

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Análisis del sistema de propulsión alimentado con energía
solar para una canoa**

Diego Fernando Guerrero Méndez

Diego Gonzalo Naranjo Vargas

Ingeniería Mecánica

Trabajo integración curricular presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico.

Quito, 06 de diciembre de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**Análisis del sistema de propulsión de propulsión alimentado con energía
solar para una canoa**

Diego Fernando Guerrero Méndez

Diego Gonzalo Naranjo Vargas

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Juan Sebastián Proaño, Ph.D.

Firma del profesor

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Marco León, M.Sc.

Firma del profesor

Quito, 06 de diciembre de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Diego Fernando Guerrero Méndez

Código: 00124579

Cédula de Identidad: 1716929110

Lugar y fecha: Quito, 06 de diciembre de 2019

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Diego Gonzalo Naranjo Vargas

Código: 00115916

Cédula de Identidad: 1717513780

Lugar y fecha: Quito, 06 de diciembre de 2019

RESUMEN

El presente proyecto de tesis surge con el objetivo de crear un medio de transporte sustentable, económico y viable, el cuál sea capaz de cumplir con todas los requerimientos de la comunidad Achuar en la Amazonía ecuatoriana. Para lograr este objetivo se busca la creación de un sistema de propulsión adecuado para las canoas achuar con el objetivo de que sean de fácil manejo y resistentes a las condiciones climáticas de la Amazonía. Se utilizó un método analítico enfocado en seleccionar una pareja de hélice-motor adecuada para Tapiatpia, embarcación que navega en la Amazonía ecuatoriana. Analizando las dimensiones de la embarcación y parámetros de velocidad y carga necesarios, se obtuvo un empuje, valor con el que se trabajó en los cálculos de selección de hélice, para la cual se eligió una de 3 álabes y 12 pulgadas de diámetro y un motor DC brushless de 20 kW, ya que el método de cruce de curvas Q-RPM arrojó un punto de operación que cumplió con todos los requerimientos. Así se obtuvo la pareja adecuada y se desarrolló un método de selección correcto. Además, se usó un método de simulación con el fin de observar el comportamiento de la embarcación en el río bajo estas condiciones y así corroborar todos los resultados arrojados por el método analítico. De esta manera se certificó que la pareja hélice-motor escogida logrará que la embarcación navegue a dicha velocidad.

Palabras clave: propulsión, motor eléctrico, hélice, comunidades amazónicas, Kara Solar.

ABSTRACT

The present thesis project arises with the objective of creating a sustainable, economical and viable transport which can fulfill all the requirements of the ACHUAR community in the Ecuadorian Amazon. To achieve this goal, the creation of a propulsion system suitable for Achuar canoes is sought with the aim of being easy to use and resistant to the climatic conditions of the Amazon. An analytical method was used focused on selecting a suitable propeller-motor pair for Tapiatpia, a boat that sails in the Ecuadorian Amazon. Analyzing the dimensions of the boat and necessary speed and load parameters, a thrust was obtained, that value was used in the calculus to choose the propeller, the selected propeller was 3 blades and 12-inch diameter and a DC Brushless motor of 20 kW was selected because of the method of intersect the Q-RPM curves gave an operation point that achieved all the requirements. With this, an adequate pair was selected, and a correct selection method was developed. In addition, a simulation method was used in order to observe the behavior of the boat in the river under these conditions and thus corroborate all the results produced by the analytical method. In this way it was certified that the chosen propeller-motor pair will ensure that the boat navigates at that speed.

Key words: propulsion, electric engine, propeller, Amazonian communities, Kara Solar.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
El combustible fósil es el abastecimiento energético a nivel mundial.....	9
Datos del Ecuador.....	13
MATERIALES Y MÉTODOS	21
Método Analítico	21
Opción 1.....	25
Opción 2.....	30
Simulación	35
Importar el modelo CAD al simulador Simscale.....	36
Creación del dominio.....	37
Creación del mallado.....	38
Características del modelo.....	39
Materiales.....	39
Condiciones Iniciales.....	40
Simulación.....	41
Control de resultados.....	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
Método Analítico	43
Simulación	47
CONCLUSIONES	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
ANEXO 1: Ajustes Generales en Javaprop.....	54
ANEXO 2: Valores para Hélice de 12 Pulgadas.....	55
ANEXO 3: Datos para la Hélice 12 pulgadas.....	56
ANEXO 4: Datos para la Hélice 12 pulgadas.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes de la demanda de energía primaria por fuente de combustible.	10
Tabla 2. Número de habitantes indígenas en cada provincia (López et al, 2013)	14
Tabla 3. Presupuesto del Proyecto.	19
Tabla 4. Requerimientos Ingenieriles.	22
Tabla 5. Datos del Motor Brushless 10 kW.	26
Tabla 6. Datos del Motor Brushless 20 kW.	31
Tabla 7. Datos del Punto de Cruce.	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo CAD de Tapiatpia.	21
Figura 2. Plano de corte con $V = 2,9586 \text{ m}^3$	23
Figura 3. Superficie Mojada.	23
Figura 4. Superficie en contacto con el aire.....	23
Figura 5. Curvas del Motor 10 kW (Golden Motor,2015).....	25
Figura 6. Curva de Torque del Motor Brushless 10 kW.....	26
Figura 7. Curva de Eficiencia del Motor Brushless 10 kW.	27
Figura 8. Curva de Torque de la Hélice 12 pulgadas.....	28
Figura 9. Curva de Eficiencia de la Hélice 12 pulgadas.....	29
Figura 10. Curvas de Torque de Hélice y Motor.	29
Figura 11. Curvas del Motor 20 kW (Golden Motor, 2015).....	30
Figura 12. Curva de Torque del Motor Brushless 20 kW.....	31
Figura 13. Curva de Eficiencia del Motor Brushless 20 kW.	32
Figura 14. Curva de Torque de la Hélice 12 pulgadas.....	32
Figura 15. Curva Eficiencia de la Hélice 12 pulgadas.....	33
Figura 16. Cruce de Curvas de Torque.	33
Figura 17. Curva de Empuje de Hélice 12 pulgadas.....	34
Figura 18. Etapas de un modelo de simulación	35
Figura 19. Diseño importado a Simscale	36
Figura 20. Creación de un análisis tipo multifase.....	37
Figura 21. Medidas recomendadas para el dominio de la simulación (Simscale, s/f).	37
Figura 22. Vista isométrica del mallado de nuestra nave.	38
Figura 23. Pestaña "Model" Simscale	39
Figura 24. Pestaña "Materials " Simscale.....	40
Figura 25. Esquema de las condiciones iniciales (Simscale, s/f).....	41
Figura 26. Ajuste del control de resultados de coeficientes de drag y lift.	42
Figura 27. Punto de operación de eficiencia de la Hélice.....	44
Figura 28. Punto de operación de empuje de la Hélice.....	44
Figura 29. Punto de operación en cruce de curvas de Torque.	45
Figura 30. Punto de operación en eficiencia del Motor.	45
Figura 31. Opción de Hélice 12 pulgadas.....	46
Figura 32. Motor DC Brushless 20 kW.	46
Figura 33. Oleaje del rio por el movimiento del bote y presión en la superficie de control....	47
Figura 34. Velocidad del bote sobre el río.....	48
Figura 35. Gráfica Fuerza vs Tiempo (Simscale).	49
Figura 36. Gráfica coeficiente de fuerza vs tiempo (Simscale).	49

INTRODUCCIÓN

El combustible ha sido utilizado por el hombre a partir que se obtuvo la forma de controlar, manipular, y producir el fuego. Desde entonces se han ido descubriendo otros elementos, tratando de hacerlos más eficaces en métodos que demandan calor y potencia que es el resultado de la combustión. Este proceso de avance utiliza un aumento descontrolado de combustibles fósiles, empezando por madera, el carbón y petróleo. Siendo estos los causantes de una contaminación notoria en el planeta. Tan grave ha sido el problema de contaminación que, en el siglo XX, se da una gran oposición al consumo desmedido de este combustible, donde nace la necesidad de investigar otro tipo de opción menos contaminante (Betancour, 2005).

El combustible fósil es el abastecimiento energético a nivel mundial

Actualmente más del 80% del abastecimiento mundial de energía, se derivan del combustible fósil como es el carbón, gas natural y el petróleo. Porcentajes a nivel mundial arrojan que el petróleo es un tercio de las necesidades energéticas, seguido del carbón que es la cuarta parte y el gas natural forman una quinta parte. El 6% es la energía nuclear, un 13% están conformadas por energías renovables como lo son energía solar, eólica etc., también energías hidroeléctricas, biomasas (US EIA, 2010).

Se puede ver en la tabla que el uso de las fuentes de energía muestra porcentajes diferentes en los países desarrollados y en desarrollo. Antes se podía establecer que el consumo de energía era mayor en países desarrollados, en el 2007 lo países en desarrollo alcanzaron los mismos niveles de consumo. Tanto los países en desarrollo como los desarrollados utilizan el 80% de combustibles fósiles. Versus las energías renovables con tecnología que van en

progreso basadas en el sol, los vientos llegan al 1% de abastecimiento energético mundial (US EIA, 2010).

Tabla 1. Porcentajes de la demanda de energía primaria por fuente de combustible.

	N. Mundial	P. Desarrollados	P. N. Desarrollados
Carbón	27%	21%	34%
Gas natural	21%	23%	20%
Petróleo	33%	38%	26%
Nuclear	6%	11%	2%
Renovables	13%	7%	18%
Total	100%	100%	100%

El transporte a lo largo de la historia se ha caracterizado por utilizar los combustibles fósiles como fuente de energía, ya sea transporte terrestre, aéreo o marítimo. Este proceso tiene varios problemas y consecuencias muy graves, entre los más destacados está la contaminación ambiental que produce la quema de estos combustibles y su consecuencia como agravante del calentamiento global. Es importante mencionar que es una energía costosa, pues los vehículos necesitan incontable cantidad de litros de combustible para funcionar durante su periodo de vida útil. Por otro lado, al no ser una energía renovable, no se puede pensar a largo plazo para seguir beneficiándose de ella, pues en un momento determinado las fuentes de combustible se agotarán. Todas estas razones han sido analizadas, por lo que actualmente el transporte está tomando un rumbo distinto y se encamina hacia la movilidad eléctrica (Lapko, 2016). La sustitución de mayor magnitud se ha dado en el campo automotriz, pues las empresas intentan dejar de lado los autos que utilizan combustible y reemplazarlos con vehículos eléctricos, como herramientas que ayuden a corregir o aliviar los ya mencionados problemas que el mundo enfrenta en la actualidad.

La industria marítima por su parte también representa un gran impacto a estos problemas, pues los barcos emiten gases contaminantes debido a que utilizan motores impulsados por combustibles fósiles, al necesitar grandes magnitudes de torque y al ser millones en el mundo, ha existido mayor interés en el estudio de sistemas eléctricos que puedan lograr los mismos rendimientos que un motor a combustión, una idea de cambio muy similar a la que con ventaja se ha desarrollado en el campo automotriz. La aparición de nuevas leyes en contra de las emisiones y las exigencias ambientales de obtener mayores eficiencias en los procesos de movilidad marítima han sido apoyos fundamentales para dejar de lado el uso de combustibles, pues en la mayoría de los casos estos se rigen a tecnologías antiguas que no fueron desarrolladas tomando en cuenta estos factores. De esta manera se obliga a buscar nuevas opciones y explorar distintos horizontes. Una primera idea fue combinar la combustión con la parte eléctrica, para desarrollar motores híbridos que con el apoyo eléctrico logren cubrir las nuevas exigencias, así no se da una transformación inmediata y se cuida el pensamiento conservador de la industria marítima. Si bien estas ideas lograron buenos resultados, se pueden considerar como soluciones limitadas a corto plazo, pues solo funcionan para mejorar en cierta medida los motores de combustible, pero no cumplen con el objetivo de sustitución total (Reabroy, Tiaple, Pongduang, Nantawong y Iamraksa, 2015).

Esta implementación, estudio y desarrollo de motores híbridos fue el paso fundamental para comenzar con la idea del uso de motores netamente eléctricos. Considerando que el campo marítimo tiene una infinidad de aplicaciones, se ha podido hacer un enfoque en ciertas áreas específicas en las que la implementación de motores eléctricos sea más sencilla y arroje resultados equivalentes o superiores a los que ya se consiguen con motores de combustión. Al igual que en la mayoría de los estudios nuevos, se necesita hacer cambios pequeños para poder probar y tener la certeza de que cuando se quiera trabajar a mayor magnitud todo funcione correctamente, por esta razón se han buscado aplicaciones de las que se puedan observar

resultados rápidos con los cambios hechos. Una de las aplicaciones en la que ya se ha trabajado es la de transporte de carga y pasajeros dentro de puertos, así como el transbordo de pasajeros o transporte de encomiendas y equipaje que se realiza en los terminales terrestres y aeropuertos, el campo marítimo también tiene este tipo de actividades dentro de los puertos. Un claro ejemplo son los barcos cargueros, ya que debido a su gran tamaño no llegan a puntos de recepción de carga en los puertos y por esta razón la carga se transporta desde la recepción en un punto del puerto, a través de distintas rutas dependiendo si se debe ir a varios puntos, utilizando mayoritariamente barcos pequeños o lanchas, hasta el barco grande que será el encargado de llevar la carga. Por otro lado, un problema derivado del anterior es que los pasajeros muchas veces no pueden llegar por tierra hasta el punto donde se aborda barcos grandes, como cruceros y para esto se hace un micro transporte de pasajeros al igual que se hace con carga. Ya que este tipo de embarcaciones de menor tamaño no necesitan una fuerza demasiado grande para hacer el micro transporte, se ha optado por sustituir sus motores de combustión por motores eléctricos e ir estudiando el comportamiento, ventajas y desventajas (Hardman, 2019).

Otra aplicación es el turismo náutico, una forma de turismo que ha tenido un creciente desarrollo en los últimos años, pues en ciertos países en los que el acceso a comunidades solamente se puede hacer por barco, y ya que muchas de estas comunidades atraen a los turistas, se ha buscado cubrir estas necesidades mediante la aplicación de pequeños barcos o yates que puedan hacer los recorridos, pero el punto importante es que se ha tratado de dejar de lado los motores de combustión, esto debido al gran impacto que ha tenido la implementación de procesos amigables con el medio ambiente cuando se trata de turismo. Así se dio lugar a la creación de un ecoturismo náutico que utiliza motores eléctricos en los yates para el transporte de los pasajeros a través de las comunidades. Estos cambios sugieren ventajas significativas, ya que el campo del turismo maneja gastos y ganancias grandes que se logran incrementar al

atraer más turistas por ser eco amigables y al ahorrar en costos de combustible, de igual manera su impacto ambiental se reduce y los cumplimientos de normas y leyes evitan posibles multas y gastos extras (Lapko, 2016). Estos estudios en aplicaciones pequeñas son claros ejemplos de la sustitución de barcos de combustión por los que utilizan energía eléctrica, se han obtenido los resultados de ventajas y desventajas para cada aplicación, pero lo realmente importante es que han sido útiles para observar posibles problemas que puedan surgir si se hace cambios así de abruptos en aplicaciones más grandes, como barcos cargueros o lanchas de competencia. El hallazgo más relevante es que al tratarse de motores eléctricos, se debe hacer un estudio específico para cada barco de manera individual, tomando en cuenta dimensiones y geometría para poder diseñar o utilizar un sistema de propulsión adecuado para el caso particular.

Datos del Ecuador

La población de la región Amazónica en Ecuador en el año 2010 fue de 739.814 habitantes, de los cuales el 38.81% corresponde a población urbana y 61,19 % a población rural (López et al, 2013). La población está compuesta principalmente por niños y jóvenes menores de 15 años que representan el 38,4 % de la población, la población mayor a 65 años forma parte del 5% y el resto de los habitantes el 56,6 % (INEC, 2010). Para el año 2020 se proyecta alrededor de 956.699 habitantes (INEC, 2010).

La región amazónica está constituida por pobladores de tres grandes grupos: indígenas, colonos y una población flotante que está dedicada a la actividad petrolera y maderera (Guamán y Ordóñez, 2014). En la Tabla 2, se muestra el número de habitantes que se consideran indígenas en cada provincia que forman para de la región Amazónica del Ecuador.

Tabla 2. Número de habitantes indígenas en cada provincia (López et al, 2013)

Nacionalidad								
Indígena	Morona	Santiago	NAPO	Orellana	Pastaza	Sucumbíos	Zamora	Chinchi
Achuar	3.771	14	49	2.565	203	65		
Andoa	93	281	92	0	53	109		
Cofán	188	17	34	5	990	16		
Kichwa	873	53.996	34.804	17.817	15.392	2.060		
Secoya	63	2	9	30	455	2		
Siona	4	8	7		532	0		
Shiwar	133	8	11	818	14	53		
Shuar	62.63	137	1.924	5.645	2.018	5.475		
Waorani	2	112	908	1.184	14	2		
Sapara	1	6	1	456	10	0		
Otros	3.780	4.264	5.490	4.879	4.003	6.437		
Total	71.538	58.845	43.329	33.399	23.684	14.219		

Las actividades económicas de la zona están destinadas a la industria petrolera, maderera y minera. Sin embargo, comunidades como los Shuar y Achuar, sus hombres se dedican a la pesca, cacería o construcción de viviendas, en tanto las mujeres cosechan productos como: yuca, papa china, camote, maíz (Guamán y Ordóñez, 2014). Es tal la consecuencia de la actividad petrolera en la región que hoy en día es visible la deforestación tardía en comunidades indígenas como los Kichwa, Shuar y Secoya, en tanto los Waorani han implementado prácticas de transportación por el río Napo y sus afluentes (López et al, 2013).

En los últimos años el gobierno ha invertido en la infraestructura de instituciones educativas para los niños y adolescentes de esta región, no obstante, existen comunidades muy alejadas de los centros poblados, los cuales presentan un alto índice de pobreza (Guamán y Ordóñez, 2014). Para el año 2014 la pobreza se redujo en 12 puntos y la indigencia en 17,8, pese a esto, el oriente ecuatoriano mantiene elevados índices de pobreza (Castillo y Andrade, 2016).

