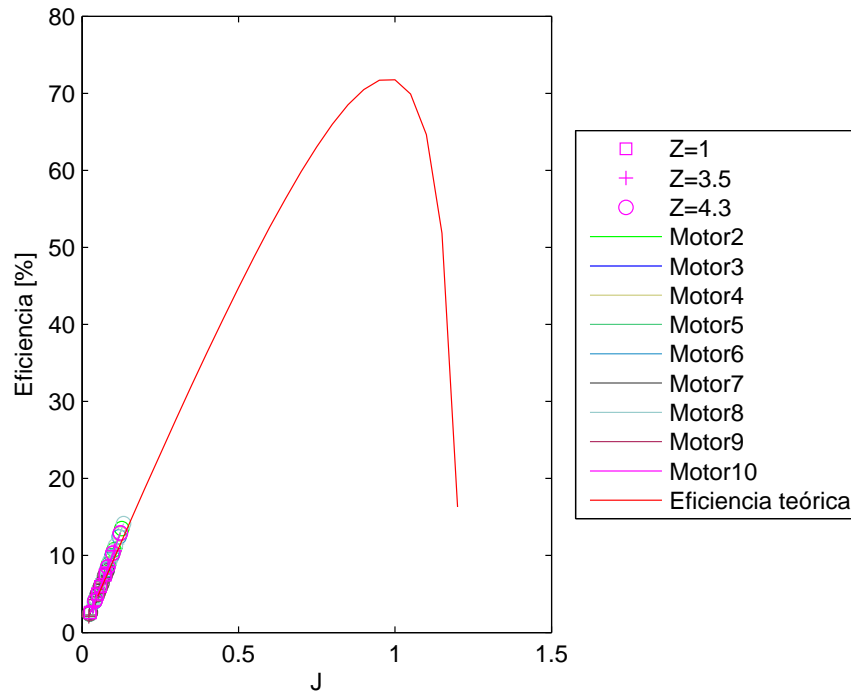


Figura 26. Eficiencia de la propela en función del coeficiente de avance

#### 4.2.7. Eficiencia Global del Sistema

Finalmente, es posible analizar el sistema de forma global. Para este caso se procede a obtener la eficiencia global del sistema, mostrada en la Figura 27, en la que los valores de eficiencia no superan el 20% y denotan que un mayor factor de reducción generan valores mayores de eficiencia a costa de un menor torque para la carga efectuada por la propela, evidenciado en la Figura 24.

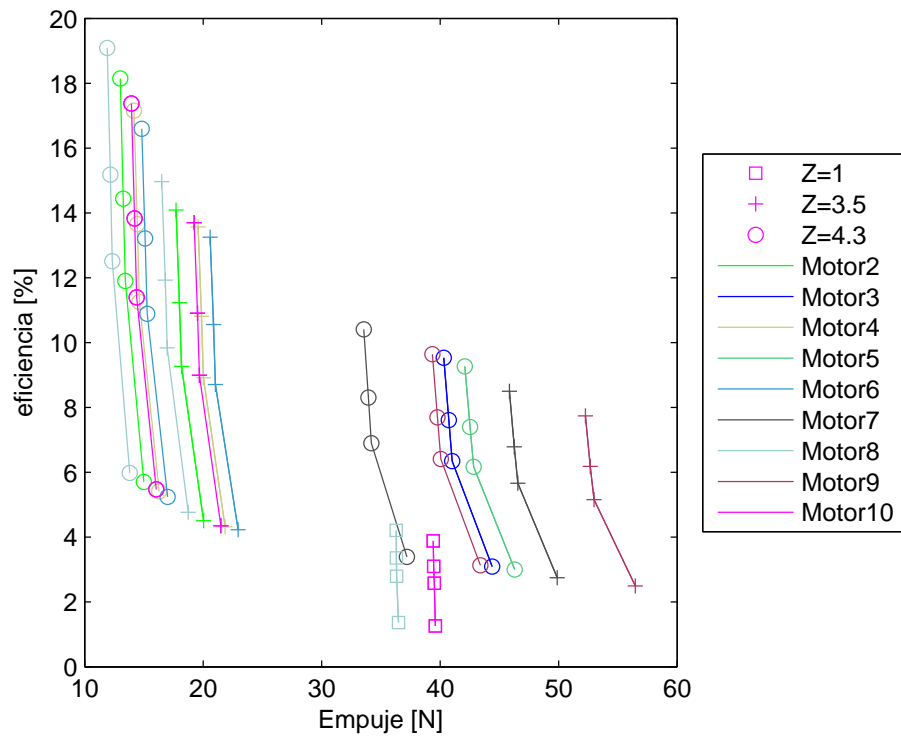


Figura 27. Eficiencia global del sistema de propulsión



## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de concluir el trabajo realizado, es necesario responder a la pregunta de cuál es el mejor motor para la propela instalada en el Visor3. Los parámetros definidos entonces para la selección del mejor conjunto motor-reductor para la propela instalada en el Visor3 son presentados en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de evaluación del sistema del sistema de propulsión

Parámetro	Símbolo
Torque [mNm]	Q
Empuje [N]	T
Corriente [A]	I
Potencia shaft [W]	$P_{sha}$
Potencia eléctrica [W]	$P_{ele}$
Potencia propela [W]	$P_{pro}$
Eficiencia shaft [%]	$\eta_{sha}$
Eficiencia propela [%]	$\eta_{pro}$
Eficiencia del sistema [%]	$\eta_{global}$
Corriente disponible [A]	$I_{disponible}$
Reducción	Z

Los resultados de los anteriores parámetros evaluados en los motores y reducciones seleccionadas se presentan en la matriz de comparación en la que se puede evidenciar de una manera más amigable toda la información extraída durante el trabajo, esta información se encuentra señalada en la Tabla 7.

Al observar la Tabla 7 se logra evidenciar mediante un código de colores los valores más altos para cada uno de los parámetros estudiados, teniendo en cuenta que estos valores han sido evaluados para el motor a su máximo voltaje, por lo cual adicional a los colores con tonos rojizos y verdosos, se encuentran algunos valores con color amarillo,

Tabla 7. Matriz de resultados totales

Tabla de comparación											
Motor	Z	Q	T	I	P <sub>sha</sub>	P <sub>ele</sub>	P <sub>pro</sub>	$\eta_{sha}$	$\eta_{pro}$	$\eta_{global}$	I <sub>disponible</sub>
1	1	1,009.20	71.28	97.51	308.13	1,170.10	85.54	26.33	6.94	1.83	-83.59
	3.5	699.50	49.52	19.39	178.64	231.70	59.43	77.10	8.32	6.41	-5.36
	4.3	519.90	37.10	11.68	115.02	140.20	44.51	82.05	9.68	7.94	2.96
2	1	521.35	37.20	28.96	115.50	347.56	44.64	33.23	9.66	3.21	-20.19
	3.5	252.48	18.01	4.01	39.54	48.09	21.61	82.23	13.66	11.23	4.98
	4.3	177.77	13.27	2.30	23.59	27.56	15.92	85.59	16.87	14.43	6.87
3	1	1,061.90	74.71	71.51	332.36	1,287.10	89.65	25.82	6.74	1.74	-61.87
	3.5	761.90	53.83	14.66	202.84	263.90	64.60	76.88	7.96	6.12	-5.09
	4.3	569.70	40.73	8.92	131.73	160.60	48.88	82.03	9.28	7.61	1.14
4	1	549.01	39.23	21.33	124.70	383.92	47.09	32.48	9.44	3.07	-15.23
	3.5	275.90	19.86	3.06	45.07	55.12	23.84	81.77	13.22	10.81	3.18
	4.3	195.19	14.17	1.76	27.07	31.74	17.34	85.27	16.01	13.66	4.60
5	1	1,079.80	75.97	56.06	340.74	1,345.60	91.17	25.32	6.69	1.69	-48.73
	3.5	792.70	56.15	11.76	215.17	282.20	67.38	76.24	7.83	5.97	-4.52
	4.3	595.10	42.10	7.19	140.54	172.50	1.03	81.49	9.08	7.40	0.43
6	1	560.24	40.05	16.78	128.50	402.69	48.06	31.91	9.35	2.98	-12.14
	3.5	288.98	20.89	2.47	48.26	59.35	25.06	81.32	12.98	10.56	2.28
	4.3	205.12	15.10	1.43	29.12	34.28	18.12	84.93	15.56	13.21	3.41
7	1	991.60	70.12	30.35	300.15	1,092.60	84.14	27.47	7.01	1.93	-25.79
	3.5	649.80	46.26	5.68	160.12	204.60	55.51	78.27	8.67	6.78	-1.06
	4.3	478.70	33.95	3.41	101.76	122.70	40.74	82.96	10.01	8.30	1.43
8	1	509.52	36.32	9.01	111.63	324.53	43.58	34.40	9.76	3.38	-6.16
	3.5	232.24	16.80	1.17	34.97	42.26	20.16	82.73	14.42	11.93	1.76
	4.3	162.36	12.17	0.67	20.65	24.05	14.60	85.85	17.68	15.18	2.33
9	1	1,063.70	74.83	26.56	333.22	1,279.90	89.79	26.14	6.74	1.76	-22.95
	3.5	746.70	52.67	5.33	196.87	255.70	63.21	76.99	8.03	6.18	-1.73
	4.3	556.30	39.77	3.23	127.18	155.10	47.73	82.01	9.38	7.69	0.55
10	1	551.91	39.45	7.95	125.68	381.78	47.34	32.92	9.42	3.10	-5.67
	3.5	271.71	19.53	1.12	44.07	53.70	23.44	82.06	13.30	10.91	1.22
	4.3	191.75	14.22	0.64	26.37	30.85	17.64	85.48	16.30	13.83	1.75

dicho color señala los valores de corriente que están por encima de la corriente máxima suministrada por el *driver*, y la corriente nominal de funcionamiento del motor.

Por lo tanto para poder realizar la matriz de selección, matriz encargada de entregar una respuesta sobre el mejor motor, es necesario filtrar la Tabla 7 dejando únicamente los motores adecuados, es decir los que son aptos en su rango de voltaje, como se explicó previamente. La nueva matriz de selección depurada se presenta en la Tabla 8, en la que las combinaciones posibles entre motor y reductor de velocidad trabajan en el rango establecido para los motores.

Tabla 8. Matriz de resultados depurada y filtrada

<b>Motor</b>	<b>Z</b>	<b>Q</b>	<b>T</b>	<b>I</b>	<b>P<sub>sha</sub></b>	<b>P<sub>ele</sub></b>	<b>P<sub>pro</sub></b>	<b><math>\eta_{sha}</math></b>	<b><math>\eta_{pro}</math></b>	<b><math>\eta_{global}</math></b>	<b>I<sub>disponible</sub></b>
2	Z=3.5	252.48	18.01	4.01	39.54	48.09	21.61	82.23	54.65	44.94	4.98
	Z=4.3	177.77	13.27	2.30	23.59	27.56	15.92	85.59	67.48	57.76	6.87
3	Z=4.3	569.70	40.73	8.92	131.73	160.60	48.88	82.03	37.10	30.44	1.14
4	Z=3.5	275.90	19.86	3.06	45.07	55.12	23.84	81.77	52.88	43.24	3.18
	Z=4.3	195.19	14.17	1.76	27.07	31.74	17.34	85.27	64.06	54.62	4.6
5	Z=4.3	595.10	42.10	7.19	140.54	172.50	1.03	81.49	36.31	29.59	0.43
6	Z=3.5	288.98	20.89	2.47	48.26	59.35	25.06	81.32	51.93	42.23	2.28
	Z=4.3	205.12	15.10	1.43	29.12	34.28	18.12	84.93	62.23	52.85	3.41
7	Z=3.5	649.80	46.26	5.68	160.12	204.60	55.51	78.27	34.67	27.14	-1.06
	Z=4.3	478.70	33.95	3.41	101.76	122.70	40.74	82.96	40.04	33.22	1.43
8	Z=1	509.52	36.32	9.01	111.63	324.53	43.58	34.40	39.04	13.43	-6.16
	Z=3.5	232.24	16.80	1.17	34.97	42.26	20.16	82.73	57.57	47.71	1.76
	Z=4.3	162.36	12.17	0.67	20.65	24.05	14.60	85.85	70.72	60.71	2.33
9	Z=3.5	746.70	52.67	5.33	196.87	255.70	63.21	76.99	32.11	24.72	-1.73
	Z=4.3	556.30	39.77	3.23	127.18	155.10	47.73	82.01	37.53	30.78	0.55
10	Z=1	551.91	39.45	7.95	125.68	381.78	47.34	32.92	37.67	12.40	-5.67
	Z=3.5	271.71	19.53	1.12	44.07	53.70	23.44	82.06	53.19	43.65	1.22
	Z=4.3	191.75	14.22	0.64	26.37	30.85	17.64	85.48	64.71	55.32	1.75

Con una lista depurada sobre los motores activos para la propela, es necesario realizar la matriz de selección para obtener un valor cuantitativo del mejor motor. Para ello se define una matriz de ponderación. Dicha matriz relaciona cada uno de los parámetros que se van a evaluar, y se le da un peso a cada uno de estos según la importancia de este para el proyecto.

Para este caso en particular los parámetros de mayor peso serían el empuje, y los diferentes tipos de eficiencias que entrega el sistema y la corriente disponible. Por esto los demás parámetros al ser relacionados con los anteriores obtendrán un valor más bajo. Esta matriz de ponderación se muestra en la Tabla 9.

