



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA CONCEPTUAL DE UNA  
EMBARCACIÓN AUTÓNOMA PROPULSADA POR ENERGÍA SOLAR

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL MECÁNICA

GRACE ESTRELLA VEGA FLORES

PROFESOR GUÍA:  
PABLO CASTILLO CAPPONI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
LEONEL NUÑEZ LAZO  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE  
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL MECÁNICA  
POR: GRACE ESTRELLA VEGA FLORES  
FECHA: 30/07/2020  
PROF. GUÍA: PABLO CASTILLO CAPPONI

## ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA CONCEPTUAL DE UNA EMBARCACIÓN AUTÓNOMA PROPULSADA POR ENERGÍA SOLAR

En la actualidad se han realizado numerosas embarcaciones propulsadas por energía solar fotovoltaica, un ejemplo de ello son los taxis solares que funcionan al sur de Chile en Valdivia. A nivel mundial también se han diseñado pequeñas embarcaciones autómatas en base a energía solar, pero con limitaciones en cuanto a su tiempo de funcionamiento, rango de desplazamiento y comunicación.

El siguiente trabajo de título consiste en llevar a cabo el diseño conceptual de una embarcación autónoma capaz de navegar por el mundo propulsada únicamente por energía solar fotovoltaica. Su objetivo es estudiar la prefactibilidad técnica conceptual de dicha embarcación a partir de simulaciones de viaje generadas en Matlab a partir de la radiación disponible realizadas en tiempo real. Para esto se determinan sus dimensiones principales a partir de la base de datos generada del estudio de embarcaciones existentes y se seleccionan los equipos principales estudiando las distintas tecnologías disponibles en el mercado para luego culminar con un balance de energía entre ellos.

De acuerdo a las consideraciones del proyecto se tienen presente dos problemáticas principales: la intermitencia del recurso solar y las posibles colisiones durante el trayecto de la embarcación. Para la primera se incluye un sistema de almacenamiento capaz de entregar una potencia base estable, cuidando de no agregar demasiado peso y dimensión al modelo. Mientras que para la segunda se genera una herramienta computacional que permite predecir posibles colisiones con otros navíos y ajuste la ruta.

Finalmente, el estudio indica que dentro de las limitaciones propias de una etapa de diseño conceptual y considerando los resultados obtenidos para velocidad y tiempos de viaje, se determina que el diseño es técnicamente factible y se recomienda continuar con las etapas de ingeniería básica y de detalle del proyecto.

*La naturaleza es inagotablemente sostenible si cuidamos de ella.*

*- Sylvia Dolson*

# Agradecimientos

En primer lugar le agradezco a mi familia por el apoyo incondicional que me han dado y los valores inculcados. A mi madre por habérsela jugado y creer en mi incluso antes que yo misma, por ser un ejemplo de esfuerzo y ayudarme a ser la persona que soy hoy en día. A Jorge por acompañarme, comprenderme y apoyarme de todas las formas posibles, en especial los primeros años cuando me quedaba dormida los días de controles. A mi hermana Nicole por ser la mejor hermana que alguien pueda tener, por su cariño y hacerme reír con sus locuras incluso en los días más complicados, por los grandes momentos que hemos pasado juntas y los que aún nos quedan.

En segundo lugar quiero agradecer a los amigos quienes me acompañaron a lo largo de mi travesía en la universidad, a los que estuvieron desde el primer día y a quienes conocí durante el camino, gracias por todos los momentos juntos, por las aventuras que tuvimos y también por la compañía durante las largas noches de estudio. En particular agradecer a Paskal Guzmán, por ser la mejor amiga del mundo y la mejor compañera con quien he tenido la suerte de compartir desde el primer día en plan común y luego durante la especialidad, por ser un apoyo incondicional y con quien este proceso no hubiera sido el mismo.

Finalmente, agradecer a los profesores que han tenido un efecto durante mi formación como profesional, tanto a mi profesor de física electivo del colegio Mauricio Ramos quien me inspiró a escoger la carrera de ingeniería civil mecánica, como al profesor Ramón Frederick del departamento de mecánica por enseñarme que siempre se puede seguir aprendiendo y mejorando cuando uno ama lo que hace. Agradecer también a los profesores miembros de mi comisión por ayudarme a seguir aprendiendo y perfeccionando mi trabajo, en particular agradecer a mi profesor guía Pablo Castillo por la confianza que ha depositado en mi, por tener siempre la mejor disposición y enseñarme a creer en mi como profesional.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes básicos generales . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	1
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.3.1. Objetivo general . . . . .	2
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.4. Alcances . . . . .	2
1.5. Antecedentes y discusión bibliográfica . . . . .	3
1.5.1. Vehículos no tripulados . . . . .	3
1.5.2. Embarcaciones . . . . .	4
1.5.3. Energía solar . . . . .	6
1.5.4. Componentes principales . . . . .	9
1.5.5. Legislación . . . . .	12
<b>2. Metodología</b>	<b>13</b>
<b>3. Base de datos para el diseño</b>	<b>15</b>
3.1. Recopilación de información . . . . .	15
3.2. Parámetros de diseño y dimensiones principales . . . . .	16
3.2.1. Manga . . . . .	16
3.2.2. Calado . . . . .	17
3.2.3. Masa total de la embarcación . . . . .	18
<b>4. Selección de equipos</b>	<b>20</b>
4.1. Sistema fotovoltaico . . . . .	20
4.1.1. Paneles solares . . . . .	20
4.1.2. Regulador . . . . .	26
4.1.3. Batería . . . . .	28
4.2. Sistema de propulsión . . . . .	35
4.2.1. Propulsión por chorro de agua . . . . .	37
4.2.2. Selección sistema de propulsión . . . . .	37
4.2.3. Motor . . . . .	39
4.2.4. Variador de tensión (ESC) . . . . .	41
4.3. Conexión de equipos principales . . . . .	44
<b>5. Diseño</b>	<b>45</b>
5.1. Dimensiones principales . . . . .	45

5.2.	Forma del casco . . . . .	46
5.2.1.	Tipos de cascos . . . . .	46
5.2.2.	Obra viva . . . . .	47
5.3.	Disposición de equipos principales . . . . .	47
<b>6.</b>	<b>Balance de energía</b>	<b>50</b>
6.1.	Sistema de propulsión . . . . .	50
6.1.1.	Resistencia al avance . . . . .	51
6.1.2.	Número de Reynolds . . . . .	51
6.1.3.	Número de Froude . . . . .	52
6.1.4.	Resistencia friccional . . . . .	52
6.1.5.	Resistencia residual . . . . .	53
6.1.6.	Resistencia del aire . . . . .	55
6.1.7.	Potencia efectiva del barco . . . . .	56
6.2.	Sistema fotovoltaico . . . . .	57
6.2.1.	Energía del sistema fotovoltaico . . . . .	57
6.2.2.	Energía de la batería . . . . .	58
6.3.	Balance de energía . . . . .	58
<b>7.</b>	<b>Programación de ruta</b>	<b>60</b>
7.1.	Ruta inicial . . . . .	61
7.1.1.	Zonas de navegación . . . . .	63
7.1.2.	Radiación diaria . . . . .	63
7.2.	Ruta actual . . . . .	64
7.2.1.	Radiación actual . . . . .	66
7.3.	Repetir programa . . . . .	66
<b>8.</b>	<b>Resultados y discusión</b>	<b>67</b>
8.1.	Ruta inicial . . . . .	67
8.1.1.	Viaje 1: Playa Jama (Ecuador) - Sta. Teresa (Costa Rica) . . . . .	67
8.1.2.	Viaje 2: Pto. de Talcahuano (Chile) - Pto. de Valparaíso (Chile) . . . . .	70
8.2.	Ruta actual . . . . .	72
8.2.1.	Viaje 1: Playa Jama (Ecuador) - Sta. Teresa (Costa Rica) . . . . .	72
8.2.2.	Viaje 2: Pto. de Talcahuano (Chile) - Pto. de Valparaíso (Chile) . . . . .	76
<b>9.</b>	<b>Propuesta de trabajo y conclusiones</b>	<b>84</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>88</b>
	<b>Anexo A. Fichas técnicas de equipos</b>	<b>89</b>
A.1.	Panel solar . . . . .	90
A.2.	Ficha técnica del regulador de carga . . . . .	91
A.3.	Batería . . . . .	92
A.4.	Plano motor . . . . .	93
A.5.	Variador de tensión (ESC) . . . . .	94
	<b>Anexo B. Códigos de programas</b>	<b>95</b>
B.1.	Ruta inicial . . . . .	97

B.2. Radiación diaria . . . . .	104
B.3. Ruta actual . . . . .	107
B.4. Radiación actual . . . . .	115
B.5. Repetir programa . . . . .	117

# Índice de Tablas

3.1. Información recopilada . . . . .	15
3.2. Resultados dimensión de manga según eslora . . . . .	17
3.3. Resultados dimensión de calado según eslora y manga . . . . .	18
3.4. Resultados de masa total aproximada según longitud de eslora . . . . .	19
4.1. Base datos paneles fotovoltaicos . . . . .	22
4.2. Base datos paneles fotovoltaicos viables . . . . .	22
4.3. Especificaciones controlador de carga solar MPPT 75/10 . . . . .	28
4.4. Comparación costos según ciclo de vida para distintas tecnologías [25] . . . . .	32
4.5. Base de datos baterías . . . . .	33
4.6. Especificaciones T-jet Large Jet Drive, TFL . . . . .	38
4.7. Especificaciones motor seleccionado . . . . .	41
4.8. Comparación variadores de tensión (ESC) [10] . . . . .	42
4.9. Especificaciones controlador de velocidad Aerostar 50A electrónico con BEC 5A . . . . .	43
6.1. Coeficientes de resistencia del aire en calma [18] . . . . .	56

# Índice de Ilustraciones

1.1. Zonas y ejes del casco de una embarcación [8] . . . . .	4
1.2. Dimensiones del barco [8] . . . . .	5
1.3. Componentes energía solar [29] . . . . .	6
1.4. Mapa radiación [28] . . . . .	7
1.5. Energía solar fotovoltaica y térmica . . . . .	7
1.6. Esquema de sistema de propulsión eléctrico [9] . . . . .	9
2.1. Metodología . . . . .	13
3.1. Gráfico relación eslora/manga versus eslora . . . . .	16
3.2. Gráfico relación manga/calado versus eslora . . . . .	17
3.3. Gráfico pesa de embarcación, según longitud de eslora . . . . .	18
4.1. Dimensiones panel solar FLEX050W12V . . . . .	23
4.2. Comportamiento corriente según voltaje, panel solar FLEX050W12V . . . . .	24
4.3. Máxima curvatura recomendada para panel solar FLEX050W12V . . . . .	24
4.4. Conexión paneles fotovoltaicos en serie [1] . . . . .	25
4.5. Conexión paneles fotovoltaicos en paralelo [1] . . . . .	25
4.6. Configuración seleccionada de paneles solares . . . . .	26
4.7. Controlador de carga solar MPPT 75/10 . . . . .	27
4.8. Comparación de la densidad energética volumétrica y de peso de algunas tecnologías de baterías [27] . . . . .	28
4.9. Comparación curva de descarga entre batería ion-litio y plomo-ácido [15] . . . . .	29
4.10. Gráfico capacidad según temperatura para tecnología ion-litio y AGM [24] . . . . .	30
4.11. Gráfico capacidad según temperatura para tecnología ion-litio y AGM [13] . . . . .	30
4.12. Batería Power Brick 12v Lithium-Ion battery pack . . . . .	34
4.13. Dimensiones batería Power Brick 12v Lithium-Ion battery pack . . . . .	34
4.14. Conexión en paralelo, sistema de baterías . . . . .	35
4.15. Partes de una hélice para barco [20] . . . . .	36
4.16. Arreglo general típico de propulsor por chorro de agua [4] . . . . .	37
4.17. T-Jet Large Jet Drive by TFL, vista . . . . .	38
4.18. T-Jet Large Jet Drive by TFL, vista . . . . .	38
4.19. T-Jet Large Jet Drive by TFL, vista mecanismo de gobierno . . . . .	39
4.20. Movimiento del mecanismo de gobierno . . . . .	39
4.21. Motores inrunner y outrunner [14] . . . . .	40
4.22. Motor sin escobillas outrunner Turnigy SK3 3548-700KV . . . . .	41
4.23. Controlador de velocidad Aerostar 40A electrónico con BEC 5A . . . . .	43

4.24. Conexión de los equipos principales . . . . .	44
5.1. Tipos de casco para una embarcación [11] . . . . .	46
5.2. Medidas de caso tipo semidesplazamiento [16] . . . . .	47
5.3. Disposición de equipos, vista lateral interna y superior externa . . . . .	48
5.4. Disposición de equipos, vista lateral interna y superior interna . . . . .	49
6.1. Fuerzas sobre la embarcación . . . . .	50
6.2. Relación número de Froude, resistencia residual y desplazamiento [3] . . . . .	54
6.3. Relación número de Froude, resistencia residual y desplazamiento para velero . . . . .	55
7.1. Diagrama de programación global . . . . .	61
7.2. Diagrama de programa ruta inicial . . . . .	61
7.3. Zonas de navegación [6] . . . . .	63
7.4. Diagrama programa radiación diaria . . . . .	64
7.5. Diagrama de programa ruta actual . . . . .	65
7.6. Diagrama de programa radiación actual . . . . .	66
8.1. Ruta inicial entregada en el mapa para viaje 1 . . . . .	68
8.2. Detalle ruta inicial entregada en el mapa para viaje 1 . . . . .	68
8.3. Gráfico radiación diaria promedio para cada punto de la ruta . . . . .	69
8.4. Gráfico velocidad diaria promedio según fecha para viaje 1 . . . . .	70
8.5. Ruta inicial entregada en el mapa para viaje 2 . . . . .	71
8.6. Gráfico de radiación diaria promedio según fecha para viaje 2 . . . . .	71
8.7. Gráfico de velocidad diaria promedio según fecha para viaje 2 . . . . .	72
8.8. Comparación ruta inicial y ruta actual viaje 1 . . . . .	73
8.9. Comparación radiación inicial y actual según latitud para viaje 1 . . . . .	73
8.10. Comparación velocidad inicial y actual según latitud para viaje 1 . . . . .	74
8.11. Barcos alrededor de la embarcación para viaje 1 . . . . .	75
8.12. Distancia entre embarcación y barcos alrededor para viaje 1 . . . . .	76
8.13. Comparación ruta inicial y ruta actual viaje 2 . . . . .	77
8.14. Detalle comparación ruta inicial y ruta actual viaje 2 . . . . .	77
8.15. Comparación radiación inicial y actual según latitud para viaje 2 . . . . .	78
8.16. Comparación velocidad inicial y actual según latitud para viaje 2 . . . . .	79
8.17. Barcos alrededor de la embarcación para viaje 2 . . . . .	80
8.18. Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 23 de Marzo 2020 . . . . .	81
8.19. Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 23 de Marzo 2020 detalle . . . . .	81
8.20. Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 27 y 28 de Marzo 2020 . . . . .	82
8.21. Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 29 de Marzo 2020 . . . . .	83
8.22. Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 29 de Marzo 2020 detalle . . . . .	83

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes básicos generales

Hoy en día se han realizado numerosas embarcaciones que funcionan con energía solar, un ejemplo de ello son los taxis solares utilizados al sur de Chile en Valdivia. A nivel mundial, también se han diseñado pequeñas embarcaciones autónomas pero con ciertas limitaciones en cuanto a su tiempo de funcionamiento y comunicación.

Dentro de dichas embarcaciones, el que ha alcanzado mayor éxito ha sido el WasteShark desarrollado por la compañía holandesa RanMarine Technology, el cual se trata de un dron marino cuya función es recoger la basura flotante del agua.

El mayor problema que presenta la energía solar es su intermitencia por lo cual es usualmente usada con otra energía de respaldo, de caso contrario se requiere de un sistema de almacenamiento que resulta de vital importancia para la continuidad de la operación.

### 1.2. Motivación

Actualmente el transporte marítimo genera 900.000 toneladas métricas de partículas contaminantes cada año y aporta con un 30[%] en la formación de concentraciones de óxido de nitrógeno. Además, se espera que para el año 2020 se produzcan 1.480 millones de toneladas métricas de dióxido de carbono, lo cual es equivalente a 65 millones de autos circulando. Además, estudiando la entrada progresiva de la energía solar en el área naval se puede observar la continuada evolución e importancia que ésta va tomando como alternativa a la combustión de hidrocarburos.

Es por todo lo anterior que se busca crear un precedente para generar un nuevo transporte marítimo más limpio y amigable con el medio ambiente que el actual, ampliando el campo de aplicaciones tanto de las energías renovables no convencionales como en el diseño de vehículos no tripulados.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Realizar el diseño conceptual y estudiar la prefactibilidad técnica de una embarcación automática propulsada por energía solar, mediante simulaciones de viaje.

### 1.3.2. Objetivos específicos

Para el cumplimiento del objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar modelos similares con el fin de generar una base de datos y establecer parámetros principales de diseño
- Seleccionar equipos y dimensiones principales que mejor se adapten a las condiciones y necesidades del proyecto
- Desarrollar una herramienta computacional para la simulación de viajes, según la radiación disponible y barcos alrededor
- Realizar una evaluación de prefactibilidad técnica mediante los resultados obtenidos de por lo menos dos simulaciones de viaje

## 1.4. Alcances

Al tratar se de un estudio de prefactibilidad de ingeniería conceptual se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

- La etapa de diseño será del tipo conceptual, en donde se especificaran las dimensiones principales, los equipos necesarios y su disposición, sin entrar en detalle respecto al perfil de forma de la embarcación.
- Por petición de la empresa demandante se considerará un tamaño de eslora máximo de 1,5 metros.
- En cuanto a la carga, sólo se consideran los componentes de la embarcación no teniendo uso como barco de transporte de pasajeros u otro tipo.
- Al funcionar con una energía intermitente como es la solar, se requiere de un sistema de reserva de energía para funcionar las 24 horas del día. Sin embargo, eso implicaría un mayor peso en la embarcación por lo cual se tendrá un horario de funcionamiento limitado durante el día.
- Debido a posibles colisiones fuera del horario de funcionamiento, se requiere de un sistema de almacenamiento de energía de emergencia para poner en marcha la embarcación y así evitar eventuales daños de esta.
- Para el recurso solar disponible se considerará la radiación directa y no se incluirán otros factores como mapa de sombras o nubosidad.
- En la etapa inicial del diseño no se entrará en detalle respecto a las condiciones climáticas que puedan tenerse aguas adentro, esto se analizará más adelante cuando se estudie el perfil de forma.



- Se realizarán al menos dos simulaciones de viaje, para ello se requiere de uno o más programas para obtener las posiciones de viaje cada cierto tiempo, en dicho programa no se considerará la comunicación con la embarcación puesto que la empresa demandante ya cuenta con una. Además, para obtener la posición actual del barco se utilizará el calculado por el programa ya que no se cuenta con el prototipo real.
- La evaluación será únicamente del tipo técnica sin considerar tópicos económicos, donde el criterio de factibilidad será la velocidad y tiempo de viaje obtenidos en las simulaciones.

## 1.5. Antecedentes y discusión bibliográfica

### 1.5.1. Vehículos no tripulados

Se entiendo por vehículos no tripulados, Unmanned Vehicles (UV) por su nombre en inglés, a aquellos vehículos propulsados que no portan un operador humano, moviéndose en forma autónoma o guiados en forma remota, capaces de transportar una carga. Independiente del tamaño, éstos pueden ser aéreos (UAV), marinos (UMV) o terrestres (UGV) [5].

Asimismo, los UV pueden tener diferentes sistemas de control que definirán básicamente la distancia hasta la cual se podrán alejar respecto de la estación de control y el grado de independencia en el cumplimiento de las tareas. Estos pueden ser controlados vía radiofrecuencia o vía satélite, o estar programados para seguir rutas con puntos predefinidos que son controlados a través de un sistema de posicionamiento a bordo.