El Ecuador dentro de sus tres regiones naturales de la costa sierra y el Oriente, en su geografía tiene vastos Ríos como el Guayas y Esmeraldas; la superficie plana de nuestro Oriente ecuatoriano permite poseer ríos navegables, deben ser aprovechados para un transporte fluvial ecológico y armónico con el ser humano, con la reducción del consumo de energías no-renovables y la discusión sobre alternativas de generación de energía son temas de debate que alcanzan a todo el mundo.

Los cuerpos de agua en la región Amazónica son los más contaminados, por las diversas actividades sin medidas de mitigación que allí se practican, un estudio realizado en las fuentes de agua de la Amazonía cerca del Puyo arrojó que 8 de las 10 fuentes analizadas presentaban contaminación severa con la presencia de bacterias como la *E. coli*. Acorde al Centro de salud de la zona Pitirishca la enfermedad más común en la población es la parasitosis no especificada, que ocurre en niños y jóvenes de 5 a 14 años. Juntamente con diarreas, enfermedades del estómago y parásitos que los habitantes de la Amazonía padecen. Según el Centro de salud Pitirishca las enfermedades más comunes son: Parasitosis no especificada, Rinofaringitis, Piodermatitis, Faringitis bacteriana, Bronquitis aguda, Infecciones de vías urinarias, Conjuntivitis no específica, Diarrea infecciosa, Lumbagia no específica, Amigdalitis no específica (McGregor, 2018).

Los recursos hídricos que posee el Ecuador se ven afectados de alguna manera por la contaminación urbana, industrial, hidrocarburífera, falta de una coordinación entre entidades

institucionales, para mejorar la eficiencia, en el uso de estos bienes naturales que favorezca la calidad de vida el ser humano.

El área hidrográfica que presenta la Amazonía con respecto al territorio nacional es del 51,41% (López et al. 2013). Su situación hidrográfica es crítica, debido a la actividad que por muchos años se ha realizado en la región que es la actividad petrolera, muchos de los ríos están contaminados, así lo indica, el estudio de San Sebastián et al, (2001), en el cual se muestra el análisis de Hidrocarburos totales de petróleo, en 20 ríos perteneciente a 9 de las comunidades que allí habitan. Los resultados fueron valores que sobrepasan la norma establecida para consumo humano, en ciertos ríos la concentración superó hasta 100 veces más la concentración del límite permitido. Tal es la contaminación en el medio acuático, que el hecho de arrojar indirectamente.

La Amazonía ecuatoriana tiene un gran atractivo ecoturístico, el transporte fluvial es indispensable para trasladarse de una comunidad a otra especialmente de Misahauallí al Coca. Es importante destacar que en Misahauallí se encuentra una gran cantidad de cruceros fluviales, lo que enfatiza la relación del transporte el turismo de la zona (Smith, 2010).

Por otro lado, este medio de transporte no solo está netamente correlacionado con el turismo, la educación y el comercio van de la mano. En los últimos años se han cerrado escuelas unidocentes, a su vez se han abierto escuelas con un fácil acceso, por lo que se ha instaurado canoas en los diferentes ríos que conectan las viviendas de los niños y docentes con la institución educativa. En tanto, para el comercio los deslizadores que constituyen canoas más rápidas son muy utilizados por la industria petrolera, las comunidades que rodean al río Putumayo lo usan para movilizarse entre Puerto Mestanza y Puerto Asís en Colombia (Wilmsmeier, et al., 2017).

La adquisición del combustible para que las canoas tradicionales funcionen varía acorde a la zona en la que se encuentran, por ejemplo, a través del río Napo, se transporta

mediante tanqueros fluviales, combustible hasta Nuevo Rocafuerte. Otro es el caso de las seis comunidades: Nuevo Sinaí, Buen Samaritano, Puerto Rodríguez, Bajo Rodríguez, Mushuc Kayari y Tres Fronteras que se encuentran a lo largo del río Putumayo, éstas obligatoriamente deben tomar una canoa para poder salir a otra comunidad o a Puerto el Carmen. Otra delimitante para conseguir este tipo de combustible, son los costos de gasolina, especialmente en Putumayo que son excesivamente altos, hasta cuatro veces más de su precio base. Las diferentes complicaciones para obtener este combustible son tediosas, porque de esta manera se pone trabas a la fuga de éste hacia Colombia (Wilmsmeier, et al., 2017).

Por todo lo descrito anteriormente, las lanchas, canoas o deslizadores se han convertido en el principal medio de transporte en el Napo, todo ello lleva a la reflexión del cuidado de los recursos que se están afectando al hacer uso de este tipo de transporte fluvial, ya que el impacto ambiental en el ecosistema acuático y paisajístico lo alejan de la zona ecológica y llena de naturaleza pura que es lo que caracteriza al oriente ecuatoriano. Estas alteraciones al medio acuático por el uso de canoas son producto de la falta de normas y estudios de mitigación de los efectos ambientales generados por este tipo de transporte fluvial (Dillón, 2012).

El uso de este tipo de transporte genera impactos ambientales directos e indirectos, como, la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), lubricantes, derrame de combustible, e indirectamente la tala de árboles dentro de la región usados para la fabricación de estos embalses (Guamán et al., 2015)

Una propuesta diferente al uso de combustible típico, son los motores eléctricos, cuyas fuentes energéticas son los paneles solares, además de ayudarse del favorecimiento de la corriente del río. En el Ecuador, en mayo del 2015 se lanzó un proyecto en el cual se utilizó este tipo de energía eléctrica en las embarcaciones. Para trasladarse de una comunidad a otra desde el Puerto el Carmen hasta Puerto Rodríguez, fue necesario alrededor de dos pares de baterías recargadas. En definitiva, la idea tuvo una buena aceptación en los comuneros, porque

al implementar esta idea de tecnología limpia, las emisiones gaseosas, la contaminación auditiva y acuática va a disminuir notablemente, generando así una zona sustentable y sostenible ambientalmente (Wilmsmeier, et al., 2017).

Estudios realizados en la Amazonía ecuatoriana coinciden que las canoas eléctricas-solares son una alternativa amigable con el ambiente y con la comunidad de esta región, así lo respalda el estudio realizado por Guamán et al., (2015), efectuado en los ríos de la parte sur de la Amazonía, zona donde viven alrededor de 500 familias indígenas. En estas comunidades se instaló el proyecto “Yatsa li Etsari”, el cual consiste en generar electricidad por medio de sistemas fotovoltaicos, de esta manera la instalación de canoas en la cual se usa como combustible la luz solar es una opción viable tanto económicamente como ambiental. Además, se propone que los botes solares-eléctricos naveguen por los principales ríos: Morona, Cangaime, Macuma y Magosiza, con una duración de hasta 4 horas.

Existe la Fundación Kara Solar, que tiene un proyecto en la comunidad Achuar en la Amazonía ecuatoriana, enfocado en un sistema fluvial utilizando la energía solar, modelo de transporte sostenible que recorre el territorio por los ríos que son sus rutas ancestrales, responde al deseo profundo de esta cultura de vivir en armonía con el medioambiente, (Sunshine, 2018) donde se entrelazan el hombre y la naturaleza unidos armónicamente, para una convivencia eficaz y con desarrollo.

Esta iniciativa nació de la Asociación Latinoamericana para el Desarrollo Alternativo (ALDEA), la cual ha impulsado a que se unan diferentes comunidades a través de la comunicación fluvial desde el 2017.

Los Achuar, están socializando este medio de transporte para implementar y beneficiar a las comunidades cercanas, también impulsan la construcción de un bote, con las mismas características, expectativas para alcanzar un mayor desarrollo ecológico sostenible y disuadir el cambio climático.

En la actualidad el proyecto se encontraba con serios problemas de diseños, entre los problemas que se han encontrado está el daño irreparable de motores antes adquiridos, la falta de velocidad por parte de la canoa, el daño en la hélice antes adquirido por falta de una protección adecuada entre otros. Por ello, se busca hacer un estudio de todos los parámetros a tomar en cuenta para que en el futuro el sistema de transporte sea confiable y carezca de estos problemas que no le han permitido funcionar con normalidad y han parado el desarrollo de las comunidades amazónicas debido a la imposibilidad de comunicarse.

Para solucionar todas las falencias antes descritas se ha desarrollado el presente proyecto de tesis, el cual tiene como finalidad el diseño del sistema de propulsión necesaria para este tipo de transportes que sea amigable con la naturaleza, que cumpla con las necesidades de la comunidad y que sea versátil y fácil de maniobrar dadas las condiciones amazónicas. Para lograr estos objetivos se ha puesto como objetivos del proyecto la selección de un motor eléctrico de acuerdo con los parámetros de empujes, análisis de geometría de hélice, y diseño del sistema de transmisión. Para el desarrollo del proyecto se ha estimado un presupuesto que se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Presupuesto del Proyecto.

Elemento	Cantidad	Costo (\$)
Nuevo rig de pruebas	1	300
Motor eléctrico	1	1500-2000
Hélice	1	400-500
Viáticos		350
	Total	\$3150

Como veremos a continuación el primer paso en nuestro trabajo es analizar la canoa como tal y ver que fuerzas actúan sobre ella, identificar cuáles son las fuerzas de arrastre que

se ejercen sobre ella y calcular la fuerza necesaria para mover la misma. Posterior a este análisis se busca encontrar un hélice adecuado de acuerdo con el movimiento que describe la canoa. como tercer punto está el análisis de motores que cumplan con las especificaciones requeridas para luego analizar todas las partes antes descritas en conjunto y verificar que la eficiencia sea máxima cuando el diseño está trabajando en conjunto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método Analítico

Se diseñó un plan estratégico y bien organizado para cumplir con el desarrollo del proyecto de la manera más eficiente. Debido a que por parte de la Fundación Kara Solar ya hubo un trabajo previo, se trató de rescatar lo más importante para que sea una base de la cual partir con el proyecto. Kara Solar seleccionó el bote para el cuál necesitaban el desarrollo del sistema de propulsión, para esto proporcionaron el modelo CAD. El bote que se utilizó para el estudio se presenta en la Figura 1.

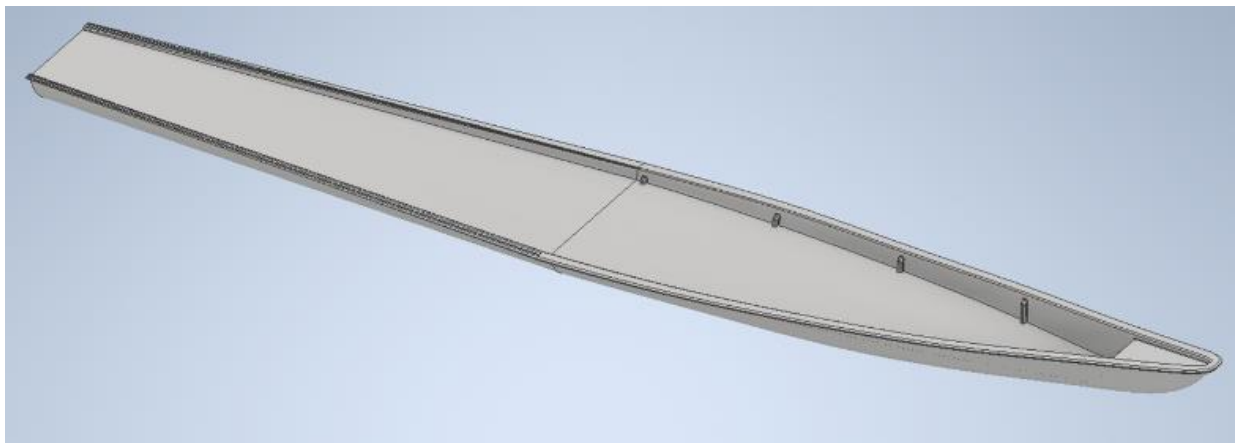


Figura 1. Modelo CAD de Tapiatpia.

Para el desarrollo del sistema de propulsión es necesario iniciar con el cálculo de empuje que debe tener este bote para poder navegar y cumplir con las condiciones requeridas de velocidad y peso. En la Tabla 4 se muestran las variables y valores requeridos de velocidad, capacidad de carga con los que se realizarán los cálculos. Es importante mencionar que la densidad que se tomó fue un promedio entre el agua salada y dulce, ya que en la Amazonía los ríos tienen sedimentos que los hacen más densos en comparación al agua pura. Por otro lado, al tener variabilidad en las condiciones se utilizó el caso más crítico, es decir con peso máximo y navegando contra corriente. También se debe aclarar que la variable L se

refiere a la línea de agua que rodea la superficie del bote cuando está sumergido y esta variable se la utiliza para cálculos de fuerzas de arrastre.

Tabla 4. Requerimientos Ingenieriles.

Datos Conocidos	
Gravedad (m/s ²)	9,81
Densidad agua (kg/m ³)	1014
Densidad aire (kg/m ³)	1,225
Masa (kg)	3000
Peso (N)	29430
L (m)	14,179
Viscosidad Cinemática (m ² /s)	8,927E-07
Velocidad (km/h)	20
Velocidad (m/s)	5,56

El primer paso fue calcular el volumen sumergido, V de la embarcación tomando en cuenta los datos de la Tabla 4. Se comenzó con la aplicación del principio de Arquímedes, con el cuál se puede obtener el volumen sumergido del bote, es decir cuánto se sumergirá al estar sometido a las condiciones iniciales críticas. El valor del volumen sumergido se obtuvo a partir de la ecuación 1, donde Fe se refiere a la fuerza de empuje, ρ es la densidad del agua y g es la gravedad.

$$V = \frac{F_e}{\rho g} = \frac{29430}{1014 * 9,81} = 2,9586 \text{ m}^3 \quad (1)$$

Después se utilizó el software Inventor Autodesk para trabajar con el modelo CAD de la embarcación, Figura 1, con el fin de realizar cortes iterativos hasta conseguir un volumen igual al que se obtuvo analíticamente, Figura 2, con este corte se tiene una idea clara de dónde estará el agua y qué superficie del bote estarán sometida a la fuerza del agua y aire respectivamente.

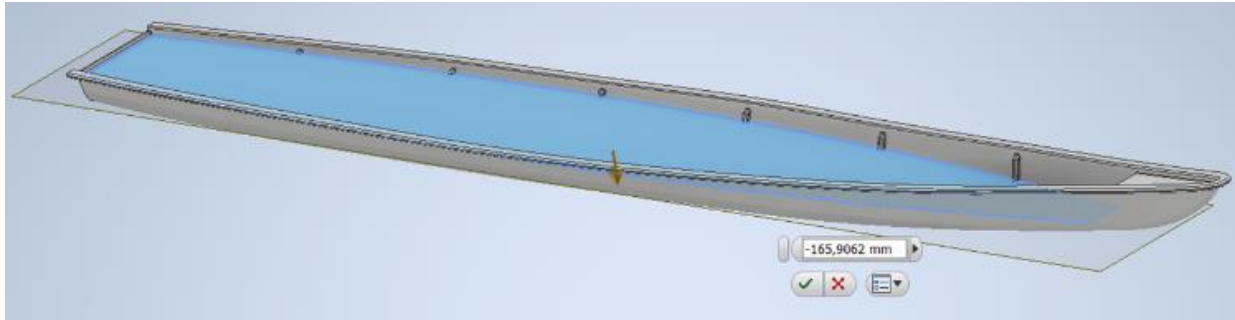


Figura 2. Plano de corte con $V = 2,9586 \text{ m}^3$.

De esta manera con el uso de herramientas del software se determinó la superficie mojada con un valor de $19,66 \text{ m}^2$, Figura 3.

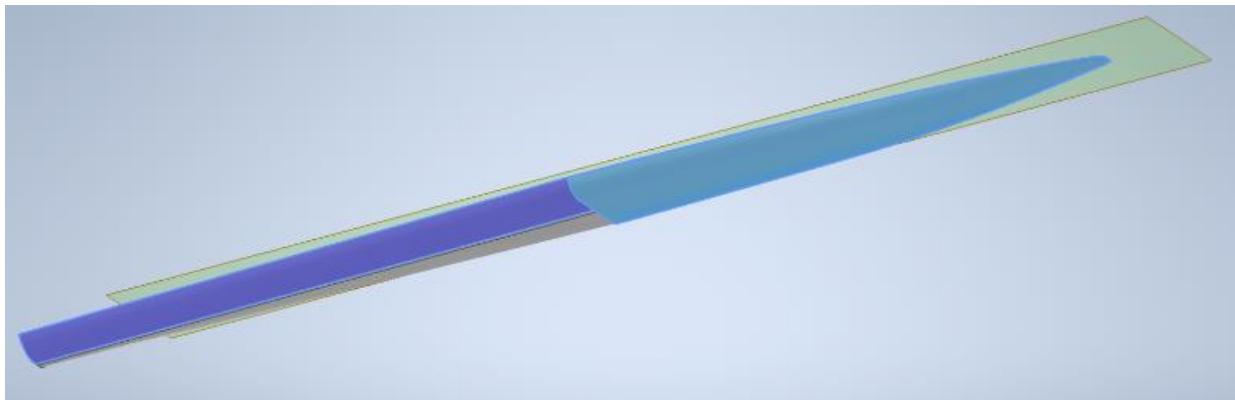


Figura 3. Superficie Mojada.

El valor de la superficie en contacto con el aire que se obtuvo fue de $16,18 \text{ m}^2$, Figura 4.