Habiendo obtenido dicha matriz, lo único que queda es realizar la sumatoria de la multiplicación de cada factor de ponderación referente a un criterio por dicho parámetro, con lo cual se obtiene un resultado cuantitativo, el cual se evidencia dentro de un código de colores, conociendo cual es la opción más alta y cuál es la más baja según la importancia de los parámetros asignados.

Tabla 9. Valores de calificación para selección de conjunto motor-reductor

	Q	T	I	P <sub>sha</sub>	P <sub>ele</sub>	P <sub>pro</sub>	$\eta_{sha}$	$\eta_{pro}$	$\eta_{global}$	I <sub>disponible</sub>	Suma	Factor de ponderación	
Q		2	3	3	4	2	2	2	2	2	22	0.0815	
T	4		4	4	4	3	4	3	3	3	32	0.1185	
I	3	2		2	3	2	2	2	1	3	20	0.0741	
P <sub>sha</sub>	3	2	4		4	3	2	2	2	2	24	0.0889	
P <sub>ele</sub>	2	2	3	2		2	2	2	2	2	19	0.0704	
P <sub>pro</sub>	4	3	4	3	4		3	2	2	3	28	0.1037	
$\eta_{sha}$	4	2	4	4	4	3		2	2	2	27	0.1000	
$\eta_{pro}$	4	3	4	4	4	4	4		2	3	32	0.1185	
$\eta_{global}$	4	3	5	4	4	4	4	4		3	35	0.1296	
I <sub>disponible</sub>	4	3	3	4	4	3	4	3	3		31	0.1148	
<b>Total</b>												270	

Según la Tabla 10 el motor más adecuado para la aplicación del minisubmarino Visor3 es el motor número número 9, acoplado a un reductor de velocidad con relación de 3.5:1 aún cuando la eficiencia del sistema esté calificada por debajo de la media de los datos obtenidos, el empuje prima como factor de selección.

Tabla 10. Matriz de decisión conjunto motor-reductor

Calificación												
Motor	Z	Evaluación según su parámetro										Total
		Q	T	I	P <sub>sha</sub>	P <sub>ele</sub>	P <sub>pro</sub>	$\eta_{sha}$	$\eta_{pro}$	$\eta_{global}$	I <sub>disponible</sub>	
2	Z=3.5	1.69	1.71	2.78	1.00	4.37	1.71	4.79	3.86	3.70	4.70	3.076
	Z=4.3	1.19	1.26	3.73	0.60	4.64	1.26	4.99	4.77	4.75	5.00	3.287
3	Z=4.3	3.81	3.87	0.05	3.35	2.90	3.87	4.78	2.62	2.51	3.50	3.190
4	Z=3.5	1.85	1.89	3.30	1.14	4.28	1.89	4.76	3.74	3.56	4.20	3.080
	Z=4.3	1.31	1.35	4.02	0.69	4.58	1.37	4.97	4.53	4.50	4.50	3.223
5	Z=4.3	3.98	4.00	1.01	3.57	2.74	0.08	4.75	2.57	2.44	3.10	2.843
6	Z=3.5	1.94	1.98	3.63	1.23	4.22	1.98	4.74	3.67	3.48	4.00	3.092
	Z=4.3	1.37	1.43	4.21	0.74	4.55	1.43	4.95	4.40	4.35	4.20	3.191
7	Z=3.5	4.35	4.39	1.85	4.07	2.32	4.39	4.56	2.45	2.23	2.50	3.315
	Z=4.3	3.21	3.22	3.11	2.58	3.39	3.22	4.83	2.83	2.74	3.60	3.263
8	Z=1	3.41	3.45	0.00	2.84	0.75	3.45	2.00	2.76	1.11	0.00	2.020
	Z=3.5	1.56	1.60	4.35	0.89	4.45	1.60	4.82	4.08	3.93	3.80	3.106
	Z=4.3	1.09	1.15	4.63	0.52	4.69	1.15	5.00	5.00	5.00	4.00	3.264
9	Z=3.5	5.00	5.00	2.05	5.00	1.65	5.00	4.48	2.27	2.04	2.00	3.442
	Z=4.3	3.73	3.78	3.21	3.23	2.97	3.78	4.78	2.65	2.53	3.30	3.376
10	Z=1	3.70	3.74	0.59	3.19	0.00	3.74	1.92	2.66	1.02	0.70	2.181
	Z=3.5	1.82	1.85	4.38	1.12	4.30	1.85	4.78	3.76	3.59	3.50	3.078
	Z=4.3	1.28	1.35	4.64	0.67	4.60	1.40	4.98	4.61	4.56	3.80	3.207

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante la simulación en software CFD son un buen estimado del comportamiento real del sistema. Del comportamiento de la propela, es posible concluir que la eficiencia de la propela aumenta en función del coeficiente de avance, sin embargo el coeficiente de avance se ve afectado directamente por el cambio tanto de la velocidad de avance como la velocidad angular, pues a mayor velocidad angular, la eficiencia de la propela disminuye tanto como el coeficiente de avance. Aunque a mayor velocidad angular el empuje de la propela aumenta, éste va en detrimento de la eficiencia de la misma.

Otra conclusión importante se deriva del rango de trabajo de los motores seleccionados y del aprovechamiento del rango de trabajo de la propela. Se evidencia que para los valores del coeficiente de avance trabajados entre 0 y 0.3, la eficiencia de la propela alcanza un máximo de 30%. Por lo que permite concluir que el rango de motores seleccionado debe ser cambiado en miras de encontrar un mayor aprovechamiento de la capacidad de empuje la propela, o por otra parte el análisis debería partir entonces del cambio de la propela para que se adecúe de mejor manera a las necesidades de trabajo del minisubmarino.

El uso de reductores de velocidad en el sistema cumplió la función esperada aumentando el torque de salida hacia la propela, pero a su vez disminuyó el torque consumido por el motor para accionar el mecanismo de propulsión lo que genera una disminución en el consumo de potencia eléctrica por parte del motor. En conclusión, el uso de este mecanismo es completamente útil para equipos operados remotamente sin cable umbilical que porten baterías, ya que aumenta el rendimiento eléctrico y la capacidad de operación.

## TRABAJO FUTURO

Debido al desarrollo del presente trabajo de grado dentro del proyecto de Exploración de los Fondos Marinos Colombianos, se espera que su trabajo continúe y alimente este proceso de generación de conocimiento. El trabajo futuro se ubica en dos categorías: 1) modelización y simulación y 2) experimentación.

### MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN

- El trabajo realizado definió escenarios variables en función del cambio de motores para un modelo de propela, sin embargo, se deben evaluar dos escenarios más. Uno que analice un grupo de propelas para un motor dado, y otro que defina múltiples escenarios con variaciones de ambos componentes.
- En cuanto al uso de herramientas de CFD, es necesario contemplar otras modificaciones a las características del modelo físico estudiado, esto es, incluir ductos (*nozzle*), paredes de bloqueo, etc., e inclusive estudiar la influencia del arrastre del casco del vehículo en el comportamiento de la propela.
- El uso de una modelización del problema mediante la teoría *actuator disk* se ha definido como un método que disminuye el tiempo de computo [20], por lo que la investigación en el tema y su uso para la modelización de propelas es pertinente, y alimentaría completamente un proceso de diseño de propelas.
- El acceso a software de simulación en fluidos de licencia libre puede ser una vía exploratoria de uso en la Universidad Pontificia Bolivariana, ya que a pesar de presentar algunas desventajas respecto a software de uso comercial, involucra la necesidad de desarrollar otro tipo de competencias tales como programación en lenguajes de alto nivel, potencialización de las actividades investigativas en el tema de simulación y permite un acceso de toda la comunidad académica a un completo paquete de herramientas útiles en materia de investigación.

## EXPERIMENTACIÓN

Adicional a lo anterior, es necesario realizar experimentación que compruebe y alimente la información recopilada. Este tipo de desarrollo es útil para definir nuevas rutas de trabajo independientes a las definidas aquí para conocer información de primera mano del comportamiento real del sistema propulsivo. Esta experimentación debe evaluar los parámetros de desempeño señalados en este documento como evaluadores del comportamiento del sistema de propulsión.

En este sentido la medición de parámetros de comportamiento de la propela se pueden llevar a cabo con un montaje en canal hidrodinámico en el que se mida el torque y el empuje generado.

Para la obtención del empuje generado por la propela, es posible realizar experimentación de tipo *Static Bollard Pull Test*, en el que el empuje generado es medido en una celda de carga [21, 22], de igual manera con un arreglo de celdas de cargas es posible obtener el valor del torque entregado por la propela, este arreglo es conocido como *strain gauge balance*.

Es posible obtener la eficiencia de la propela con los datos de empuje y torque obtenidos, de igual manera es posible obtener los valores de los coeficientes de torque  $K_Q$  y  $K_T$ .

Para la ejecución de los experimentos mencionados es recomendable realizar los siguientes pasos antes de la prueba con el propulsor inmerso en el agua [21],

- Realizar prueba externa sin la propela instalada en el propulsor para verificar el funcionamiento del motor y su acople al reductor de velocidad.
- Realizar prueba externa con la propela instalada en el propulsor para verificar vibraciones, elementos que estén en contacto y produzcan fricción o detención inmediata del propulsor, etc.

La medición de la potencia entregada por el sistema de propulsión justo antes de la propela, indicada como potencia del *shaft* en el presente documento, puede obtenerse mediante la medición del torque en este punto. La obtención del torque permite obtener la potencia, ya que es conocido el valor de la velocidad angular a la cuál gira el sistema en este punto. Esta velocidad angular está relacionada con el valor de rotación del



motor, afectada por el valor de relación del reductor de velocidad.

Conocida la potencia justo antes de la propela, es posible conocer la eficiencia que entrega la propela en relación a la entregada por el conjunto motor-reductor, ya que la potencia entregada por la propela se puede obtener mediante el torque medido [1].

La obtención de los parámetros de evaluación eléctricos definidos en este documento se obtienen mediante la medición de éstas variables en el motor. Para este caso se obtendrían valores de consumo de corriente en el motor y potencia eléctrica demandada por éste.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Allmendinger, S. of Naval Architects, and M. E. (U.S.), *Submersible vehicle systems design*, ser. SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS (U S)//TRANSACTIONS. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990.
- [2] R. D. Christ and R. L. W. Sr, “Chapter 3 - ROV components,” in *The ROV Manual*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, pp. 46 – 80.
- [3] U. A. Korde, “Study of a jet-propulsion method for an underwater vehicle,” *Ocean Engineering*, vol. 31, no. 10, pp. 1205 – 1218, 2004.
- [4] F. Azis, M. Aras, M. Rashid, M. Othman, and S. Abdullah, “Problem identification for underwater remotely operated vehicle (rov): A case study,” *Procedia Engineering*, vol. 41, no. 0, pp. 554 – 560, 2012.
- [5] G. Griffiths, *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*, ser. Ocean science and technology. Taylor & Francis, 2002.
- [6] R. A. Valencia-Cardona, *Modelación y simulación de un vehículo sumergible operado remotamente ROV, para inspección subacuática*. Universidad EAFIT, 2007.
- [7] J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [8] O. Foundation, *OpenFOAM User Guide. Version 2.3.0*, OpenCFD, Febrero 2014.
- [9] I. T. T. C. (ITTC), Ed., *Testing and Extrapolation Methods. Propulsion. Propulsor Open Water Test*, vol. 7.5. International Towing Tank Conference (ITTC).
- [10] J. A. Ramírez-Macías, *Diseño Mecánico de un Vehículo Sumergible Operado Remotamente*. Universidad Pontificia Bolivariana, 2007, trabajo de Grado para

aspirar al título de Especialista en Automática.

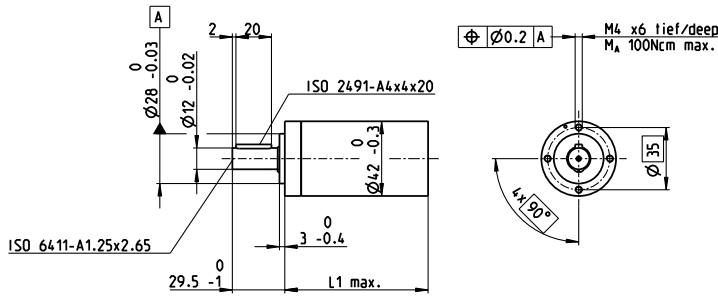
- [11] M. Morgut and E. Nobile, “Influence of grid type and turbulence model on the numerical prediction of the flow around marine propellers working in uniform inflow,” *Ocean Engineering*, vol. 42, no. 0, pp. 26 – 34, 2012.
- [12] H. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education Limited, 2007.
- [13] G. Kuiper, *The Wageningen Propeller Series*, marin ed. MARIN, Mayo 1992, published on the occasion of its 60th anniversary.
- [14] J. Kim and W. K. Chung, “Accurate and practical thruster modeling for underwater vehicles,” *Ocean Engineering*, vol. 33, pp. 566 – 586, 2006.
- [15] E. Benini, “Significance of blade element theory in performance prediction of marine propellers,” *Ocean Engineering*, vol. 31, pp. 957 – 974, 2004.
- [16] A. N. Hayati, S. M. Hashemi, and M. Shams, “A study on the behind-hull performance of marine propellers astern autonomous underwater vehicles at diverse angles of attack,” *Ocean Engineering*, vol. 59, no. 0, pp. 152 – 163, 2013.
- [17] J. Martínez-Calle, L. Balbona-Calvo, J. González-Pérez, and E. Blanco-Marigorta, “An open water numerical model for a marine propeller: A comparison with experimental data,” *ASME 2002 Joint U.S.-European Fluids Engineering Division Conference*, vol. 2, pp. 807–813, 2002.
- [18] M. Bernitsas, D. Ray, and P. Kinley, “ $k_t$ ,  $k_q$  and efficiency curves for the wageningen b-series propellers.” Department of Nava Architecture and Marine Engineering. College of Engineering. University of Michigan., Ann Arbor, Michigan 48109, Report 237, 1981.
- [19] M. MOTOR, *High Precision Drives Systems*, 08th ed., MAXON MOTOR.
- [20] A. M. I. Nodeland, “Wake modelling using an actuator disk model in openfoam,” Master Thesis of Energy and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Junio 2013.