Los vehículos no tripulados marinos (UMV) son capaces de navegar por el medio acuático y subacuático, sin necesidad de llevar un piloto a bordo. En el ámbito naval el desarrollo de los vehículos no tripulados ha sido más lento que en el aéreo, esta realidad ha cambiado los últimos 10 años, experimentando un explosivo impulso, no sólo su uso sino también en las características de éstos, de tal forma que en la actualidad se pueden clasificar en tres categorías básicas [5]:

- Vehículos Operados Remotamente (ROV): normalmente empleados para la exploración submarina, se caracterizan por estar conectados a través de un cable umbilical a la plataforma madre, apoyando tanto la fuente de poder como la transmisión de datos y vídeo hacia la estación del operador. Sus principales aplicaciones son actividades científicas que requieren interacción con el fondo marino o recolección de muestras y datos submarinos.
- Vehículos Submarinos Autónomos (AUV): con aplicaciones similares a las del grupo precedente, pero se caracterizan por tener sistemas de alimentación de poder incluidos en la misma plataforma, propulsión propia y sistemas de navegación y control independientes, enlazando con la estación supervisora a través de un sistema de comunicación.
- Vehículos de Superficie No Tripulados (USV): existen en versiones autónomas o conectadas alámbrica (cable umbilical) o inalámbricamente con la estación de control.

## 1.5.2. Embarcaciones

Se considera como embarcación a toda construcción destinada a navegar sobre o bajo el agua, cualquiera que sea su clase y dimensión. Las embarcaciones se pueden clasificar según cuatro criterios: tamaño, finalidad, tipo de propulsión y por sustentación.

### Zonas y ejes del casco

- Plano de crujía: plano imaginario longitudinal (proa-popa) que divide la embarcación en dos mitades simétricas. Coincide con la quilla y su intersección con el casco determina la línea de crujía.
- Través: eje transversal, perpendicular a la línea de crujía, que divide el barco en dos mitades.
- Proa: parte delantera de la embarcación.
- Popa: parte posterior de la embarcación.
- Babor: parte izquierda de la embarcación mirando de popa a proa.
- Estribor: parte derecha de la embarcación mirando de popa a proa.
- Línea de flotación: es la intersección entre la parte sumergida y la parte que emerge del agua de la embarcación.
- Obra viva: parte del casco por debajo de la línea de flotación. Se conoce también como carena.
- Obra muerta: parte del casco por encima de la línea de flotación.

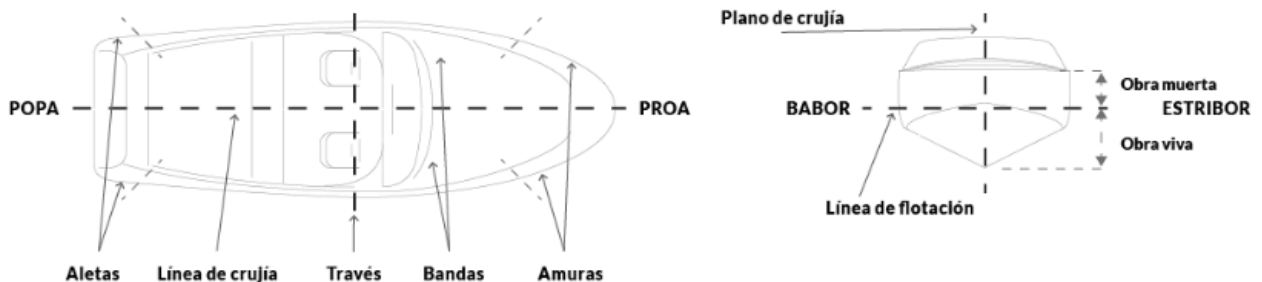


Figura 1.1: Zonas y ejes del casco de una embarcación [8]

### Dimensiones del barco

- Eslora máxima: longitud máxima de la embarcación. Es la distancia medida sin considerar elementos no estructurales del casco.
- Manga máxima: es la máxima anchura del casco con las estructuras fijas.
- Calado: profundidad de la embarcación o altura de la obra viva. La distancia se mide desde la línea de flotación hasta la parte inferior de la quilla. No se cuenta el timón, la orza o las colas de los motores.
- Calado a popa (Cpp): distancia entre la parte inferior de la quilla y la línea de flotación a popa.

- Calado a proa ( $C_{pr}$ ): distancia entre la parte inferior de la quilla y la línea de flotación a proa.
- Calado en el medio: distancia entre la parte inferior de la quilla y la línea de flotación en el medio de la eslora de la embarcación. También conocido como calado en la perpendicular media.
- Calado medio ( $C_m$ ): semisuma de los calados a popa y a proa.
- Francobordo: distancia vertical desde la línea de flotación, en carga máxima, y la cubierta superior.
- Puntal: máxima dimensión vertical medida desde la parte superior de la quilla hasta cubierta principal.
- Desplazamiento: peso de la embarcación, el cual es equivalente al peso del agua desplazada medido en toneladas métricas.
- Desplazamiento máximo: peso máximo permitido de la embarcación totalmente cargada y lista para navegar.

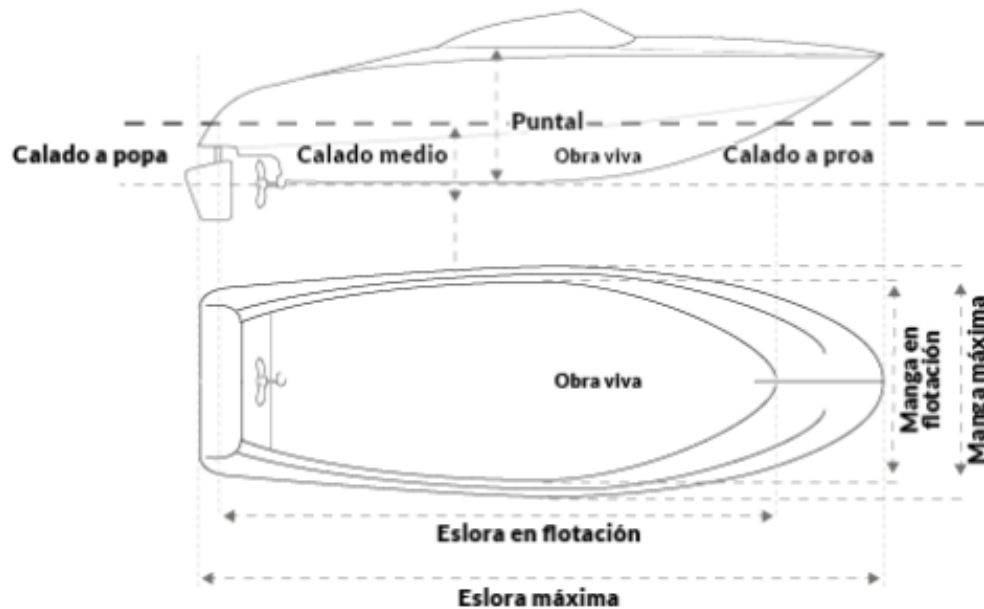


Figura 1.2: Dimensiones del barco [8]

### 1.5.3. Energía solar

La energía solar se puede aprovechar transformándola en otros tipos de energía, principalmente en energía eléctrica y luego térmica. Es una energía renovable debido a que no genera emisiones de dióxido de carbono en su producción. Al compararla con otro tipo de energías sus principales ventajas son:

- Energía renovable y por lo tanto, es inagotable
- Baja contaminación y respeto al medioambiente
- Tecnología establecida

#### Recurso solar

La radiación solar es aprovechable en sus componentes directa y difusa, o en la suma de ambas. La radiación directa es, como su nombre indica, aquella que llega a la superficie terrestre directamente sin sufrir reflexiones o refracciones. La difusa, por otro lado, es aquella que atraviesa la atmósfera y es reflejada por la presencia de nubes y otras partículas atmosféricas o absorbida por éstos. La radiación utilizada en los paneles solares es la directa, la cual puede reflejarse y concentrarse para su posterior uso, cosa que no puede lograrse con la componente difusa debido a que ésta proviene de todas las direcciones.



Figura 1.3: Componentes energía solar [29]

Hay que diferenciar entre dos conceptos que a menudo se confunden como son la irradiancia y la irradiación: la primera corresponde a la magnitud que marca la radiación o intensidad de iluminación solar que llega a la tierra como una potencia instantánea por unidad de superficie y se mide en  $[W/m^2]$ ; mientras que la segunda corresponde a la cantidad de irradiancia por unidad de tiempo, o dicho de otra manera, la radiación solar recibida por unidad de tiempo y superficie, se mide en  $[Wh/m^2]$ . en la Figura 1.4 se muestra la radiación en el planeta.

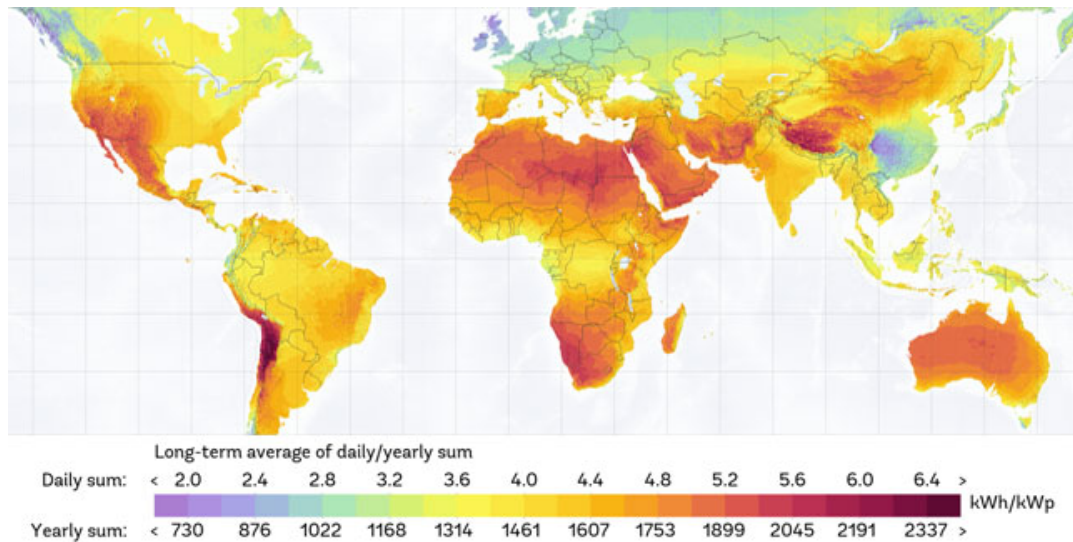


Figura 1.4: Mapa radiación [28]

## Tipos de energía solar

Considerando los diferentes métodos de obtención de electricidad a partir del aprovechamiento de la irradiación solar se puede clasificar la energía solar en diferentes tipos. Cada uno de estos procedimientos difiere en cuanto a la captación y transformación de energía, obteniendo a su vez características y rendimientos específicos en cada caso.

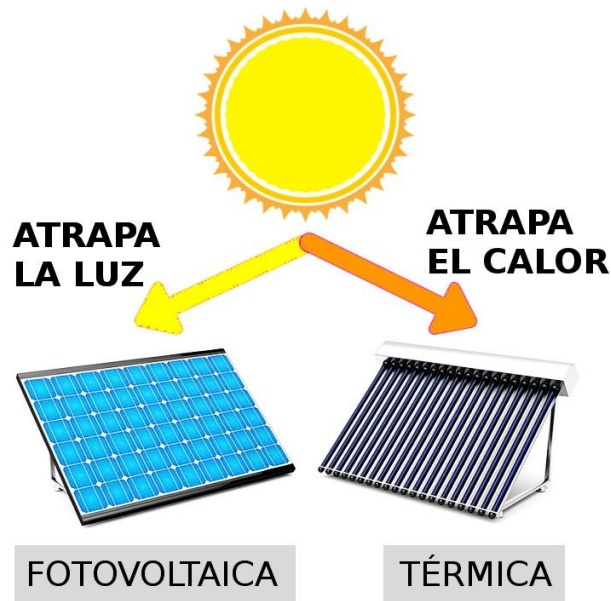


Figura 1.5: Energía solar fotovoltaica y térmica

Los dos tipos de energía solar más utilizados por ser aquellos con mejores resultados son la energía fotovoltaica y la energía solar térmica.

- Energía solar fotovoltaica: consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica. Este tipo de energía, a menudo se la denomina directamente energía fotovoltaica. Esta transformación en energía eléctrica se consigue aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores mediante las células fotovoltaicas.
- Energía solar térmica: es el método que transforma la energía radiada por el Sol en energía térmica mediante el uso de colectores o paneles solares térmicos. El funcionamiento de un colector se basa en la captación de los rayos solares por parte del panel solar, por el cual está circulando agua u otro fluido. Éste será el que absorba el calor recibido del Sol, para posteriormente poderse usar directamente o almacenarse si así se desea.

## Aplicaciones en el ámbito naval

En la actualidad se ha logrado insertar el uso de energía solar en distintas áreas del ámbito naval, tales como buques, plataformas flotantes, sensores marinos y sistemas de señalización marítima. Para el proyecto resulta de gran importancia el primer uso, destacando embarcaciones como SOLEMAR de Seacleaner S.L. en España, MS Turanor de PlanetSolar, y Waste Shark en Holanda.

Solemar es un catamarán de 12 metros de eslora, con capacidad para 60 pasajeros, insubmersible al estar rellenos sus dos cascos de espuma expandida. Alcanza una velocidad máxima de 6 nudos gracias a sus generadores solares con paneles de última generación que les proporcionan una potencia de 4.650 Wp, cuarenta y ocho baterías de 1.000 Ah de capacidad y dos motores eléctricos con 4.600 W de potencia cada uno. Su autonomía es indefinida con sol y hasta 150 horas sin sol.

MS Turanor de PlanetSolar destaca por ser el barco solar más grande del mundo, con una eslora de 31 metros, una manga de 15m, un calado de 1,55 m, una altura de flotación de 6,3 m y un peso muerto de 85 toneladas [12]. Además, ha sido la primera embarcación multicasco en dar la vuelta al mundo utilizando únicamente energía solar, hecho que logró en 2010. La distancia total fue de más de 50.000 kilómetros en 160 días, a una velocidad media de 8 nudos. Si hablamos de datos técnicos, el PlanetSolar es capaz de navegar a una velocidad máxima de 14 nudos, gracias a su generador solar, capaz de producir una potencia máxima de 93,5 kW, en una eficiencia del 18,8 %, incorporando baterías de iones de litio (NCA) de una tensión de 388 V y una capacidad de 2.910 Ah (485 Ah/célula).

La compañía holandesa RanMarine Technology ha desarrollado un dispositivo llamado Waste Shark que, de ser implementado, podría llegar a eliminar hasta 500 kg de basura cada 24 horas. Se trata de un dron marino cuya función es quitar la basura flotante del agua, cuenta con baterías y placas solares integradas. Su boca, que traga los desperdicios, se hunde 30 centímetros bajo el agua, lo que le permite ir recolectando la basura. Además, sus sensores de profundidad, temperatura y calidad de agua lo impulsan a movilizarse con seguridad e informar a las autoridades sobre los detalles del sitio en que se está desplazando [19]. Este dron está diseñado para trabajar de forma completamente autónoma, aunque cuenta con una opción de pilotaje manual. Para evitar que pueda sufrir incidentes con barcos, otros vehículos marinos y la fauna del lugar, cuenta con un sistema de cartografía GIO, gracias al cual este dispositivo no interfiere en la navegación de otras embarcaciones ni en la vida de peces o

aves.

#### 1.5.4. Componentes principales

El sistema de propulsión eléctrico para embarcaciones menores se basa principalmente en la utilización de un motor eléctrico para producir el giro del eje. La energía eléctrica se transporta a bordo mediante baterías, las que proveen electricidad en forma de corriente continua, por lo cual, en caso de utilizarse un motor de corriente alterna será necesario contar con un conversor de corriente continua a corriente alterna. Muchos de estos dispositivos integran además un variador de frecuencia, es decir un control que permite variar la velocidad y sentido de giro del motor. En los motores de corriente continua sólo se requiere variación de voltaje y polaridad para controlar la velocidad y sentido de giro del motor, mientras que el motor de corriente alterna es necesario un variador de frecuencia. Además, se busca generar energía eléctrica a bordo por medio de paneles fotovoltaicos, los cuales son expuestos a la radiación solar con la finalidad de cargar batería con la energía generada.

La figura 1.6 muestra esquemáticamente los elementos que conforman un sistema de propulsión eléctrico a bordo de una embarcación menor.

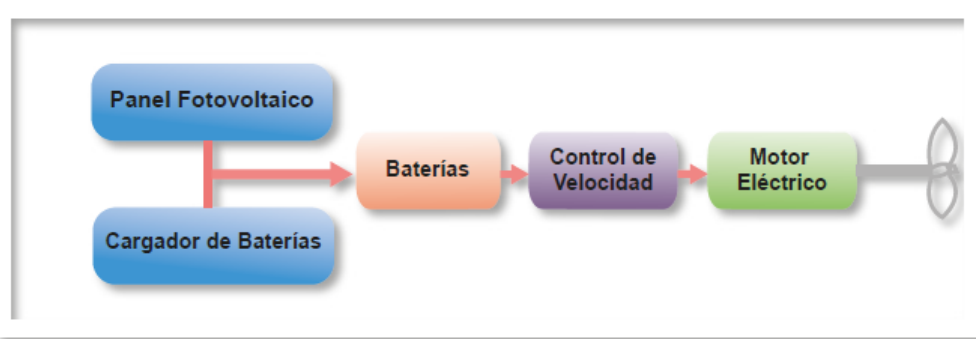


Figura 1.6: Esquema de sistema de propulsión eléctrico [9]

**Paneles fotovoltaicos** Una placa solar fotovoltaica se basa en la unión de varias células iguales, pudiéndose ajustar la corriente y tensión hasta un valor que satisfaga al consumidor. Así, la asociación en serie de células aumenta la tensión final de la placa, mientras que al colocarlas en paralelo la unidad que aumenta es la corriente. Normalmente en el proceso de construcción el primer paso es unir celdas en serie hasta conseguir el voltaje deseado, pasando después a la unión en paralelo para ajustar la corriente.

Los paneles solares tienen entre 28 y 40 celdas, aunque lo normal es que trabajen con 36. La superficie de estos varía entre 0.1 y 0.5  $[m^2]$  con dos bornes de salida (positivo y negativo), que pueden incluir alguna intermedia para los diodos de protección.

Los paneles cuentan además con otros elementos aparte de las celdas, dichos elementos dotan a la placa de mejores características de rigidez y sujeción, protección frente a agentes externos y permitiendo la conexión eléctrica.

Los tres principales tipos de placas fotovoltaicas en la actualidad son los paneles mono-

cristalinos, policristalinos y de capa fina o células amorfas.

Los paneles solares monocristalinos se cortan de un solo cristal de silicio. Son los paneles más eficientes pero a su vez los más caros de producir. Deben estar montados en una estructura rígida para su protección, pese a que son rígidos.

Las ventajas principales de estos paneles residen en sus mayores tasas de eficiencia debido a la alta pureza del silicio, hablando siempre de un valor superior al 15 % llegando y superando a veces el 21 %. La vida de estos paneles es más larga, y sus fabricantes ofrecen con frecuencia garantías de hasta 25 años. En condiciones de poca luz, a su vez, suelen funcionar mejor que los paneles policristalinos similares en características. Por último, pese a que el factor temperatura afecta al rendimiento de estas placas, lo hace en menor medida respecto a las placas policristalinas [2].

Por el contrario, la principal desventaja reside en los altos costes de estos sistemas. Además, el circuito entero puede averiarse si el panel se cubre parcialmente por una sobra o suciedad. Una solución a este problema es la instalación de microinversores solares en vez de inversores en cadena o centrales.

En cuanto a los paneles policristalinos son una reducción de corte de un bloque de silicio compuesto de un gran número de cristales. Montadas también en marcos rígidos, estas placas tienen una eficiencia y coste un poco menor respecto a las anteriores. Esto se debe al uso de un método de fabricación diferente al de los monocristalinos, fundiéndose en este caso el silicio bruto y enfriado en un molde cuadrado, donde posteriormente se corta en láminas perfectamente cuadradas.

La principal ventaja de los paneles policristalinos se encuentra en su precio, mientras que los inconvenientes son una menor resistencia al calor, una eficiencia característica de un 13-16 % y de la necesidad de mayor superficie para obtener los mismos resultados que las placas monocristalinas [2].

Como se ha comentado anteriormente, haciendo un poco de resumen en cuanto a la comparación entre placas fijas monocristalinas y policristalinas encontramos que estas primeras tienen un coste mayor a las segundas, sin embargo tienen un rendimiento un poco más alto, lo que se traduce en una menor superficie de placa para obtener la misma energía solar producida. También son las placas monocristalinas las que tienen mejores propiedades térmicas, aguantando mejor su rendimiento al aumentar la temperatura de estas.