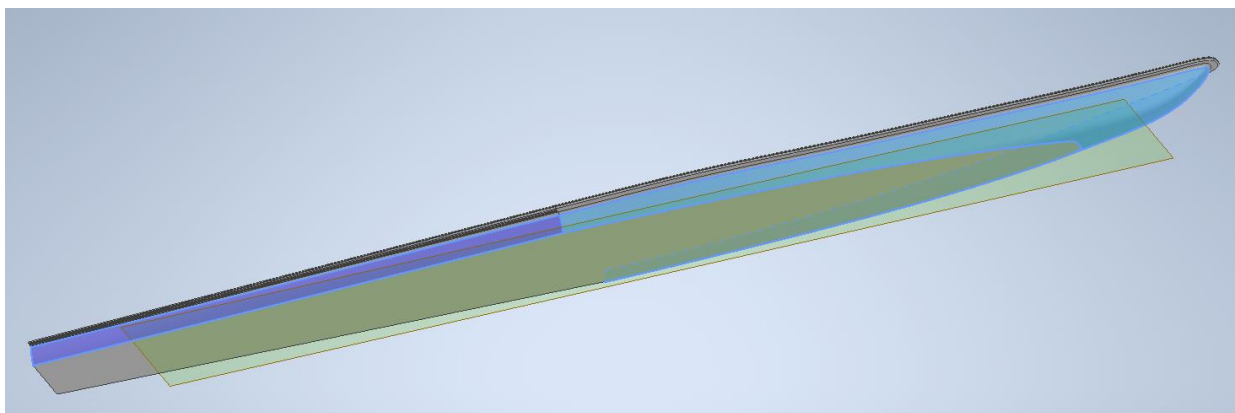


Figura 4. Superficie en contacto con el aire.

Con los valores de superficie se calcularon los empujes en el agua y en el aire respectivamente. Para calcular el valor del empuje en el agua se utilizó la ecuación 2, que a

su vez fue dependiente de valores de Reynolds y coeficiente de empuje obtenidos con las ecuaciones 3 y 4, donde F_a es la fuerza de arrastre, C_f el coeficiente de empuje, A_s el área superficial, v la velocidad lineal y ν la viscosidad cinemática.

$$F_{a_{\text{agua}}} = C_f A_s \rho_{\text{agua}} v^2 = 1305,38 \text{ N} \quad (2)$$

$$Re = \frac{vL}{\nu} = \frac{5,56 * 14,179}{0,898} = 88240419,20 \quad (3)$$

$$C_f = \frac{0,075}{(\log(Re) - 2)^2} = 0,00212 \quad (4)$$

Para el empuje en el aire se utilizó la ecuación 5, en la cual se tomó un valor para el C_{aire} , coeficiente aerodinámico de 0,09, este valor es de medio cuerpo aerodinámico, ya que es la forma a la que más se asemeja la embarcación.

$$F_{a_{\text{aire}}} = \frac{1}{2} C_{\text{aire}} \rho_{\text{aire}} A_{\text{aire}} v^2 = 27,53 \text{ N} \quad (5)$$

Finalmente, el empuje total se obtuvo de la suma de los 2 valores anteriores como se muestra en la ecuación 6.

$$F_e = F_{a_{\text{agua}}} + F_{a_{\text{aire}}} = 1332,91 \text{ N} \quad (6)$$

Con el valor del empuje necesario para mover la embarcación con sus dimensiones y peso a la velocidad requerida, el siguiente paso fue la elección de una hélice, para lo cual se utilizó el programa JavaProp (Anexo 1), una calculadora de diseño para hélices que toma en cuenta las dimensiones, velocidad rotacional y velocidad lineal requerida, y arroja los valores de potencia, torque, empuje y eficiencia (Mh-Aerotoools, s/f).

Para la elección correcta, se analizaron distintas dimensiones de hélice tomando en cuenta factores comunes de velocidad rotacional = 3600 rpm y velocidad lineal de 20 km/h con el empuje calculado antes, de estas distintas opciones se observaron los valores de eficiencia y finalmente se eligió la hélice con eficiencia más alta, diámetro de 12 pulgadas y 3 álabes (Anexo 2). Cabe recalcar que el valor de potencia arrojado para esta hélice fue de

14,41 kW, con este valor se tiene una idea general de cuál debe ser la potencia del motor, ya que para los procesos posteriores se debe partir de una opción para elegir el motor adecuado.

Después de tener una opción fija para la hélice, se comenzó el proceso para elegir el motor correcto, para lo cual se utilizó como guía un documento del MIT en el cual se encuentran los pasos necesarios para verificar si la hélice y el motor escogidos son la mejor opción, enfocándose en buscar un punto de operación óptimo al cruzar las curvas de torque tanto de la hélice como del motor (MIT, 2005). El emparejamiento se debe dar a través de las curvas de Q-RPM, esto debido a que el punto de operación de velocidad rotacional se da cuando los torques son iguales. El primer paso fue elegir un motor con sus curvas de desempeño respectivas, tomando en cuenta el valor anterior de potencia requerida de 14,41 kW, se decidió utilizar un motor de potencia menor, para comprobar el método, pues si estaba por debajo de los valores requeridos claramente no habría un emparejamiento correcto.

Opción 1.

La primera opción fue un motor DC Brushless de 10 kW con sus curvas de desempeño, Figura 5.

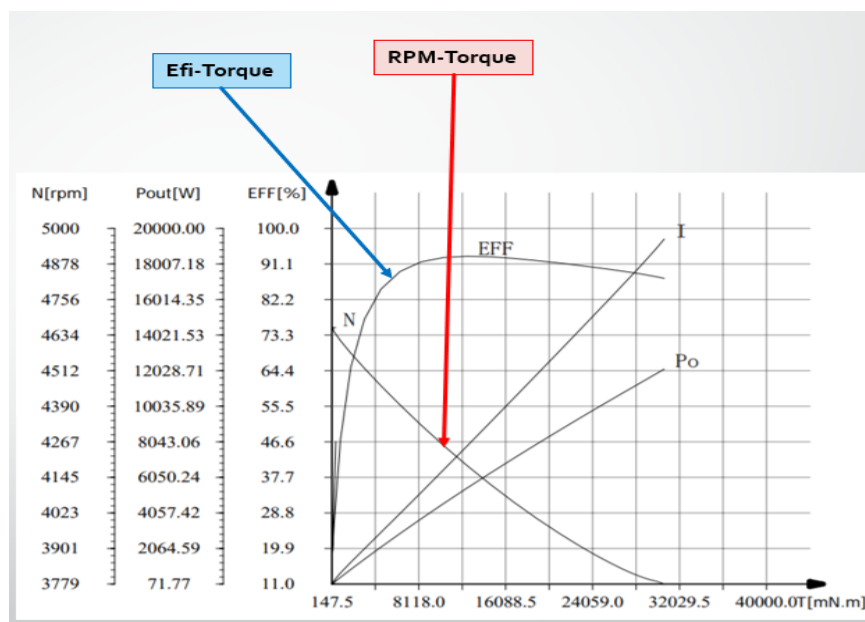


Figura 5. Curvas del Motor 10 kW (Golden Motor,2015).

Con los datos de estas curvas, se realizó la Tabla 5. Se reprodujeron las curvas en Excel, se fijó las RPM en el eje horizontal para reconstruir las curvas necesarias como se puede observar en las Figuras 6 y 7.

Tabla 5. Datos del Motor Brushless 10 kW.

Motor Brushless 10 kW		
Torque (Nm)	RPM	Eficiencia
30,6275	3779	0,875
30,3575	3783	0,876
30,065	3787	0,878
29,77	3791	0,88
29,415	3797	0,88
29,0875	3800	0,881
28,6925	3803	0,883
28,2975	3809	0,886
27,7625	3816	0,887
27,1075	3825	0,891
26,1725	3842	0,896
24,825	3872	0,902
23,0775	3910	0,907
21,1125	3949	0,914
18,9675	3996	0,92
16,7975	4052	0,927
14,5875	4114	0,931
12,4275	4181	0,935
10,315	4251	0,933
8,3275	4320	0,929
6,46	4388	0,917
4,7725	4460	0,892
3,2425	4525	0,833
1,9175	4580	0,706
0,805	4621	0,433
0,1475	4647	0,11
0,3575	4658	0,319
0,468	4659	0,436

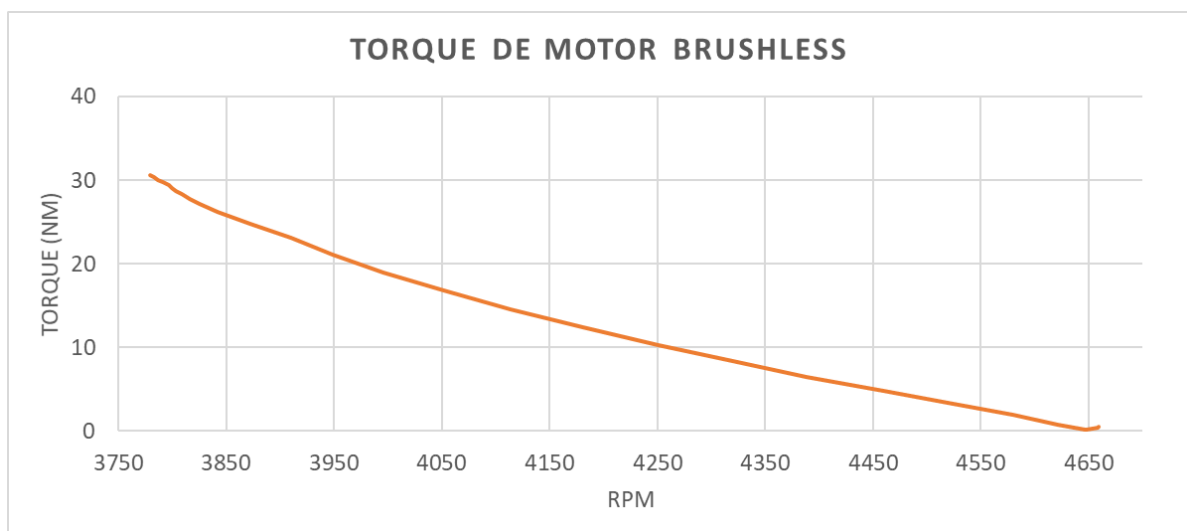


Figura 6. Curva de Torque del Motor Brushless 10 kW.

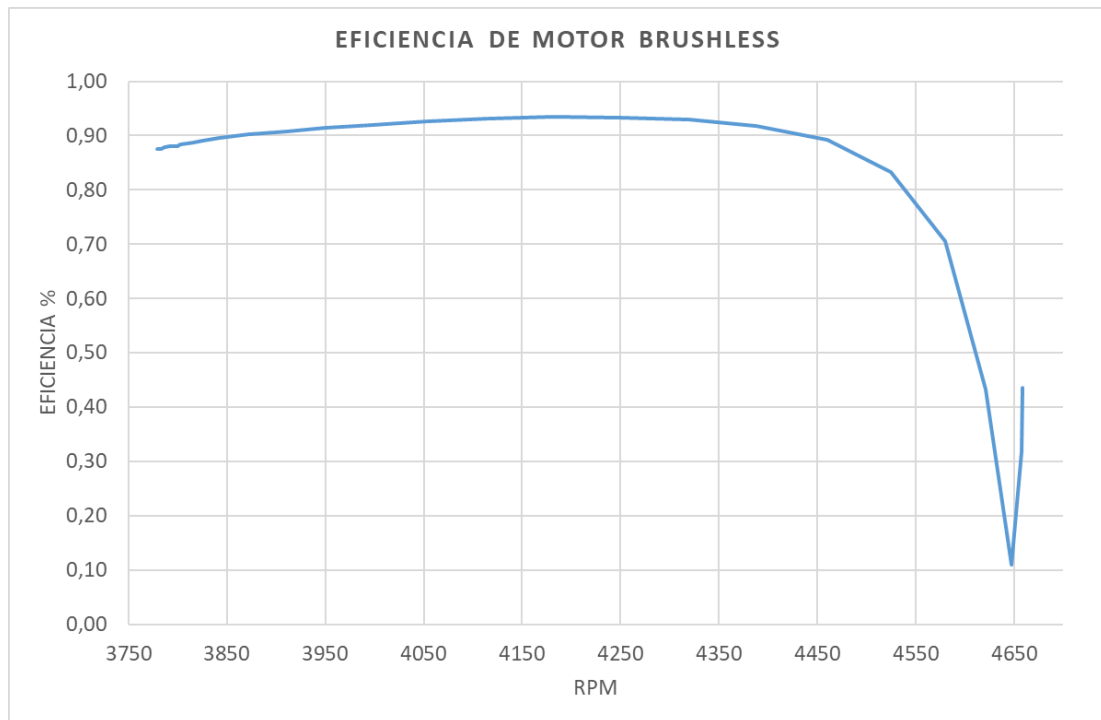


Figura 7. Curva de Eficiencia del Motor Brushless 10 kW.

Una vez obtenidas las curvas del motor, se realizaron los cálculos para los valores de la hélice. Debido a que en el manual de operación de JavaProp se encuentran todas las ecuaciones que se usan dentro de esta calculadora, se decidió utilizarlas en una hoja de cálculo de Excel para de esta manera tener una doble verificación, tanto analíticamente con fórmulas como con el uso del programa (Hepperle, 2018). Se tomaron los valores de RPM con los que se construyeron las curvas del motor para realizar los cálculos de los parámetros de la hélice, además el empuje de 1332,91 N que se calculó previamente se mantuvo fijo para que el resto de los parámetros varíen. La velocidad rotacional n dada en rev/s se obtuvo de la ecuación 7, donde RPM son las revoluciones por minuto. El coeficiente de empuje C_T de la ecuación 8, donde T es el empuje y D el diámetro. El coeficiente de potencia C_P con la ecuación 9. La potencia P en kW con la ecuación 10. El torque Q en Nm con la ecuación 11. La eficiencia porcentual E_{fi} con la ecuación 12.

$$n = \frac{\text{RPM}}{60} \quad (7)$$

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (8)$$

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (9)$$

$$P = \frac{TC_p n D}{1000 C_T} \quad (10)$$

$$Q = \frac{1000P}{2\pi n} \quad (11)$$

$$\text{Efi} = \frac{Tv}{P} \quad (12)$$

Se resumieron los valores obtenidos en una tabla (Anexo 4), y con los datos se construyeron las curvas necesarias para la hélice como se observa en las Figuras 8 y 9.

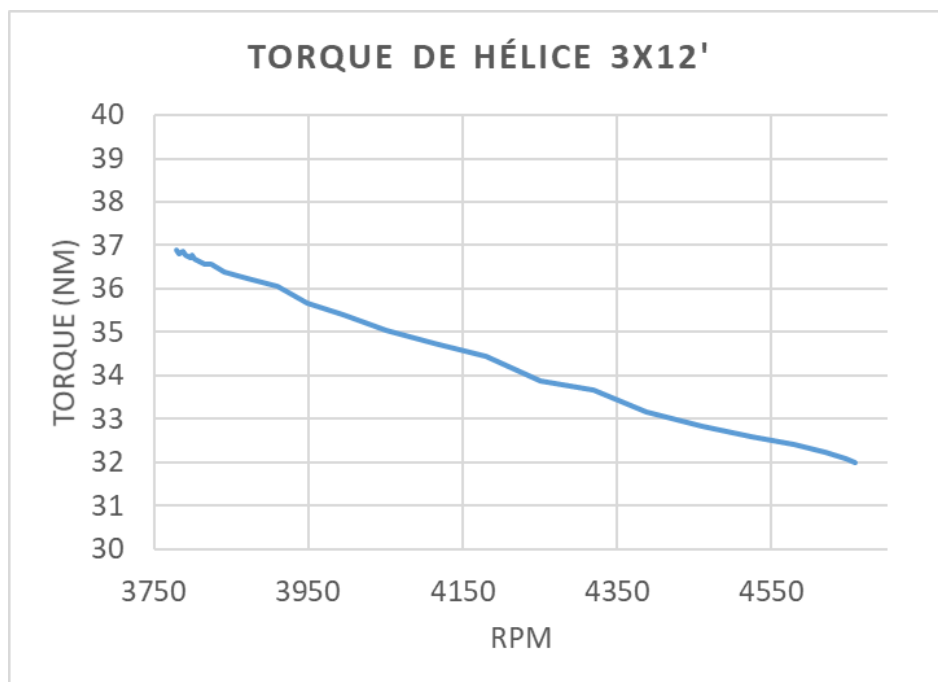


Figura 8. Curva de Torque de la Hélice 12 pulgadas.

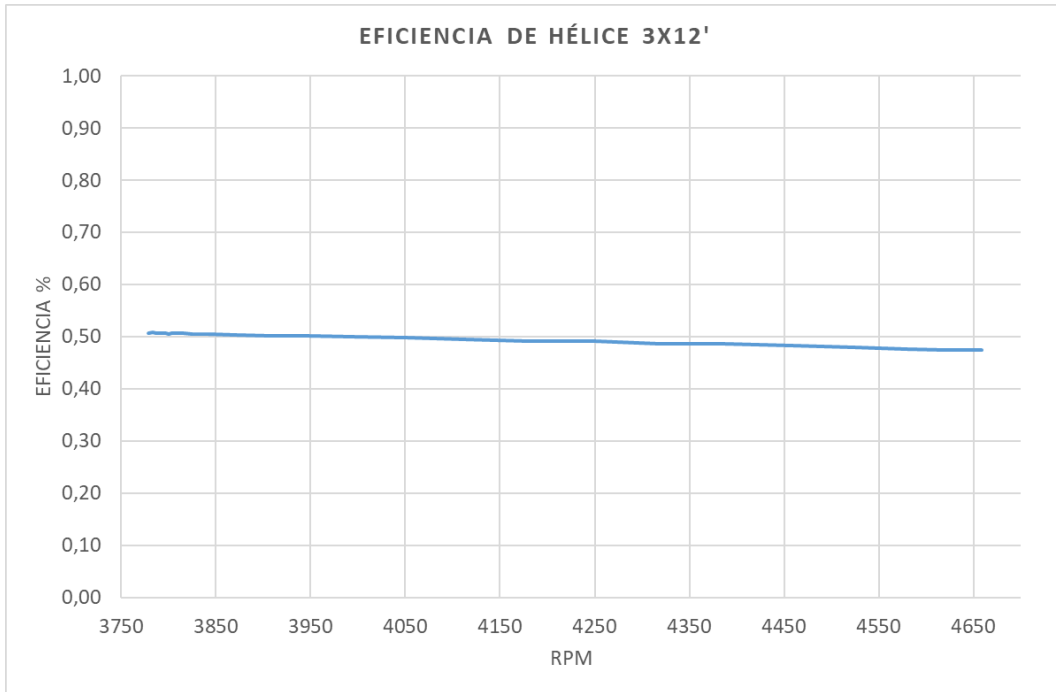


Figura 9. Curva de Eficiencia de la Hélice 12 pulgadas.