- [21] M. K., SaptoAdiN, and N. Prayogo, “Design of testing of underwater thruster for shrimp roV-itb,” *Indian Journal of Marine Sciences*, vol. 38(3), pp. 338–345, 2009.
- [22] R. A. Valencia-Cardona, “Fluid and structural simulation of a roV,” Universidad EAFIT, Tech. Rep., 2008.

## ANEXOS

# Reductor planetario GP 42 C Ø42 mm, 3-15 Nm

Versión cerámica



## Datos técnicos

Reductor planetario	diente recto
Eje de salida	acero inoxidable
Rodamiento de salida	rodamiento a bolas pretensado
Juego radial a 12 mm de la brida	máx. 0.06 mm
Juego axial con carga axial	< 5 N 0 mm
	> 5 N máx. 0.3 mm
Máx. carga axial admisible	150 N
Máx. fuerza adm. en acoplamientos a presión	300 N
Sentido de giro, entrada/salida	=
Máx. velocidad de entrada en continuo	8000 rpm
Rango de temperatura aconsejado	-40...+100°C
Número de etapas	1 2 3 4
Máx. carga radial adm. a 12 mm de la brida	120 N 240 N 360 N 360 N

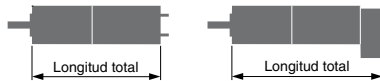
M 1:4

- Programa Stock
- Programa Estándar
- Programa Especial (previo encargo)

## Referencia

Datos del Reductor	203113	203115	203119	203120	203124	203129	203128	203133	203137	203141
1 Reducción	3.5:1	12:1	26:1	43:1	81:1	156:1	150:1	285:1	441:1	756:1
2 Reducción absoluta	7/2	49/4	26	343/8	2197/27	156	2401/16	15379/54	441	756
10 Momento de inercia	14	15	9.1	15	9.4	9.1	15	15	14	14
3 Diámetro máx. del eje del motor	10	10	8	10	8	8	10	10	10	10
<b>Referencia</b>	<b>203114</b>	<b>203116</b>	260552*	203121	203125	260553*	203130	203134	203138	203142
1 Reducción	4.3:1	15:1	36:1	53:1	91:1	216:1	186:1	319:1	488:1	936:1
2 Reducción absoluta	13/3	91/6	36/1	637/12	91	216/1	4459/24	637/2	4394/9	936
10 Momento de inercia	9.1	15	5.0	15	15	5.0	15	15	9.4	9.1
3 Diámetro máx. del eje del motor	8	10	4	10	10	4	10	10	8	8
<b>Referencia</b>	260551*	203117		203122	203126		<b>203131</b>	203135	<b>203139</b>	260554*
1 Reducción	6:1	19:1		66:1	113:1		230:1	353:1	546:1	1296:1
2 Reducción absoluta	6/1	169/9		1183/18	338/3		8281/36	28561/81	546	1296/1
10 Momento de inercia	4.9	9.4		15	9.4		15	9.4	14	5.0
3 Diámetro máx. del eje del motor	4	8		10	8		10	8	10	4
<b>Referencia</b>		203118		<b>203123</b>	203127		203132	203136	203140	
1 Reducción		21:1		74:1	126:1		257:1	394:1	676:1	
2 Reducción absoluta		21		147/2	126		1029/4	1183/3	676	
10 Momento de inercia		14		15	14		15	15	9.1	
3 Diámetro máx. del eje del motor		10		10	10		10	10	8	
4 Número de etapas		1	2	2	3	3	4	4	4	4
5 Máx. par en continuo	Nm	3.0	7.5	7.5	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
6 Máx. par admisible de forma intermitente	Nm	4.5	11.3	11.3	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
7 Máx. rendimiento	%	90	81	81	72	72	72	64	64	64
8 Peso	g	260	360	360	460	460	460	560	560	560
9 Holgura media en vacío	°	0.6	0.8	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
11 Longitud reductor L1	mm	41.0	55.5	55.5	70.0	70.0	70.0	84.5	84.5	84.5

\*no combinación con motor EC-i40 (50 W y 70 W)



## Sistema Modular maxon

+ Motor	Página	+ Sensor	Pág.	Freno	Pág.	Longitud total [mm] = Longitud motor + longitud reductor + (sensor/freno) + piezas de montaje									
EC-max 30, 60 W	205					105.1	119.6	119.6	134.1	134.1	134.1	148.6	148.6	148.6	148.6
EC-max 30, 60 W	205	MR	319			117.3	131.8	131.8	146.3	146.3	146.3	160.8	160.8	160.8	160.8
EC-max 30, 60 W	205	HEDL 5540	328			125.7	140.2	140.2	154.7	154.7	154.7	169.2	169.2	169.2	169.2
EC-max 30, 60 W	205			AB 20	370	141.2	155.1	155.1	169.6	169.6	169.6	184.1	184.1	184.1	184.1
EC-max 30, 60 W	205	HEDL 5540	328	AB 20	370	161.4	175.9	175.9	190.4	190.4	190.4	204.9	204.9	204.9	204.9
EC-max 40, 70 W	206					99.1	113.6	113.6	128.1	128.1	128.1	142.6	142.6	142.6	142.6
EC-max 40, 70 W	206	MR	320			115.0	129.5	129.5	144.0	144.0	144.0	158.5	158.5	158.5	158.5
EC-max 40, 70 W	206	HEDL 5540	328			122.5	137.0	137.0	151.5	151.5	151.5	166.0	166.0	166.0	166.0
EC-max 40, 70 W	206			AB 28	371	133.4	147.9	147.9	162.4	162.4	162.4	176.9	176.9	176.9	176.9
EC-max 40, 70 W	206	HEDL 5540	328	AB 28	371	151.7	166.2	166.2	180.7	180.7	180.7	195.2	195.2	195.2	195.2
EC-4pole 30, 100 W	213					88.1	102.6	102.6	117.1	117.1	117.1	131.6	131.6	131.6	131.6
EC-4pole 30, 100 W	213	MR	319			100.3	114.8	114.8	129.3	129.3	129.3	143.8	143.8	143.8	143.8
EC-4pole 30, 100 W	213	HEDL 5540	329			108.7	123.2	123.2	137.7	137.7	137.7	152.2	152.2	152.2	152.2
EC-4pole 30, 100 W	213			AB 20	370	124.3	138.8	138.8	153.3	153.3	153.3	167.8	167.8	167.8	167.8
EC-4pole 30, 100 W	213	HEDL 5540	329	AB 20	370	145.1	159.6	159.6	174.1	174.1	174.1	188.6	188.6	188.6	188.6
EC-4pole 30, 200 W	214					105.1	119.6	119.6	134.1	134.1	134.1	148.6	148.6	148.6	148.6
EC-4pole 30, 200 W	214	MR	319			117.3	131.8	131.8	146.3	146.3	146.3	160.8	160.8	160.8	160.8
EC-4pole 30, 200 W	214	HEDL 5540	329			125.7	140.2	140.2	154.7	154.7	154.7	169.2	169.2	169.2	169.2
EC-4pole 30, 200 W	214			AB 20	370	141.3	155.8	155.8	170.3	170.3	170.3	184.8	184.8	184.8	184.8
EC-4pole 30, 200 W	214	HEDL 5540	329	AB 20	370	162.1	176.6	176.6	191.1	191.1	191.1	205.6	205.6	205.6	205.6
EC-i 40, 50 W	228					67.1	81.6	81.6	96.1	96.1	96.1	110.6	110.6	110.6	110.6
EC-i 40, 50 W	228	16 EASY				78.8	93.3	93.3	107.8	107.8	107.8	122.3	122.3	122.3	122.3
EC-i 40, 50 W	228	HEDL 5540				90.1	104.6	104.6	119.1	119.1	119.1	133.6	133.6	133.6	133.6
EC-i 40, 70 W	229					77.1	91.6	91.6	106.1	106.1	106.1	120.6	120.6	120.6	120.6
EC-i 40, 70 W	229	16 EASY				88.8	103.3	103.3	117.8	117.8	117.8	132.3	132.3	132.3	132.3
EC-i 40, 70 W	229	HEDL 5540				100.1	114.6	114.6	129.1	129.1	129.1	143.6	143.6	143.6	143.6



**ADS 50/10** 4-Q-DC Servoamplifier  
Powerful PWM servoamplifier for permanent magnet activated DC motors from 80 to approx. 500 watts output power. Available as Power Version in module housing.



**ADS\_E 50/5** 4-Q-DC Servoamplifier  
Powerful PWM servoamplifier for permanent magnet activated DC motors from 10 to approx. 250 watts output power. Available as Standard Version in racket card (Eurocard) format.



**ADS\_E 50/10** 4-Q-DC Servoamplifier  
Powerful PWM servoamplifier for permanent magnet activated DC motors from 80 to approx. 500 watts output power. Available as Power Version in racket card (Eurocard) format.

Operating modes		
IxR compensation, encoder speed control, DC tacho speed control, current control	IxR compensation, encoder speed control, DC tacho speed control, current control	IxR compensation, encoder speed control, DC tacho speed control, current control
Electrical Data		
12 - 50 VDC	12 - 50 VDC	12 - 50 VDC
0.9 x V <sub>CC</sub>	0.9 x V <sub>CC</sub>	0.9 x V <sub>CC</sub>
20 A	10 A	20 A
10 A	5 A	10 A
50 kHz	50 kHz	50 kHz
95 %	95 %	95 %
75 μH / 10 A	150 μH / 5 A	75 μH / 10 A
Input		
-10 ... +10 V	-10 ... +10 V	-10 ... +10 V
«Enable»	«Enable»	«Enable»
+4 ... 50 V	+4 ... 50 V	+4 ... 50 V
min. 2 VDC, max. 50 VDC	min. 2 VDC, max. 50 VDC	min. 2 VDC, max. 50 VDC
Channel A, A1, B, B1, max. 100 kHz, TTL	Channel A, A1, B, B1, max. 100 kHz, TTL	Channel A, A1, B, B1, max. 100 kHz, TTL
Output		
Open Collector, max. 30 VDC (I <sub>L</sub> < 20 mA)	Open Collector max. 30 VDC (I <sub>L</sub> < 20 mA)	Open Collector max. 30 VDC (I <sub>L</sub> < 20 mA)
-10 ... +10 VDC (short circuit protected)	-10 ... +10 VDC (short circuit protected)	-10 ... +10 VDC (short circuit protected)
-10 ... +10 VDC (short circuit protected)	-10 ... +10 VDC (short circuit protected)	-10 ... +10 VDC (short circuit protected)
Voltage outputs		
+/-12 VDC, max. 12 mA (short circuit protected)	+/-12 VDC, max. 12 mA (short circuit protected)	+/-12 VDC, max. 12 mA (short circuit protected)
+5 VDC, max. 80 mA	+5 VDC, max. 80 mA	+5 VDC, max. 80 mA
IxR compensation, Offset, n <sub>max</sub> , I <sub>max</sub> , gain	IxR compensation, Offset, n <sub>max</sub> , I <sub>max</sub> , gain	IxR compensation, Offset, n <sub>max</sub> , I <sub>max</sub> , gain
Protected against thermal overload, overcurrent and short-circuit of motor cables	Protected against thermal overload, overcurrent and short-circuit of motor cables	Protected against thermal overload, overcurrent and short-circuit of motor cables
Bi-colour LED, green = READY, red = ERROR	Bi-colour LED, green = READY, red = ERROR	Bi-colour LED, green = READY, red = ERROR
Ambient temperature and humidity range		
-10 ... +45°C	-10 ... +45°C	-10 ... +45°C
-40 ... +85°C	-40 ... +85°C	-40 ... +85°C
20 ... 80 %	20 ... 80 %	20 ... 80 %
Mechanical Data		
Approx. 400 g	Approx. 175 g	Approx. 410 g
180 x 103 x 26 mm (see page 284)	160 x 100 x 16 mm (see page 284)	160 x 100 x 30.5 mm (see page 284)
Flange for M4-screws	Rack-Installation	Rack-Installation
See page 284	See page 284	See page 284
Order Number		
<b>201583</b> ADS 50/10 4-Q-DC Servoamplifier Power Version in module housing	<b>166143</b> ADS_E 50/5 4-Q-DC Servoamplifier Standard Version in Eurocard format	<b>168049</b> ADS_E 50/10 4-Q-DC Servoamplifier Power Version in Eurocard format
Accessories		
<b>235811</b> DSR 70/30 Shunt regulator	<b>167850</b> Front panel 3HE, 5TE <b>166873</b> Backplane with screw type terminal block	<b>168910</b> Front panel 3HE, 7TE <b>166873</b> Backplane with screw type terminal block

**A. ARTÍCULO PUBLICABLE**



## Análisis del Desempeño Dinámico del Sistema de Propulsión de un Minisubmarino Robot

Esteban VARGAS, Santiago VÉLEZ, Juan A. RAMÍREZ-MACÍAS

Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Mecánica,  
Cir. 1 #70-01, of. 11-311, Medellín, Colombia.  
juan.ramirez@upb.edu.co

Resumen: En este trabajo se aborda el análisis dinámico de un propulsor desde el punto de vista del comportamiento de la propela, con el fin de obtener modelos matemáticos que asistan el proceso de diseño de propulsores para mini-vehículos sumergibles. A través del uso de herramientas de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), se analiza el comportamiento del torque y el empuje de una propela en aguas abiertas como parámetros de desempeño. La simulación del comportamiento de la propela y el procesamiento de los resultados de elaboró usando ANSYS. El modelo matemático permitirá estudiar en conjunto el sistema propulsor compuesto por propela y motor para fines de diseño. Copyright® 2014 UPB

Abstract: In this work the dynamics of the propulsion system of a Remotely Operated Vehicle (ROV) are studied through fluid dynamics simulation. Torque and thrust are assumed as performance parameters of the propeller, and are analyzed to evaluate the dynamic behavior.