### **Paneles de capa fina o células amorfas**

Finalmente, los paneles amorfos o flexibles las principales ventajas residen en un menor coste debido a su sencillo y barato proceso de fabricación, a su flexibilidad y consecuentemente adaptación a todo tipo de superficies. Además, el rendimiento de estos paneles no se ven afectados tanto por sombras y altas temperaturas, no obstante su producción de electricidad por unidad de superficie puede llegar a ser cuatro veces menor respecto a una placa monocristalina, con rendimientos de 6-8 %, y su rápida degradación.



## Regulador o cargador de baterías

El regulador de carga se encuentra entre la salida de los paneles y la entrada de las baterías, su propósito es controlar la tensión e intensidad con que se están cargando las baterías. De este modo se tiene un buen funcionamiento y se alarga la vida útil de las baterías, protegiéndolas de sobrecargas o descargas muy profundas. Algunos reguladores tienen la función de detectar corrientes inversas, lo que permitiría la eliminación de los diodos de bloqueo.

Existen 2 tipos de reguladores de carga: regulador PWM (Pulse-Width Modulation, modulación por anchura de pulsos) y regulador MPPT (Maximum Power Point Tracking, o seguidor del punto de máxima potencia). Los primeros trabajan reduciendo la potencia de entrada desde los paneles a la batería para que se tenga la misma tensión entre ambos, además corta el paso de energía entre los paneles y las baterías una vez estén cargadas completamente. Suelen tener un menor costo en comparación a los reguladores MPPT, pero es estrictamente necesario que tanto el sistema de paneles como el de baterías tengan el mismo voltaje.

En cuanto a los reguladores del tipo MPPT, además de cortar el paso de energía una vez que las baterías alcanzan su carga completa son capaces de adaptar la tensión de salida de los paneles al de la batería. La principal ventaja es que suelen sacar un mayor rendimiento de los paneles fotovoltaicos, trabajando en el punto de máxima eficiencia.

A la hora de elegir entre un PWM y un MPPT, también está en función de los paneles que vamos a utilizar. Es obligatorio un regulador MPPT si usamos paneles de 60 células o el voltaje del campo fotovoltaico es superior al voltaje del banco de baterías.

## Baterías

Llamamos batería eléctrica, acumulador o simplemente batería al dispositivo que, formado por una o varias celdas electroquímicas, puede convertir la energía química que almacena en electricidad. A diferencia de las pilas, la reacción química que permite su funcionamiento es reversible, lo que permite volver a cargar la batería por medios eléctricos.

Las baterías se caracterizan fundamentalmente por los siguientes aspectos:

- La tensión o voltaje nominal que suministran la cual se mide en voltios [V].
- La capacidad de carga, que determina la intensidad que la batería puede suministrar a lo largo del tiempo a su tensión nominal. Se mide en amperios / hora [Ah].
- La energía, resultado de suministrar una intensidad a una determinada tensión a lo largo del tiempo. Es resultado de conocer la tensión y la capacidad. Se mide en vatios / hora [Wh].
- Factor de autodescarga. Las baterías no mantienen la carga de forma indefinida, sino que la van perdiendo poco a poco. Nos indica el porcentaje de carga que la batería pierde en un tiempo determinado.

Dependiendo de la naturaleza interna de la batería y sus características electroquímicas, podemos distinguir varios tipos de baterías:

- Plomo-ácido: En general son económicas y fáciles de fabricar. No admiten sobrecargas ni descargas profundas y tienen un peso y volumen elevados para la energía que almacenan. Hay esencialmente dos grandes familias de baterías de plomo-ácido.
- Níquel-cadmio: Funcionan bien en un amplio rango de temperaturas y se pueden sobrecargar sin sufrir daños. Admiten descargas profundas y proporcionan un buen número de ciclos, pero acusan mucho el efecto memoria. Su peso y volumen, aunque mejores que los de las baterías de plomo-ácido, siguen siendo elevados para la energía que almacenan.
- Níquel-hidruro metálico: están sustituyendo a las baterías de níquel-cadmio por su menor efecto memoria y mayor capacidad. Sin embargo, el número de ciclos que proporcionan es menor y no trabajan bien con frío extremo, que reduce drásticamente su capacidad.
- Iones de litio: su capacidad es elevada en relación a su peso y volumen, teniendo además un factor de autodescarga muy reducido. Casi no se ven afectadas por el efecto memoria y pueden cargarse sin necesidad de haber sido descargadas previamente. Como contrapartida se consideran no del todo segura, ya que se combustionan debido a estabilidad química y fuga térmica. Además, de su alto costo en comparación a otra tecnologías.

### **1.5.5. Legislación**

#### **Legislación internacional**

La OMI -Organización Marítima Internacional- es el organismo especializado de las Naciones Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y de prevenir la contaminación del mar por los buques.

#### **Legislación nacional**

La Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante, es el organismo de alto nivel de la Armada de Chile que tiene por misión, cautelar el cumplimiento de las leyes y acuerdos internacionales vigentes, para dar seguridad a la navegación, proteger la vida humana en el mar, preservar el medio ambiente acuático, los recursos naturales marinos y fiscalizar las actividades que se desarrollan en el ámbito marítimo de su jurisdicción, con el propósito de contribuir al desarrollo marítimo de la Nación.

La navegación está regida por el Decreto Ley 2222 [7] que sustituye la ley de Navegación anterior, promulgada en 1978 y actualizada en el año 2005. En el cual se habla acerca de las disposiciones generales, del registro y nacionalidad de las naves, de la navegación, de la propiedad y personas que participan en la operación de la nave, orden, disciplina y seguridad, de la reserva naval y de los riesgos de la navegación.

# Capítulo 2

## Metodología

El desarrollo del trabajo se divide en 3 partes principales: recopilación de información y creación de la base de datos, selección de equipos y diseño, y finalmente simulaciones y comparación de los resultados.

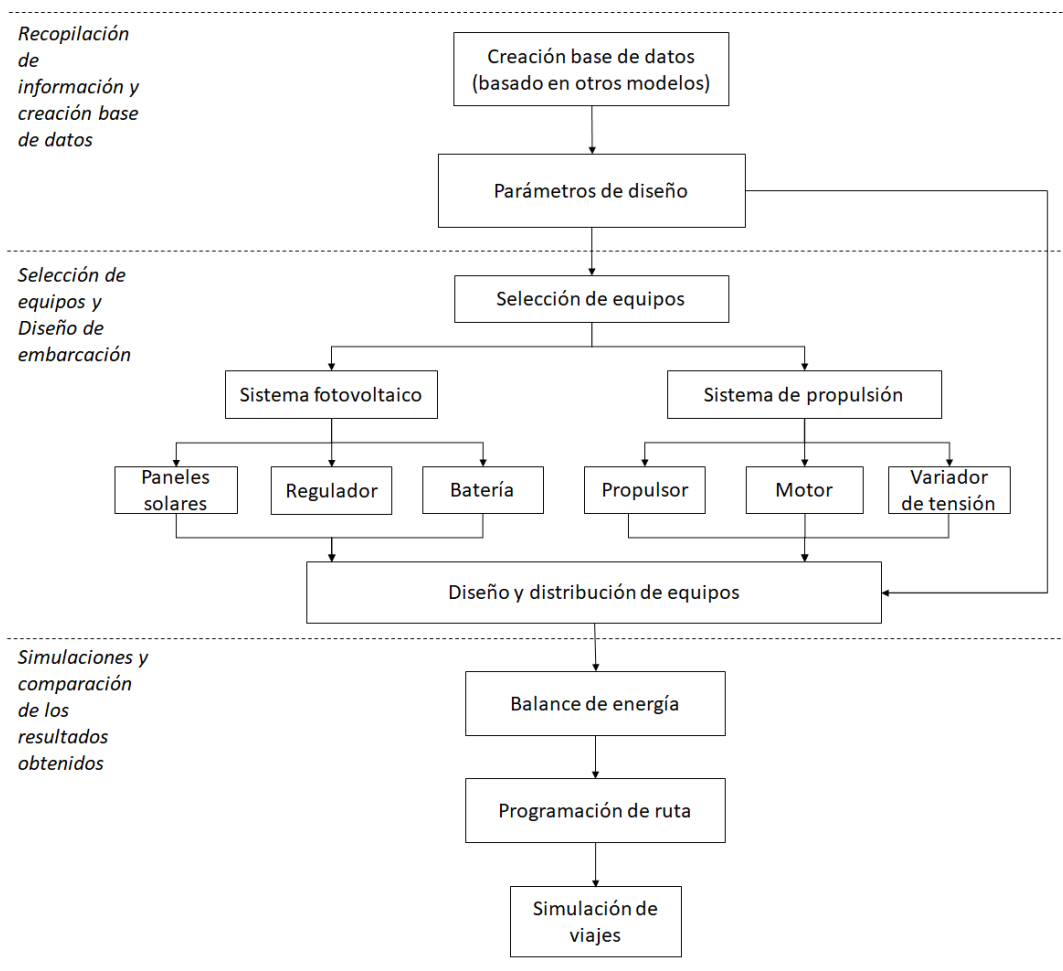


Figura 2.1: Metodología

En primera instancia se realiza una recopilación de información de otras embarcaciones propulsadas por energía solar, luego se crea una base de datos con la información principal de cada barco para graficar relaciones de dimensión y peso con lo que se obtendrán parámetros de diseño.

Luego se seleccionan los equipo principales para el sistema fotovoltaico y el de propulsión, en esta sección se analizan las distintas tecnologías disponibles y se escoge la más adecuada según las condiciones establecidas del proyecto. En el caso del sistema fotovoltaico se seleccionan los paneles solares, regulador y batería; el criterio principal para dicha selección son el espacio y peso de estos. Mientras para el sistema de propulsión primero se escogerá el tipo de tecnología, luego las partes principales del sistema como hélice, motor, variador de frecuencia o tensión y finalmente la conexión del sistema.

Una vez elegidos los equipos principales se procede al diseño de la embarcación a partir del espacio ocupado y distribución de los equipos y los parámetros de diseño obtenidos en la base de datos.

Posteriormente, con las dimensiones determinadas y los equipos seleccionados se procede a realizar el balance de energía de la embarcación con el fin de calcular la velocidad a partir de la radiación. Para ello se analizan las distintas resistencia al movimiento de la nave y la potencia generada por el sistema fotovoltaico según la radiación.

Luego en la programación de ruta lo que se busca es obtener las coordenadas a seguir por la embarcación, una vez que ya se tienen se le enviaran las ordenes vía satélite. Para conseguir dicha ruta se tienen cinco programas, tres de ellos en lenguaje Matlab y dos en Python; además se cuenta con los recursos de Marine Traffic y Pysolar.

Una vez realizados los programas con todos los datos obtenidos, se inicia la etapa de simulación para la cual primero se deben escoger los viajes. Lo que se busca es tener un viaje aproximado de 20 días y otro de duración alrededor de una semana, se evaluarán distintos orígenes y destinos en el programa ruta inicial hasta obtener la duración deseada.

Para finalizar con todos los datos obtenidos se evalúa la factibilidad técnica del proyecto mediante la etapa de simulación, para ello se seleccionan dos viajes de distinta duración y se hacen funcionar los programas, con los resultados obtenidos se grafican las distintas rutas para su posterior análisis.

# Capítulo 3

## Base de datos para el diseño

### 3.1. Recopilación de información

Para obtener una primera estimación de las dimensiones principales de la embarcación se realiza un estudio de diversas embarcaciones existentes propulsadas por energía solar.

Tabla 3.1: Información recopilada

Modelo	Eslora [m]	Manga [m]	Calado [m]	Potencia total paneles [Wp]	Potencia de motor [W]	Desplazamiento [kg]
Solemar	12	4	0,7	4.625	4.800	5.900
Soel Cat 12	11,8	5,8	0,7	8.600	30.000	6.000
The Soelshuttle 14	16	5,36	0,75	-	30.000	7.900
The Soelcruiser 11	10,78	4,3	0,85	-	60.000	5.600
SOL 10	4,06	1,9	-	200	600	420
RA 82	26,5	5,27	0,8	9.600	18.000	34.000
RA 72	22	4,3	0,6	4.200	12.000	29.000
RA 66	20	4,6	0,6	3.800	8.000	12.000
RA 46	14,3	3,5	0,7	2.000	10.000	14.000
RA 33	10	3	0,45	2.100	5.000	4.300
RA 29	8,8	3	0,45	2.100	4.200	2.400
SOL 20	6	2,23	0,5	550	2.000	530
SOL 15	4,65	2	-	260	2.000	530
SOL 12	3,7	1,7	-	200	600	220
Zholar	6,1	2,7	0,5	734	2.600	-
Aquabus 850T	8,5	2,5	0,55	-	8.000	2.000
SeaCleaner 400	4	2	0,4	600	1.600	420
30 ft VIK Boat	10	3,4	0,9	-	25.000	5.000
Solar Aquawatt 550	5,5	1,84	0,4	340	1.200	480
Seacharger	2,3	0,56	-	100	-	22,7
Waste Shark	1,56	1,08	0,45	-	-	39
SunCRZ 9	3,6	1,65	0,3	500	600	210

## 3.2. Parámetros de diseño y dimensiones principales

Con los datos recopilados, mostrados en la Tabla 3.1, se grafican distintas relaciones a continuación para obtener una aproximación de las dimensiones principales y peso total.

### 3.2.1. Manga

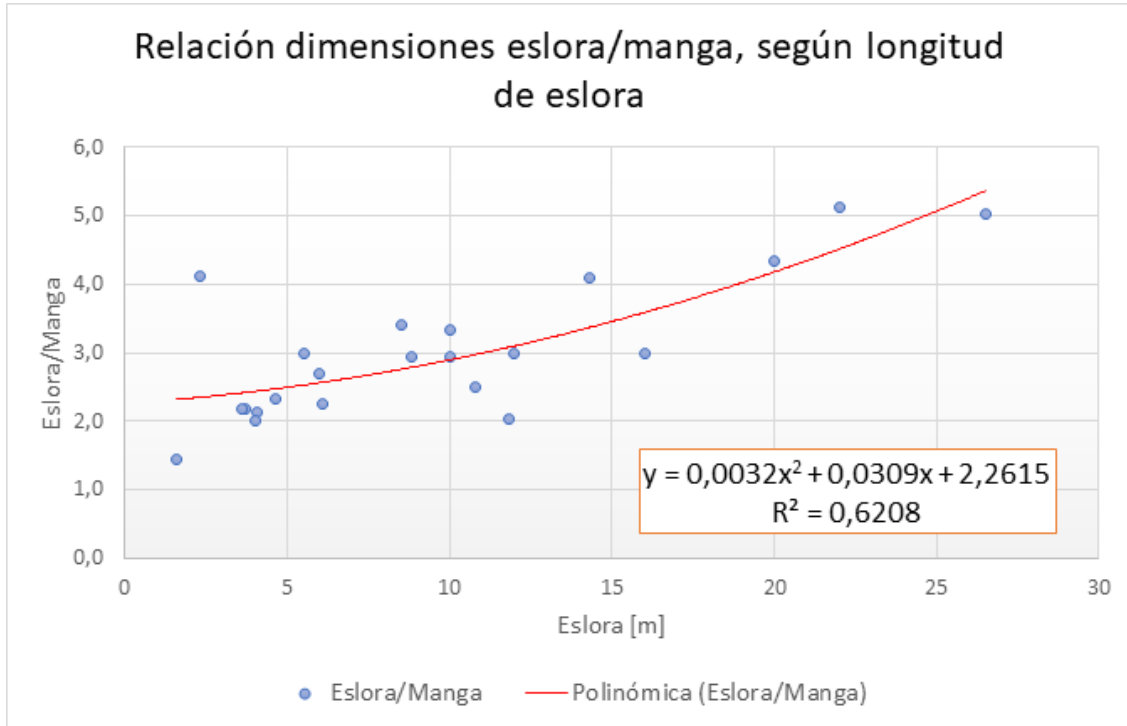


Figura 3.1: Gráfico relación eslora/manga versus eslora

De la Figura 3.1 se puede obtener la regresión que representa la curva de comportamiento de la relación eslora/manga según la longitud de eslora, con lo que a continuación en la Ecuación 3.1 se despeja el valor de la manga para una longitud  $x$  de eslora.

$$manga = \frac{x}{0,0032 \cdot x^2 + 0,0309 \cdot x + 2,2615} [m] \quad (3.1)$$

Según las condiciones del proyecto nombradas anteriormente, se calcula la longitud de manga para distintos largos de eslora dentro del rango que cumple con las condiciones para más adelante escoger un tamaño de eslora definitivo según la configuración de equipos para la embarcación, en la Tabla 3.2 se pueden ver dichos resultados.

Tabla 3.2: Resultados dimensión de manga según eslora

Eslora [m]	Manga [m]
1,1	0,48
1,2	0,52
1,3	0,56
1,4	0,60
1,5	0,65

### 3.2.2. Calado

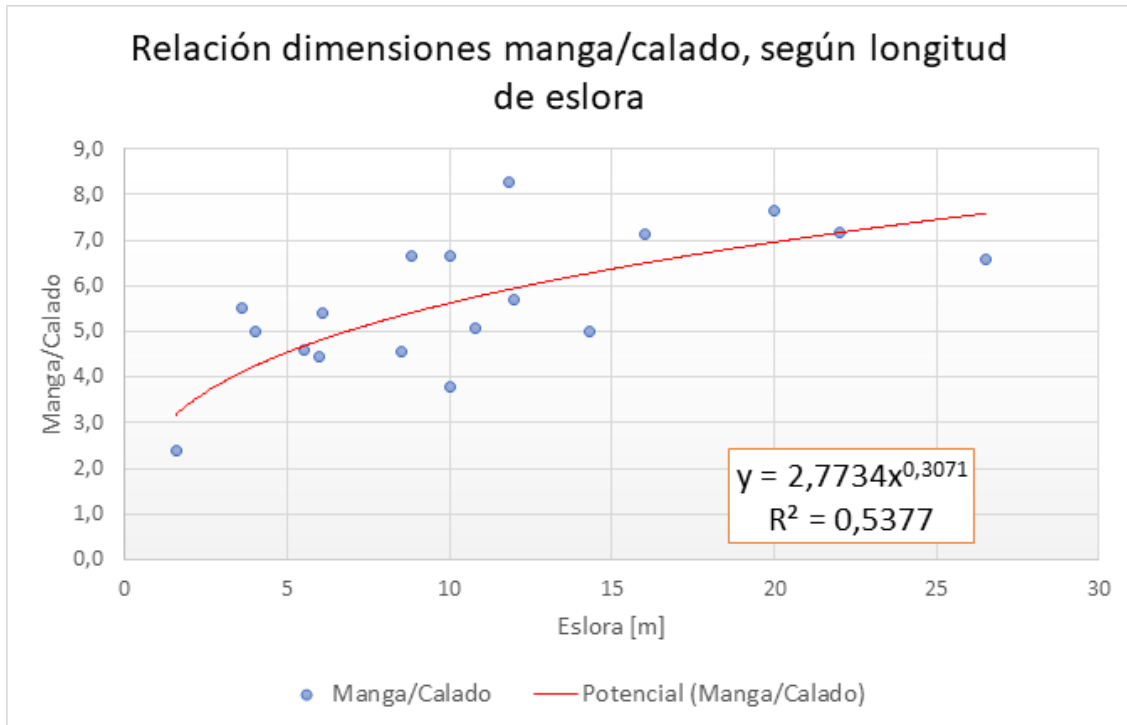


Figura 3.2: Gráfico relación manga/calado versus eslora

Al igual que en la sección anterior, utilizando la base de datos se realiza un gráfico de la relación manga/calado según la longitud de eslora y se obtiene la regresión que representa su comportamiento, con lo que se despeja el tamaño de calado y se obtiene la Ecuación 3.2.

$$calado = \frac{manga}{2,7734 \cdot x^{0,3071}} [m] \quad (3.2)$$

Nuevamente se utiliza distintas longitudes de eslora además de los datos de manga de la Tabla 3.1 calculados anteriormente, para conseguir los distintos tamaños de calado mostrados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Resultados dimensión de calado según eslora y manga

Eslora [m]	Manga [m]	Calado [m]
1,1	0,48	0,17
1,2	0,52	0,18
1,3	0,56	0,19
1,4	0,60	0,20
1,5	0,65	0,21

### 3.2.3. Masa total de la embarcación

Un último parámetro de importancia para los cálculos es la masa total de la embarcación, para ello se repite el proceso anterior tanto para el calado como para la manga, en donde se grafica la información de la base de datos, se busca la regresión que lo representa y finalmente se despeja la variable que buscamos.