Con las curvas de torque de la hélice y el motor se realizó el cruce como se observa en la Figura 10, pero no hubo un punto de intersección para poder continuar con el emparejamiento.

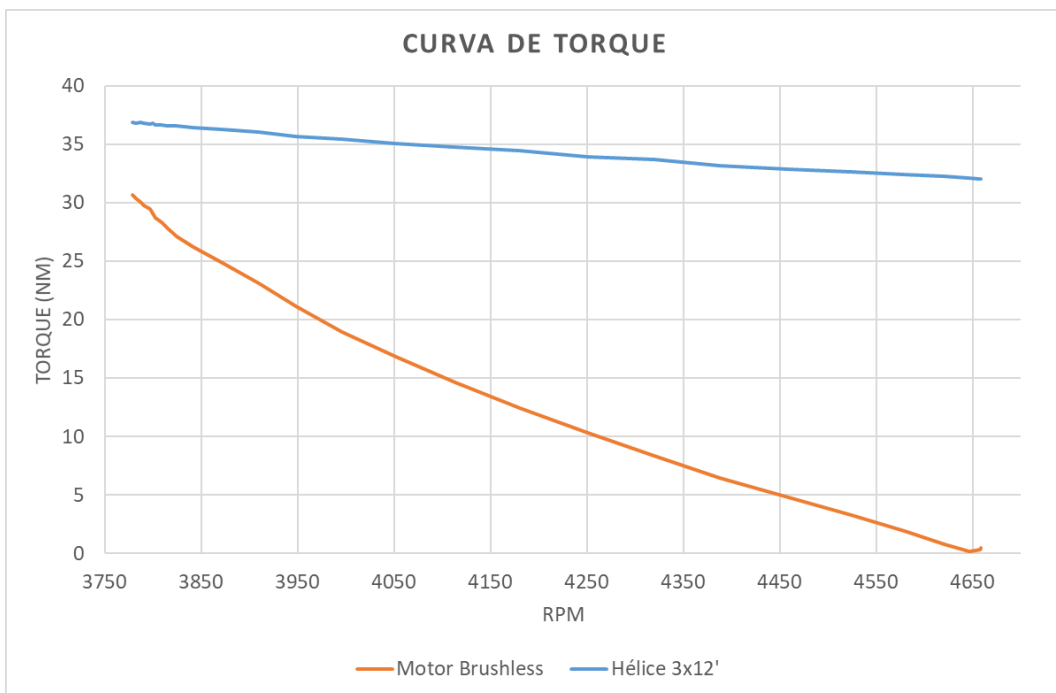


Figura 10. Curvas de Torque de Hélice y Motor.

Opción 2.

Debido a que no hubo un cruce en las curvas de torque de la Opción 1, se procedió a realizar el emparejamiento con un motor de mayor potencia, para esto se eligió un motor DC Brushless de 20 kW con sus curvas respectivas, Figura 11.

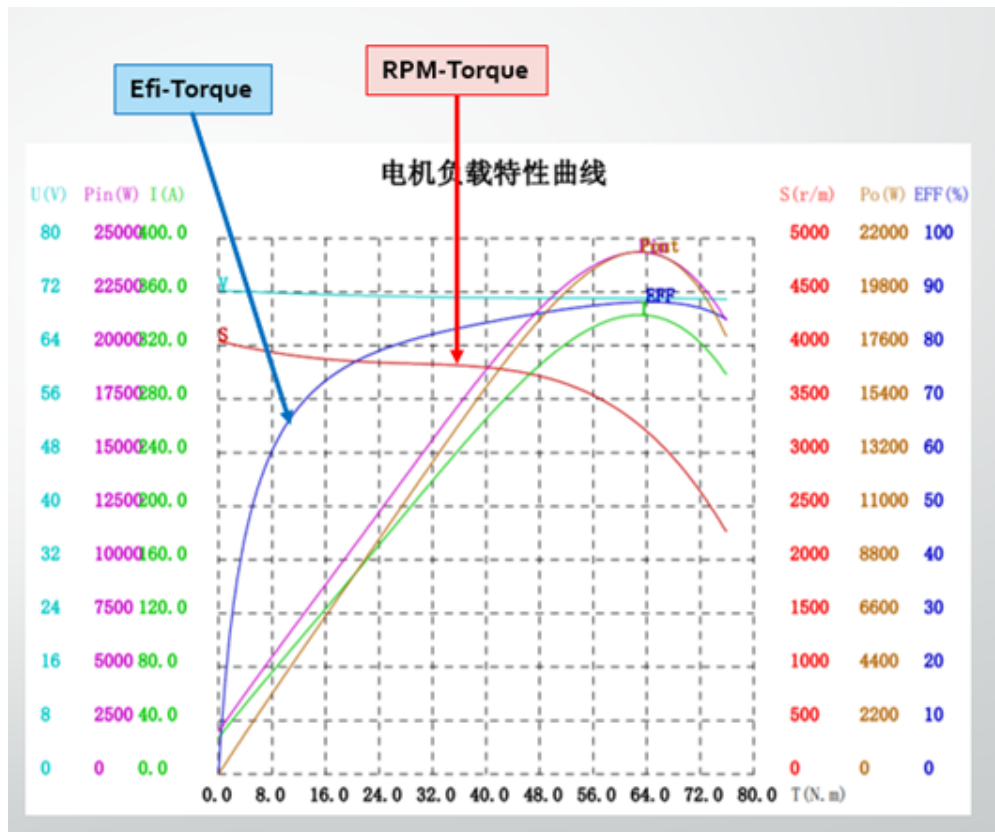


Figura 11. Curvas del Motor 20 kW (Golden Motor, 2015).

Con estos datos, se realizó la Tabla 6 para reproducir las curvas en Excel, Figuras 12 y 13.

Tabla 6. Datos del Motor Brushless 20 kW.

Motor Brushless 20 kW		
Torque (Nm)	RPM	Eficiencia
75,8	2335	0,862
71,7	2627	0,863
65,6	2952	0,865
58,5	3542	0,884
54,8	3616	0,885
50,7	3730	0,866
47,2	3745	0,858
43,7	3758	0,845
40,2	3772	0,837
36,8	3781	0,832
33,8	3792	0,823
30,2	3805	0,816
26,9	3820	0,814
23,8	3836	0,805
20,7	3852	0,781
18,5	3868	0,758
15,9	3882	0,733
13,8	3898	0,695
12	3913	0,674
10,2	3928	0,65
8,6	3940	0,626
7,3	3952	0,588
6,2	3962	0,567
5,1	3973	0,485
3,9	3984	0,445
2,8	3996	0,382
1,7	4003	0,253
0,8	4015	0,145
0,1	4025	0,023
0,3	4036	0,094
0,5	4053	0,122

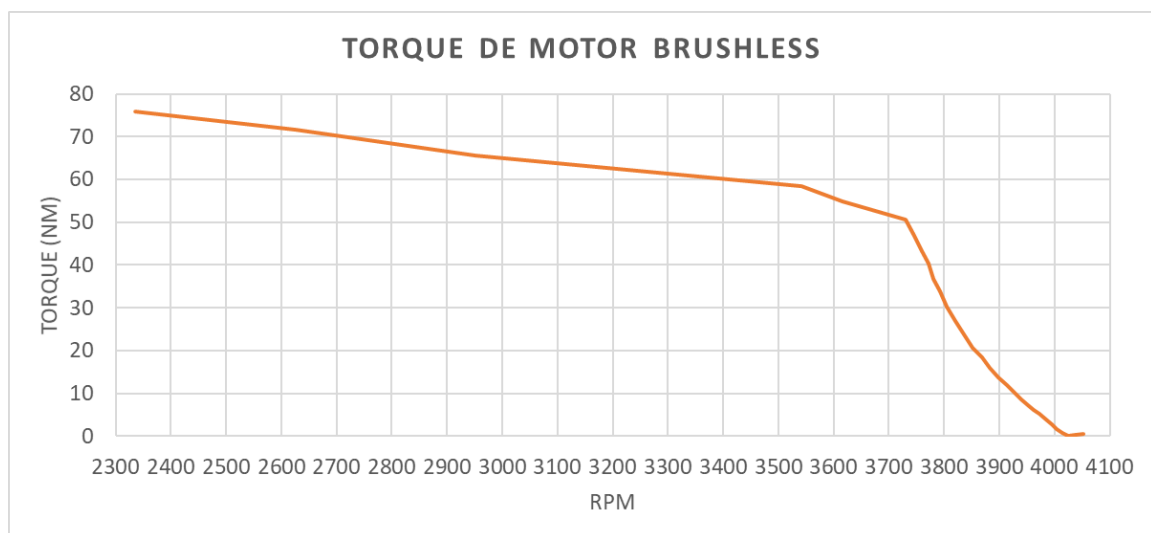


Figura 12. Curva de Torque del Motor Brushless 20 kW.

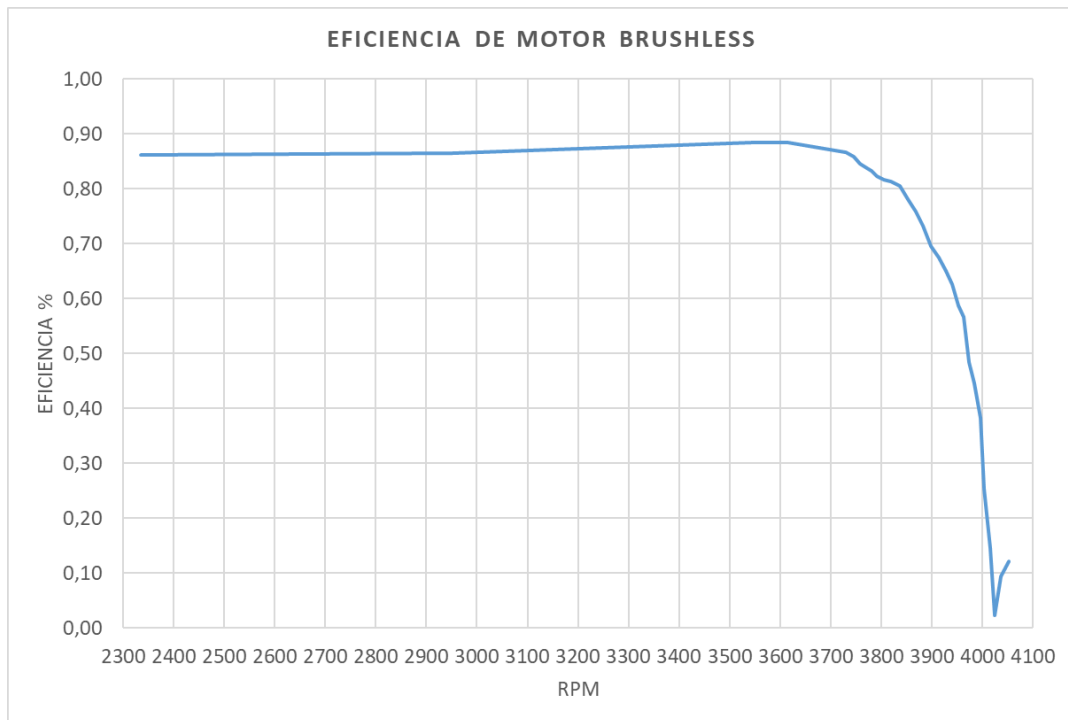


Figura 13. Curva de Eficiencia del Motor Brushless 20 kW.

Se tomaron los valores de RPM con los que se construyeron las curvas del motor para realizar los cálculos de los parámetros de la hélice con las ecuaciones antes mencionadas y se colocaron en una tabla (Anexo 3).

Con estos datos se construyeron las curvas para la hélice, Figuras 14 y 15.

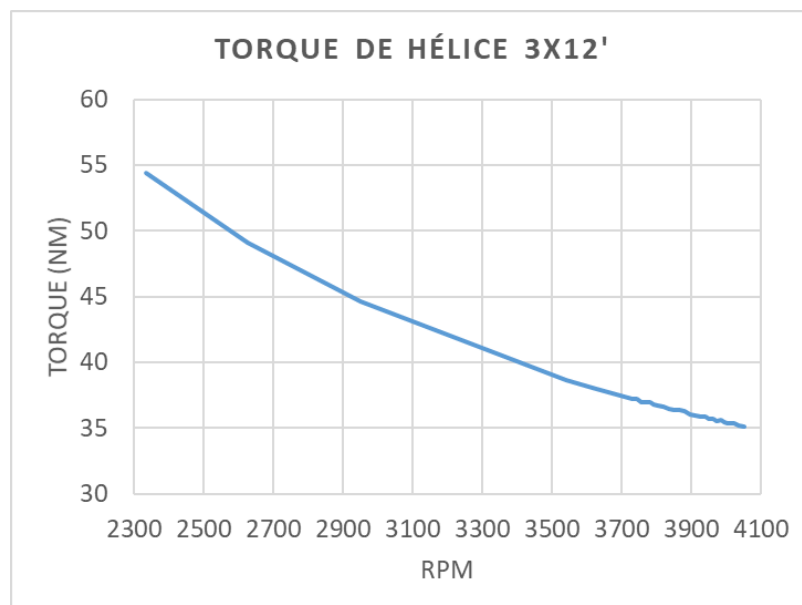


Figura 14. Curva de Torque de la Hélice 12 pulgadas.

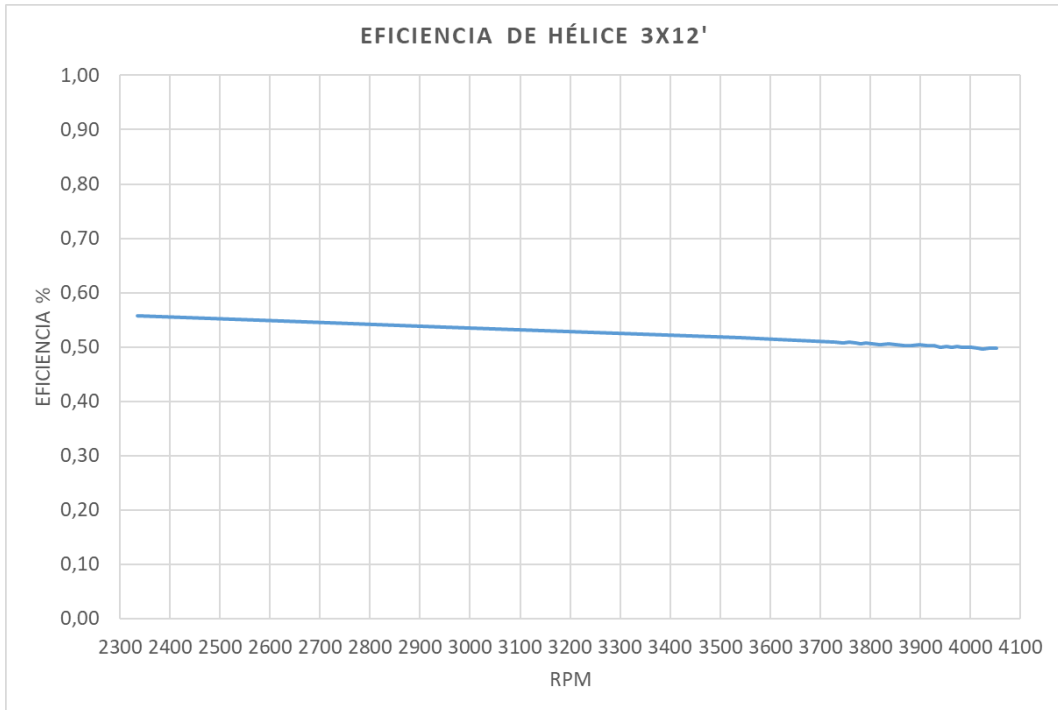


Figura 15. Curva Eficiencia de la Hélice 12 pulgadas.

Con las curvas de torque de la hélice y el motor se realizó el cruce como se observa en la Figura 16, del punto de intersección se extrajeron los datos para calcular la potencia, Tabla 7.

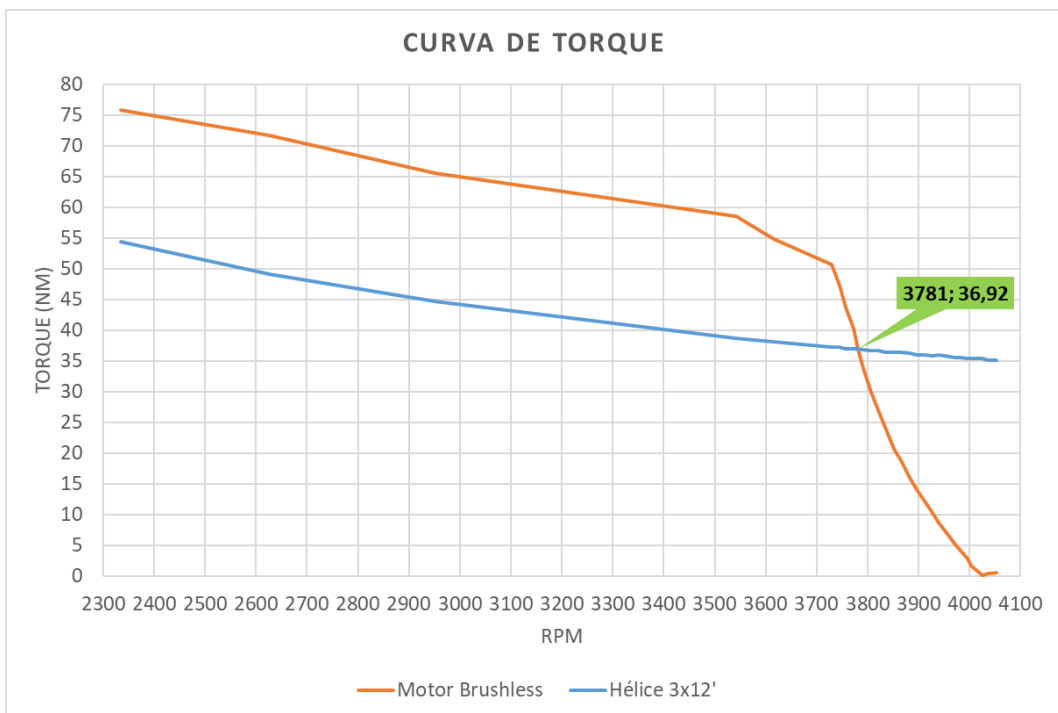


Figura 16. Cruce de Curvas de Torque.