Keywords: ROV, Torque and Thrust analysis, Propeller, CFD simulation.

### 1. INTRODUCCIÓN

Las simulaciones computacionales para el análisis del comportamiento del flujo a través de propelas ha sido un tema tratado ampliamente por investigadores en el área marítima, y han tratado de resolver preguntas alrededor del comportamiento tanto del fluido circundante e incidente en la propela, así como las propiedades mecánicas, fluido-dinámicas y características de desempeño.

En particular se busca analizar el comportamiento del empuje y el torque en función de las características geométricas y de carga de trabajo. Los primeros estudios fueron la *teoría de momentum* propuesto por Rankine en 1865 y la *teoría de sección de hoja* propuesto por R. E. Froude en 1887 (Carlton, 2011). La teoría de momentum incluye parámetros geométricos en su análisis y toma como variables de interés el torque y el empuje. La teoría de sección de hoja permite establecer un mayor número de relaciones entre las variables de desempeño del propulsor y su configuración geométrica. Estos estudios son la base para el análisis del desempeño dinámico de las propelas.

Algunos trabajos que merecen revisión especial i.e. aquellos que se han acercado a los modelos teóricos de diseño de propelas, basados en iteraciones numéricas de modelos matemáticos propuestos tales como el Método de diseño de Eckhardt y Morgan, basados en el procedimiento de análisis de Burrell que

combina las teorías de momentum y sección de hoja para el estudio del comportamiento dinámico de las propelas. Estas teorías de diseño se extendieron al estudio de los fenómenos de cavitación producidos en los vértices de los alabes de las hélices de las propelas, al incluir fenómenos de vorticidad e inclusive el estudio de fluidos inviscidos por el método de análisis de Lerb (Carlton, 2011).

El uso de sistemas de cómputo, permitió conocer ese comportamiento dinámico basado en otros modelos de cálculo. Estos modelos de cálculo se basan en el desarrollo de los planteamientos de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en esfuerzos de Reynolds (RANS), para flujo tridimensional estacionario. Algunos estudios se han centrado en determinar procedimientos de solución de las ecuaciones RANS en los entornos de los simuladores que permitan obtener resultados más realistas frente al comportamiento dinámico de la propela tales como los métodos SST (Shear Stress Transport) y BSL-RSM (Baseline-Reynolds Stress Models), determinando el SST como un modelo de cálculo pertinente y acertado al análisis de desempeño de propelas, basados en análisis de flujo turbulento, bien sea por el análisis  $\kappa\text{-}\omega$  ó  $\kappa\text{-}\epsilon$  (Morgut y Nobile, 2012).

La mayoría de los análisis mediante simulación en fluidos van de la mano con una comprobación experimental, e inclusive, los métodos de análisis han permitido validar los valores de

referencia comercial de las propelas. Sin embargo, este trabajo se encamina a que el análisis permita conocer para una propela en particular su comportamiento dinámico, y que estos valores se extrapolen a un nuevo entorno (software) en donde acoplados a un sistema mecánico y eléctrico de transmisión de potencia, se pueda evaluar globalmente el desempeño del sistema de propulsión.

Para la obtención del anterior objetivo, se utilizará una simulación de fluidos computacionales en el software ANSYS, donde la premisa principal sea conocer el comportamiento de los parámetros del torque y empuje como parámetros de desempeño dinámico de la propela. La validación experimental será un aporte adicional a futuro al presente trabajo y la comprobación de los resultados se realizará en base los modelos de cálculo tradicionales o de base ya mencionados.

## 2. MODELO DE PROPELA

En este estudio fue usado un modelo único de propela tipo Wageningen de 3.5" de diámetro ( $D$ ) y cuatro hojas, (Fig. 1). La hélice formada no es simétrica, por esta razón es nece-

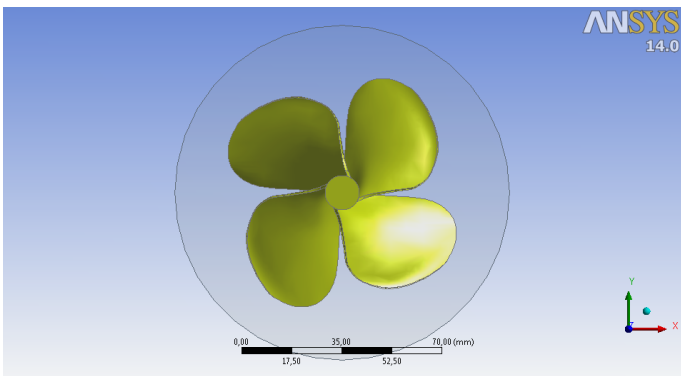


Figura 1. Modelo en CAD de la propela para simulación

sario simular la geometría completa i.e. no es posible realizar análisis mediante el uso de periodicidad. Además de lo anterior, la propela tiene un paso de 4" y una razón de área de hoja de 0.70.

Con la anterior información es posible obtener curvas teóricas de torque y empuje en función de la velocidad angular, usando los modelos de cálculo de *teoría de momentum* o de *sección de hoja* (Abu-Sharkh, 2003). Si se usa teoría de momentum se puede encontrar que el empuje  $T$  y el torque  $Q$  están dados por

$$T = K_T D^4 \rho \omega^2, \quad (1)$$

$$Q = K_Q D^5 \rho \omega^2; \quad (2)$$

donde:  $K_T$  y  $K_Q$  son los coeficientes de empuje y torque respectivamente,  $D$  es el diámetro de la propela y  $\omega$  es la velocidad angular. Los coeficientes de empuje y torque son función del coeficiente de avance

$$J = \frac{V_a}{\omega D}, \quad (3)$$

donde:  $V_a$  es la velocidad de avance del fluido, que a su vez es función de la velocidad del vehículo.

Considerando los parámetros de la propela, las definiciones de  $K_T(J)$  y  $K_Q(J)$  para propelas Wageningen dadas en (Bernittas, 1981) a una velocidad de avance de 1.2 m/s y usando (2) - (3), se obtienen las gráficas teóricas de las Figs. 2 y 3.

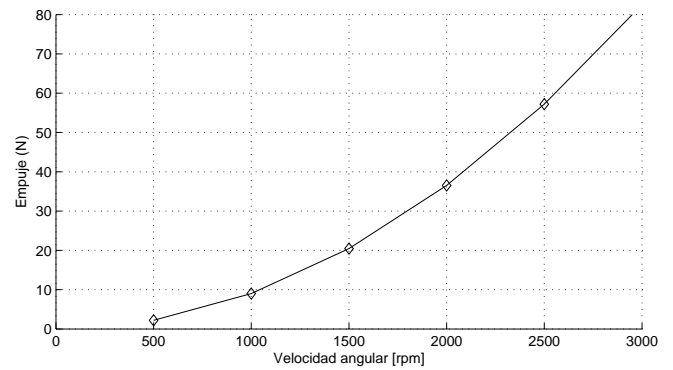


Figura 2. Empuje teórico en función de la velocidad angular

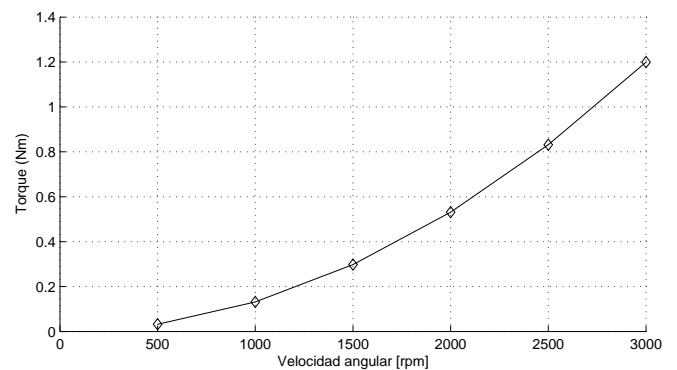


Figura 3. Torque teórico en función de la velocidad angular

## 3. MÉTODOS

### 3.1. Volumen de control

Para definir el volumen de control se aplica el principio usado por (Morgut y Nobile, 2012). Tal como se muestra en la Fig. 4, la longitud aguas arriba  $L_1$  es  $3D$  y la longitud aguas abajo  $L_2$  es  $5D$ . Para la simulación se definen las siguientes condiciones de frontera:

- Se suponen en la entrada dos intensidades de turbulencia: 1% y 10%.
- Se definen los componentes de velocidad libres i.e. no hay restricciones para el comportamiento de la velocidad a la salida de la propela.
- En la región de salida del volumen de control la presión estática se define como cero.
- En todas las paredes sólidas del volumen de control se define condición de no deslizamiento.

### 3.2. Mallado

Para el mallado se usa una discretización mediante celdas tetraédricas no estructurada, porque requiere menor tiempo de cómputo y facilita el refinamiento en caso de ser necesario (Morgut y Nobile, 2012). La resolución espacial en los puntos con mayor ángulo de hélice es de aproximadamente 5 mm. Para la generación del mallado en entorno *Mesh* de ANSYS se configuraron los siguientes parámetros:

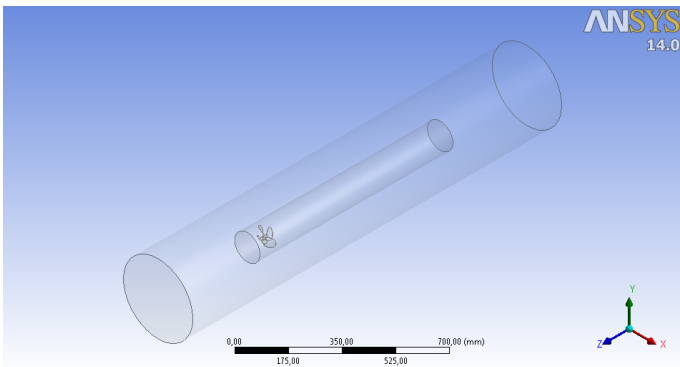


Figura 4. Volumen de Control para simulación en propela de minisubmarino

- *Used advanced size function: On—Proximity and Curvature.*
- *Relevance center: Coarse.*
- *Smoothing: High.*

Usando los anteriores parámetros y limitados por la capacidad de cómputo, se hallan los siguientes resultados promedio para la evaluación de la calidad del mallado obtenido:

- Elementos: 390901.
- Nodos: 68922.
- *Skewness:* 0.235316.
- *Element Quality:* 0.832471.
- *Aspect Ratio:* 1.859253.

En este sentido, dado que en este trabajo se usa software académico, la solución al problema está restringida al uso de una calidad de malla máxima de 500000 elementos i.e. se encuentra la mejor solución posible sujeta a esta restricción.

### 3.3. Consideraciones de pre-procesamiento

En la etapa de pre-procesamiento se tuvieron en cuenta las siguientes configuraciones, previas a la verificación:

- La simulación se lleva a cabo en estado estacionario. Se podría realizar en estado transitorio, pero por la capacidad de cómputo limitada esto no es posible.
- Se selecciona como método numérico el modelo viscoso SST  $\kappa$ - $\omega$  (Morgut y Nobile, 2012; Hayati et al., 2013). Se usan los valores por defecto de  $\kappa$ - $\omega$  del software.
- Se configura agua como fluido.
- Para el material de la propela se usa la opción por defecto del software.
- En el parámetro *Cell Zone Conditions*, se configuran las siguientes opciones:
  - Se activa la opción *Frame motion* para escoger movimiento rotacional. Esto implica que para la simulación la propela sólida permanece estacionaria y el volumen de control rota alrededor de un eje específico.
  - Se escoge como eje de rotación el eje Z positivo tal como se encuentra en la Fig. 4.
  - Se define una velocidad angular para el volumen de control. Se puede definir una velocidad única de rotación o se puede definir la velocidad como una variable. En este último caso, la velocidad variable es una lista discreta de valores de velocidad. Para este trabajo se escoge un único valor de velocidad de rotación, igual a la del trabajo de (Ramírez-Macías,

2007) i.e. 1450 rpm.

- Las condiciones de frontera para la velocidad definidas en la opción *velocity inlet* fueron:
  - Magnitud de la velocidad lineal de 1.2 m/s, constante.
  - Presión inicial nula, constante.
  - Se usaron los valores de  $\kappa$  (energía cinética turbulenta) y  $\omega$  por defecto.

Posterior a la etapa de verificación se definen los métodos de solución y la discretización espacial. En este punto se escogieron las siguientes configuraciones:

- *Gradient: Least Squares Cell based.*
- *Pressure: Presto.*
- *Momentum: Second Order Upwind.*
- *Turbulent kinetic energy: Second Order Upwind.*
- *Specific dissipation rate: First Order Upwind.*

En la selección de estas condiciones se utilizaron los métodos numéricos más refinados sujetos a la capacidad de cómputo disponible.