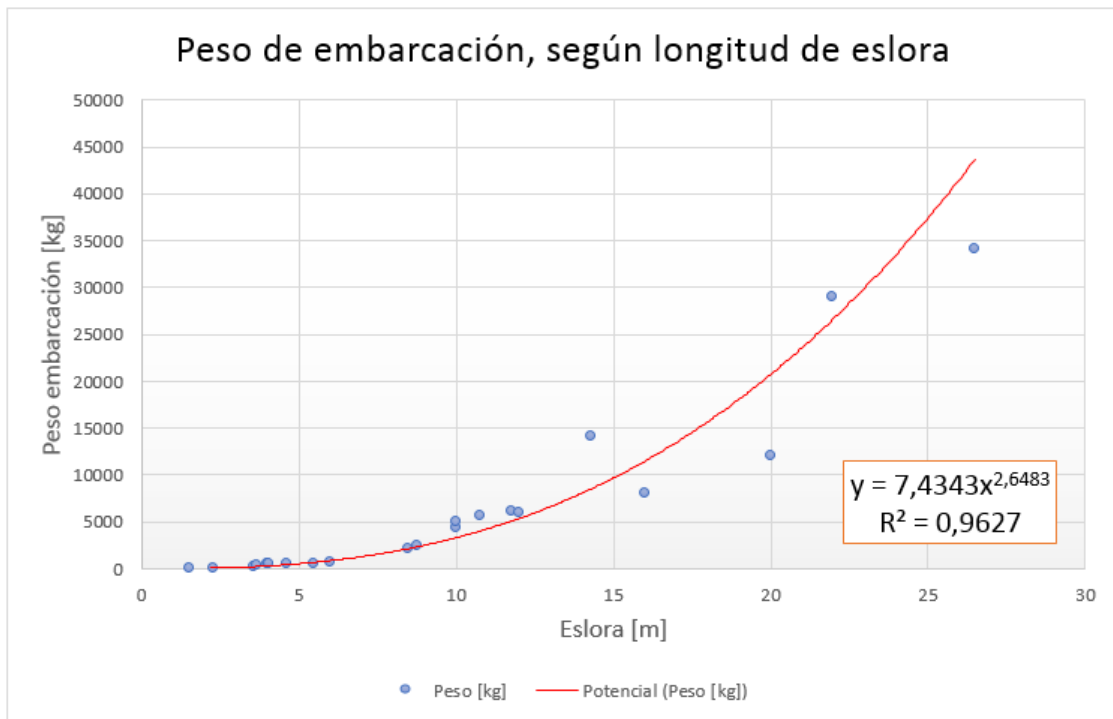


Figura 3.3: Gráfico pesa de embarcación, según longitud de eslora

$$m = 7,4343 \cdot x^{2,6483} [kg] \quad (3.3)$$



Tabla 3.4: Resultados de masa total aproximada según longitud de eslora

Eslora [ $m$ ]	Masa total [ $kg$ ]
1,1	9,57
1,2	12,05
1,3	14,89
1,4	18,12
1,5	21,76

# Capítulo 4

## Selección de equipos

### 4.1. Sistema fotovoltaico

#### 4.1.1. Paneles solares

Uno de los principales componentes del sistema fotovoltaico son los paneles, ya que son los encargados de absorber la radiación solar y convertirla en energía que más tarde se usará en la propulsión de la embarcación.

Se tienen dos principales criterios para la selección de los paneles: el espacio y el peso. Se busca tener la mayor cantidad de energía producida optimizando el espacio disponible dado por las dimensiones principales de la nave, además se busca tener el menor peso posibles para disminuir el arrastre de la embarcación y así aumentar su velocidad.

Como se habló en la sección 1.5.4 los paneles monocristalinos son los que presentan una mayor tasa de eficiencia frente a los otros dos tipos. Sin embargo, son aproximadamente cinco veces mas pesados en comparación a los paneles flexibles, como el peso es uno de los criterios principales para el diseño de la embarcación se opta por este tipo de tecnología.

#### Consideraciones

Un punto importante a considerar son los factores externos o internos que afectan y repercuten directamente en el funcionamiento de la placa. Uno de ellos es la temperatura dada que la exposición prolongada de la placa hace que esta aumente progresivamente su temperatura, afectando directamente a su eficiencia. En el caso de las placas en embarcaciones de recreo este fenómeno se puede controlar en mayor medida que cuando se trata de viviendas, ya que en condiciones de navegación es constante el aire circulante y por tanto la refrigeración de las placas.

Además de la temperatura, se tiene que la radiación incidente sobre la placa varía en función del ángulo del Sol con el horizonte, por lo que en general debe plantearse la colocación de los paneles cambiando su posición con el tiempo durante un mismo día o durante el año dependiendo de la estación. En una embarcación, los cambios constantes de rumbo dificultan la orientación de las placas, siendo el horizontal la manera más habitual y con mejores resultados.

Debido a la sensibilidad de los paneles a la presencia de sombras, produciendo una disminución del voltaje de salida se hace necesario ubicar las placas solares en un lugar de la embarcación en donde se asegure una insolación sin sombras.

Para el calibre del cableado se recomienda sobredimensionarlo, ya que no se desea perder ni una milésima de corriente debido a algún cable subdimensionado. Además, se aconseja el uso de diodos a la salida de los paneles en dirección de la circulación de corriente hacia las baterías, esto con el fin de prevenir que durante la noche haya un flujo de corriente en el sentido opuesto que podría dañar el panel.

### **Selección de paneles fotovoltaicos**

Generalmente, para seleccionar un modelo comercial y calcular el número de paneles es necesario conocer cuál es la energía necesaria diaria que se debe producir. También se deben conocer las condiciones de radiación de cada mes, las condiciones de la instalación y el criterio para dimensionarla.

Sin embargo, como se tendrá una radiación variable debido al cambio de posición de la embarcación lo que se busca es obtener la mayor energía de los paneles, maximizando el número de placas según el espacio disponible.

En la Sección 3.2 se establecieron los principales parámetros de diseño, con distintas opciones para la longitud de eslora. A continuación en la Tabla 4.1 se muestran distintos modelos de paneles flexibles con sus características correspondientes, para determinar la eslora necesaria se multiplica el largo del módulo por la cantidad de estos y se suma un tercio de dicho valor, luego dentro de las opciones de longitud de eslora para la embarcación se escoge la próxima más cercana, con ello además se obtiene además el tamaño de manga y se calcula la potencia nominal total del sistema.

Posteriormente se analizan los resultados según las consideraciones del proyecto, en primer lugar se busca tener más de un panel en caso de la falla de uno pueda seguir funcionando, otra consideración es el tamaño de eslora recomendado ya que se busca que se encuentre dentro del rango mencionado anteriormente. Continuando hacia la derecha en la Tabla 4.1 se analiza el tamaño de manga y se verifica que sea mayor al ancho del módulo, finalmente en la columna de potencia nominal total del sistema se busca los valores mayores que cumplan con las condiciones ya mencionadas para las columnas anteriores.

Tabla 4.1: Base datos paneles fotovoltaicos

<b>Empresa</b>	<b>Modelo</b>	<b>Largo [mm]</b>	<b>Ancho [mm]</b>	<b>Número de paneles</b>	<b>Eslora [m]</b>	<b>Manga [m]</b>	<b>Potencia total [W]</b>
AutoSolar	FLX20SP-M	530	310	2	1,5	0,65	40
	FLX35SP-M	560	445	2	1,5	0,65	70
	FLX50SP-M	560	580	2	1,5	0,65	100
	BSP100MF	940	670	1	1,3	0,56	100
	FLX150SP-M	1460	540	1	2,0	-	150
TechnoSun	Flex018w12v	434	277	2	1,2	0,52	36
	Flex025w12v	626	277	1	0,9	-	25
	Flex050w12v	545	535	2	1,5	0,65	100
	Flex060w12v	725	535	1	1,0	-	60
	Flex060w24v	725	535	1	1,0	-	60
	Flex100w12v	1050	540	1	1,4	0,6	100
	Flex120w12v	1305	540	1	1,8	-	120
		460	290	2	1,3	0,56	40

En la Tabla 4.2 se muestran en mayor detalle las características de los módulos fotovoltaicos viables según el proceso de clasificación descrito anteriormente, el primero es el modelo FLX50SP-M de la empresa AutoSolar y el segundo corresponde al modelo FLEflex050w12v de la empresa TechnoSun, ambos modelos son muy similares ya que requieren del mismo tamaño de eslora y reúnen una potencia nominal total de 100 [W].

Tabla 4.2: Base datos paneles fotovoltaicos viables

<b>Empresa</b>	<b>Potencia [W]</b>	<b>IMP [A]</b>	<b>ISC [A]</b>	<b>VMP [V]</b>	<b>VOC [V]</b>	<b>Eficiencia PV [%]</b>	<b>Peso total [kg]</b>
AutoSolar	50	2,84	3,07	17,06	21,00	19,60	2,80
Techno Sun	50	2,84	3,05	17,60	21,20	21,50	1,40

Según lo mostrado, la configuración óptima se encuentra utilizando dos módulos PV del modelo FLEX050W12V perteneciente a la empresa TechnoSun, ya que posee una mayor eficiencia que la opción de la empresa AutoSolar y tiene un menor peso total de los módulos.

La gama de paneles Flex son módulos solares flexibles de alta eficiencia con la célula de más alta eficiencia del mercado (Sunpower), tienen rendimientos de hasta el 20 % o más altos, que permiten una generación de energía hasta 25-30 % mayor que los módulos fotovoltaicos convencionales del mismo tamaño. A continuación en la Figura 4.1 se muestran las dimensiones del modelo seleccionado.

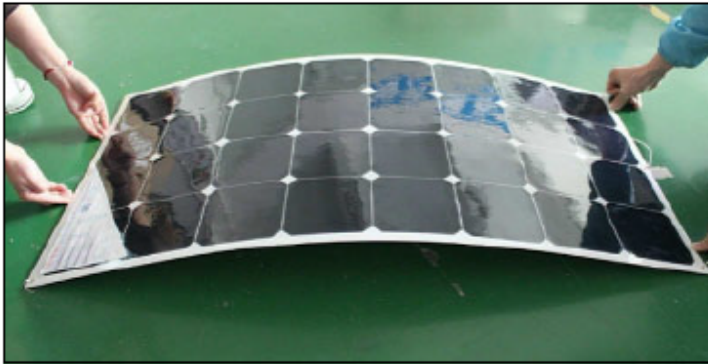
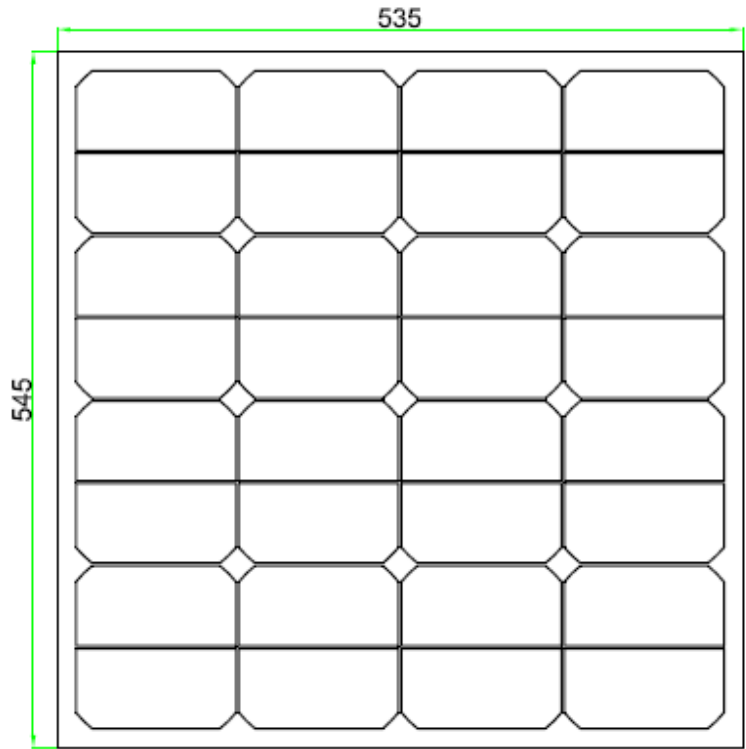


Figura 4.1: Dimensiones panel solar FLEX050W12V

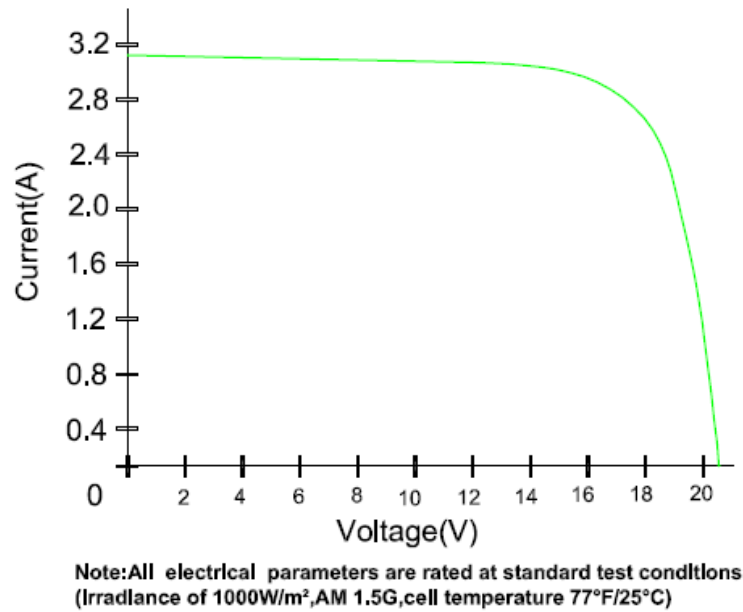


Figura 4.2: Comportamiento corriente según voltaje, panel solar FLEX050W12V

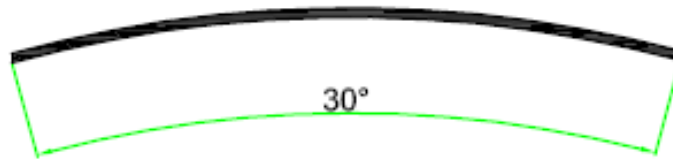


Figura 4.3: Máxima curvatura recomendada para panel solar FLEX050W12V

### Conexión de placas solares

Una vez elegida la tecnología y la configuración de los paneles, se requiere escoger la configuración del sistema: en serie, paralelo o una configuración de ambos, sin embargo para este caso como se trata de solo dos paneles no se puede tener una combinación.

Cuando los paneles son conectados en serie se suma la tensión y se mantiene la intensidad de corriente de estos, así se pueden seguir conectando paneles hasta obtener el voltaje deseado pero no aumenta su capacidad de generar corriente. Se debe saber que existe un límite de paneles que se puedan conectar y queda determinado por la tensión que admite el regulador conectado a la salida de los paneles.

A continuación en la Figura 4.4 se muestra un ejemplo de este tipo de conexión en donde si colocamos 3 paneles en serie la tensión de cada panel se multiplicará por 3 y la intensidad se mantendrá igual.

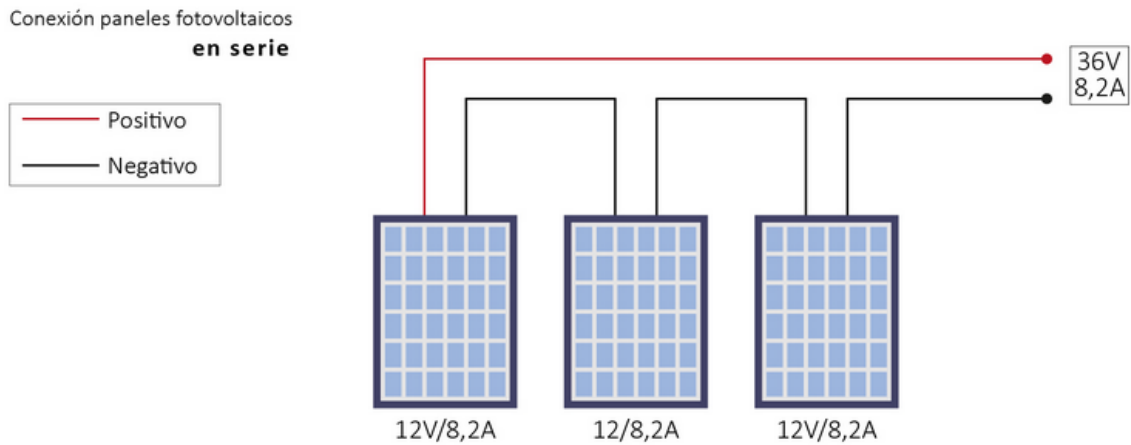


Figura 4.4: Conexión paneles fotovoltaicos en serie [1]

La conexión en paralelo, por el contrario, aumenta la intensidad de corriente, manteniendo la tensión. Se suma la intensidad de corriente de cada panel para obtener la intensidad total del sistema. Al igual que en el caso anterior el límite de la cantidad de paneles a conectar queda determinado por el máximo de corriente que el regulador pueda admitir.

En la Figura 4.5 se muestra un ejemplo de la conexión en paralelo en que si colocamos 3 paneles en paralelo la intensidad de cada panel se multiplicará por 3 y la tensión se mantendrá igual.

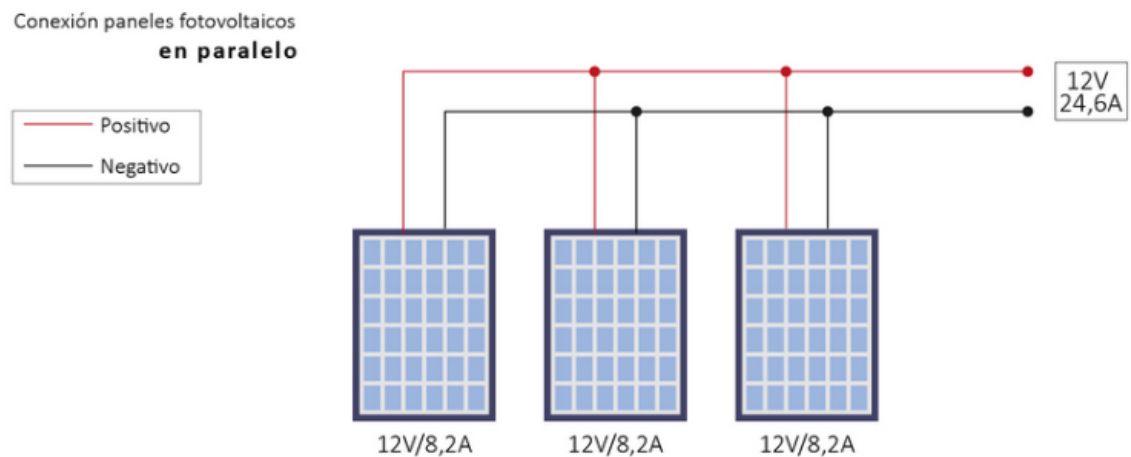


Figura 4.5: Conexión paneles fotovoltaicos en paralelo [1]

Como se dijo anteriormente el principal motivo de tener más de un panel es la seguridad en caso que uno falle, por lo que se prefiere tener una conexión en paralelo ya que si estuvieran en serie y un panel fallara, dejaría de funcionar la red completa. Otra ventaja de escoger una configuración en paralelo es la tensión de trabajo continua, facilitando la elección de los demás equipos del sistema fotovoltaico. Luego en la Figura 4.6 se muestra la distribución y conexión de los paneles con sus respectivas medidas principales.