Tabla 7. Datos del Punto de Cruce.

Punto de Cruce	
RPM	Torque (Nm)
3781	36,92
n (rev/s)	63,02
Potencia (kW)	14,62
Coef. Pot	0,021899
Empuje (N)	1332,91
% Pot	73,09

Finalmente, fijando el torque obtenido del cruce, se realizó la curva de empuje para la hélice como se muestra en la Figura 17.

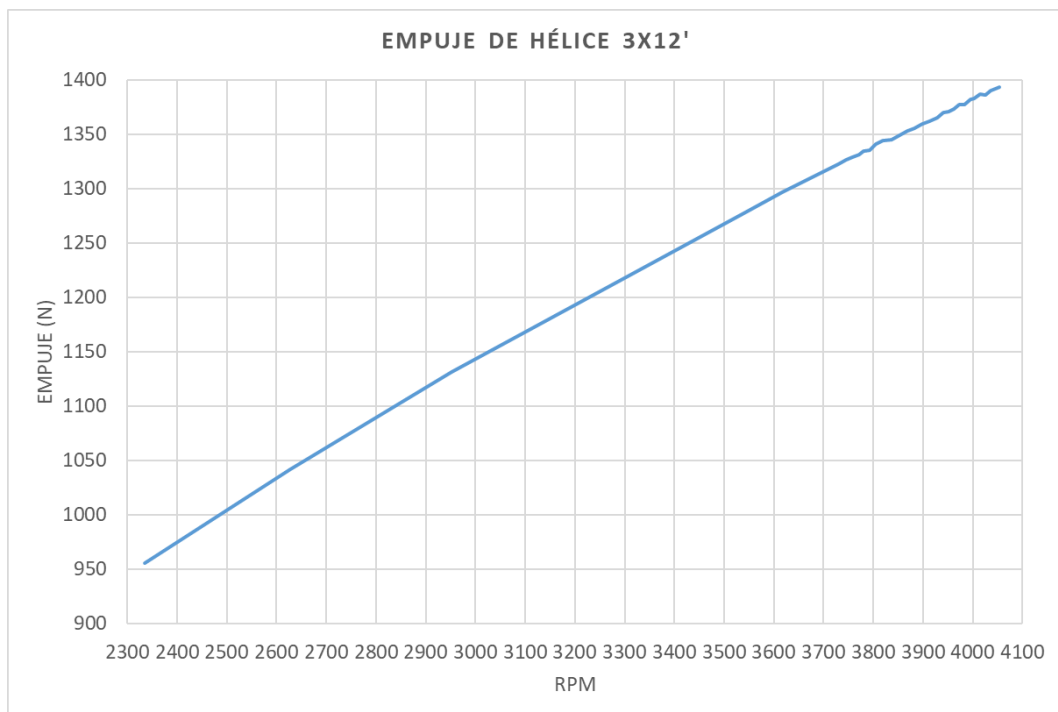


Figura 17. Curva de Empuje de Hélice 12 pulgadas.

Simulación

Para corroborar los datos obtenidos mediante el método analítico, se propuso realizar un análisis computacional de los fluidos que interactúan con la embarcación. Para realizar este análisis se propuso utilizar el simulador Simscale el cual tiene una versión de estudiante libre y es propicio para el trabajo que necesitamos.

Para realizar la simulación vamos a desarrollar todo el proceso siguiendo los pasos que se muestran a continuación en la Figura 18.

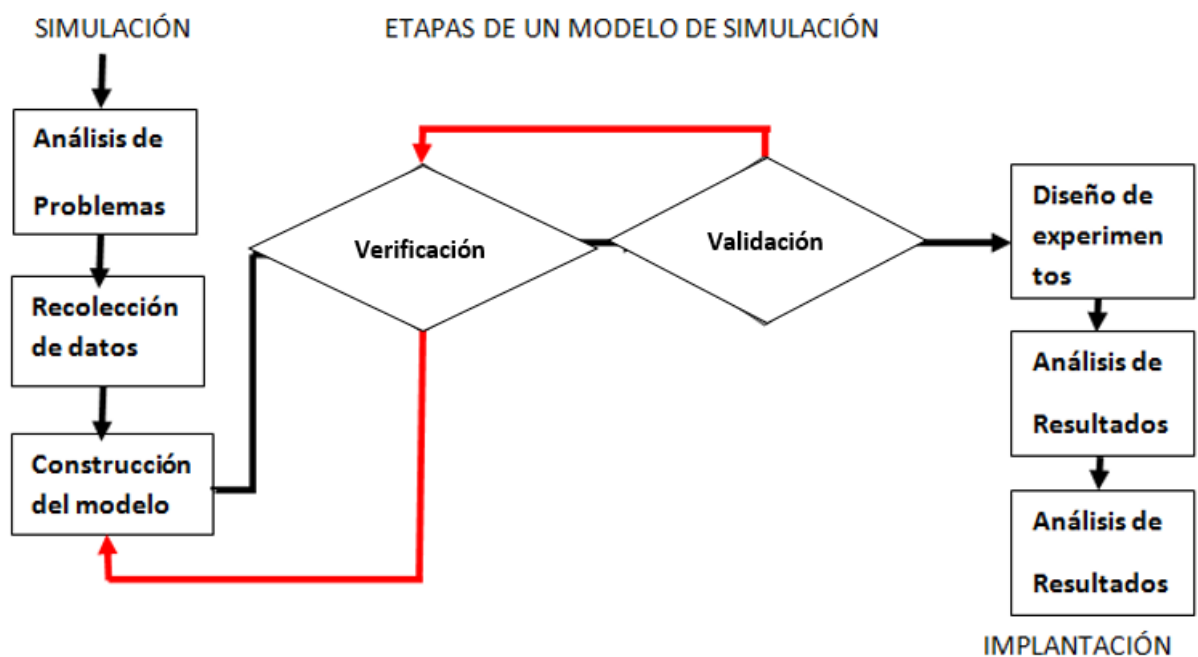


Figura 18. Etapas de un modelo de simulación

Como podemos observar el primer paso es el análisis del problema, donde se tiene como objetivo de la simulación analizar la fuerza de empuje necesaria para que la embarcación se mueva bajo los requerimientos propuestos por Kara Solar.

Continuando con el segundo paso de nuestro modelo se procede a determinar los datos que se van a usar en la simulación y que corresponden a los datos expuestos en la Tabla

4. Para realizar la construcción del CAD se toma el modelo de la embarcación Tapiatpia obtenido de la Fundación Kara Solar, el mismo con el que se trabajó en el método analítico.

Importar el modelo CAD al simulador Simscale.

Al haber terminado la construcción y refinamiento de nuestro modelo CAD el siguiente paso es la verificación y validación del modelo al importarlo al simulador de Simscale, Figura 19, y verificar el estado del cuerpo sólido y cada una de sus caras, es necesario aclarar que el diseño debe ser un cuerpo sólido para que la simulación no muestre divergencias en el resultado final.

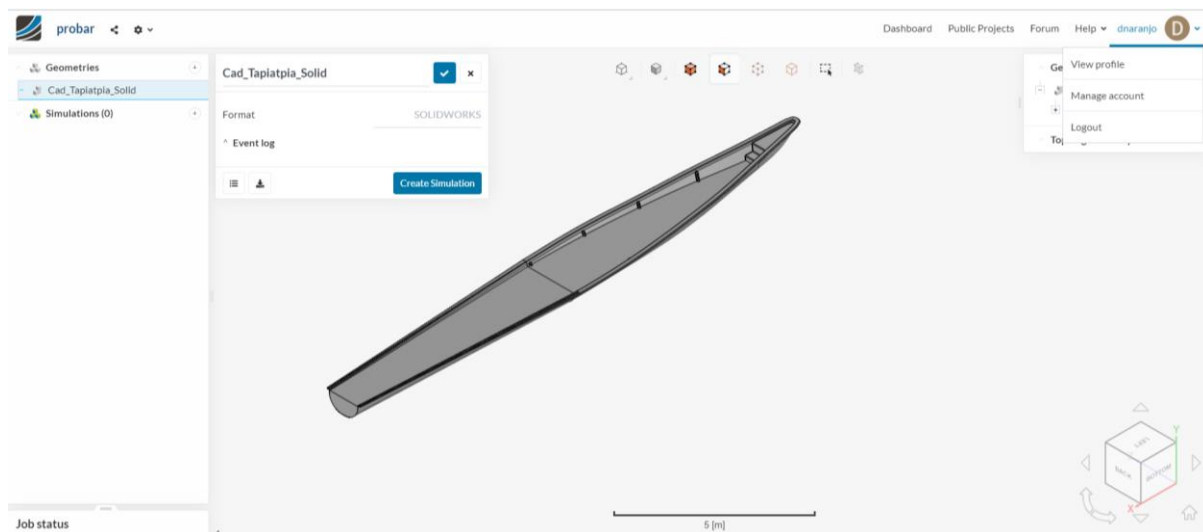


Figura 19. Diseño importado a Simscale

Acabado el paso anterior es necesario crear una simulación multifase en nuestro simulador, Figura 20, esto debido a que nuestra embarcación está en contacto con dos fluidos (aire y agua) los cuales van a crear una fuerza de resistencia al movimiento del bote. Además, en este tipo de estudio también es necesario seleccionar que vamos a realizar un estudio considerando que el flujo es turbulento, esta decisión es tomada puesto que nuestro número de Reynolds calculado arrojó que el flujo va a comportarse de dicha manera.

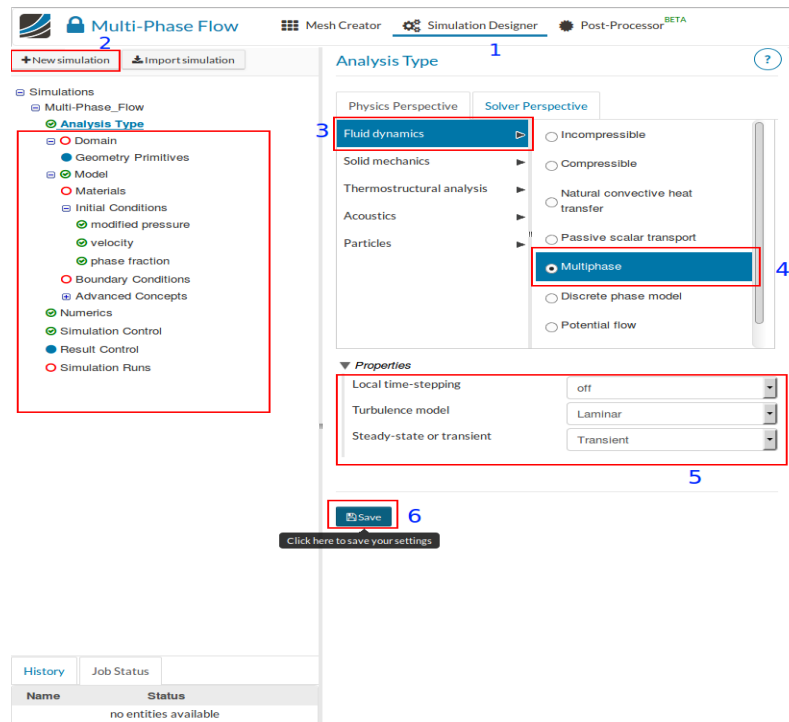


Figura 20. Creación de un análisis tipo multifase

Creación del dominio.

A continuación, es necesario crear un dominio, el cual va a ser el espacio donde vamos a trabajar durante toda la simulación. Para crear este dominio los diseñadores de Simscale recomiendan que se toman las siguientes medidas como referencia, Figura 21.

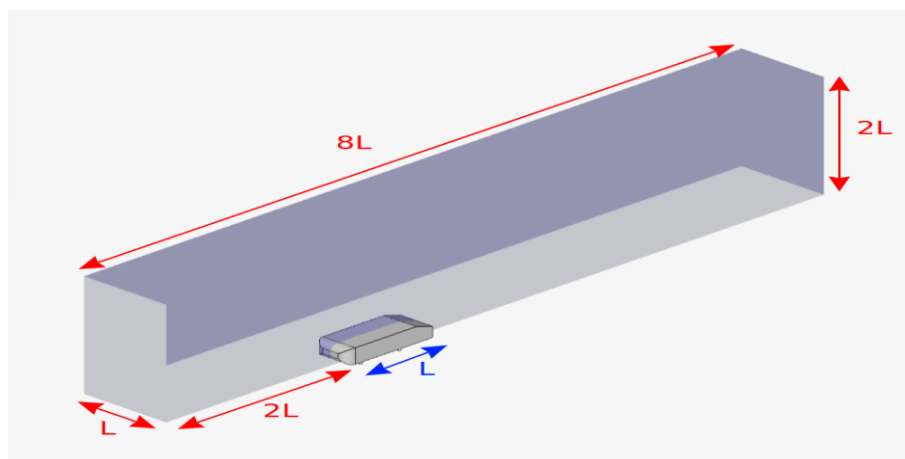


Figura 21. Medidas recomendadas para el dominio de la simulación (Simscale, s/f).

Creación del mallado.

Como siguiente paso después de crear tu dominio, es necesario realizar el mallado correspondiente, Figura 22, el mallado tiene como objetivo dividir el dominio en pequeños recuadros donde individualmente se van a estudiar las condiciones que posteriormente se van a especificar, de esta manera nuestro análisis se convierte en un análisis de elementos finitos los cuales darán los resultados deseados. Después de realizar un mallado general es necesario refinar la malla en ciertos lugares donde el análisis tiene una interacción importante con las condiciones y es necesario estudiarlo con más detenimiento, la manera de lograr este objetivo es haciendo más fina la malla en dichos lugares. Como resultado final podemos observar la Figura 22 mostrando nuestro modelo dentro del mallado de control.

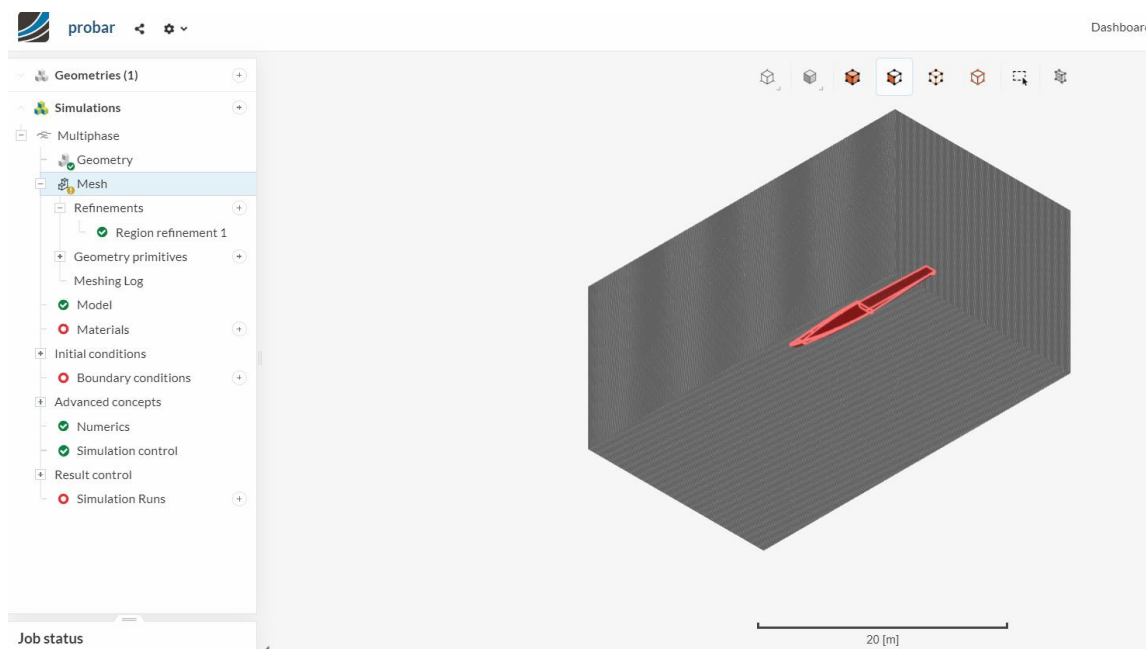


Figura 22. Vista isométrica del mallado de nuestra nave.

Características del modelo.

El siguiente paso para tomar en cuenta se denomina modelo, en este paso nosotros podemos añadir el valor y la dirección de la fuerza que ejerce la gravedad sobre nuestra superficie de control como se muestra en la Figura 23.