Por último, se definen 1000 iteraciones para el cálculo del software. El criterio de convergencia para los residuales se define en 0.0001, y la solución converge a las 450 iteraciones aproximadamente.

## 4. RESULTADOS

Los valores de torque y empuje se obtienen a través de la interfaz de *Results Post* de ANSYS. El torque y el empuje se orientan en la dirección esperada. Los valores obtenidos fueron:

- Torque:  $Q = -0.264$  Nm.
- Empuje:  $T = -16.82$  N.

Estos resultados difieren un 20% con respecto a los reportados por Ramírez-Macías (2007), en donde se reporta que el valor de torque es de 0.212 Nm a 1450 rpm.

La Fig. 5, muestra como se comporta la velocidad en el contorno de la propela. Esta imagen da una idea del comportamiento dinámico de la velocidad en el contorno de la propela.

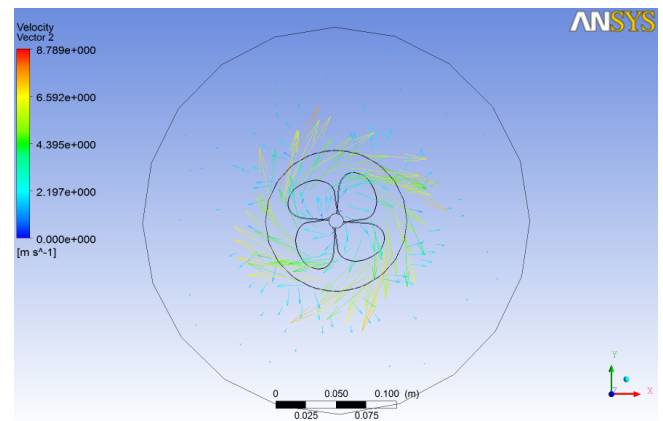


Figura 5. Vectores de velocidad en el diámetro de la propela

La Fig. 6 muestra el comportamiento del flujo por medio de *streamlines* en el volumen de control definido para el estudio de acción de la propela. De esta figura se aprecia que la zona central de la propela, donde tiene línea de acción el eje de

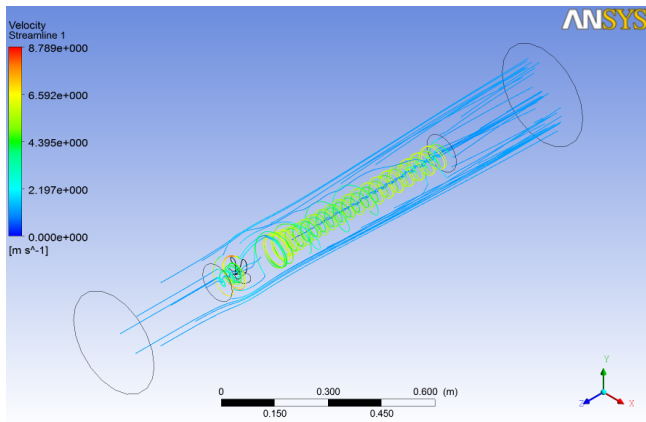


Figura 6. *Streamlines*. Comportamiento del flujo en el volumen de control definido

la propela (*hub*), la velocidad es casi cero y el cambio de momentum generado es igual a cero.

## 5. DISCUSIÓN

El comportamiento del flujo aguas abajo según la Fig. 6 no es el esperado, ya que el flujo mantiene un comportamiento rotacional en una longitud amplia. Se esperaba una estabilización del flujo por lo menos a una distancia de  $4D$ , dada la velocidad de rotación y la velocidad de avance del vehículo. (De la Calle, 2002).

En el tema de mallado, las configuraciones geométricas y el número de elementos a obtener en un software de licencia académica no permiten obtener soluciones de fenómenos más complejos y de mayor afinidad de resultados respecto a los esperados. En este sentido, un fenómeno de flujo rotacional para estudios de cavitación requiere de un refinamiento de malla de mayor calidad; lo que implica no solo una mayor cantidad de elementos, sino también unos índices de oblicuidad, calidad de elemento, relación de aspecto cercanos o iguales a los esperados.

En el análisis de malla, los datos promedio dan un balance de malla con buenos índices de calidad. Sin embargo, un análisis de malla más relevante permite observar las siguientes anotaciones:

- El aspect ratio de 1.8 es cercano a 1 como valor ideal. Sin embargo existen valores máximos cercanos a 9.5.
- El indicador de calidad de elemento ideal debe ser cercano a 1, por lo que el valor de 0.88 es bueno. Sin embargo valores máximos de 0.99 en elementos cercanos a la propela inducen a posibles errores de cálculo.
- La deformación de los elementos se encuentra en un valor de 0.2. Sin embargo un refinamiento de malla no se podría realizar dada la limitación del número de elementos de la licencia académica de ANSYS.

Si bien las anotaciones anteriores parecen negativas, dentro de los parámetros de evaluación de calidad de la malla y la inexistencia de problemas de continuidad en los modelos de cálculo, la simulación permite obtener resultados validos con respecto a lo esperado.

Una de las modificaciones realizadas en vía de encontrar soluciones que permitan realizar comparaciones fue la variación de la intensidad de turbulencia (Morgut y Nobile, 2012). Sin

embargo, la diferencia entre los resultados obtenidos fue alta, cercana al 100%. Es de conocer que la intensidad de turbulencia está asociada con la energía cinética que define el modelo  $\kappa$ .

Un cambio en los métodos de solución de los modelos numéricos de ANSYS, en el cual el cálculo de la disipación de energía se realizó de orden 1, presentó divergencia en los resultados. Por esto, un estudio interesante sería el de comparar los diferentes métodos numéricos aplicables a la solución de fenómenos de fluidos en régimen turbulento.

En cuanto al análisis hecho a los resultados obtenidos, las curvas de comportamiento teórico a una velocidad de avance constante de vehículo de 1.2 m/s definen un valor de coeficiente de avance entre 0.01 y 0.257, en este rango los coeficientes de torque y empuje, variables en función de la velocidad angular se comportan de forma lineal, por lo que no se aproxima mediante el uso de funciones polinomiales. Esta aproximación puede ofrecer diferencias en el comportamiento de los parámetros de empuje y torque respecto a los valores obtenidos, y en cuanto al valor puntual obtenido, las diferencias están cercanas al 5%.

Desde la teoría de momentum y los resultados obtenidos mediante CFD (del inglés *Computer Fluid Dynamics*) para el comportamiento de la propela los resultados son acordes a los esperados. Sin embargo un análisis extensivo donde se refinan los comportamientos de los coeficientes de torque y empuje y donde se incluya el análisis realizado por el método de sección de hoja generaría resultados más satisfactorios y permitiría estudiar más variables dentro del conjunto de parámetros evaluados.

## 6. CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de torque y empuje son cercanos a los valores tenidos por referencia en la literatura, por lo cual se ajustan los modelos y el método a lo que se espera obtener. Sin embargo, algunas variaciones en modelos de discretización varían en gran manera los resultados obtenidos.

Las discretizaciones de segundo orden no son útiles cuando las velocidades de rotación son bajas, y el modelo SST presenta problemas para los valores de Reynolds bajos, ya que las etapas de transición de régimen turbulento a laminar presentaron problemas en los criterios de convergencia usados, y fallos en el análisis de los resultados.

Una de las causas por las cuales fue difícil desarrollar el análisis es encontrar la velocidad crítica de funcionamiento de la propela, ya que de forma paralela se realizaron simulaciones con velocidades angulares de 3000 rpm en adelante, presentando todas problemas para obtener resultados satisfactorios.

Se concluye además que la potencia de computo incide directamente en la forma en la que se obtienen y se procesan de forma posterior los resultados, por lo cual el uso de herramientas de software de simulación en fluidos exige de un buen componente de cómputo y por último de un buen desarrollo científico alrededor del estado del arte del fenómeno trabajado.

Se deja abierto el desarrollo de simulaciones donde se varíe la velocidad angular y la velocidad de desplazamiento del vehículo. Este análisis permitirá hacer extensivo el análisis de eficiencia esperado, además de mejorar los procesos de selección de componentes de un sistema de propulsión.

## REFERENCIAS

- Abu-Sharkh, S. M. (2003). Propulsion Systems for AUVs. *Technology and Applications of Autonomous Vehicles*, 109–125; G. Griffiths, Editor. Taylor & Francis.
- Benini, E. (2004). Significance of blade element theory in performance prediction of marine propellers. *Ocean Engineering*, 31, 957–974.
- Carlton, J. (2011). *Marine Propellers and Propulsion*. Butterworth-Heinemann. 560 p.
- De la Calle, J. M. et al. (2002). Análisis del flujo en una hélice marina: comparación de los resultados numéricos con las medidas experimentales.
- Hayati, A. N. et al. (2013). A study on the behind-hull performance of marine propellers astern autonomous underwater vehicles at diverse angles of attack. *Ocean Engineering*, 59, 152–163.  
doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.12.014.
- Morgut, M. and Nobile, E. (2012). Influence of grid type and turbulence model on the numerical prediction of the flow around marine propellers working in uniform inflow. *Ocean Engineering*, 42, 26–34.  
doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.01.012.
- Ramírez-Macías, J. A. (2007). *Diseño mecánico de un vehículo sumergible operado remotamente*. Trabajo de grado Especialización en Automática, Universidad Pontificia Bolivariana.
- Bernitsas, M. and Ray, D. (1981).  $K_T$ ,  $K_Q$  and efficiency curves for the wageningen b-series propellers. University of Michigan, Ann Arbor, Report.



Juan A. RAMÍREZ-MACÍAS, nacido en Medellín, Colombia (1983); Ing. Mecánico (UPB, 2004), Especialista en Automática (UPB, 2007) y Magíster en Ingeniería (UPB, 2010); actualmente es investigador del Grupo de Automática y Diseño A+D y Profesor Titular de la Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana. Sus principales áreas de trabajo son la robótica-mecatrónica, el diseño mecánico y la teoría de control.

## AUTORES



Esteban VARGAS, nacido en Itagüí, Colombia (1990); Bachiller académico del Liceo Francisco Restrepo Molina (2008) y Estudiante de último año de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana (2013). Actualmente elabora su trabajo de grado con el Grupo de Automática y Diseño A+D, de la UPB, en el tema de propulsión en vehículos sumergibles. En su tiempo libre interpreta el Piano.



Santiago VÉLEZ, nacido en Medellín, Colombia (1992); Bachiller académico del Colegio San Ignacio de Loyola (2008) y Estudiante de último año de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana (2013). Actualmente elabora su trabajo de grado con el Grupo de Automática y Diseño A+D, de la UPB, en el tema de propulsión en vehículos sumergibles. En su tiempo libre juega Fútbol y tenis.

## **B. ANTEPROYECTO**

**ANTEPROYECTO  
ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DINÁMICO DEL SISTEMA DE  
PROPULSIÓN DEL MINISUBMARINO Visor3**

**ESTEBAN VARGAS BOLÍVAR  
SANTIAGO VÉLEZ ZULUAGA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2014**

**ANTEPROYECTO  
ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DINÁMICO DEL SISTEMA DE  
PROPULSIÓN DEL MINISUBMARINO Visor3**

**ESTEBAN VARGAS BOLÍVAR  
SANTIAGO VÉLEZ ZULUAGA**

**Anteproyecto de trabajo de grado para optar al título de Ingeniero  
Mecánico**

**Director  
Juan Alberto Ramírez Macías  
Magíster en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MEDELLÍN  
2014**



## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana (Medellín) ha venido trabajando durante 20 años en el desarrollo de vehículos sumergibles operados remotamente (ROV). Dentro de esos 20 años de trabajo alrededor del área, se desarrollaron inicialmente los minisubmarinos VISOR I (1993) y VISOR II (2000). Por último se desarrolló el minisubmarino Visor3 (2006–2009), en asocio con el Grupo de Investigación en Ingeniería Naval (GIIN) de la Escuela Naval Almirante Padilla (ENAP) y COLCIENCIAS.

En el año 2011 se realizó la formulación del “Programa Estratégico para el Desarrollo de Tecnología Robótica Orientada a la Exploración Petrolera de los Fondos Marinos Colombianos”, entre el Grupo de Automática y Diseño A+D y el Grupo de Investigación en Oceanografía e Ingeniería Costera (OCEANICOS) de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; dentro de la convocatoria 531 de Colciencias para proyectos de investigación en la modalidad de cofinanciación con la empresa Ecopetrol S.A. En el desarrollo de este nuevo proyecto se busca la participación de estudiantes de pregrado y posgrado de las instituciones educativas agrupadas en el proyecto, para fomentar la investigación e impulsar la formación de capacidades técnicas y científicas. Estos procesos pretenden disminuir la brecha tecnológica respecto a los países industrializados mediante la apropiación de conocimiento; generando un beneficio para el sector académico e industrial, y propiciando el desarrollo del país y la región.

El proyecto macro tiene como propósito principal el desarrollo de un sistema de vehículo sumergible operado remotamente (ROV) para exploración subacuática hasta 500 m de profundidad, compuesto por un minisubmarino y sus subsistemas auxiliares. El minisubmarino en sí es un dispositivo complejo y requiere para su operación la interacción de subsistemas como propulsión, instrumentación, control, iluminación y toma de muestras entre otros, que se deben abordar y diseñar adecuadamente. Este proyecto de grado tiene como propósito trabajar alrededor del sistema de propulsión.