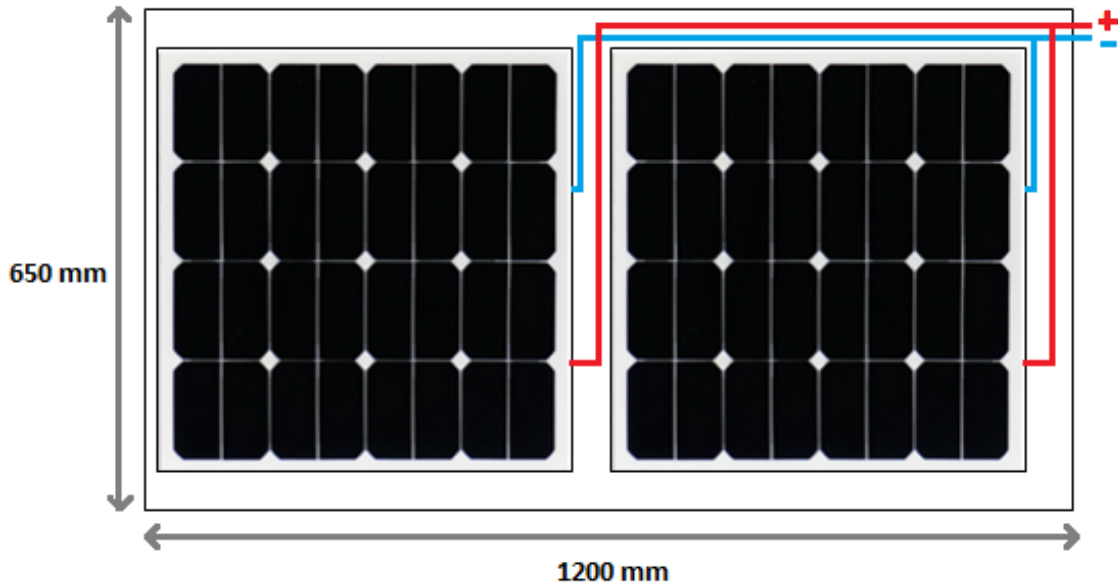


Figura 4.6: Configuración seleccionada de paneles solares

## 4.1.2. Regulador

### Cálculo del regulador solar

Para seleccionar el regulador de carga a utilizar, primero se debe calcular la cantidad de amperios necesarios para el sistema fotovoltaico que se tiene. Para ello primero se calcula la potencia total del sistema de paneles, como se muestra en la Ecuación 4.1 a continuación.

$$P_{tot} = N_{FV} \cdot P_{FV} \quad (4.1)$$

Donde,

$P_{tot}$ : potencia total del sistema PV [Wp]

$N_{FV}$ : número de paneles fotovoltaicos

$P_{FV}$ : potencia del panel fotovoltaico [Wp]

Reemplazando en 4.1:

$$P_{tot} = 2 \cdot 50 = 100 [Wp]$$

Una vez ya calculada la potencia total del conjunto de paneles se divide por la tensión de las baterías a utilizar.

$$I_{max} = \frac{P_{tot}}{V_{bat}} \quad (4.2)$$

Donde,

$I_{max}$ : corriente máxima del sistema [A]



$V_{bat}$ : voltaje de las baterías [V]

Si bien aún no se escoge el modelo de batería a utilizar, por simplicidad se espera que tenga igual tensión de trabajo que los paneles.

$$I_{max} = \frac{100}{12} = 8,33 \text{ [A]}$$

Según lo anterior, se requerirá un regulador solar MPPT de por lo menos 8,33 amperios.

### Selección regulador solar y configuración paneles

Una vez conocemos que necesitamos un regulador superior a 8,33 amperios, consultamos la ficha técnica para ver la máxima tensión máxima de circuito abierto FV permitida. Normalmente será 100V o 150V. Esta tensión no puede sobrepasarse bajo ningún concepto.

Para la selección del controlador de carga, se utilizan los datos obtenidos del sistema PV y la tabla de la ficha técnica, mostrada en la Sección A.2. Según lo anterior se requiere una corriente de carga nominal superior a los 8,33 [A] y una potencia superior a 100 [W] para una tensión de trabajo de 12 [V], luego se selecciona el modelo MPPT 75/10.



Figura 4.7: Controlador de carga solar MPPT 75/10

Tabla 4.3: Especificaciones controlador de carga solar MPPT 75/10

Propiedad	Valor	Unidad
Tensión de la batería	12/24	[V]
Corriente de carga nominal	10	[A]
Potencia FV máxima, 12 V	135	[W]
Tensión máxima circuito abierto	75	[V]
Eficiencia máxima	98	[%]
Autoconsumo	10	[mA]
Alto	100	[mm]
Ancho	113	[mm]
Largo	40	[mm]
Peso	0,5	[kg]

### 4.1.3. Batería

Una opción usada ampliamente en embarcaciones son las baterías Absorbent Glass Mat (AGM) en donde el ácido sulfúrico de cada vaso es absorbido por una capa muy delgada de fibra de vidrio comprimida con el aspecto de un fieltro, que asegura los problemas frente a posibles derrames de ácido en caso de rotura. Por esta razón las baterías AGM pueden ser transportadas de forma mucho más segura y sin restricciones por peligrosidad. Además, son capaces de entregar el amperaje solicitado durante el tiempo previsto y duran muchos ciclos de carga-descarga.

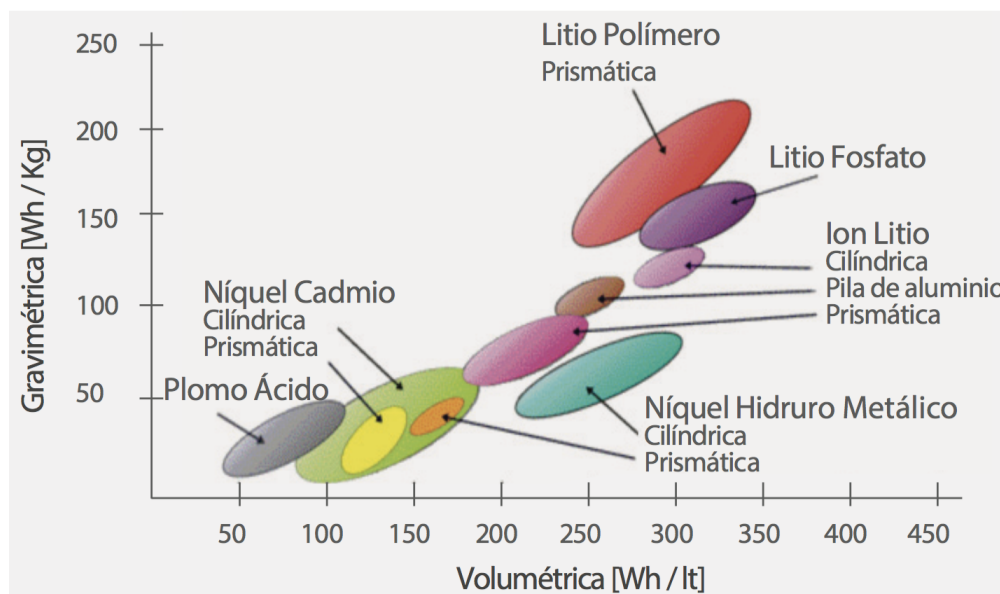


Figura 4.8: Comparación de la densidad energética volumétrica y de peso de algunas tecnologías de baterías [27]

Si bien la batería de tecnología AGM son más ligeras que las baterías de ácido-plomo normales, para los requerimientos de la embarcación se tienen baterías por sobre los 20 [kg] en tecnología AGM por lo que se procede a buscar nuevas tecnologías. En el gráfico de la

Figura 4.8 se muestra la comparación de las densidades energéticas entre distintos tipos de tecnologías.

Se tiene que las baterías de plomo-ácido convencional son las que presentan una menor cantidad de energía tanto por peso como por volumen en comparación con el resto, por lo cual para tener la misma capacidad de reserva de energía se tendrá una batería más grande y pesada; mientras en el otro extremo se tiene que las baterías de litio polímero son las más livianas y las de litio fosfato presentan el menor tamaño.

Todos los tipos de baterías tienen una cosa en común: el voltaje en sus terminales disminuye o aumenta según su nivel de carga. El voltaje será más alto cuando la batería esté completamente cargada y más bajo cuando esté vacía. Esta relación entre voltaje y estado de carga (SOC) depende directamente de la tecnología de batería utilizada.

Si se observa el gráfico de la Figura 4.9 se tiene que en las baterías convencionales de plomo-ácido tienen una curva aproximadamente lineal en donde el voltaje disminuye lentamente a medida que la batería se descarga. Por otra parte, las baterías de iones de litio tienen una curva de descarga mucho más plana manteniendo su voltaje completo casi hasta el final, lo que significa que en un amplio rango operativo, el voltaje en los terminales de la batería cambia ligeramente.

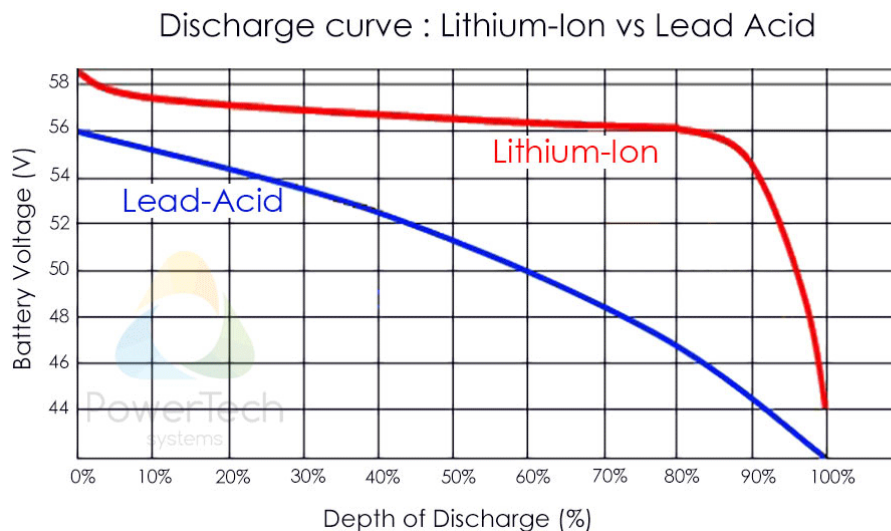


Figura 4.9: Comparación curva de descarga entre batería ion-litio y plomo-ácido [15]

Una de las condiciones a considerar en el funcionamiento de la embarcación son los cambios de temperatura que puedan tenerse, lo cual afecta a la capacidad de las baterías. En el gráfico mostrado en la Figura 4.10 se ven los resultados para la capacidad de la tecnología litio y AGM a distintas temperaturas. Ambas tecnologías pierden capacidad en ambientes fríos, para temperaturas bajo 0°C la capacidad de las baterías de plomo-ácido decae considerablemente mientras que para las de ión-litio baja en menor cantidad.

Además, el ratio de descarga afecta al rendimiento de las baterías de plomo ácido. A -20°C,

una batería de litio que entrega una corriente 1C, puede entregar más del 80 % de su energía cuando la batería de plomo ácido entregará un 30 % de su capacidad.

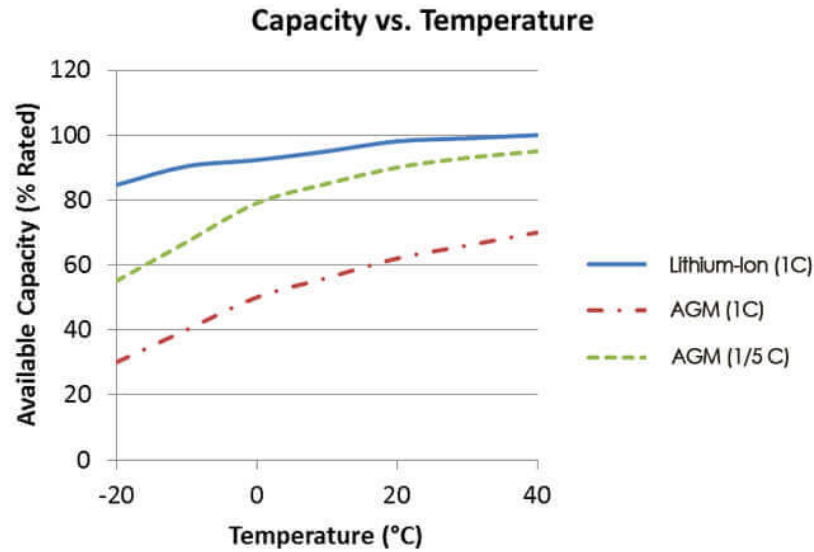


Figura 4.10: Gráfico capacidad según temperatura para tecnología ion-litio y AGM [24]

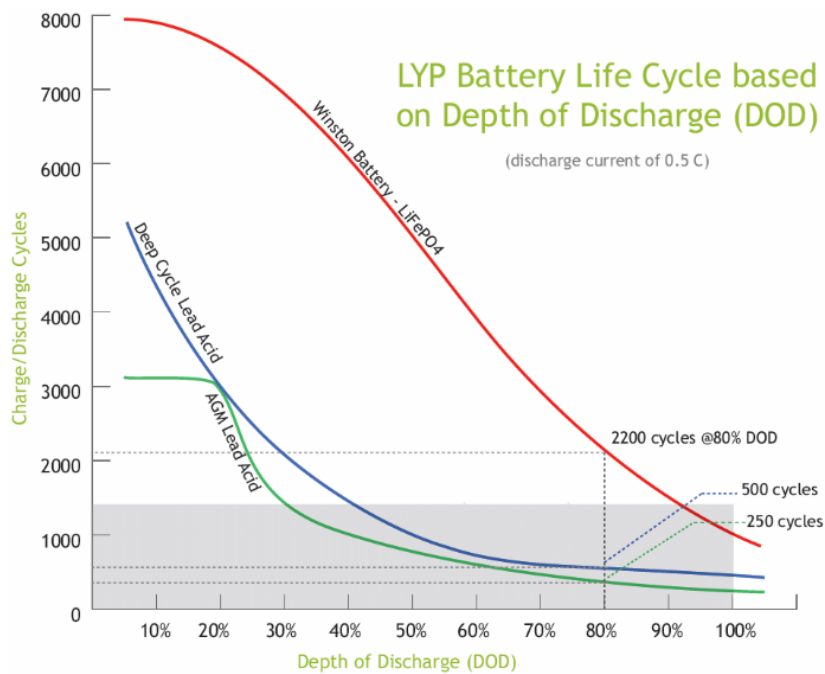


Figura 4.11: Gráfico capacidad según temperatura para tecnología ion-litio y AGM [13]

Otro factor a considerar antes de elegir el tipo de tecnología a utilizar es la vida útil en descarga profunda, debido a la alta demanda de uso que esta tendrá. En el gráfico de la Figura 4.11 se muestra la estimación del ciclo de vida basada en la profundidad de descarga, las baterías litio (en específico LiFePo4) tienen una vida útil 4 veces más larga que las baterías de plomo y ácido de ciclo profundo en aplicaciones de descarga profunda (unos 500 ciclos

frente a 2200 ciclos). La ventaja de la vida aumenta a 10 veces en comparación con las baterías AGM (unos 250 ciclos frente a 2200 ciclos).

Finalmente con todo lo expuesto anteriormente, las baterías de litio son la mejor opción ya que mostraron ser superiores a otras tecnologías en cuanto a requerimientos de densidad energética, a la variación de voltaje en descarga, comportamiento de su capacidad en ambientes duros (calor y frío) y duración de su vida útil para descargas profundas (80 %).

## **Baterías de Litio**

Los cuatro componentes principales de una batería ion-litio son el cátodo, ánodo, electrolito y el separador. Generalmente, las baterías de ion de litio producen un voltaje de celda promedio de alrededor 3.7 [V] y operan con un principio simple de intercambio de iones de litio entre el cátodo y ánodo.

Según el material que se encuentra en el cátodo, existen tres tipos principales de baterías ion-litio, son el óxido de cobalto, óxido de manganeso y fosfato de hierro. El material más usado comúnmente para el cátodo es el óxido de cobalto-litio ( $\text{LiCoO}_2$ ) y alguna forma de carbono generalmente es usado para el ánodo.

La batería de óxido de cobalto-litio tiene la ventaja de su alta densidad de energía, pero acarrea graves problemas de seguridad. La batería de litio-óxido de manganeso es la de mayor utilización por sus características y seguridad pero su mal rendimiento a altas temperaturas es su mayor inconveniente mientras que las de litio-fosfato de hierro tiene las mejores características de seguridad, ciclo de vida largo (mas de 2000 ciclos) y una buena disponibilidad.

## **Seguridad: Estabilidad química y fuga térmica**

Como se mencionó en la anteriormente en la Sección 1.5.4, una de las principales desventajas de las baterías de ion-litio son la inestabilidad química y fuga térmica. Esto se vuelve relevante ya que al tratarse una una embarcación autómata el operador no estará cerca físicamente a la nave para impedir que sufra algún daño mayor.

En baterías de ion-litio estos incidentes de auto combustión ocurren debido a sobrecarga, cortocircuito o abuso que genera calor y libera oxígeno que alimenta aún más el fuego. Este proceso cíclico extremadamente peligroso se conoce como fugas térmicas y, una vez iniciado, puede ser muy difícil de detener. Sin embargo, en el caso de las baterías de litio-fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ) los átomos de oxígeno comparten electrones en enlaces covalentes muy fuertes, por lo que es menos probable que el compuesto se vuelva inestable, libere energía en forma de calor y se incendie [23].

Por lo expuesto anteriormente, la batería  $\text{LiFePO}_4$  es más segura y químicamente estable de las que hay en el mercado de consumo y se adecua mejor a los requerimientos del proyecto.

## Comparación de costos

Otra de las desventajas a considerar es el costo de la batería, en particular las baterías de ion-litio LiFePO<sub>4</sub> al ser una tecnología relativamente reciente poseen un costo más elevado. A continuación en la Tabla 4.4 se presentan los resultados de un cálculo simple que compara el costo de una batería LiFePO<sub>4</sub> en comparación con tres tecnologías competidoras de plomo-ácido, considerando su vida útil y costo de inversión.

La comparación se realiza entre la batería de fosfato de litio-hierro RB100 de RELiON y tres tecnologías de baterías de plomo-ácido de tamaño equivalente (BCI Group 31); ácido de plomo flotante o inundado (FLA), alfombrilla de vidrio absorbente (AGM) y gel.

En el cálculo se asume una profundidad de descarga (DOD) del 80 % ya que se espera tener descargas profundas de las baterías, del gráfico de la Figura 4.11 se obtienen la vida útil para dicha profundidad.

Tabla 4.4: Comparación costos según ciclo de vida para distintas tecnologías [25]

Tipo de batería	Costo de mercado por unidad [USD]	Vida útil estimada [ciclos]	Costo por ciclo [USD/ciclo] [USD/ciclo]
Plomo-ácido FLA	185	315	0.59
Plomo-ácido AGM	270	250	1,10
Plomo-ácido gel	400	500	0,80
LiFePO <sub>4</sub>	1050	2200	0,48

Se observa que si bien el costo de inversión de la batería LiFePO<sub>4</sub> es considerablemente alto en comparación a otras tecnologías, su costo por ciclo es mucho menor y solo comparables con las de plomo-ácido FLA, sin embargo estas últimas no se utilizan en embarcaciones por tema de seguridad.

## Responsabilidad ambiental

Ya que una de las motivaciones del proyecto es reducir la contaminación de las embarcaciones, se busca que los materiales y equipos sean amigables con el medio ambiente. Las baterías LiFePO<sub>4</sub> a diferencia de otras baterías, no contienen metales pesados o productos químicos tóxicos y, en general, son mucho más "limpias" que sus antepasados [23].

No obstante, aunque el contenido de las baterías de LiFePO<sub>4</sub> del producto terminado es muy limpio según los estándares de la batería, el proceso para fabricarlas requiere una gran cantidad de ácidos tóxicos y elementos contaminantes. Aún así, si se considera que todas las demás tecnologías de baterías también implican un proceso de fabricación ambientalmente cuestionable, se siguen considerando más limpias las de tecnología LiFePO<sub>4</sub>.

## Selección de baterías

Para la selección de baterías primero se buscan posibles candidatos en el mercado que pertenezcan a la tecnología seleccionada y tengan un voltaje de trabajo igual al del regulador de carga. En la Tabla 4.5 se muestran las características principales de las baterías encontradas.

En la columna de la izquierda se tiene la empresa a la que pertenece la batería, luego se tienen las dimensiones que mas adelante servirán para calcular el volumen ocupado ya que un criterio importante de selección es el espacio utilizado por estas; ya continuando hacia la derecha se puede observar la cantidad de baterías que se puede tener el cual se busca sea superior a uno en caso que de se presente alguna falla se encuentre otra de respaldo, para calcular este número se limita el peso máximo del sistema a 3,5 [kg] y se divide en el peso de cada batería, luego se calcula la energía que puede guardar el sistema de baterías mediante la Ecuación 4.3 [22]. Finalmente se muestran el de peso y volumen total que se busca obtener el mínimo valor posible.

$$E_{batt} = \frac{V_{batt} \cdot C_{batt} \cdot x_2}{1000 \cdot \nu_d} \quad (4.3)$$

Donde,

$E_{batt}$ : energía de la batería [kWh]

$V_{batt}$ : voltaje de la batería [Volt]

$C_{batt}$ : capacidad de la batería [Ah]

$x_2$ : cantidad de baterías

$\nu_d$ : eficiencia de descarga = 96 %

Tabla 4.5: Base de datos baterías

Empresa	Largo [mm]	Ancho [mm]	Grueso [mm]	Cantidad baterías	Energía [kWh]	Peso total [kg]	Volumen total [cm3]
TechnoSun	181	167	77	1	0,213	2,80	2327,5
	181	167	77	1	0,240	2,93	2327,5
	181	167	77	1	0,267	3,12	2327,5
PowerTech	151	92	65	3	0,300	3,24	2708,9
	151	98	91	2	0,320	3,10	2693,2
	180	168	76	1	0,267	2,80	2298,2
	180	168	76	1	0,400	3,44	2298,2
Probattery	107	89	69	4	0,240	3,40	2628,3
	151	99	65	2	0,200	2,60	1943,4
	151	101	98	1	0,160	1,90	1494,6
	181,5	167,5	77	1	0,240	2,70	2340,9
	181,5	167,5	77	1	0,267	3,00	2340,9

Luego, analizando los resultados obtenidos el primer filtro es el número de baterías que sea mayor a uno con lo que quedan cuatros opciones del sistema, dentro de dichas opciones

se selecciona el que tenga mayor energía de almacenamiento correspondiente a la empresa PowerTech con  $0,320 [kWh]$ , quien además posee el segundo menor valor para el peso con  $3,10 [kg]$ . A continuación en las Figuras 4.12 y 4.13 se muestra la batería seleccionada y sus dimensiones.