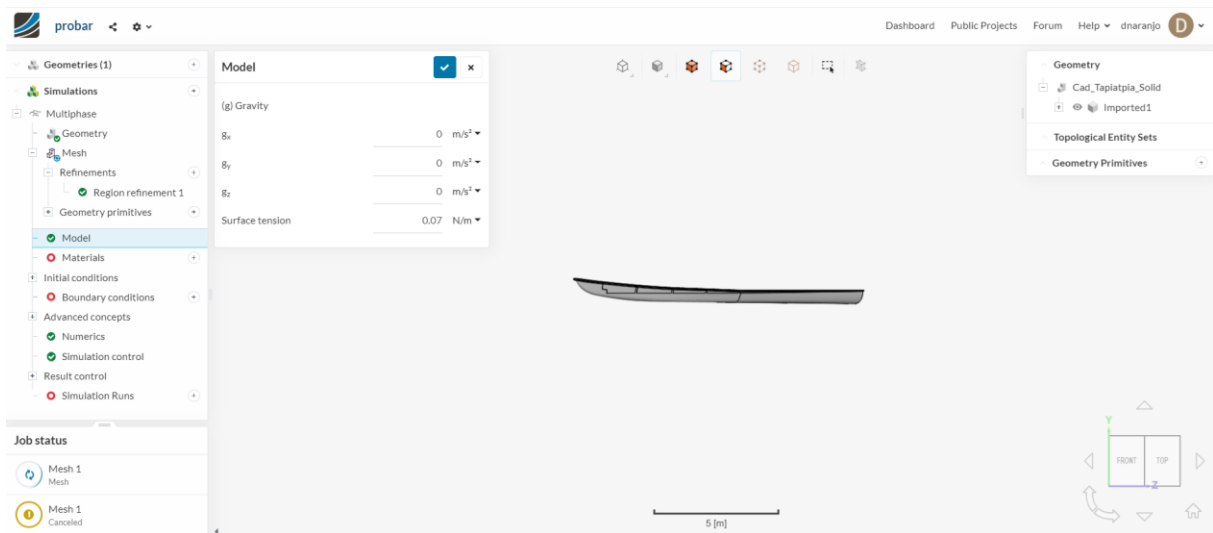


Figura 23. Pestaña "Model" Simscale

Materiales.

A continuación, es necesario definir el material el cual vamos a usar, para este punto tomaremos a los materiales agua y aire que van a interactuar en toda nuestra superficie de control como se muestra en la Figura 24, posteriormente en las condiciones iniciales indicaremos la fracción del material presente en cada parte de nuestra superficie de estudio, aunque en esta pestaña es necesario ya identificar la fase 1 y fase 0.

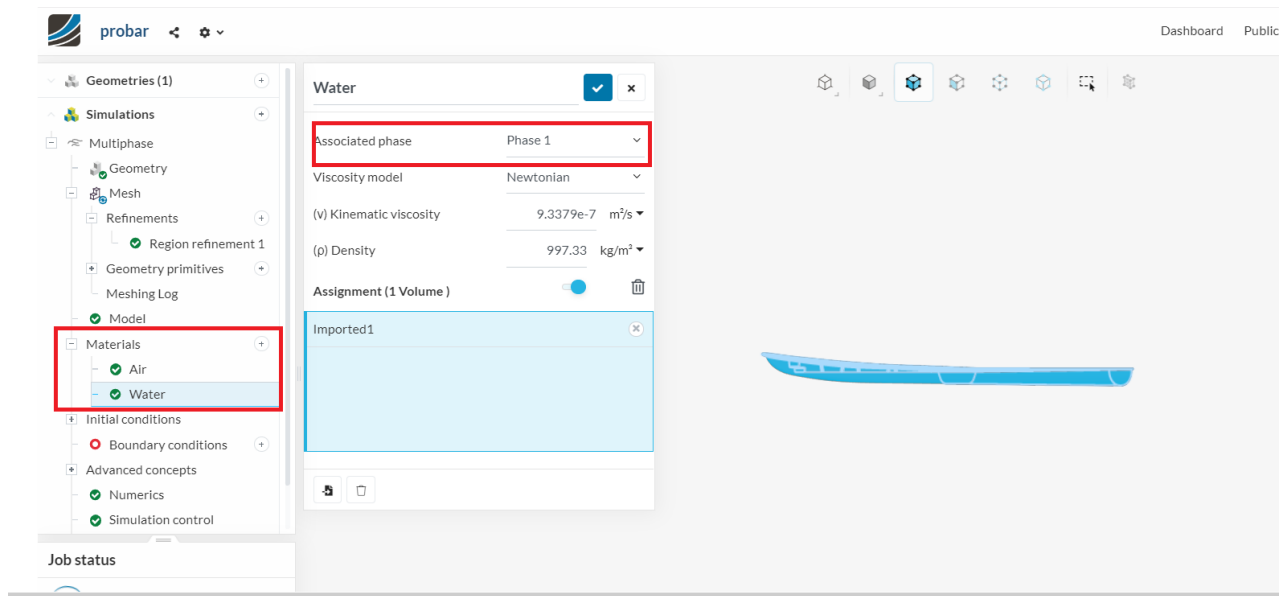


Figura 24. Pestaña "Materials" Simscale

Condiciones Iniciales.

Después de analizar las condiciones necesarias presentes en la realidad, se ha decidido asumir las siguientes condiciones para el proyecto:

- Velocidad de entrada: 20 km/h
- Presión de salida: 0 Pa (presión manométrica)
- Cara superior y lateral: estas caras se las considera con la función slip motion condition puesto que tanto en la parte superior como en la lateral el fluido adyacente sigue siendo aire.
- Condición de simetría: La condición de simetría es necesaria para agilizar los cálculos de la simulación, esto es posible gracias a que nuestro modelo es simétrico y los resultados pueden van a hacer iguales tanto al lado derecho como al izquierdo.

En la Figura 25 se muestra un ejemplo, donde un modelo de color gris oscuro se encuentra en el centro y las caras externas del dominio son asignadas con las condiciones iniciales descritas anteriormente.

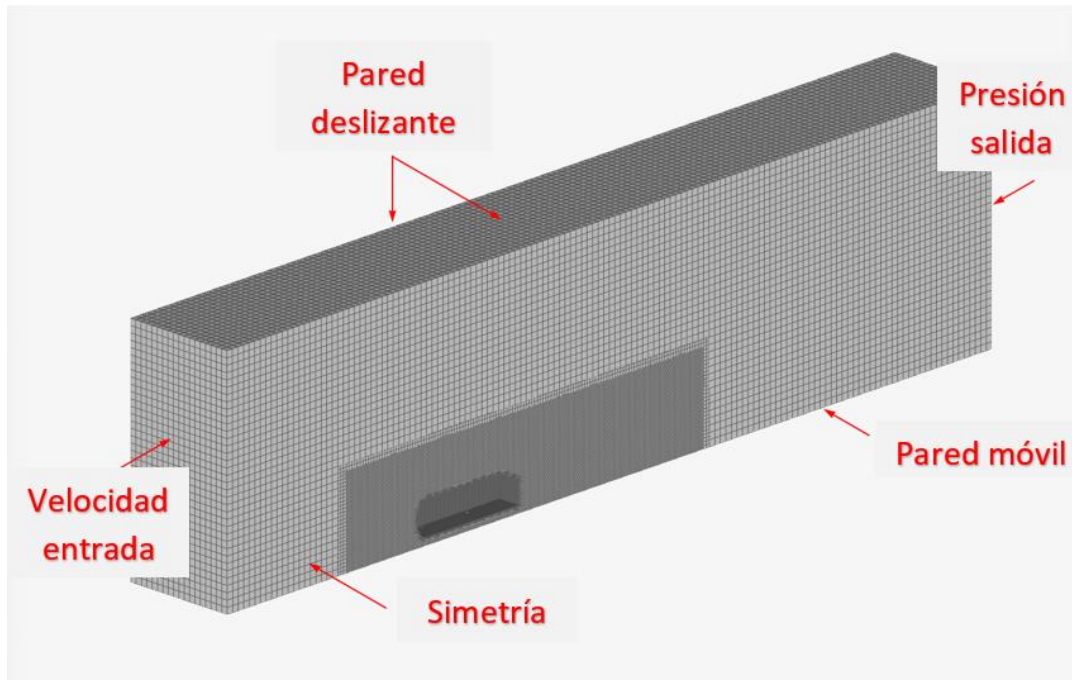


Figura 25. Esquema de las condiciones iniciales (Simscale, s/f).

Simulación.

Para los ajustes de la simulación se considera un tiempo de 60 segundos para que la simulación tenga tiempo de converger los datos. Además, es necesario ajustar el número de procesadores que se van a utilizar puesto que esta es una aplicación en un procesador externo, entre mayor sean el número de procesadores, más rápido la simulación va a converger en un resultado.

Control de resultados.

Antes de correr la simulación es necesario definir las fuerzas y momentos que se necesitan obtener, en nuestro caso las fuerzas que se busca encontrar es la fuerza de drag que produce la embarcación, para de esa manera saber cuánta fuerza se necesita para mover el bote a 20 km/h. A continuación, se puede observar la configuración realizada en la pestaña de control de datos para configurar el cálculo de dichos coeficientes.

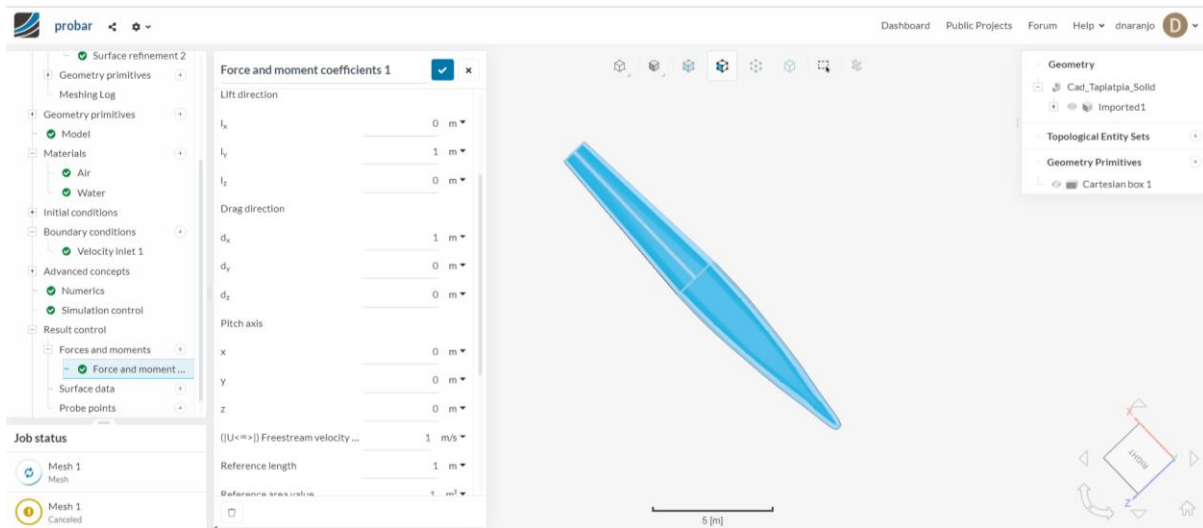


Figura 26. Ajuste del control de resultados de coeficientes de drag y lift.

Finalmente, es necesario mandar a procesar todos los datos previamente configurados y esperar los resultados de la simulación. Una vez obtenidos dichos resultados se proceden a realizar un post procesamiento de resultados y con ello verificar los datos obtenidos en los otros métodos utilizados en el presente trabajo de tesis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Método Analítico

Con la opción 1 del motor de 10 kW no hubo un cruce en las curvas de torque, por lo que no se continuó con el proceso de emparejamiento. Por otro lado, la opción 2 del motor de 20 kW si arrojó un punto de cruce en las curvas de torque, en la Tabla 7 se ve que el punto es cuando la velocidad rotacional es de 3781 rpm y el torque es de 36,92 Nm, con estos valores se utilizó la ecuación 11 y se despejó la potencia para obtener un valor de 14,62 kW, lo que nos sugiere que si el motor utilizado tiene una potencia de 20 kW, se requeriría utilizar solamente el 73,09 % de su poder para cumplir con todos los parámetros previamente establecidos. Se desplazó este punto de operación dado en las curvas de torque hacia el resto de curvas, en primera instancia, como se observa en la Figura 27, en la curva de eficiencia de la hélice se obtiene un valor de 50,65 %. En la figura 28 se puede ver el punto de operación en la curva de empuje de la hélice, arrojando un valor de 1334,57 N, valor que es mayor al calculado en un principio y asegura que con las dimensiones de la embarcación y el peso si se alcanzará velocidad de navegación de 20 km/h. En la figura 29 se encuentra el punto de operación que se utilizó en el resto de curvas. Finalmente, en la Figura 30 se ve el punto de operación en la curva de eficiencia del motor, con un valor alto del 83,2%. Todos estos valores indican que el emparejamiento es bueno y la elección de hélice, Figura 31 y el motor, Figura 32, es la correcta para la aplicación.

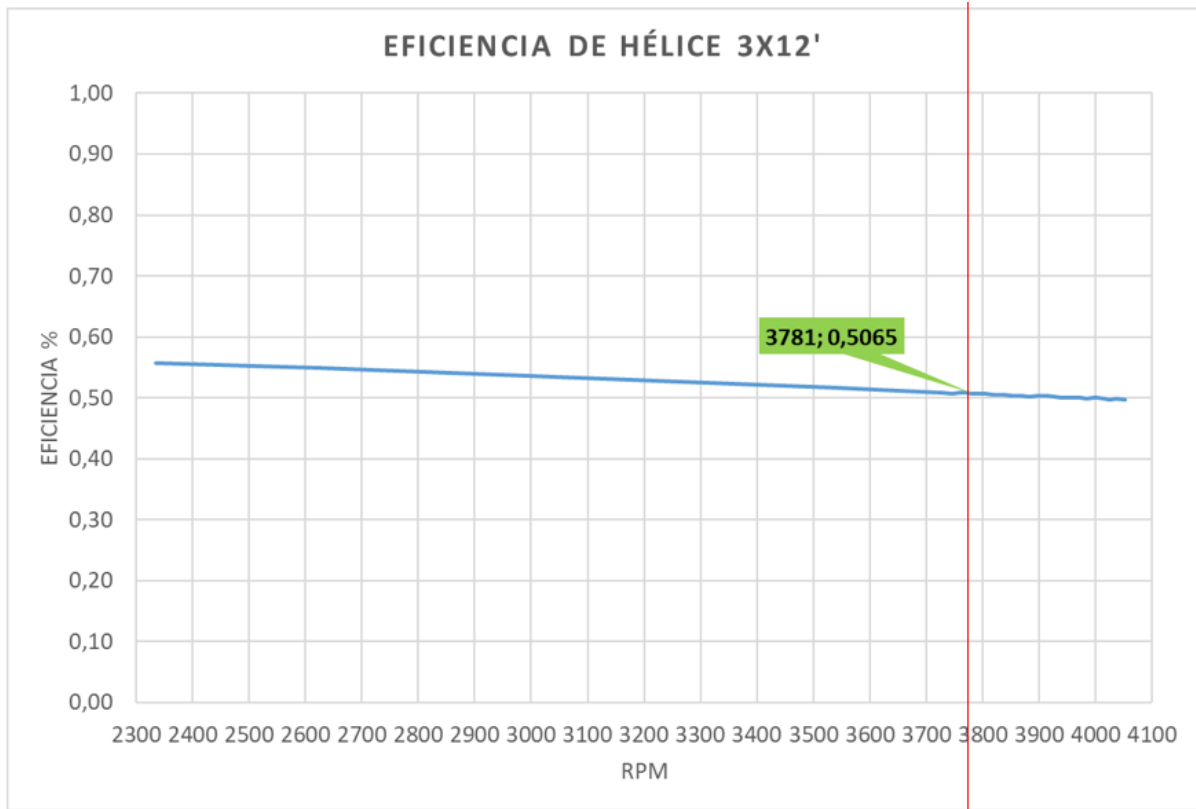


Figura 27. Punto de operación de eficiencia de la Hélice.

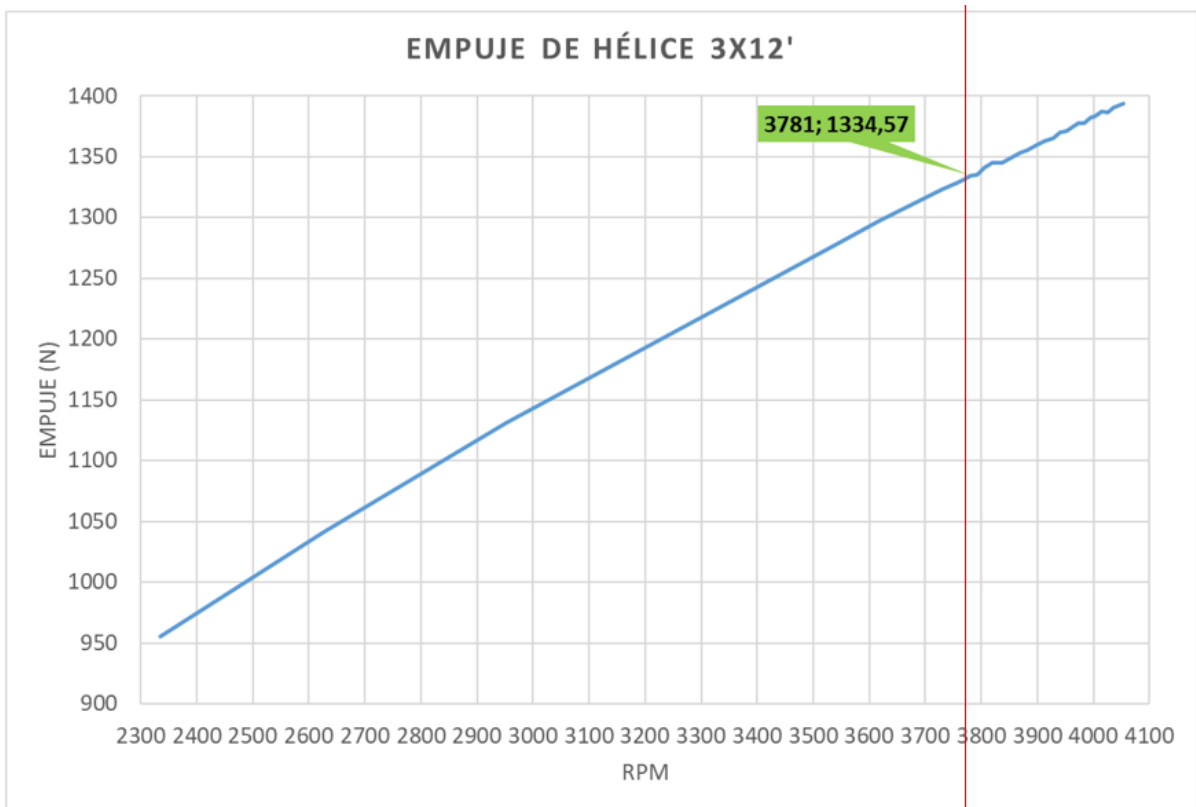


Figura 28. Punto de operación de empuje de la Hélice.