A pesar de que para el minisubmarino Visor3 se desarrolló una versión operativa del sistema de propulsión y se avanzó en el conocimiento de su funcionamiento de este subsistema, es necesario expandir la frontera de lo que se sabe y se conoce para hacer un diseño más asertivo del nuevo submarino. Se detecta entonces que es necesario saber, desde etapas tempranas del diseño, cuál es la selección más adecuada usando modelos matemáticos más ajustados y metodologías ordenadas que propicien un proceso de diseño efectivo y eficiente.

Dado que se cuenta con un prototipo base, el Visor3, y se desea elaborar un nuevo minisubmarino, metodológicamente se opta por partir de la experiencia ganada en el desarrollo de este prototipo inicial y por aprovecharlo como plataforma de pruebas, de modo que los primeros diseños se prueben en el minisubmarino base y luego se extrapolen al nuevo. En este orden de ideas se formula el presente trabajo: el “Análisis del Desempeño Dinámico del Sistema de Propulsión del minisubmarino Visor3”, en el cual se busca expandir la frontera de conocimiento que se tiene actualmente en el Grupo A+D alrededor del tema de sistemas de propulsión, elaborar herramientas de software para los cálculos y esbozar un proceso ordenado de diseño que se pueda utilizar en el futuro.

## JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de grado está enmarcado dentro del Programa Estratégico para el Desarrollo de Tecnología Robótica Orientada a la Exploración Petrolera de los Fondos Marinos Colombianos, proyecto 1210-531-30550 (Convocatoria 531 de 2011), y se desarrolla con la financiación de la Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPEPETROL; el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, COLCIENCIAS; la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, UNALMED; y la Universidad Pontificia Bolivariana, UPB.

Aportará al proyecto información relevante al análisis dinámico del sistema de propulsión del minisubmarino existente, Visor3, que se pretenden extrapolar al nuevo modelo. Esta información relevante permitirá aumentar la información disponible para el análisis dinámico del comportamiento de los sistemas propulsivos en los vehículos sumergibles, mediante un estudio extensivo de las fuentes bibliográficas existentes. Sumado a lo anterior, generará un análisis matemático extensivo de este comportamiento dinámico, que se espera sirva de apoyo para trabajos futuros relacionados con el tema de propulsión, y no se limite al proyecto anteriormente mencionado.

Según los resultados esperados, proveerá información y herramientas útiles para la disminución de los procesos iterativos de diseño y selección de componentes del sistema de propulsión del nuevo minisubmarino. Además, de establecer escenarios futuros donde se evalúe el comportamiento dinámico de los propulsores seleccionados y se puedan establecer comparaciones entre alternativas de conjuntos de selección, logrando así un plan de ejecución futuro más adecuado y correspondiente a las exigencias del contexto, en el cual se ubicará el nuevo desarrollo.

Adicional a lo anterior, el desarrollo de este trabajo se enmarca dentro de algunos requisitos académicos de la institución y del proyecto. En primer lugar, responde a la necesidad planteada por el proyecto macro para disminuir la brecha tecnológica y de conocimiento en el país, mediante la inclusión de estudiantes de pregrado y posgrado

mediante el desarrollo de trabajos de grado, que aporten y generen información relevante para el desarrollo del proyecto. También, el desarrollo de este trabajo hace parte de los requisitos para la adquisición de título profesional en Ingeniería Mecánica, en la UPB. Lo anterior, como objetivo de formar profesionales íntegros, y de generar en el egresado bolivariano espíritu investigativo, para responder a las necesidades del medio, la demanda tecnológica y de conocimiento de la sociedad, y ser diferenciador en los procesos de generación de conocimiento en el país.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Elaborar un análisis detallado del desempeño dinámico de los propulsores del minisubmarino Visor3.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el modelo de cálculo que permita predecir el comportamiento de los propulsores del minisubmarino Visor3 a partir de la revisión bibliográfica.
- Identificar los parámetros físicos que alimentan el modelo matemático escogido para los propulsores del minisubmarino Visor3, estimando cuáles se conocen con certeza y cuáles no.
- Desarrollar software que resuelva numéricamente el modelo matemático escogido para el minisubmarino Visor3, usando herramientas computacionales de alto nivel (v.g. Matlab)
- Enunciar o definir parámetros de desempeño que permitan hacer evaluaciones comparativas entre diferentes configuraciones de propulsor.
- Evaluar alternativas o escenarios que puedan mejorar el comportamiento de los propulsores, a través de estudios comparativos que usen el software desarrollado como herramienta y simulaciones en un software de fluidos (Ansys Fluent).
- Proponer experimentos que permitan la validación futura de los modelos matemáticos y la identificación de los parámetros físicos que lo alimentan.

## ANTECEDENTES

El estudio de los sistemas de propulsión para vehículos sumergibles ha estado relegado al estudio de cada uno de sus componentes de forma independiente, centrado principalmente en el análisis de las propelas como efectores finales del proceso propulsivo en el vehículo. Sin embargo, el sistema de propulsión es un conjunto de elementos que interactúan entre sí y estas interacciones cambian los parámetros de desempeño del conjunto global. En [1] se presenta un modelo de cálculo en el cuál es posible determinar parámetros globales para el comportamiento del sistema.

Por otra parte, el uso de software de programación y para análisis de fluidos permite obtener, asociado a los procedimientos experimentales, conclusiones respecto al comportamiento de los sistemas propulsivos de forma global [2, 3], donde la posibilidad de variar una mayor cantidad de parámetros como inclinación del vehículo, ángulo de incidencia del flujo, obstrucciones, etc., no se ve limitado. Además del análisis del arrastre generado por el casco del vehículo [4, 5, 6].

Para el estudio de las propelas los métodos de análisis son extensivos con modelos como el propuesto por Rankine (1865) y modificado luego por R.E. Froude en 1884 [7] basados en la teoría de momentum. Posteriormente W. Froude (1878) propone el análisis de propelas por medio de la teoría de elemento de hoja [7, 8]. Ambos han sido los de uso más extensivo para el análisis de propelas. Algunos otros son los propuestos por Burrell (1994), el método de análisis de Lerbs (1952) y el método de diseño de Eckhardt y Morgan (1955).

El apoyo de herramientas de CFD (Dinámica de fluidos computacionales) ha permitido realizar análisis exhaustivo del comportamiento del sistema de propulsión de los vehículos sumergibles. Algunos de estos estudios se han encaminado a determinar los parámetros de malla y modelos de turbulencia para el desarrollo de las simulaciones centrados en el comportamiento dinámico de las propelas [9, 10, 11]. Adicional a lo an-

terior se ha simulado el uso de ductos para propelas [12], ampliando las aproximaciones numéricas de flujo existentes [13].

Debido a la trayectoria en el desarrollo de ROV's del Grupo de Automática y Diseño A+D de la UPB, se han desarrollado una cantidad de trabajos que aportan información al desarrollo del presente trabajo de grado. En este sentido se han desarrollado los siguientes trabajos: el trabajo a nivel de pregrado desarrollado por los Ingenieros Mecánicos Michael John Bernal y David Agudelo Ochoa (Diseño del Sistema de Propulsión para un Vehículo Sumergible Operado Remotamente (2007), a nivel de especialización el trabajo desarrollado por el Mg. Juan Alberto Ramírez Macías sobre el Diseño Mecánico de un Vehículo Sumergible Operado Remotamente (2007) y el llevado a cabo por el I.T. Raúl Adolfo Valencia Cardona (2007).

## MARCO TEÓRICO

### VEHÍCULOS SUMERGIBLES

Es necesario realizar una diferencia entre los términos ROV y AUV. El término vehículo operado remotamente o ROV (*Remotely Operated Vehicle*) por sus siglas en inglés, hace referencia a un vehículo unido físicamente, por medio de un cable, a un operador ubicado en una superficie, estación o barco que manipula su acción a través de un sistema de control [14]. Por otro lado, el término vehículos sumergibles autónomos o AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*) hacen referencia a aquellos vehículos cuyo accionar no requiere la acción externa de un operador, ya que posee un control suficiente para desempeñar las tareas encomendadas (completamente autónomos). Algunas otras acepciones hacen referencia a los UVMS (*Underwater Vehicle-Manipulator System*) definidos como los equipos que interactúan directamente con el ambiente y que pueden equipar varios manipuladores o efectores finales [14].

Algunas de las tareas encomendadas a un ROV comienzan desde la exploración con fines recreativos, hasta la inspección de tuberías submarinas, asistencia en los procesos de recolección de muestras, medición de variables, captura de imágenes, vigilancia y labores militares.

#### *Clasificación*

Los ROV pueden clasificarse según un múltiple grupo de aspectos. Una agrupación ideal es la definida por el tipo de fuente de poder, grado de autonomía y tipo de comunicación hacia el vehículo.

La clasificación de estos se puede realizar evaluando diferentes ítems de cada ROV, por ejemplo: profundidad a la que operan, si tiene o no baterías y según el peso y potencia.



Por el fin que presenta el proyecto macro, la aplicación y el uso del ROV a construir, es importante conocer la clasificación según su peso y potencias.

- LCROV (*Low cost small electric ROV*): son ROVs de características sencillas. Trabajan mediante un sistema completamente eléctrico con un motor que no supera una potencia de 5 hp. Son de volumen pequeño, con un peso que ronda los 3 kg, por lo cual suelen ser empleados en lugares donde un buzo no puede ingresar físicamente. Por lo cual son utilizados más que todo en tuberías o cavidades. No están dotados de brazos por lo cual solo desarrollan actividades de inspección e investigación. Suelen tener una limitación de inmersión de 100 m.
- Small ROV: son ROVs con una gran similitud a los LCROV, la gran diferencia está en su tamaño y potencia, con una potencia alrededor de 10 hp y un peso alrededor de los 15 kg. Pueden sumergirse hasta una profundidad máxima de 300 m. Continúan siendo solamente ROV de inspección por lo cual no pueden realizar tareas de reparación. Aunque su tamaño es mayor, sus dimensiones no son muy grandes, por lo cual posee como ventaja su fácil transporte y operación desde una bote.
- Gama media: son ROVs que poseen un sistema mixto electro-hidráulico con una potencia de menos de 100 hp. Su peso oscila entre 1000 y 2200 kg, tienen una capacidad de inmersión de hasta 2000 m, utilizados para realizar inspección y tareas de trabajo tanto si se trata de trabajo medio o pesado. Suelen estar dotados de un brazo único con tres dedos aunque la gama más alta de esta clase está dotado con dos brazos. Son capaces de cargar pesos de entre 100 y 200 kg. Son capaces de realizar una fuerza de 450 kg. Están equipados para operar en corrientes fuertes por lo cual son útiles en lugares poco seguros para buzos.

La clasificación se da especialmente en estos tres ROV, existen otras además de éstas pero son variaciones de lo mencionado anteriormente. Por ejemplo los ROV de gama alta tendrán una capacidad de inmersión más alta y realizara una fuerza mayor, lo que pretende decir es que se presenta es una variación de peso, tamaño y potencia dependiendo de lo que se requiera a la hora de utilizarlos.

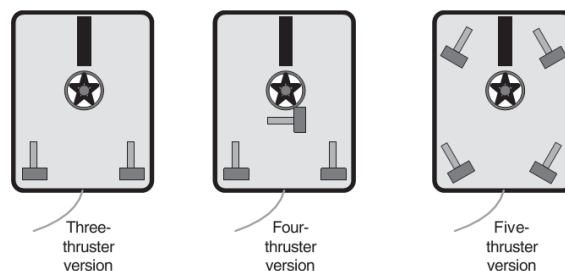
## SISTEMA DE PROPULSIÓN

El sistema de propulsión está encargado de generar el desplazamiento espacial de un vehículo operado remotamente. Se encarga de transmitir la energía de la cuál se alimenta el vehículo y convertirla en trabajo mecánico. Se establece el sistema de propulsión cómo una composición de todos los sistemas requeridos para mover el sumergible bajo condiciones normales o de emergencia [1].

El principal objetivo de un sistema de propulsión es obtener alto empuje en relación al tamaño y arrastre del vehículo, esto a su vez en función de la potencia de entrada [15]. Este empuje generado debe vencer las fuerzas de arrastre generadas por el casco del vehículo, sostener una velocidad de avance y permitir el alcance de las profundidades de trabajo según el arreglo o configuración de los propulsores.

Los sistemas de propulsión se pueden clasificar según el tipo de arreglo y cantidad de propulsores [15]. Estos arreglos permiten definir el control que se tenga sobre el movimiento espacial del vehículo. Además de ser determinados por el sistema de control, la aplicación específica, y costo económico. La Fig. 1, representa los esquemas de configuración y cantidad de propulsores para un ROV más comunes.

Figura 1. Arreglo de propulsores según su cantidad para un ROV [15]



En función de la cantidad de propulsores dispuestos en el ROV, su maniobrabilidad será más cómoda y eficaz. Así, un ROV con una configuración de tres propulsores (dos horizontales y uno vertical) los movimientos estarán limitados a maniobras hacia

adelante, atrás, movimiento de guiñada, y desplazamiento tanto hacia arriba como hacia abajo. La introducción de un nuevo propulsor permitiría desplazamientos laterales. La cantidad de propulsores está en función de la tarea a realizar, el sistema de control usado para su manipulación, y las fuerzas de arrastre necesarias para vencer por los propulsores.

Los principales componentes de los sistemas de propulsión del vehículo están en función del tipo de sistema de propulsión seleccionado. Existen en el mercado una variedad de sistemas de propulsión, entre los que se puede destacar los sistemas de propulsión a chorro o *water-jet*, los sistemas de propulsión hidráulicos y los sistemas de propulsión de tipo eléctrico [15].