Figura 4.12: Batería Power Brick 12v Lithium-Ion battery pack

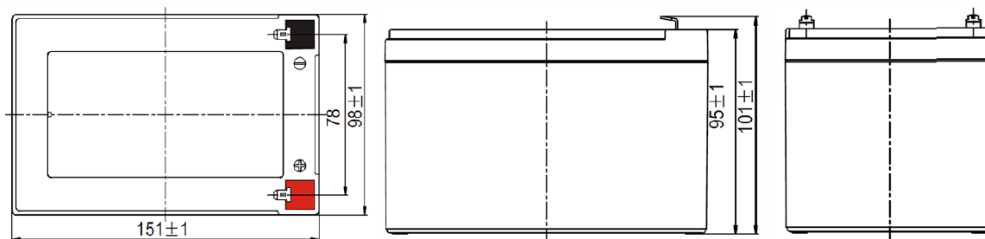


Figura 4.13: Dimensiones batería Power Brick 12v Lithium-Ion battery pack

### Conexión de las baterías

Es muy importante destacar que las baterías se pueden acoplar en serie o paralelo según necesitamos una mayor tensión o capacidad que las ofrecidas por baterías estándar, al igual que con los módulos fotovoltaicos se opta por una conexión en paralelo para poder seguir funcionando aún cuando se presente un defecto en alguna de ellas, en la Figura 4.14 se muestra la conexión entre las baterías seleccionadas.

En cualquier composición de baterías es muy importante tener en cuentas las siguientes consideraciones:

- Todas las baterías usadas deberían ser similares en capacidad , tensión, modelo , tamaño tipo y antigüedad (a ser posible todas nuevas)
- Las conexiones deben ser lo mas cortas posibles y de parecidas dimensiones entre todas las conexiones para asegurar que no haya asimetrías
- Debe mantenerse igualdad de longitud de cables
- Para la unión de cables se deben usar bornas o terminales ,las cuales deben usarse especificas para uso marino por el problema de la humedad



- Las conexiones centrales deben apoyarse en regletas de conexiones dimensionadas para la corriente que van a soportar
- Es muy conveniente un interruptor general de corte cerca de estas
- Es muy interesante también usar con desconectores rápidos que ante una emergencia nos permitan aislar una sección de baterías



Figura 4.14: Conexión en paralelo, sistema de baterías

## 4.2. Sistema de propulsión

Tenemos dos posibles opciones para el sistema de propulsión de la embarcación, en primera instancia un conjunto de timón y hélice, o como segunda opción un sistema de propulsión orientable.

El funcionamiento de las hélices convencionales es más sencillo e intuitivo. Para ello hay que distinguir dos conceptos en las palas de una hélice: cara pasiva y cara activa. La cara pasiva es la que recibe el flujo de agua cuando el barco está en movimiento y la cara activa es la que lo empuja mediante la rotación de la hélice, creando el movimiento de propulsión que hace avanzar la embarcación.

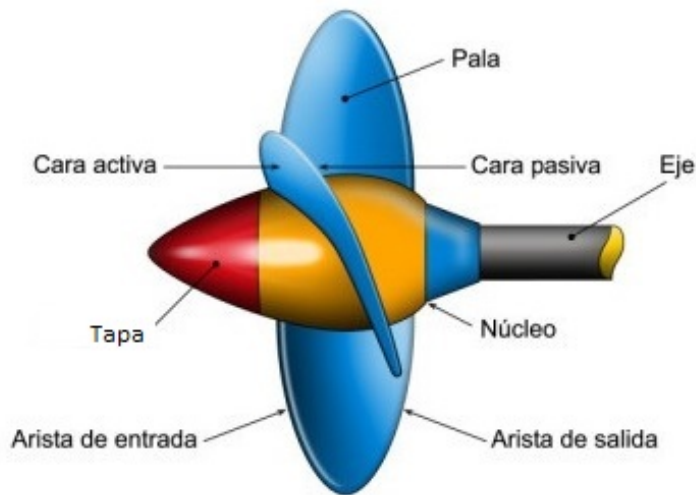


Figura 4.15: Partes de una hélice para barco [20]

En cambio, en un sistema de propulsión por chorro de agua la nave avanza gracias a expulsar dicho chorro que sale por el extremo posterior de la turbina. Primero se absorbe el agua por una entrada ubicada en la parte inferior del casco, luego es acelerada por medio de un impulsor para ser expulsada por una tobera que disminuye la sección de salida del chorro, aumentando la presión y en efecto, su velocidad.

El sistema de gobierno de este tipo de propulsión, a diferencia del conjunto hélice y timón, se consigue gracias a que la tobera es orientable pudiendo dirigir el chorro de salida y así cambiar la dirección de empuje haciendo que la embarcación gire. Además, cuenta con un codo tras la tobera que al bajarlo se invierte la dirección del flujo de salida, dirigiéndolo hacia delante.

Dependiendo de la velocidad a la que navega la embarcación será más recomendable un sistema de propulsión en vez de otro, generalmente la propulsión por hélice y timón es considerada más liviana, simple y eficiente por lo cual su uso es más popular. Sin embargo, para vehículos de mayor velocidad se hace más eficiente el uso de propulsión por chorro de agua.

De acuerdo al punto anterior y considerando que la embarcación a diseñar no busca alcanzar velocidades mayores, la opción más apropiada sería un sistema de propulsión mediante hélice; no obstante, una de las principales ventajas de la propulsión por chorro de agua frente a las hélices es que cuenta con una gran capacidad de maniobrabilidad, propiedad de interés debido a que se trata de un vehículo no tripulado.

Además, se debe considerar la instalación de más de un sistema de propulsión, bajo la condición que sean del mismo tipo, en paralelo en caso de que alguno deje de funcionar puesto que una vez iniciado el viaje la nave se encontrará a la deriva, siendo de difícil acceso para mantenciones.

Finalmente, considerandos lo expuesto anteriormente se opta en un sistema de propulsión por chorro de agua o waterjet, con una configuración de dos en paralelo.

### 4.2.1. Propulsión por chorro de agua

Como se ve en la Figura 4.16, la propulsión por chorro de agua posee tres componentes principales: un conducto de entrada o aspiración, una bomba o impulsor, y un conducto o tobera de salida.

De la figura, se ve que el sistema básico comprende un conducto de entrada, que se introduce en el casco de la manera más conveniente para la embarcación en cuestión. Desde este conducto de entrada, el agua pasa a través del impulsor, que puede adoptar una variedad de formas: lo más habitual es que se trate de un dispositivo de flujo mixto o axial que comprende varias palas que van de cuatro a ocho. La siguiente fase en el paso del agua a través de la unidad normalmente es pasar a través de un anillo del estator que tiene la doble función de enderezar el flujo y actuar como soporte para el cuerpo del cubo. Es probable que los anillos del estator comprendan entre 7 y 13 cuchillas, pero debe tenerse en cuenta que no todos los diseños utilizan esta característica.

Con algunos diseños de chorro de agua, la boquilla es orientable, mientras que en otros se utilizan placas deflectoras para controlar la dirección del flujo y, por lo tanto, impartir fuerzas de dirección al recipiente a través del cambio de dirección del impulso del chorro de agua. La característica final del sistema es el cubo de inversión.

El cucharón de inversión es un dispositivo de accionamiento mecánico o hidráulico, que puede bajarse sobre la salida del chorro de agua para producir una fuerza de retardo en el recipiente, nuevamente a través de un cambio en el momento. En algunos diseños, el cucharón está diseñado para que pueda, además de proporcionar una capacidad de frenado total, “derramar” parte del chorro para que se pueda ejercer un control fino sobre la fuerza de propulsión generada por la unidad.

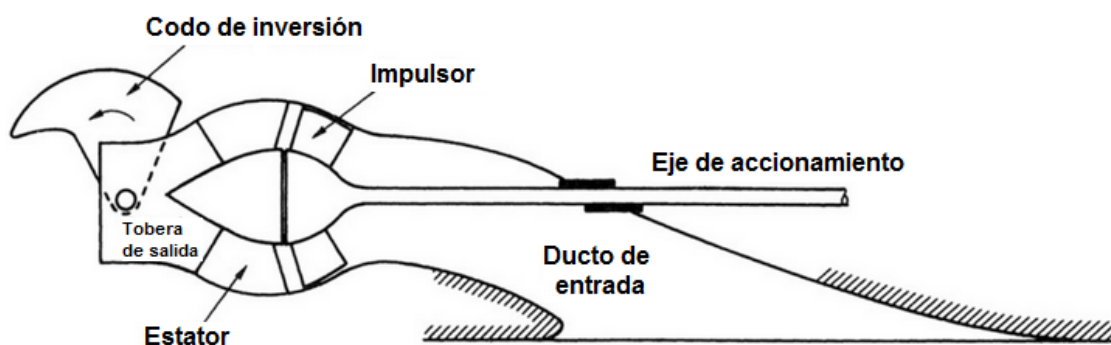


Figura 4.16: Arreglo general típico de propulsor por chorro de agua [4]

### 4.2.2. Selección sistema de propulsión

Se selecciona como propulsor T-Jet Large Jet Drive de la empresa TFL hobby, este modelo está diseñado para modelos a escalas es por ello que se solicita personalizarlo como por ejemplo el cambio de materialidad, en donde se opta por acero inoxidable para evitar la corrosión debido al agua salada. En las Figuras 4.17 y 4.18 se muestra el jet de propulsión.



Figura 4.17: T-Jet Large Jet Drive by TFL, vista

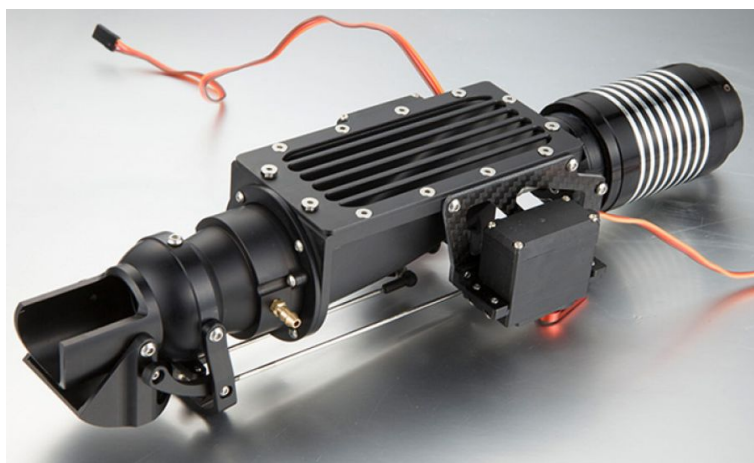


Figura 4.18: T-Jet Large Jet Drive by TFL, vista

En la Tabla 4.6 a continuación se muestran las especificaciones del modelo de jet, además este jet en particular incluye un codo de inversión para control del movimiento mostrado en las Figuras 4.19 y 4.20, en la primera se muestra el mecanismo que mueve el codo mientras en la segunda se aprecia el movimiento de esta.

Tabla 4.6: Especificaciones T-jet Large Jet Drive, TFL

Variable	Valor	Unidad
Longitud	228,5	[mm]
Ancho	110,5	[mm]
Altura	79,2	[mm]
Diámetro hélice	39	[mm]
Longitud aspiración	120	[mm]
Ancho aspiración	57	[mm]

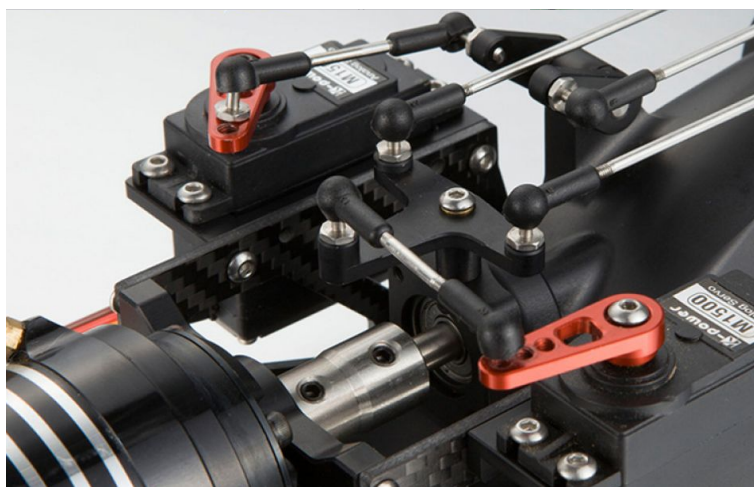
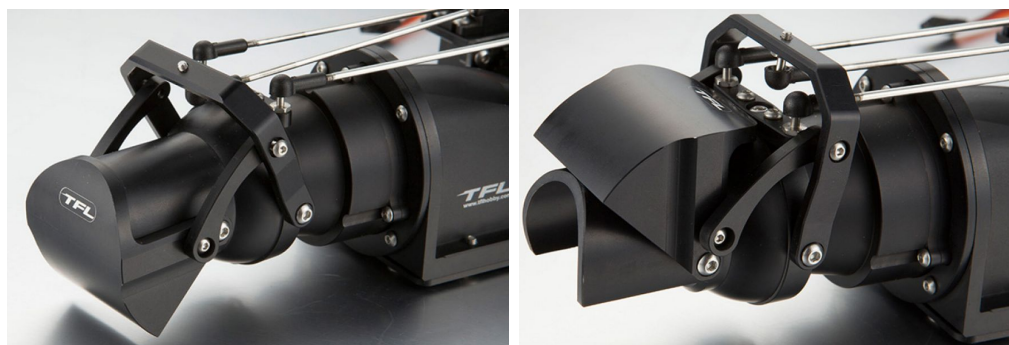


Figura 4.19: T-Jet Large Jet Drive by TFL, vista mecanismo de gobierno



(a) Codo de inversión abajo

(b) Codo de inversión arriba

Figura 4.20: Movimiento del mecanismo de gobierno

### 4.2.3. Motor

El sistema fotovoltaico entrega corriente continua por lo que de utilizar un motor de corriente alterna será necesario el uso de un inversor, por lo que se opta por un motor de corriente continua para evitar dicho proceso de transformación que no solo implica un mayor número de equipos sino también más pérdidas.

El principal inconveniente de estas máquinas es el mantenimiento costoso y laborioso, debido principalmente al desgaste que sufren las escobillas al entrar en contacto con las delgas, por lo que una mejor opción serían los motores sin escobillas o brushless.

#### Motor sin escobillas o brushless (BLDC)

Como se dijo anteriormente la principal característica y ventaja de los motores brushless es que no emplean escobillas para la transformación de energía las cuales producen rozamiento, disminuyen el rendimiento, generan calor, son ruidosos y demandan una sustitución periódica y, por tanto, un mayor mantenimiento.

Dentro de los motores sin escobillas se encuentran dos tipos: inrunner y outrunner, mostrados en la Figura 4.21, los cuales están diseñados para velocidades distintas. Los primeros desarrollan mayor velocidad, son más pequeños y su elemento móvil es el eje, entregando su torque máximo a altas revoluciones por minuto por lo que se utilizan con engranajes reductores por lo general. En cuanto a los motores brushless outrunner, los imanes permanentes se encuentran instalados en la carcasa del motor la cual corresponde al elemento móvil y el bobinado está fijado al eje, en este tipo de motor el torque máximo se desarrolla a velocidades más bajas por lo que en general no se tiene la necesidad de un reductor [17].

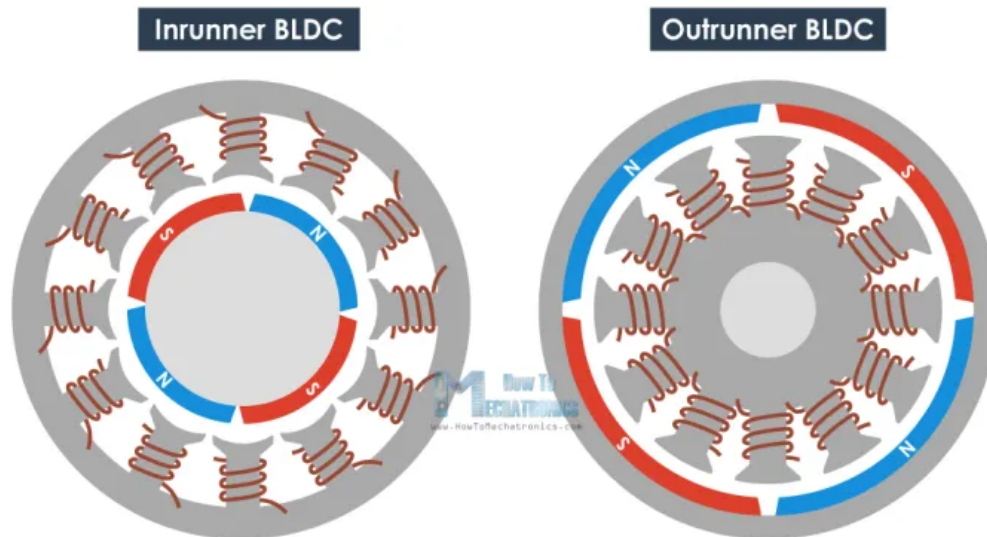


Figura 4.21: Motores inrunner y outrunner [14]

Otro dato importante a la hora de la elección de un motor es el KV el cual se refiere a la constante de revoluciones de un motor, es decir, el número de revoluciones por minuto [*rpm*] que será capaz de ofrecernos cuando se le aplique 1 [V] de tensión. El fabricante expresa este valor calculándolo sobre un banco de pruebas que no es del todo real, ya que para realizar los cálculos no se utiliza ningún tipo de peso en el motor. Por tanto este valor no deja de ser en cierta manera teórico, y muy distinto al valor real obtenido cuando el motor está funcionando con una hélice.

El KV adecuado para el motor depende directamente del uso que se le vaya a dar. Cuando se tiene un KV bajo el número de espiras es mayor, por tanto, el hilo de cobre es más fino y el total de amperios que circulará por el motor es inferior a otros con KV más alto; este tipo de KV se recomienda para drones que necesiten mucho par y poca velocidad. Indicado para mover hélices de grandes dimensiones, son motores menos vivos, muy suaves, con un menor consumo eléctrico.



En cuanto a los motores con KV alto el número de espiras es menor, por tanto, el hilo de cobre es más grueso y el total de amperios que circulará por el motor es superior a los de KV bajo. Se recomienda para drones de carreras, aparatos que necesitan poco par y mucha velocidad. Indicado para mover hélices de dimensiones pequeñas, son motores muy vivos, con reacción muy violenta y gran consumo eléctrico.

### Selección motor

Con todo lo expuesto anteriormente, se opta por un motor de corriente continua sin escobillas del tipo outrunner, en la Tabla 4.7 se muestran las características del motor seleccionado. Cabe destacar que se debe tener en cuenta que el rendimiento del motor dependerá en gran medida de la batería, los variadores instalados (ESC), el tipo de hélice, el peso final del conjunto, entre otros factores.



Figura 4.22: Motor sin escobillas outrunner Turnigy SK3 3548-700KV

Tabla 4.7: Especificaciones motor seleccionado

Propiedad	Valor	Unidad
KV	700	[rpm/V]
Corriente Idle.	0,016	[A]
Corriente máx.	50	[A]
Voltaje	11,1 - 16,8	[V]
Potencia máxima	547	[W]
Resistencia	35	[m $\Omega$ ]
Dimensiones	37x42	[mm]
Peso	167	[g]

#### 4.2.4. Variador de tensión (ESC)

El propósito del variador es variar la velocidad de un motor eléctrico junto con el sentido de giro. La mayoría de los ESC incorporan un sistema BEC, el cual hace posible regular un

voltaje estable para poder hacer funcionar el receptor y los servos. Dentro de los variadores de tensión se tienen dos tipos: variadores lineales (BEC) y variadores BEC cambiantes.