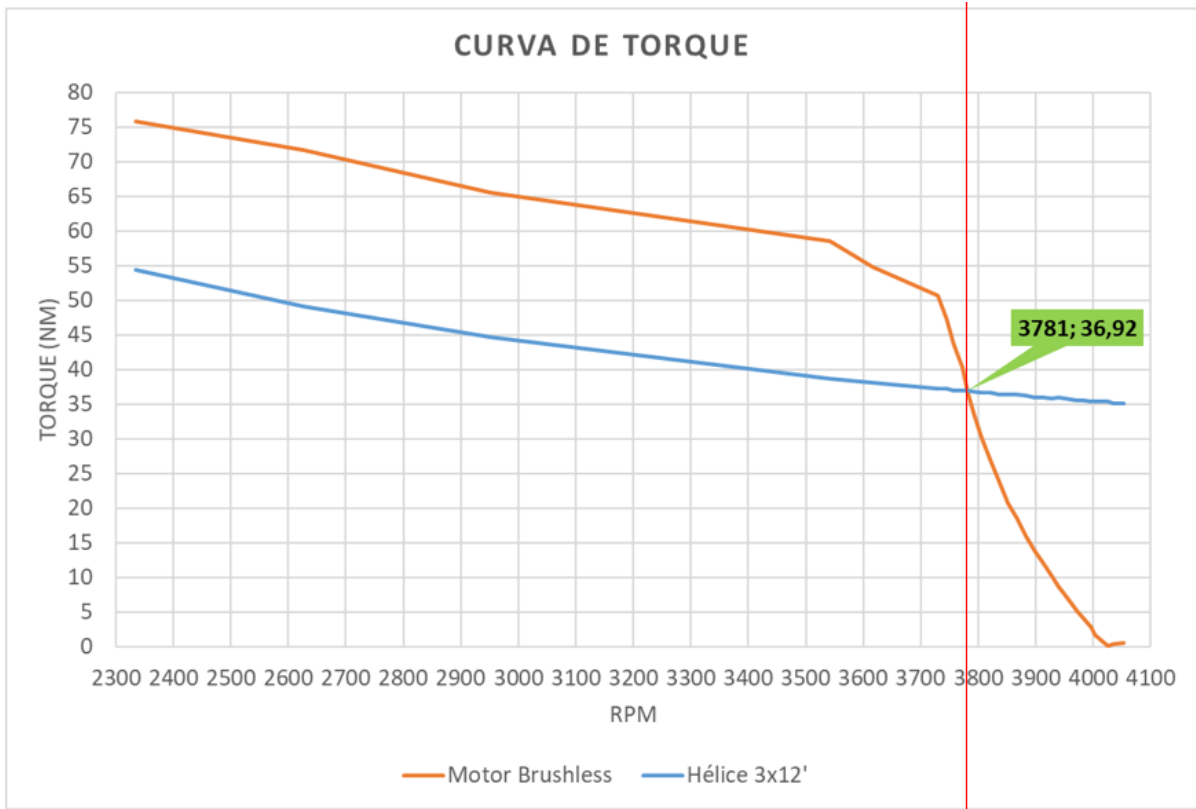


Figura 29. Punto de operación en cruce de curvas de Torque.

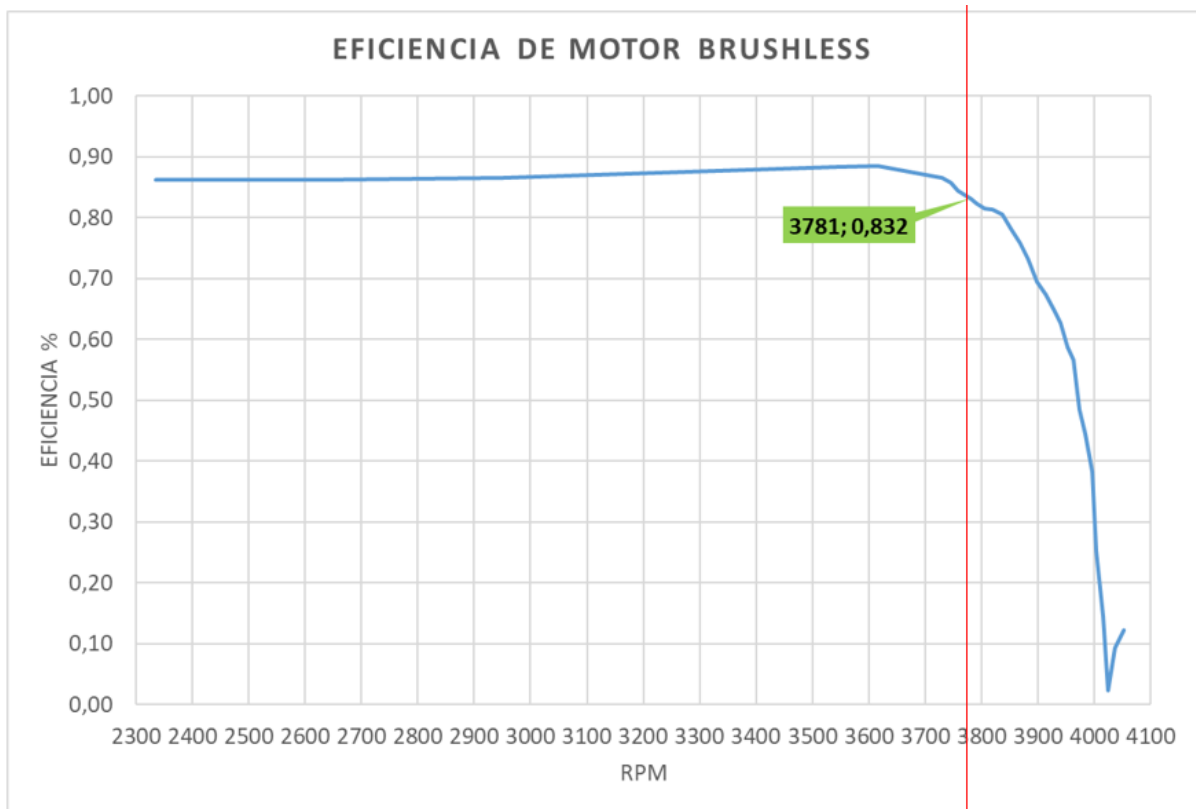


Figura 30. Punto de operación en eficiencia del Motor.

12 inch Dyna-Jet 3 Blade Bronze Prop

Home / Boat Props / Inboard Boat Props / Dyna Jet Props / 12 inch Dyna-Jet 3 Blade Bronze Prop



Michigan Wheel 12 inch Dyna-Jet 3 Blade Bronze DJ3B12B inboard prop



Availability: **In stock**

Manufacturer part number: **DJ3B12B**

Shipping: **2-3 Days to Bore, Key and Balance prior to shipment**

Manufacturer: [Michigan Wheel](#)

Diameter: 12 inch

Blades: 3

Material: Bronze

Pitch * 7 ▾

Rotation * Right Hand (RH) ▾

Cupping * No Cupping ▾

Shaft Size * 7/8 inch ▾

MSRP: \$656.00

Price: \$498.56

1 Buy

Figura 31. Opción de Hélice 12 pulgadas.

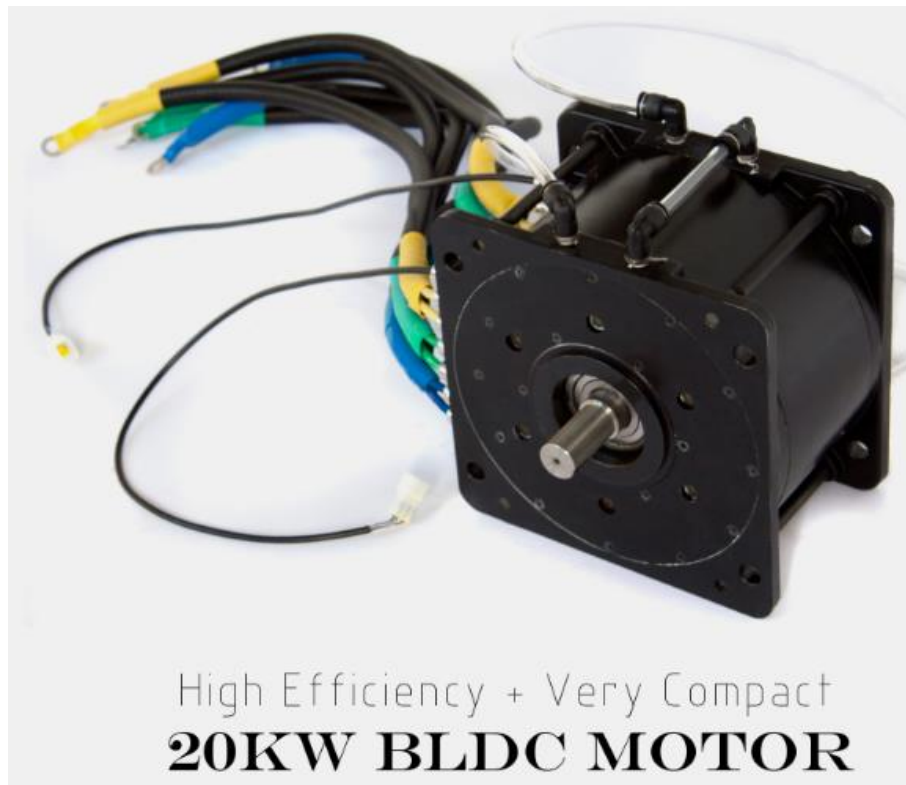


Figura 32. Motor DC Brushless 20 kW.

Simulación

Después de obtener los datos analíticos se procedió a realizar simulaciones con las mismas características utilizadas en la parte analítica, esto con el objetivo de corroborar nuestra selección.

La simulación arrojó el comportamiento esperado del bote en las condiciones planteadas como se muestra en la Figura 33, en dicha figura se puede observar cómo es el comportamiento de los dos fluidos con la superficie del bote.

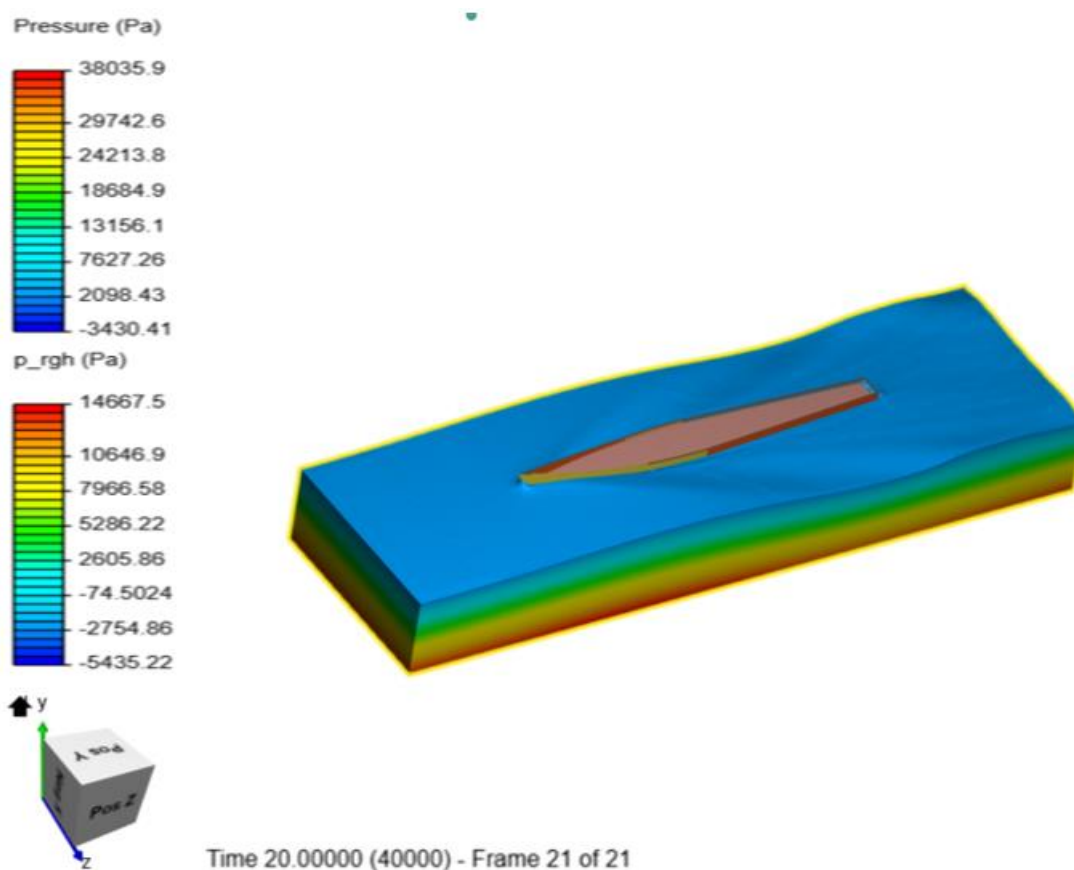


Figura 33. Oleaje del río por el movimiento del bote y presión en la superficie de control.

En la siguiente figura el simulador nos muestra cómo se comporta la velocidad en el agua del río, aquí cabe recalcar que en la simulación se toma el valor de 5,56 m/s el cual representa la velocidad a la cual el cliente desea que el bote se mueva.

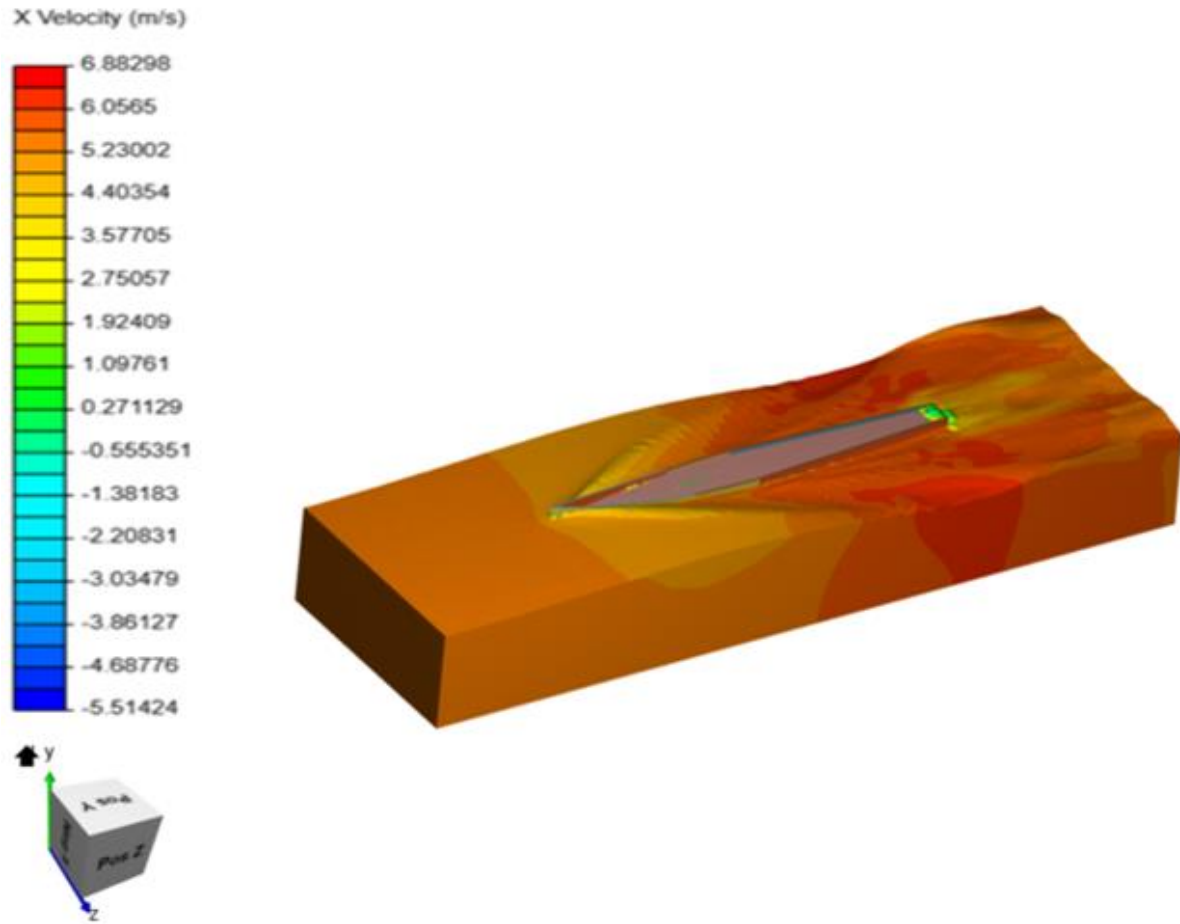


Figura 34. Velocidad del bote sobre el río.

A continuación, se puede ver la Figura 35 la cual nos muestra la fuerza en el eje X la cual representa a la fuerza de drag que genera el bote al navegar por el río a 5.56 m/s. En la gráfica se puede observar que el valor en la que converge la simulación es de 1367.82 N. Algo muy parecido al resultado obtenido en los cálculos analíticos presentados con anterioridad. Además, se puede observar el momento que se genera en el eje y, esta curva presenta una oscilación centrada en 0, esto debido a que el bote crea un oleaje en el agua que hace que el bote genere un momento oscilatorio en la nave.

Por otro lado, se puede apreciar que en la Figura 36 se puede observar los respectivos valores del coeficiente de drag obtenidos en la simulación.