#### *Sistema de propulsión a chorro o water-jet*

Es un tipo de sistema de propulsión en el cuál un arreglo de bombas dentro del vehículo aceleran el fluido en una sección de tuberías o ductos, generando así velocidades considerables. Según una relación de caudal entre la salida y la entrada, la reducción del área aumenta la velocidad en la salida del ducto. Este aumento de velocidad es el que genera la propulsión.

En este tipo de propulsión se requieren motores que generen potencias altas, por lo cuál son motores generalmente de gran tamaño. Esto implica una baja eficiencia [1], traducida en mayor peso y pérdida de autonomía. Sin embargo, poseen algunas ventajas como son una buena maniobrabilidad, control de dirección y un bajo ruido de operación [16].

Debido a su configuración son ideales para trabajar en lugares donde gran cantidad de material particulado circule por el fluido, ya que un sistema de propulsores rotativos posiblemente no funcionaría de forma adecuada [15].

#### *Propulsión hidráulica*

Propulsión generada por motores hidráulicos, ubicados en el exterior del vehículo. Funcionan básicamente en el cambio de energía en forma eléctrica a hidráulica, lo que

genera un porcentaje de ineficiencia en el proceso [15]. Estos sistemas requieren de elementos adicionales de control para su correcta operación.

Son usados en aplicaciones de alta potencia generalmente, específicamente en submarinos para trabajo pesado [15]. Requiere de una cantidad de mecanismos adicionales para su adecuado funcionamiento como válvulas de control, bombas y reservas. Sus potencias de trabajo se encuentran entre los 120 hp y los 300 hp [17]. Los sistemas de propulsión hidráulico requieren un motor eléctrico que convierta energía eléctrica en mecánica y luego en hidráulica lo que genera cierta pérdida de eficiencia en el proceso [15].

### *Propulsión eléctrica*

Es el tipo de propulsión más usada para la categoría de minisubmarinos. Sus componentes principales son un motor eléctrico, que viene configurado para soportar las condiciones de uso bajo el agua en las que será sometido, y una propela o elemento de acción final. Se encuentra en un gran rango de potencias, y según su alimentación y configuración se obtienen multiplicidad de aplicaciones finales. Los parámetros de trabajo más usuales, bajo los cuáles se usa este tipo de sistema de propulsión suelen ser bajas velocidades ( $< 6$  nudos) [18] y potencias de trabajo menores a 10 hp [17].

## SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICO

### COMPONENTES DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN

Los sistemas de propulsión eléctricos se componen básicamente de motor, reductor (en caso de ser necesario), compartimientos estancos con los elementos de transmisión de potencia, propela y elementos de control [1].

- Fuente de potencia (*power source*).
- Motor eléctrico.
- Alojamiento del propulsor y acople a la estructura del vehículo.
- Caja reductora.
- Ejes, sellos y acoples.
- Propela.
- Ductos para propelas (*kort nozzles*).

#### *Análisis Propulsión*

Uno de los principales requerimientos en el diseño de vehículos sumergibles es el cálculo de la cantidad de potencia requerida para desplazar el vehículo a una velocidad determinada [1]. Para realizar este análisis es necesario reconocer las fuerzas que actúan por el movimiento del vehículo en el fluido y las que el fluido induce en él.

Las fuerzas y cargas que actúan en el sumergible se pueden dividir en dos grupos, las cargas estáticas y las dinámicas [1, 7].

Cargas estáticas:

- Peso.
- Fuerza de empuje debida al peso del volumen desalojado.

Cargas dinámicas:

- Fuerzas de arrastre y sustentación.
- Fuerzas generadas por reacciones propias del sistema de propulsión (cambio del momentum angular)
- Fuerzas de contacto generadas por objetos y fenómenos externos.
- Cargas inerciales.

El proceso de diseño del sistema de propulsión parte de la identificación y cálculo de las cargas dinámicas. El análisis hidrodinámico permitirá conocer las fuerzas de arrastre generadas por el casco vehículo y las fuerzas que debe de vencer el sistema de propulsión para generar avance. Este análisis se puede realizar mediante el uso de termofluidos computacionales (CFD), mediante aproximaciones numéricas [1, 6] o procedimientos experimentales mediante el uso de sensores [6].

La forma típica para el casco de los ROV de estructura cerrada es un torpedo, que genera condiciones idealmente buenas para minimizar los efectos del arrastre [5]. Los efectos del tipo de estructura seleccionada para el ROV influyen en el arrastre generado, ya que un ROV de estructura abierta (*open frame*) genera más arrastre que uno de estructura cerrada [19].

## MOTOR

Los motores son los elementos encargados de convertir la potencia eléctrica entregada por la fuente de poder del vehículo, en potencia mecánica. Junto con la propela, constituyen los elementos centrales del sistema de propulsión. De la cantidad de motores eléctricos encontrados en el mercado, y en función de la configuración rotor-estator es posible identificar motores de corriente alterna y directa.

El principal objetivo de la selección de un motor apropiado para la aplicación es que cumpla con el empuje requerido para vencer las fuerzas inerciales y de arrastre propias de la geometría del vehículo, las condiciones del fluido en el entorno de trabajo y que entregue la mejor relación de torque en función de la velocidad de giro y del avance del vehículo.

Existen una gran cantidad de motores en cuanto a tipo de configuración rotor estator, corriente de alimentación, tipo de conexión, etc. Sin embargo, para la aplicación específica, se ha probado más extensivamente el uso de motores de corriente directa debido a su disponibilidad, variedad, y disponibilidad [15]. El uso de motores de corriente directa se encuentra limitado por la velocidad de giro, mucho mayor que la velocidad de giro de las propelas, por lo cuál es necesario el uso de reductores de velocidad [15]; la cantidad de corriente consumida es alta por lo que no se recomiendan para vehículos cuya fuente de poder sean baterías.

Para vehículos de estructura abierta la ubicación de las unidades propulsoras es crítica y se opta por lo general, por motores sellados que inhiban la entrada de agua [5]. Por otro lado, para ROV's de estructura cerrada, se opta por ubicar la mayoría de unidades propulsoras al interior del casco, por lo cuál se evita el uso de motores sellados y se realizan compartimentos estancos para evitar la entrada de agua al motor.

## PROPELA

Es el elemento final de acción del sistema de propulsión [17, 1, 7]. Provee el cambio en el momentum angular del fluido para generar empuje y torque que permitan desplazar el vehículo en las direcciones requeridas [7].

El análisis de propelas se puede realizar en dos vías, análisis de aguas abiertas (*open water*) o análisis con efecto del casco del vehículo (*behind hull effect*) [7]. El primero de los análisis permite conocer cómo se comporta la propela sin los efectos de arrastre generados por el vehículo con un flujo uniforme de agua, el segundo tiene en cuenta los efectos de la resistencia generada por el casco del vehículo [7].

El principal objetivo del análisis de propelas es proveer información sobre el torque y el empuje necesarios para realizar el cambio de momentum angular del fluido circundante y generar movimiento. Los análisis de propelas han permitido definir dos coeficientes para el empuje  $K_T$  y torque  $K_Q$ , en función de la velocidad de avance del vehículo, definida por el coeficiente de avance  $J$  [1, 7, 20]. Estas expresiones están dadas por

$$K_Q = \frac{Q}{\rho\omega^2 D^5}, \quad (1)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho\omega^2 D^4}. \quad (2)$$

$$J = \frac{V_a}{\omega D}; \quad (3)$$

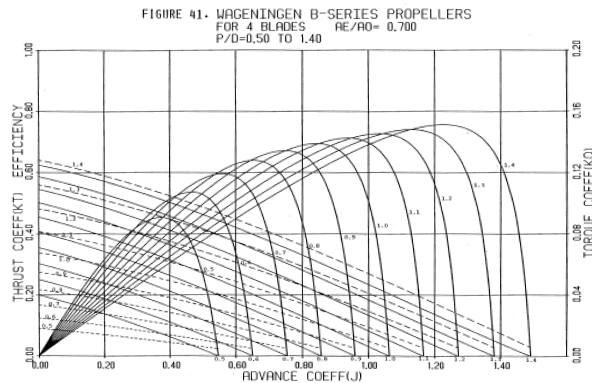
donde:  $K_T$  y  $K_Q$  son coeficiente de empuje y torque respectivamente,  $D$  es el diámetro de la propela y  $\omega$  es la velocidad angular de la propela en rad/s. El coeficiente de empuje está en función del coeficiente de avance ( $J$ ) donde  $V_a$  es la velocidad de avance del vehículo.

A partir de allí se obtienen gráficas que definen el comportamiento de la propela y es posible obtener la eficiencia de la propela como

$$\eta = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi}. \quad (4)$$

La Figura 2, muestra una curva típica del comportamiento de los coeficientes de torque y empuje para una propela Wageningen de la serie B.

Figura 2. Curva dinámica para un propela Wageningen de la serie B [21]



Existe gran cantidad de métodos teóricos para el análisis de propelas. Algunos de estos son la teoría del elemento de hoja, la teoría de momentum, el método de análisis de Lerb y los métodos de diseño de Eckhardt y Morgan. Los anteriores encaminados hacia el diseño de propelas. El modelo de cavitación permite estudiar el comportamiento



dinámico de la propela, y es útil para el estudio de la zonas de alta presión generadas especialmente en el borde de la hoja de la propela [12].

El incremento en el diámetro de la propela permite incrementar la eficiencia de esta, pero va en contravía a la cantidad de hojas. La relación óptima para encontrar una alta eficiencia, es que la relación entre hojas y diámetros sea inversa. Tener un número mayor de hojas reduce los problemas de vibración, en este sentido las diferencias de presiones generadas por un menor número de hojas puede reducirse. Los picos generados por el comportamiento del fluido en el área cercana a las puntas de las hojas de la propela, donde existe recirculación del fluido se ven interrumpidas por una cantidad de pasos de hoja mayor.

Una propela con paso alto, hace que el vehículo avance con mayor rapidez. Pero un paso alto puede generar mayor cavitación. Adicionalmente, un paso pequeño es preferible ya que reduce el tamaño general del sistema y reduce las pérdidas óhmicas del motor [8].

El aumento en las velocidades angulares de giro del motor generan mayores velocidades, pero a costa de un aumento de potencia. Esto a su vez puede desencadenar en una reducción de la eficiencia del propulsor, si no se varían a su vez el diámetro de la propela. Además, de que se requiere mayor potencia para la generación de tales velocidades.

El tamaño de motor es entonces proporcional al torque de la propela, mientras que la fuente de potencia es proporcional a la potencia de la propela.

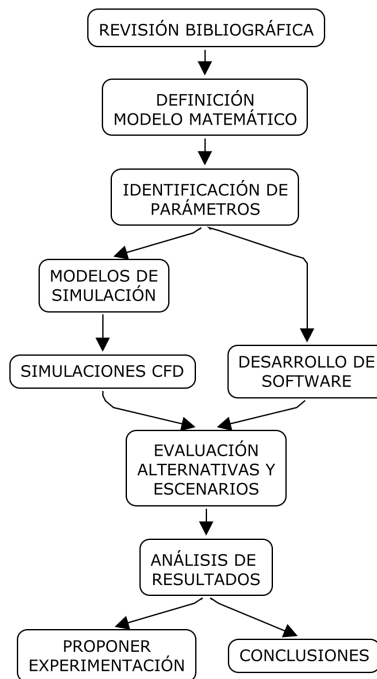
Para un empuje constante y un paso fijo de propela, el incremento en el diámetro de la misma generará un incremento en el torque y la potencia del motor [8].

Un problema de optimización de propulsores, es en primera medida la selección adecuada de la propela y sus características geométricas como paso ( $P$ ) y diámetro ( $D$ ). En un análisis mucho más global, es entonces un problema que incluye empuje ( $T$ ), velocidad de avance ( $V_A$ ), velocidad angular ( $\omega$ ), y torque( $Q$ ). Es posible según una cantidad de modelos de motores variar velocidades y torques de entrada, dejando fijas las condiciones geométricas de la propela, evaluando la eficiencia de la misma y del conjunto en forma global. Otro análisis es el correspondiente contrario, es decir, variar los parámetros de la propela con un conjunto fijo de parámetros en el motor.

## METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico partirá de una revisión de la información bibliográfica disponible. De lo anterior, se hará un análisis de la información encontrada, que permita establecer cuáles son los parámetros que definen el comportamiento dinámico de un sistema de propulsión y que pueden ser relevantes en la toma de decisiones, bien sea dentro de un proceso de diseño o de selección de componentes. Sumado a este análisis matemático, y en aras de facilitar los procesos de evaluación futuro, se elaborarán herramientas de software como respaldo y como producto final esperado, que calcule los resultados y alimente las conclusiones del presente trabajo de grado. Finalmente, se plantearán modelos experimentales como método de comprobación de los resultados obtenidos y como punto de partida para el trabajo futuro.

Figura 3. Diagrama de flujo del desarrollo metodológico



## RECURSOS

Los recursos necesarios para la ejecución del presente trabajo de grado son de tres tipos: recursos humanos, institucionales, y de equipos y materiales. Aunque está enmarcado dentro de un proyecto macro, este trabajo no requiere de desembolso de recursos.

Los recursos humanos están conformados por las personas que influyen directamente en la producción del trabajo de grado. Además, de las personas que indirectamente inciden en su desarrollo, cómo asesores externos al proyecto. Para el desarrollo del trabajo de grado, el grupo humano está conformado principalmente por los estudiantes ejecutores, el director del trabajo de grado, y los docentes de los cursos de Trabajo de Grado I y Trabajo de grado II. Se incluye además la asesoría externa recibida por el docente Andrés Felipe Tabares Franco, en el tema de fluidos computacionales (CFD).