Los variadores lineales utilizan resistores para bajar el voltaje proporcionado por la batería litio, haciendo posible que el receptor funcione a un voltaje menor sin que se queme por el alto voltaje de la batería. A medida que la batería tiene mayor voltaje y el receptor consume más, se genera calor al pasar la corriente por el resistor lo cual puede ser preocupante ya que si la corriente es alta, el resistor se calentará dañando el BEC.

Por otra parte los variadores BEC cambiantes cambian el voltaje con una alta frecuencia para bajarlo de manera más efectiva, reduciendo el voltaje sin generar calor o malgasto de energía. A continuación en la Tabla 4.8 se muestra una comparación entre ambos tipos de variadores para un BEC de 8 [V] y 3 [A], en donde se puede apreciar la diferencia en la pérdida de energía y eficiencia de los variadores para distinto voltaje de la batería.

Tabla 4.8: Comparación variadores de tensión (ESC) [10]

Tipo de variador	Variable	Voltaje de batería [V]				
		7,4	11,1	14,8	18,5	22,2
Variador lineal BEC	Corriente de batería [A]	3	3	3	3	3
	Energía perdida [W]	4,2	15,3	26,4	37,5	48,6
	Eficiencia [%]	81,0	54,0	44,4	32,0	27,0
Variador BEC cambiante	Corriente de batería [A]	2,80	1,87	1,40	1,12	0,96
	Energía perdida [W]	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
	Eficiencia [%]	85	85	85	85	85

Es importante mencionar que los variadores de tensión para motores con escobillas (brushed) no son compatibles con motores brushless, una manera fácil de identificarlos es que los variadores para motores con escobillas llevan dos cables, mientras que los otros llevan tres.

Los variadores para motores brushless crean una corriente alterna trifásica a partir de corriente continua proveniente de la batería. Es aquí donde entra en escena los 3 cables que llevan los variadores para motores sin escobillas. Uno de los polos genera un pequeño voltaje proporcional a la velocidad de giro del motor conocido como fuerza electromotriz. Este voltaje le sirve al ESC para determinar que tan rápido y en que dirección gira el motor en cualquier momento. Con esta información el ESC es capaz de averiguar como manda la corriente a los electroimanes del motor para que gire.

### Selección variador de tensión (ESC)

Los variadores están categorizados en función de la máxima corriente que pueden soportar. A mayor corriente que aguante un ESC mayor será su precio. Lo recomendable a la hora de elegir el variador es optar por uno que se encuentre por encima de la demanda del motor.

Luego, como se mostró en la Tabla 4.7 el valor de corriente puede variar entre 0,016 a 50 [A], por lo que se necesita de un variador de por lo menos dicho valor. Además considerando todo lo dicho acerca de los variadores se opta por un variador BEC cambiante, ya que para el voltaje de trabajo de las baterías seleccionadas presenta una mayor eficiencia.



La gama de Aerostar para variadores para motores sin escobillas cuentan con una suave puesta en marcha, la respuesta del acelerador lineal y múltiples funciones de protección. La instalación es muy sencilla, ya que estos controladores de velocidad vienen "plug and play" que no requiere soldadura, ya que son pre-equipado con conectores tanto para la batería como para el motor.

A continuación en la Figura 4.23 se muestra el variador de tensión o velocidad seleccionado, mientras que en la Tabla 4.9 se exponen sus especificaciones.

Tabla 4.9: Especificaciones controlador de velocidad Aerostar 50A electrónico con BEC 5A

Variable	Valor	Unidad
Longitud	56	[mm]
Ancho	30	[mm]
Espesor	14	[mm]
Corriente continua	50	[A]
Corriente ráfaga	60	[A]
Peso	44	[g]
Salida BEC	5,5/5	[V/A]

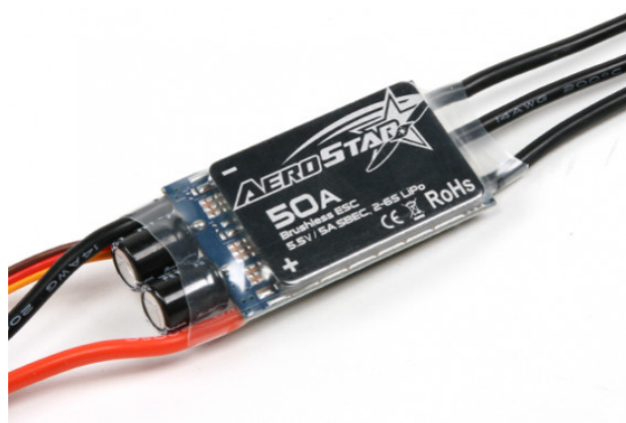


Figura 4.23: Controlador de velocidad Aerostar 40A electrónico con BEC 5A

### 4.3. Conexión de equipos principales

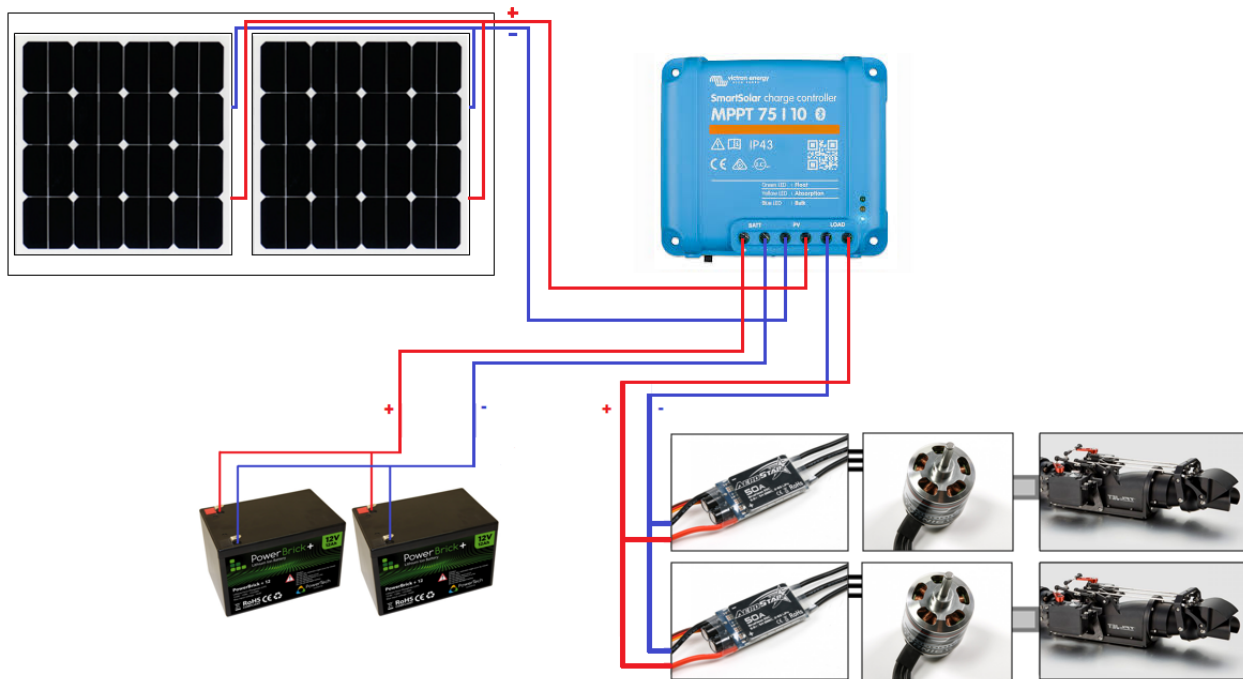


Figura 4.24: Conexión de los equipos principales

# Capítulo 5

## Diseño

### 5.1. Dimensiones principales

Según los equipos seleccionados en el capítulo anterior, en particular en sistema fotovoltaico, y los parámetros de diseño de la Sección 3.2 se tiene:

- Eslora: 1,5 [m]
- Manga: 0,65 [m]
- Calado: 0,21 [m]
- Puntal: 0,45 [m]
- Masa total: 21,76 [kg]

Se recomienda por estabilidad y un diseño agradable [26]:

$$Lwl = L \cdot 0,87 = 1,305 [m] \quad (5.1)$$

Donde,

$Lwl$ : eslora de flotación [m]

$L$ : eslora total = 1,5 [m]

## 5.2. Forma del casco

### 5.2.1. Tipos de cascos

Se tienen tres tipos principales de casco, los cuales se muestran en la Figura ?? a continuación.

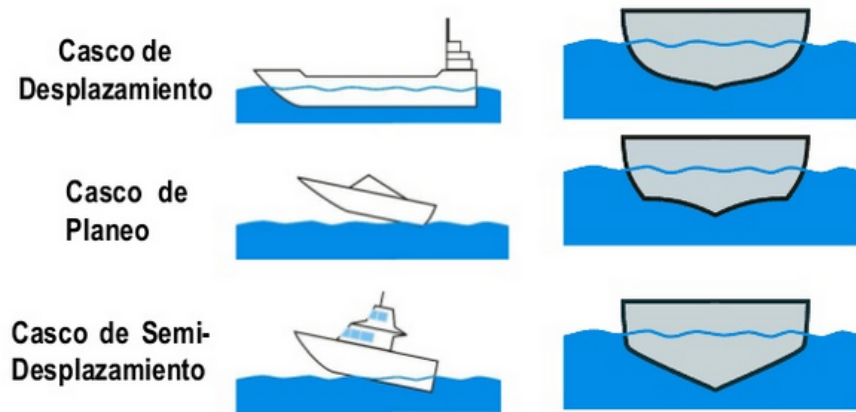


Figura 5.1: Tipos de casco para una embarcación [11]

#### Casco de desplazamiento

El tipo de desplazamiento es el que el buque navegando desplaza prácticamente el mismo volumen de obra viva sumergida que parado, es el tipo de casco más habitual en buques medio grande, permite navegar bien con mala mar pero tiene el inconveniente de que la velocidad está limitada por la eslora. Un casco de desplazamiento suele ser lento pero seguro, y suele ofrecer una gran autonomía ya que casi siempre puede navegar a la misma velocidad.

#### Casco de planeo

Es el tipo de casco que permite mayor velocidad y se usa en embarcaciones pequeñas, por sus características al alcanzar una determinada velocidad el casco sale parcialmente del agua lo que ya no limita su velocidad, son embarcaciones que necesitan una mar con calma para planear y coger su máxima velocidad, por lo que no acostumbran a navegar bien con mala mar. La gran potencia que se necesita para el planeo implica menor autonomía, pero planear por encima de la superficie del agua es la única manera de alcanzar esas velocidades.

#### Casco de semidesplazamiento

Este tipo de casco también es llamado de semiplaneo o en V, permite a velocidad baja-media navegar de una manera correcta con mala mar, pero si seguimos acelerando la proa se levanta y sale ligeramente del agua, aunque sin llegar al planeo, esto hace que no tenga su velocidad limitada por la eslora, pero requiere una elevada potencia y no alcanza velocidades tan elevadas como los cascos de planeo. Con una carena de semidesplazamiento se consiguen prestaciones intermedias, de modo que la utilizan muchos cruceros y cabinadas de eslora media.

## Selección

Dado que las velocidades que se tendrán serán variables según la radiación del lugar en donde se encuentre, un término medio conveniente para el diseño es el casco tipo semidesplazamiento, teniendo mayor libertad para el movimiento.

### 5.2.2. Obra viva



Figura 5.2: Medidas de caso tipo semidesplazamiento [16]

Como se dijo anteriormente en los antecedentes, la obra viva corresponde a la sección del barco que se encuentra sumergida y en contacto con el agua. Según el tipo de casco, se puede determinar la obra viva de la embarcación, para un casco de semidesplazamiento se tiene:

$$Obraviva = 0,75 \cdot Lwl \cdot (B + D) = 0,85 [m^2] \quad (5.2)$$

Donde,

$Lwl$ : eslora de flotación [m]

$B$ : manga de la embarcación [m]

$D$ : calado de la embarcación [m]

## 5.3. Disposición de equipos principales

Ya con las dimensiones y equipos principales establecidos, se procede a determinar la disposición de estos últimos en la embarcación como una aproximación inicial ya que a medida que se avance en las etapas de ingeniería esto se irá refinando. En la Figura 5.3 se tiene la vista lateral interna en la parte superior donde se aprecia que tanto la batería como el regulador de carga se encuentran por sobre la línea de flotación, esto se hace ya que en el fondo se tendrán temperaturas más bajas al estar en contacto con el agua lo que afecta en especial al funcionamiento de la batería como se dijo anterior en el capítulo de selección de equipos, el sistema de propulsión se tiene hasta abajo y atrás en la popa ya que la entrada de agua debe posicionarse a la altura del fondo del casco, finalmente en rojo y azul pueden verse las distintas conexiones entre los equipos.

En la parte inferior de la figura, se tiene la vista superior externa de la embarcación en donde los únicos equipos visibles son los paneles fotovoltaicos que utilizan gran parte del área de cubierta, al igual que antes se muestra en rojo las conexiones eléctricas positivas mientras que en color azul las negativas.

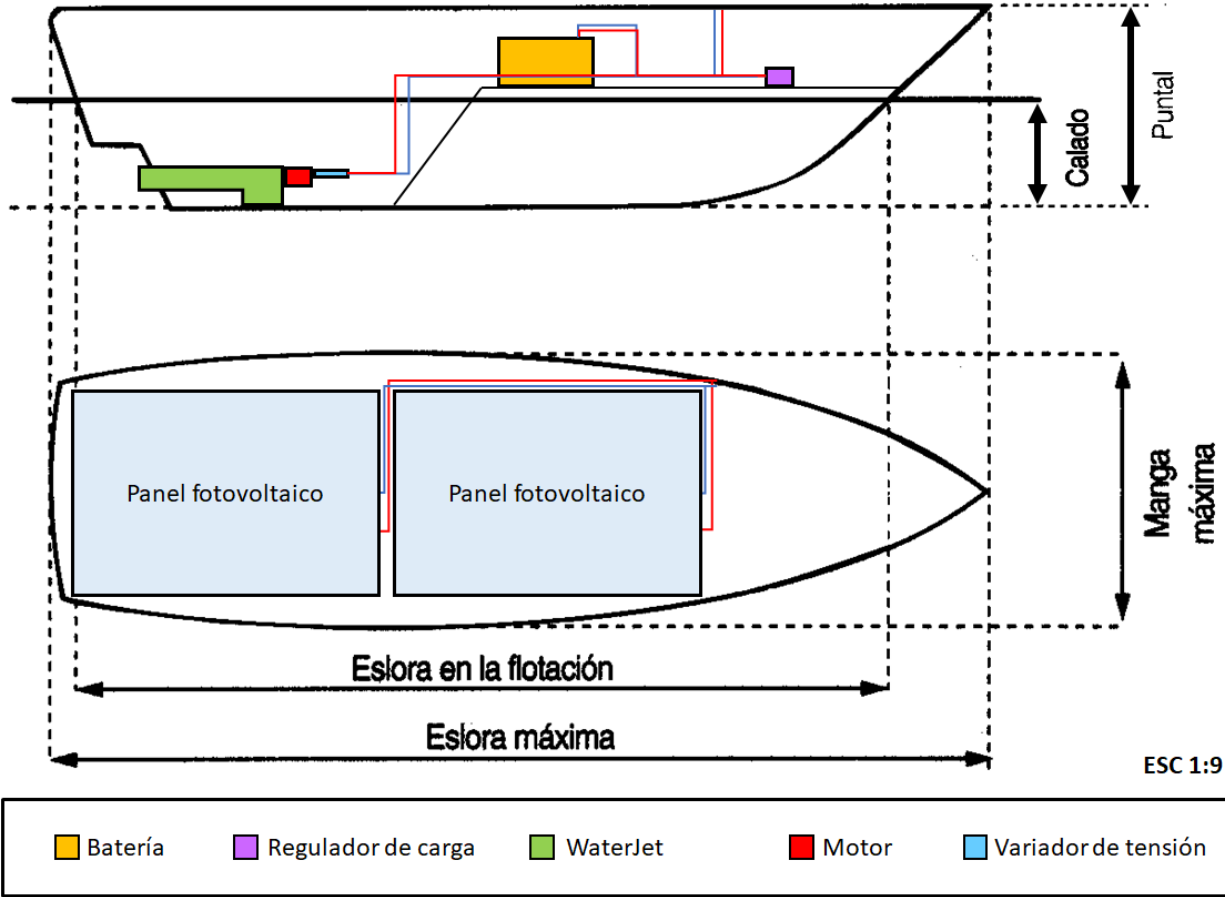


Figura 5.3: Disposición de equipos, vista lateral interna y superior externa

A continuación en la Figura 5.4 se muestra nuevamente la vista lateral interna en la parte superior, mientras que en la parte inferior se tiene la vista interna superior de la embarcación en donde la obra muerta se tiene en color gris, además se puede apreciar de mejor forma los equipos que se tienen en paralelo como son el sistema de propulsión y las baterías, estas ultimas se posicionan entre la proa y el centro de masa de la embarcación para una mayor estabilidad ya que al tratarse de un casco de semidesplazamiento al alcanzar mayores velocidades el casco en la parte de proa se elevará del agua.

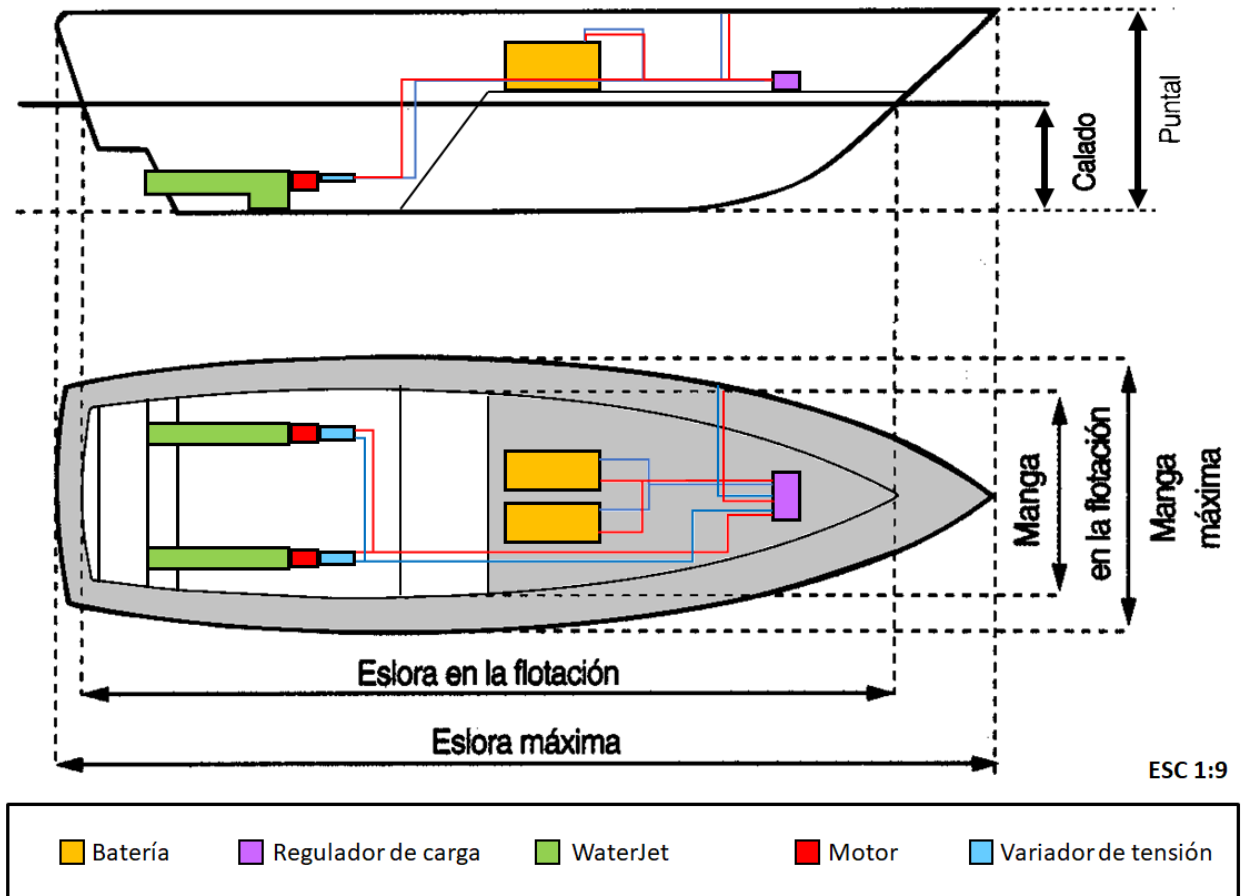


Figura 5.4: Disposición de equipos, vista lateral interna y superior interna

# Capítulo 6

## Balance de energía

Para poder obtener la velocidad a que va la embarcación es necesario realizar un balance de energía entre el sistema fotovoltaico y el de propulsión, para ello se debe estudiar cada sistema por separado y ver su interacción.