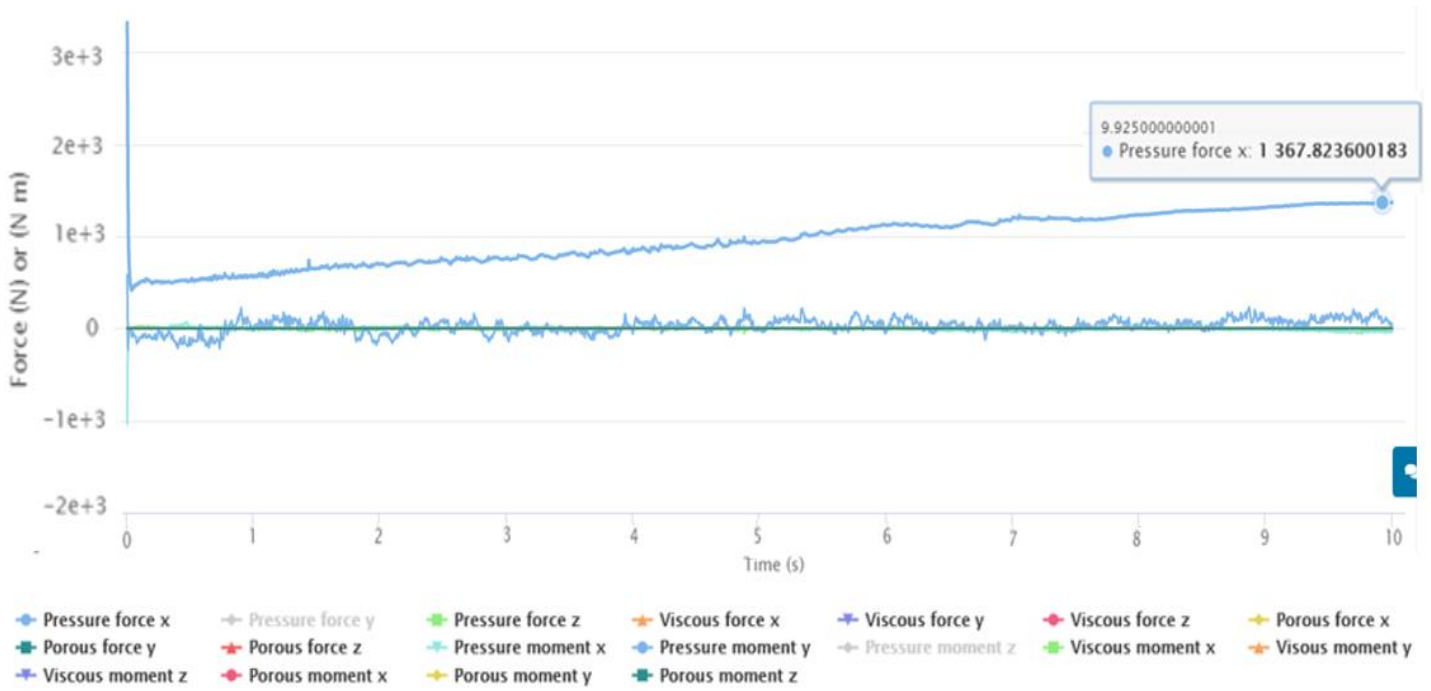


Figura 355. Gráfica Fuerza vs Tiempo (Simscale).

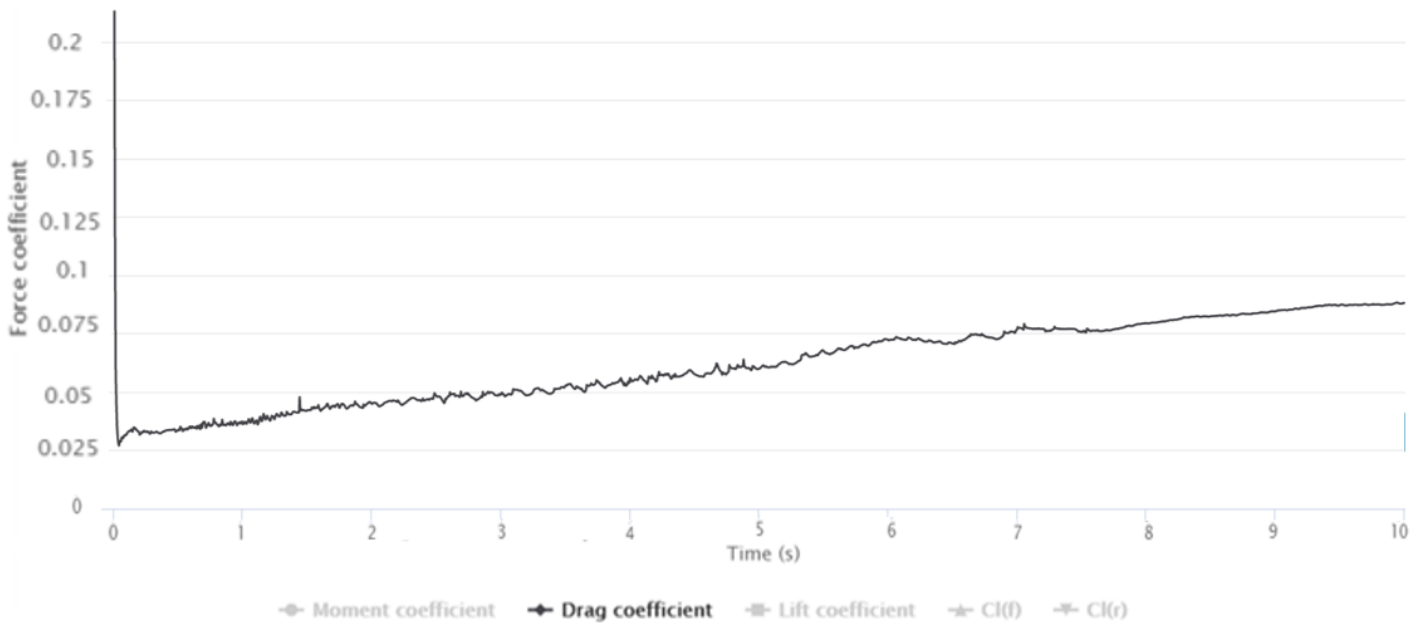


Figura 366. Gráfica coeficiente de fuerza vs tiempo (Simscale).

CONCLUSIONES

En el presente proyecto se analizó con éxito la embarcación Tapiatpia, de la cual se utilizaron sus dimensiones y una capacidad de carga específica para obtener el empuje con el que se llegará a la velocidad deseada. Por otro lado, después de realizar emparejamientos de hélice con motor utilizando un método verificado, ambos con una hélice de 12 pulgadas de diámetro en común, se determinó que el motor de 10 kW no tenía suficiente potencia para cumplir con los requisitos, mientras que el motor de 20 kW a su 73,09 % de potencia será capaz de satisfacer el objetivo principal, el cual era encontrar la pareja correcta de Hélice-Motor para Tapiatpia de acuerdo a los requerimientos.

En la simulación se corrobora los datos obtenidos en el método analítico por lo que se recomienda altamente la compra del motor y la hélice antes mencionada asegurando que los mismos funcionarán de manera adecuada para que el bote solar navegue bajo los requerimientos del cliente. Además, con esta pareja hélice-motor una vez seleccionada se debe comenzar a trabajar en la elección del paquete de baterías para que proporcione la energía suficiente y de esta manera el sistema eléctrico de propulsión trabaje correctamente.

Finalmente se concluye que la pareja motor-hélice obtenidos en el estudio son accesibles para la zona del Ecuador a través de una compra en línea directamente desde las páginas de los fabricantes, esta pareja cumplirá con los objetivos planteados en un principio, ya que es un sistema que no utiliza combustible fósil, económico y adecuado para soportar las condiciones de la Amazonía. Por otro lado, estos equipos necesitan de otros componentes para el movimiento del bote, es decir un controlador para el motor y el paquete de baterías que alimente a todo el sistema. De esta manera se mantiene la viabilidad del proyecto cumpliendo con el objetivo de ayudar a las personas que necesitan movilizarse en la zona oriente de Ecuador y alcanzando los requerimientos de velocidad y peso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dillón, J. (2012). *Yasuní-ITT: Hacia un nuevo modelo de conservación y desarrollo sostenible*. (Tesis de Maestría). Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.
- Castillo, R y Andrade, J. (2016). *Pobreza en Ecuador: Perfiles y factores asociados 2006-2014*. Recuperado de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Bibliotecas/Libros/reportePobreza.pdf>
- Gil, J., Soto, A., Usma, I. y Gutiérrez, D. (2013). *Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. Producción+ limpia*. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
- Golden Motor. (2015). BLDC 20 kW Motor Curves. Recuperado de <https://www.goldenmotor.com/eCar/HPM-20KW-72V%20Curve.pdf>
- Guamán, F. y Ordóñez, J. (2014). *Estudio de la viabilidad técnica, económica y ambiental de lanchas solares para transporte en los ríos de la Amazonía Sur del Ecuador*. (Tesis de Pregrado). Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Guamán, F., Ordoñez, J., Espinoza, L. y Jara, J. (2015). Electric-solar boats: An option for sustainable river transportation in the Ecuadorian Amazon. *Energy and Sustainability*, 195, 439-448. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/283053600_Electric-solar_boats_An_option_for_sustainable_river_transportation_in_the_Ecuadorian_Amazon
- Hardman, S. (2019). *Understanding the impact of reoccurring and non-financial incentives on plug-in electric vehicle adoption*. Elsevier.
- Hepperle, M. (2018). *JavaProp User Guide*. Obtenido de <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/java/JavaProp%20Users%20Guide.pdf>

- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). *Censo de Población 2010*.
- Lapko, A. (2016). *The use of auxiliary electric motors in boats and sustainable development of nautical tourism – cost analysis, the advantages and disadvantages of applied solutions*. Elsevier.
- López, A., Espíndola, F., Calles, J. y Ulloa, J. (2013). *Atlas "Amazonía Ecuatoriana Bajo Presión"*. Quito: EcoCiencia.
- McGregor, M. (2018). La Calidad del Agua y el Impacto en la Salud Pública: Un examen a las fuentes del agua en la Amazonia cerca de Puyo, Ecuador y la salud de las comunidades indígenas/Water Quality and the Impact on Public Health: An examination of water sources in the Amazon near Puyo, Ecuador and the health of indigenous communities. *Independent Study Project (ISP)Collection*. 2922
- Mh-Aerotoools. (s/f). *JavaProp*. Recuperado de <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javaprop.htm>
- MIT. (2005). *DC Motor / Propeller Matching*. Recuperado de <http://web.mit.edu/drela/Public/web/qprop/motorprop.pdf>
- San Sebastián, M., Armstrong, B. y Stephens, C. (2001). La salud de mujeres que viven cerca de pozos y estaciones de petróleo en la Amazonía ecuatoriana. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 9, 375-383. Recuperado de <https://scielosp.org/pdf/rpsp/2001.v9n6/375-383/es>
- Simscale. (s/f). *User Guide: External Aerodynamics around a vehicle*. Recuperado de <https://www.simscale.com/docs/tutorials/external-aerodynamics-over-vehicle/>
- Smith, R. (2010). *Manual de Ecoturismo para la Amazonía Ecuatoriana*. Doi: https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1302&context=abya_yala
- Reabroy, R., Tiaple, Y., Pongduang, S., Nantawong, T. y Iamraksa, P. (2015). *The Possibility of using Electrical Motor for Boat Propulsion System*. Elsevier.

Wilmsmeier, G., Jaimurzina, A. y Montiel, D. (01/2017). Eficiencia energética y movilidad eléctrica fluvial: soluciones sostenibles para la Amazonía. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/41137-eficiencia-energetica-movilidad-electrica-fluvial-soluciones-sostenibles-la>

ANEXO 1: AJUSTES GENERALES EN JAVAPROP.

Adjust the desired Option(s).

JavaProp

Version 1.69 - 1 de agosto de 2018.

Copyright © 2001-2018 Martin Hepperle

- Translation to Chinese (simplified) by J. X. Ding, 2011.
- Translation to Chinese (traditional) by J. X. Ding, 2011.
- If you want to translate JavaProp into your language:
 - install JavaProp locally on your system,
 - copy or edit one of the Localized_XX.java example files in the installation directory
 - return it to me for integration (for email see: www.MH-AeroTools.de).

- Your current system settings
Cannot access System.Properties, probably because JavaProp is running as an Applet.

Country Settings: (decimal character is: ',')

Density ρ : [kg/m³]

Kinematic Viscosity ν : [m²/s]

Speed of Sound a : [m/s]

Clear preferences on exit

ANEXO 2: VALORES PARA HÉLICE DE 12 PULGADAS.

Enter Design Parameters and press the 'Design It!' button.

Propeller Name:

Number of Blades B: [-]

Revolutions per minute rpm: [1/min]

Diameter D: [m]

Spinner Dia. Dsp: [m]

Velocity v: [m/s]

Thrust T: [N]

shroud chord: [-]

shroud angle: [°]

shrouded rotor square tip open hub

Propeller			
$v/(nD)$	0.304	$v/(\Omega R)$	0.097
Efficiency η	51.427 %	loading	very high
Thrust T	1,332.85 N	Ct	0.0423
Power P	14.41 kW	Cp	0.025
Torque Q	38.22 Nm	Cs	0.6358
β at 75%R	12.4°	Pitch H	158 mm

ANEXO 3: DATOS PARA LA HÉLICE 12 PULGADAS.

Hélice 3x12'						
Rpm	n (rev/s)	Coef. Empuje	Coef. Potencia	Potencia (kW)	Torque (Nm)	Eficiencia
2335	38,92	0,1006	0,0846	13,30	54,40	0,5567
2627	43,78	0,0794	0,0603	13,50	49,08	0,5485
2952	49,20	0,0629	0,0434	13,79	44,60	0,5371
3542	59,03	0,0437	0,0261	14,32	38,62	0,5170
3616	60,27	0,0419	0,0247	14,42	38,09	0,5134
3730	62,17	0,0394	0,0227	14,55	37,25	0,5090
3745	62,42	0,0391	0,0225	14,59	37,21	0,5074
3758	62,63	0,0388	0,0222	14,55	36,97	0,5089
3772	62,87	0,0385	0,022	14,58	36,91	0,5078
3781	63,02	0,0384	0,0219	14,62	36,92	0,5065
3792	63,20	0,0381	0,0217	14,61	36,80	0,5068
3805	63,42	0,0379	0,0215	14,63	36,71	0,5063
3820	63,67	0,0376	0,0213	14,66	36,66	0,5050
3836	63,93	0,0373	0,021	14,64	36,44	0,5058
3852	64,20	0,0370	0,0208	14,68	36,40	0,5044
3868	64,47	0,0366	0,0206	14,72	36,35	0,5030
3882	64,70	0,0364	0,0204	14,74	36,26	0,5024
3898	64,97	0,0361	0,0201	14,70	36,02	0,5037
3913	65,22	0,0358	0,0199	14,72	35,93	0,5029
3928	65,47	0,0355	0,0197	14,74	35,85	0,5022
3940	65,67	0,0353	0,0196	14,80	35,88	0,5002
3952	65,87	0,0351	0,0194	14,79	35,73	0,5007
3962	66,03	0,0349	0,0193	14,82	35,73	0,4995
3973	66,22	0,0347	0,0191	14,79	35,56	0,5006
3984	66,40	0,0345	0,019	14,84	35,56	0,4991
3996	66,60	0,0343	0,0188	14,81	35,40	0,4998
4003	66,72	0,0342	0,0187	14,81	35,34	0,4999
4015	66,92	0,0340	0,0186	14,87	35,36	0,4981
4025	67,08	0,0338	0,0185	14,90	35,35	0,4970
4036	67,27	0,0337	0,0183	14,86	35,15	0,4984
4053	67,55	0,0334	0,0181	14,88	35,06	0,4976

ANEXO 4: DATOS PARA LA HÉLICE 12 PULGADAS.

Hélice 3x12'						
Rpm	n (rev/s)	Coef. Empuje	Coef. Potencia	Potencia (kW)	Torque (Nm)	Eficiencia
3779	62,98	0,0384	0,0219	14,60	36,88	0,5073
3783	63,05	0,0383	0,0218	14,58	36,79	0,5080
3787	63,12	0,0382	0,0218	14,62	36,87	0,5064
3791	63,18	0,0382	0,0217	14,60	36,78	0,5072
3797	63,28	0,0380	0,0216	14,60	36,73	0,5071
3800	63,33	0,0380	0,0216	14,64	36,78	0,5059
3803	63,38	0,0379	0,0215	14,60	36,67	0,5071
3809	63,48	0,0378	0,0214	14,61	36,62	0,5070
3816	63,60	0,0377	0,0213	14,62	36,58	0,5066
3825	63,75	0,0375	0,0212	14,65	36,58	0,5054
3842	64,03	0,0371	0,0209	14,64	36,38	0,5059
3872	64,53	0,0366	0,0205	14,70	36,25	0,5039
3910	65,17	0,0359	0,02	14,76	36,06	0,5015
3949	65,82	0,0352	0,0194	14,75	35,68	0,5019
3996	66,60	0,0343	0,0188	14,81	35,40	0,4998
4052	67,53	0,0334	0,0181	14,87	35,05	0,4979
4114	68,57	0,0324	0,0174	14,96	34,73	0,4949
4181	69,68	0,0314	0,0167	15,07	34,43	0,4913
4251	70,85	0,0303	0,0159	15,08	33,89	0,4909
4320	72,00	0,0294	0,0153	15,23	33,67	0,4861
4388	73,13	0,0285	0,0146	15,23	33,15	0,4861
4460	74,33	0,0276	0,014	15,34	32,84	0,4828
4525	75,42	0,0268	0,0135	15,45	32,60	0,4794
4580	76,33	0,0261	0,0131	15,54	32,41	0,4764
4621	77,02	0,0257	0,0128	15,60	32,23	0,4747
4647	77,45	0,0254	0,0126	15,62	32,09	0,4742
4658	77,63	0,0253	0,0125	15,60	31,98	0,4746
4659	77,65	0,0253	0,0125	15,61	32,00	0,4743