Los recursos institucionales se definen como las herramientas que la universidad y otros estamentos públicos o privados de educación o formación ofrecen para la ejecución del proyecto. Se incluyen entonces las horas de trabajo asesor, el material de referencia bibliográfico, el acceso a bases de datos, licencias de uso de software de simulación en Termofluidos ANSYS FLUENT 14®), software de programación Matlab®) y software de diseño en ingeniería mecánica Solid Edge®).

Los materiales y equipos necesarios para la ejecución del proyecto, serán un computador personal, papel para la impresión del consolidado escrito que se obtendrá y dispositivos de almacenamiento de información para la entrega de resultados y ejecutables obtenidos del proyecto.

## PRESUPUESTO

La Tabla 1, presenta el presupuesto para el desarrollo del trabajo de grado. A pesar de verse enmarcado en un proyecto macro con montos desembolsables por parte de la empresa privada y COLCIENCIAS, no se harán efectivos a los estudiantes. El único ítem desembolsable será el de la papelería por parte de los estudiantes.

Tabla 1. Presupuesto para el desarrollo del trabajo de grado.

Presupuesto			Desembolso	
Descripción	UPB	Estudiantes	Si	No
Tiempo Estudiantes (6000 \$/h)	-	\$ 5.760.000		x
Tiempo asesor (60000 \$/h)	\$ 11.520.000	-		x
Papelería	-	\$ 100.000	x	
Literatura Científica	\$ 388.880	-		x
Acceso a Bases de datos	\$ 40.000	-		x
Software	\$ 880.366	-		x
Hardware de Computo	\$ 132.000	\$ 400.000		x
Total	\$ 12.961.246	\$ 6.260.000		
	<b>Total</b>	<b>\$ 19.221.246</b>		

## CRONOGRAMA

La Tabla 2, presenta el cronograma esperado para la ejecución del proyecto del trabajo de grado. El período total para la ejecución del mismo es de 12 meses, aunque el planteamiento inicial y la investigación preliminar comienzan en los meses de Agosto y Septiembre del 2012. Además, este período de 12 meses se ajusta al desarrollo de los cursos Trabajo de Grado I y II, en los dos semestres del año en curso (2013).

Tabla 2. Cronograma de actividades para el desarrollo del trabajo de grado.

<b>Cronograma de actividades</b>												
<b>Actividad</b>	<b>Duración en Meses</b>											
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Revisión Bibliográfica	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Selección de parámetros			×	×								
Resumen procedimiento de cálculo.				×	×	×	×					
Simulación CFD				×	×	×						
Análisis resultados CFD					×	×	×	×				
Estructuración código de programación.						×	×	×				
Elaboración código programación de software.							×	×	×			
Ejecución y puesta a punto del software.								×	×	×		
Análisis de resultados software.								×	×	×	×	
Elaboración de manual de uso del software.								×	×	×	×	
Escritura artículo publicable.									×	×	×	
Proposición de experimentos.								×	×	×		
Escritura trabajo de grado. Entrega final.				×	×	×	×	×	×	×	×	×

## BIBLIOGRAFÍA


- [1] E. Allmendinger, S. of Naval Architects, and M. E. (U.S.), *Submersible vehicle systems design*, ser. SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS (U S)//TRANSACTIONS. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1990.
- [2] J. Kim and W. K. Chung, “Accurate and practical thruster modeling for underwater vehicles,” *Ocean Engineering*, vol. 33, pp. 566–586, 2006.
- [3] A. C. Takinaci and M. Atlar, “Performance assessment of a concept propulsor: the thrust-balanced propeller,” *Ocean Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 129 – 149, 2002.
- [4] J. Evans and M. Nahon, “Dynamics modeling and performance evaluation of an autonomous underwater vehicle,” *Ocean Engineering*, vol. 31, pp. 1835 – 1858, 2004.
- [5] A. Alvarez, V. Bertram, and L. Gualdesi, “Hull hydrodynamic optimization of autonomous underwater vehicles operating at snorkeling depth,” *Ocean Engineering*, vol. 36, pp. 105 – 112, 2009.
- [6] J. P. J. Avila and J. C. Adamowski, “Experimental evaluation of the hydrodynamic coefficients of a {ROV} through morison’s equation,” *Ocean Engineering*, vol. 38, pp. 2162 – 2170, 2011.
- [7] J. Carlton, *Marine Propellers and Propulsion*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007.
- [8] G. Griffiths, *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*, ser. Ocean science and technology. Taylor & Francis, 2002.

- [9] M. Morgut and E. Nobile, “Influence of grid type and turbulence model on the numerical prediction of the flow around marine propellers working in uniform inflow,” *Ocean Engineering*, vol. 42, pp. 26–34, 2012.
- [10] A. N. Hayati, S. M. Hashemi, and M. Shams, “A study on the behind-hull performance of marine propellers astern autonomous underwater vehicles at diverse angles of attack,” *Ocean Engineering*, vol. 59, pp. 152–163, 2013.
- [11] J. Martínez-Calle, L. Balbona-Calvo, J. González-Pérez, and E. Blanco-Marigorta, “An open water numerical model for a marine propeller: A comparison with experimental data,” *ASME 2002 Joint U.S.-European Fluids Engineering Division Conference*, vol. 2, pp. 807–813, 2002.
- [12] W.-G. Park, Y.-R. Jung, and C.-K. Kim, “Numerical flow analysis of single-stage ducted marine propulsor,” *Ocean Engineering*, vol. 32, pp. 1260 – 1277, 2005.
- [13] R. Lewis, *Turbomachinery Performance Analysis*, Butterworth-Heinemann, Ed. Elsevier Science, 1996.
- [14] G. Antonelli, *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics. Springer, 2010.
- [15] R. D. Christ and R. L. W. Sr, “Chapter 3 - roV components,” in *The ROV Manual*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, pp. 46 – 80.
- [16] J. V. Manen and P. V. Oossanen, “Other propulsion devices,” in *Principles of Naval Architecture*. Lewis E.V., 1988, vol. II.
- [17] F. Azis, M. Aras, M. Rashid, M. Othman, and S. Abdullah, “Problem identification for underwater remotely operated vehicle (rov): A case study,” *Procedia Engineering*, vol. 41, no. 0, pp. 554 – 560, 2012.
- [18] U. A. Korde, “Study of a jet-propulsion method for an underwater vehicle,” *Ocean Engineering*, vol. 31, pp. 1205–1218, 2004.
- [19] J. P. Avila, D. C. Donha, and J. C. Adamowski, “Experimental model identification of open-frame underwater vehicles,” *Ocean Engineering*, vol. 60, pp. 81 – 94, 2013.

- [20] E. Lewis, S. of Naval Architects, and M. E. (U.S.), *Principles of Naval Architecture: Motions in waves and controllability*, ser. Principles of Naval Architecture. Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [21] M. Bernitsas, D. Ray, and P. Kinley, “ $k_t$ ,  $k_q$  and efficiency curves for the wageningen b-series propellers.” Department of Nava Architecture and Marine Engineering. College of Engineering. University of Michigan., Ann Arbor, Michigan 48109, Report 237, 1981.



ANEXO. FORMATO ACTA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

 <b>Universidad Pontificia Bolivariana</b>	<b>ACTA DE PROPIEDAD INTELECTUAL TRABAJOS DE GRADO</b>	<b>VICERRECTORÍA ACADÉMICA</b>
---	--	--------------------------------

**FECHA:** \_ 14 de Mayo de 2013

**1. NOMBRE DEL PROYECTO:** Análisis del Desempeño Dinámico del Sistema de Propulsión del Minisubmarino Visor3.

## 2. PARTICIPANTES

### 2.1 ESTUDIANTES

**Nombre:** Esteban Vargas Bolívar

**No. c.c.:** 1'037.617.800

**Horas dedicadas al proyecto:** 480

**Programa en el cual se encuentra matriculado:** Ingeniería Mecánica

**Nombre:** Santiago Vélez Zuluaga

**No. c.c.:** 1'017.186.524

**Horas dedicadas al proyecto:** 480

**Programa en el cual se encuentra matriculado:** Ingeniería Mecánica

### 2.2 DIRECTOR

**Nombre:** Juan Alberto Ramírez Macías

**No. c.c.:** 8.128.702

**Empresa donde labora actualmente:** Universidad Pontificia Bolivariana

**Cargo en la empresa:** Docente Investigador.

**Horas dedicadas al proyecto:** 120

## 3. FUENTES DE FINANCIACIÓN

Descripción	Presupuesto		Desembolso	
	UPB	Estudiantes	Si	No
Tiempo Estudiantes (6000 \$/h)	-	\$ 5.760.000		x
Tiempo Asesor (60000 \$/h)	\$ 11.520.000	-		X
Papelería	-	\$ 100.000	X	
Literaruta Científica	\$ 388.880	-		X
Acceso a Bases de datos	\$ 40.000	-		X
Software	\$ 880.366	-		X
Hardware de Computo	\$ 132.000	\$ 400.000		X
Total	\$ 12.961.246	\$ 6.260.000		
	<b>Total</b>	<b>\$ 19.221.246</b>		

#### **4. PRODUCTOS**

Los productos a entregar son:

- 4.1. Copia a la Biblioteca Central de la UPB del documento en papel y medio magnético, que soporta el trabajo de grado, una vez sea aprobado.
- 4.2. Artículo publicable en revista o congreso a nivel nacional.
- 4.3. Herramientas de software para ejecución del modelo matemático.
- 4.4. Manual que ilustra el funcionamiento del software.

#### **5. EQUIPOS Y MATERIAL BIBLIOGRAFICO**

Los estudiantes, director y asesor, se comprometen a devolver a la Universidad Pontificia Bolivariana todo el equipo y material bibliográfico, obtenido con recursos proporcionados por las dependencias académicas y administrativas de la Universidad, una vez termine el proyecto.

#### **6. DURACION DEL PROYECTO**

El proyecto tendrá una duración de 12 meses, contados a partir del 22 de Enero de 2013

#### **7. PROPIEDAD INTELECTUAL**

##### **7.1 DERECHOS MORALES**

Los derechos morales de autor corresponden a los estudiantes, al director y a toda persona que a criterio de éstos, haga aportes originales intelectuales en los avances y en el resultado final del proyecto.

En cualquier tipo de divulgación se dará crédito a los autores y la Universidad Pontificia Bolivariana.

##### **7.2 DERECHOS PATRIMONIALES**

Los derechos sobre los resultados derivados del presente trabajo de grado se rigen por el Estatuto de Propiedad Intelectual de la Universidad.

A continuación se establecen los porcentajes de participación en aportes y por tanto de derechos de patrimoniales sobre los resultados:

<b>Productos</b>	<b>Entidades financiadoras</b>	<b>Monto del aporte</b>	<b>Porcentaje de participación</b>
Artículo publicable en revista o congreso nacional.	-	-	-
Copia trabajo final en medio magnético y documento papel.	-	-	-
Herramientas de software.	-	-	-
Manual de uso de software.	-	-	-

#### **8. CONFIDENCIALIDAD**

Los participantes se comprometen a guardar absoluta reserva sobre la información confidencial que conozcan o a la que tengan acceso en virtud de su participación en el presente proyecto. Igualmente se comprometen a guardar reserva sobre los resultados innovadores con potencial de aprovechamiento comercial del proyecto.

Igualmente, están en la obligación de no copiar, enviar por fax, reproducir, divulgar, o distribuir el o los documentos, ni en su totalidad o parte, sin el expreso consentimiento por escrito de la UPB.

Acepto que la violación de la reserva a lo aquí convenido dará lugar a la aplicación de las sanciones previstas en el Código Penal, artículo 308 de la Ley 599 del 2000, referente a la *Violación de reserva industrial o comercial*, sin perjuicio de las que se imponen por competencia desleal y del cobro de las indemnizaciones a que haya lugar.

## 9. SOLUCION DE CONFLICTOS

En caso de controversia sobre la interpretación o aplicación de la presente acta, se agotarán en primera instancia los conductos regulares de la Universidad, y en caso de no llegar a ningún acuerdo, se dirimirá el conflicto mediante dos (2) amigables componedores designados por cada parte. La decisión será en equidad y tendrá fuerza vinculante para los intervinientes.

## 10. CONSTANCIA

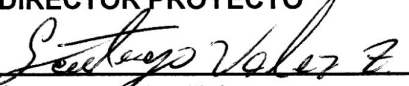
Todos los partícipes declaran conocer el Estatuto de Propiedad Intelectual de la Universidad Pontificia Bolivariana.

En caso que algún participante se retire antes del 80% de ejecución del cronograma del proyecto, perderá todos los derechos sobre los resultados de la misma.

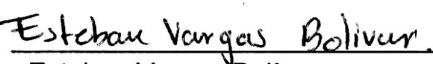
En caso de presentarse alguna circunstancia que altere los términos de la presente acta, deberá anexarse al presente documento la respectiva modificación aprobada por la respectiva facultad.

Para constancia se firma en Medellín, el 14 de Mayo de 2013

  
\_\_\_\_\_  
Juan Alberto Ramírez Macías, IM, Mg.  
**DIRECTOR PROYECTO**

  
\_\_\_\_\_  
Santiago Vélez Zuluaga  
**ESTUDIANTE**

  
\_\_\_\_\_  
Diego Andrés Flórez Londoño, IM, Mg.  
**DIRECTOR DE FACULTAD**

  
\_\_\_\_\_  
Esteban Vargas Bolívar  
**ESTUDIANTE**