### 6.1. Sistema de propulsión

Antes de analizar el sistema de propulsión, es necesario comprender las fuerzas que actúan sobre la embarcación, verticalmente se encuentran el peso de la misma y el empuje del agua sobre el cuerpo que se estudiarán más adelante cuando se hable de flotabilidad, mientras horizontalmente en el sentido de movimiento se tiene el empuje del motor y en contra el arrastre, cabe mencionar que el arrastre es tanto de la interacción barco-agua como barco-viento sin embargo solo se analizará la primera interacción ya que la última depende de condiciones meteorológicas y es menos considerable puesto que la densidad del agua es mucho mayor a la del aire.

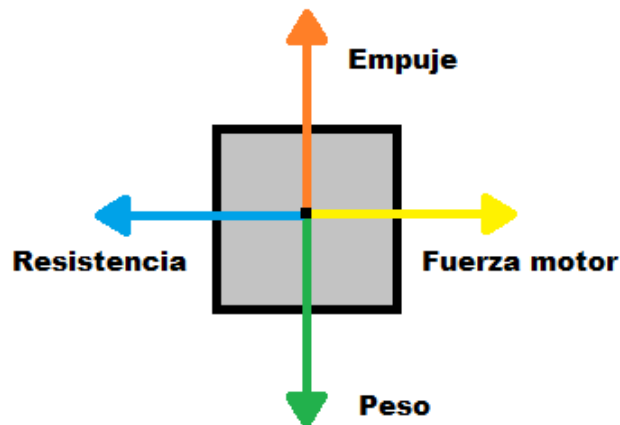


Figura 6.1: Fuerzas sobre la embarcación



### 6.1.1. Resistencia al avance

Básicamente, existen cuatro componentes de la resistencia al avance de una embarcación cuando navega en agua en calma [18], cada una de ellas está asociada con un fenómeno particular del flujo. Estas son:

- Resistencia friccional
- Resistencia por formación de olas o por oleaje
- Resistencia por formación de remolinos
- Resistencia del aire

Cuando los resultados de las pruebas realizadas en los modelos son expandidos al barco, la componente por formación de olas combinada con la componente por formación de remolinos es lo que se conoce como resistencia residual. La resistencia al aire se compone tanto de resistencia friccional como por formación de remolinos.

La resistencia total corresponde a la sumatoria de las resistencias anteriormente descritas y queda determinada por:

$$R_T = \frac{1}{2} \cdot C_T \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad (6.1)$$

Donde,

$R_T$ : resistencia total o fuerza de arrastre [ $N$ ]

$C_T$ : coeficiente de resistencia total o de arrastre, se trata de un número adimensional que depende de la forma del cuerpo y su orientación con respecto a la corriente de fluido.

$\rho$ : densidad del fluido, en este caso agua, expresada en [ $kg/m^3$ ]

$A$ : área característica correspondiente a la superficie mojada [ $m^2$ ]

$V$ : velocidad relativa entre el barco y el agua [ $m/s$ ]

### 6.1.2. Número de Reynolds

El número de Reynolds se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido. Éste relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional [21].

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (6.2)$$

Donde,

$V$ : velocidad del buque [ $m/s$ ]

$L$ : largo característico (eslora del barco) [ $m$ ]

$\nu$ : viscosidad cinemática del fluido =  $1,13125 \cdot 10^{-6}$  [ $m^2/s$ ]

### 6.1.3. Número de Froude

Es un número adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido [21], para este caso en particular está asociado con la resistencia por oleaje, ya que las crestas del tren de olas que genera un barco al navegar, se elevan contra la fuerza de gravedad.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (6.3)$$

Donde,

$V$ : velocidad del buque [ $m/s$ ]

$g$ : aceleración de gravedad [ $m/s^2$ ]

$L$ : largo característico (eslora del arco) [ $m$ ]

Las velocidades esperadas para la embarcación se encuentran en el rango de 2-10 [*nudos*], luego calculando el rango para el número de Froude utilizando la Ecuación 6.3 se tiene:

$$Fr_1 = \frac{2 \cdot 0,513}{\sqrt{9,81 \cdot 1,5}} = 0,27 \quad (6.4)$$

$$Fr_2 = \frac{10 \cdot 0,513}{\sqrt{9,81 \cdot 1,5}} = 1,34 \quad (6.5)$$

La velocidad expresada con el número de Froude permite clasificar los buques en lentos, rápidos y medios, de la siguiente manera:

- Navíos lentos: poseen un número de Froude menor a 0,27 ejemplos de ellos son los cargos, barcazas y veleros lentos.
- Navíos de velocidad media: poseen un número de Froude comprendido entre 0,27 y 0,50; entre ellos se encuentran los barcos pesqueros, remolcadores, navíos de servicio y veleros rápidos.
- Buques rápidos: con un número de Froude mayor a 0,50 se encuentran las lanchas, vedettes, semi-planeadoras, veleros de tipo catamarán y prototipos de carreras.

Según dicha clasificación el barco a diseñar corresponde a un navío de velocidad media a alta.

### 6.1.4. Resistencia friccional

La Conferencia Americana de Tanques de Prueba (American Towing Tank Conference) o ATTC, adoptó una resolución en 1947 que recomendó una formulación para el cálculo del coeficiente de resistencia, conocida como la Línea Media de Schoenherr, en donde la formula resultante fue:

$$\frac{0,242}{\sqrt{C_F}} = \log_{10}(Re \cdot C_F) \quad (6.6)$$

La línea de 1957 de la ITTC. Hoy es la formulación más ampliamente utilizada; fue adoptada por la ITTC en 1957. La ecuación de esta línea es:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (6.7)$$

Esta línea suele arrojar valores de  $C_F$  mayores a los que proporciona la Línea Media de Schoenherr, especialmente en números de Reynolds bajos. Con altos números de Reynolds (los que suelen tener los barcos reales), las dos líneas son virtualmente idénticas (colineales). La línea 1957 de ITTC tiene la ventaja de que puede ser resuelta directamente para  $C_F$  para cualquier valor de  $Re$  dado. Cabe destacar que dichas formulaciones corresponden a modelos de barcos y no aplica para superficies planas [18].

### 6.1.5. Resistencia residual

Mediante el método de *velocidades correspondientes* creado por Froude, en donde la similitud geométrica del modelo con relación al buque es algo que se asume, y los subíndices M y S representan el modelo y el buque, respectivamente. La razón de escala lineal ( $\lambda$ ) se define como el cociente entre cualquier dimensión del buque a la correspondiente del modelo.

Al probar un modelo que tenga el mismo número de Froude que el del barco prototipo, establece una condición o restricción en la velocidad del modelo:

$$V_M = \frac{V_S}{\sqrt{\lambda}} \quad (6.8)$$

Si los números de Froude son idénticos luego sus coeficientes de resistencia también serán igual, además utilizando la semejanza geométrica y la ley de escala para las velocidades, se tiene:

$$\frac{R_S}{R_M} = \frac{\Delta_S}{\Delta_M} \quad (6.9)$$

Donde,

$R_S$ : resistencia residual del prototipo

$R_M$ : resistencia residual del modelo

$\Delta_S$ : desplazamiento del prototipo

$\Delta_M$ : desplazamiento del modelo

A continuación en la Figura 6.2 se muestran las curvas para distintos tipos de embarcaciones según su velocidad, en donde obteniendo el número de Froude y desplazamiento del prototipo se puede determinar la resistencia residual de este.

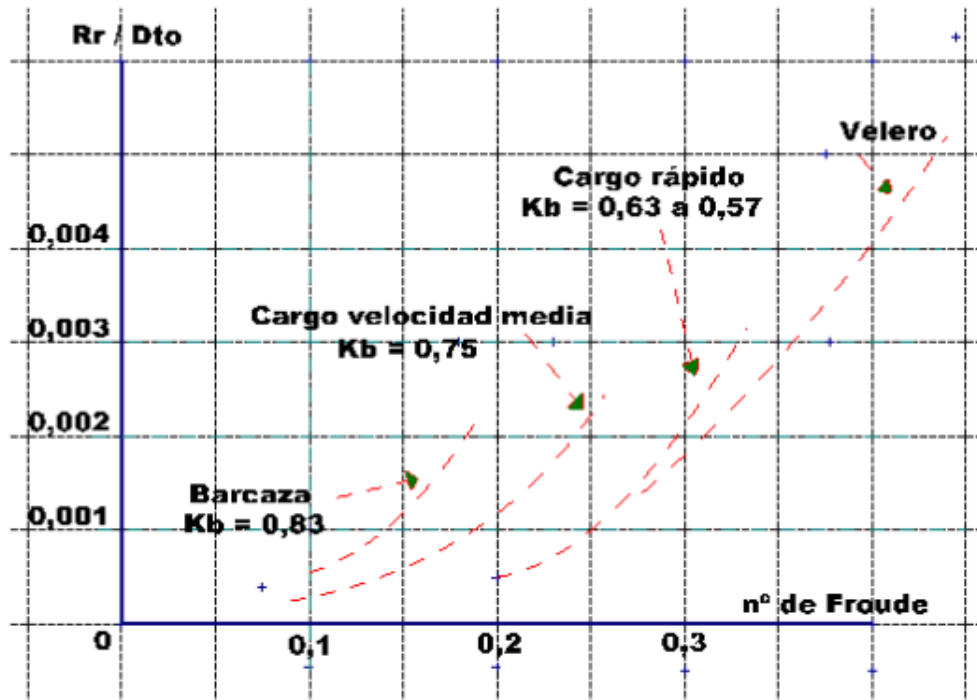


Figura 6.2: Relación número de Froude, resistencia residual y desplazamiento [3]

Con los resultados obtenidos de las Ecuaciones 6.4 y 6.5 se procede a realizar una comparación con el gráfico de la Figura 6.2, en donde se puede observar que la curva del velero es la que se encuentra en el rango calculado. Luego con los datos del gráfico se realiza un nuevo gráfico de la curva con el fin de obtener la regresión que mejor representa su comportamiento, el resultado se ve en la Figura 6.3 donde el comportamiento de la curva corresponde a una potencial, luego se obtiene:

$$\frac{R_R}{\Delta} = 0,0602 \cdot Fr^{2,9485} \quad (6.10)$$

Reemplazando la expresión para el número de Froude y despejando la resistencia residual, se tiene:

$$R_R = 0,0602 \cdot \Delta \cdot \left( \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \right)^{2,9485} \quad (6.11)$$

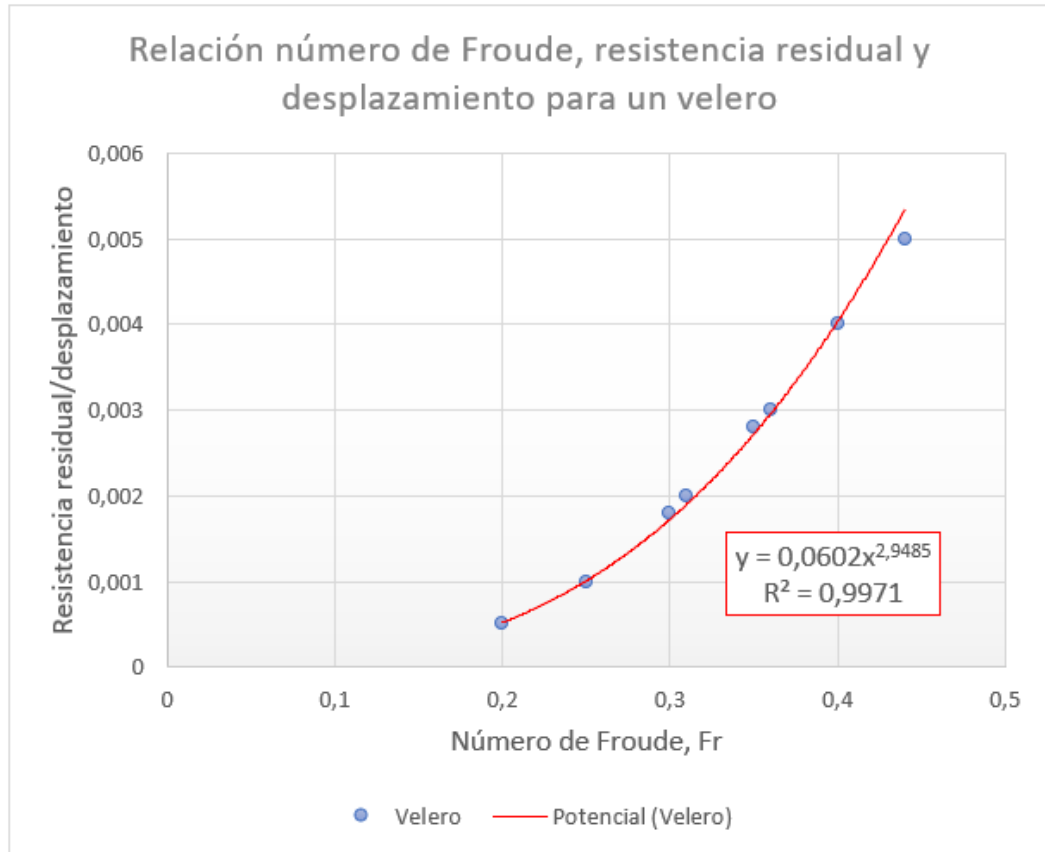


Figura 6.3: Relación número de Froude, resistencia residual y desplazamiento para velero

### 6.1.6. Resistencia del aire

La determinación de la resistencia que produce la superficie del barco es un problema más complejo que la producida por la mayoría de otros vehículos que se mueven a través de un fluido, debido a que la superficie del barco se mueve no a través de uno, sino de dos fluidos, de comportamientos muy disímiles, agua y aire.

La resistencia del aire en calma se puede expresar en términos de un coeficiente de resistencia (o arrastre), como sigue:

$$R_{air} = C_{air} \cdot \left( \frac{1}{2} \rho_a \cdot A_{pt} \cdot V^2 \right) \quad (6.12)$$

Donde:

$R_{air}$ : resistencia del aire en calma [N]

$C_{air}$ : coeficiente de resistencia del aire en calma

$\rho_a$ : densidad del aire [ $kg/m^3$ ] = 1,226 [ $kg/m^3$ ] a 15 [°ircC]

$A_{pt}$ : área transversal proyectada en la porción del buque que está por encima del agua (obra muerta) [ $m^2$ ]

$V$ : velocidad del buque [ $m/s$ ]

Los rangos típicos de valores de  $C_{air}$  publicados en la literatura especializada se resumen en la Tabla 6.1 a continuación.

Tabla 6.1: Coeficientes de resistencia del aire en calma [18]

Tipo de barco	Rango de $C_{air}$
De carga general	0,60 a 0,85
Buque tanque	0,75 a 1,05
Portacontenedores	0,60 a 0,75
De pasajeros	0,65 a 1,10
Bélico	0,40 a 0,80

Deberá notarse que el coeficiente de resistencia del aire en calma, definido anteriormente, está basado en la densidad del aire y también en el área transversal proyectada del buque por encima del agua. Éste no es directamente aditivo a los coeficientes de resistencia friccional y residual, CFS y CR, los cuales están basados en la densidad del agua y en el área de la superficie mojada del barco. Es una práctica común en procedimientos estandarizados para la predicción de la resistencia del buque, definir un coeficiente resistencia de aire en calma diferente (CAA), el cual es consistente con y directamente aditivo a los coeficientes de resistencia del agua. Este se define de la siguiente manera:

$$C_{AA} = \frac{R_{air}}{\frac{1}{2}\rho_w \cdot S \cdot V^2} \quad (6.13)$$

Donde:

$\rho_w$ : densidad del agua de mar = 1025,9 [kg/m<sup>3</sup>] a 15 [°C]

$S$ : superficie mojada del buque [m<sup>2</sup>]

$V$ : velocidad del buque [m/s]

Utilizando ambas ecuaciones, se obtiene:

$$C_{AA} = 0,001194 \left( \frac{A_{pt}}{S} \right) C_{air} \quad (6.14)$$

### 6.1.7. Potencia efectiva del barco

La potencia efectiva se define como la potencia que se requiere para remolcar un barco a través del agua completamente en calma a una velocidad dada, o la potencia requerida para contrarrestar la resistencia total del barco a esa velocidad. Se calcula multiplicando la resistencia por la velocidad:

$$W = R_T \cdot V \quad (6.15)$$

Donde,

$W$ : potencia efectiva requerida para mover la embarcación [W]

$R_T$ : resistencia total de la embarcación [N]

$V$ : velocidad del barco [m/s]

Luego reemplazando la resistencia total:

$$W = \left( \frac{1}{2} \cdot (C_F + C_{AA}) \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 + R_R \right) \cdot V \quad (6.16)$$

$$W = \left( \frac{\rho \cdot S \cdot V^2}{2} \cdot \left( \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} + 0,001194 \left( \frac{A_{pt}}{S} \right) C_{air} \right) + R_R \right) \cdot V \quad (6.17)$$

Reemplazando  $C_{air}$ , la expresión para el número de Reynolds:

$$W = \left( \frac{0,0375\rho \cdot S}{(\log_{10}(\frac{V \cdot L}{\nu}) - 2)^2} + (3,582 \cdot 10^{-4})\rho \cdot A_{pt} \right) V^3 + 0,0602 \cdot \Delta \cdot \left( \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \right)^{2,9485} \cdot V \quad (6.18)$$

Finalmente, reemplazando los valores para las variables conocidas se obtiene:

$$W = \left( \frac{37,96 \cdot S}{(\log_{10}(V \cdot 1,33 \cdot 10^6) - 2)^2} + 0,37 \cdot A_{pt} \right) V^3 + (1,14 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta) V^{3,9485} \quad (6.19)$$

## 6.2. Sistema fotovoltaico

### 6.2.1. Energía del sistema fotovoltaico

Energía del sistema fotovoltaico [22]:

$$E_{PV}(t) = P_{PV} \cdot \eta_s \cdot \eta_c \cdot x_1 \cdot \int_0^t \frac{I_{rr}(t)}{G_{STC}} \cdot dt \quad (6.20)$$

Donde,

$t$ : corresponde a las horas efectivas de sol 0,1,...,24 [h]

$P_{PV}$ : potencia fotovoltaica de cada panel = 50 [W]

$x_1$ : cantidad de módulos PV

$I_{rr}$ : irradiancia solar [kW/m<sup>2</sup>]

$G_{STC}$ : radiación solar en condiciones estándar  $\sim 1$  [kW/m<sup>2</sup>]

$\eta_s$ : eficiencia del sistema fotovoltaico, según pérdidas debido al convertidor, cableado, temperatura, etc = 0,8

$\eta_c$ : eficiencia de carga, debido al proceso de carga de energía fotovoltaica a la batería = 0,85

El último termino a la derecha corresponde a la variable *HSP* u *horas sol pico*, se obtiene como sigue:

$$HSP = \frac{kWh_t}{GST} \quad (6.21)$$

Donde,  
 $kWh_t$ : irradiación solar promedio del tiempo t analizado [ $kWh$ ]

Reemplazando *HSP* y valores conocidos en la Ecuación 6.20:

$$E_{PV}(t) = 0,136 \cdot \frac{kWh_t}{GST} \quad (6.22)$$

### 6.2.2. Energía de la batería

$$E_{batt} = \frac{V_{batt} \cdot C_{batt} \cdot x_2}{1000} \quad (6.23)$$

Donde,  
 $E_{batt}$ : energía de la batería [kWh]  
 $V_{batt}$ : voltaje de la batería [Volt]  
 $C_{batt}$ : capacidad de la batería [Ah]  
 $x_2$ : cantidad de baterías

## 6.3. Balance de energía

### Demanda total de energía

Demanda total de energía:

$$E_{load}(t) = \int_0^t P_{prop} \cdot dt + E_{serv}(t) \quad (6.24)$$

Donde,  
 $t$ : 0,1,...,24 [h]  
 $E_{load}$ : demanda de energía [Wh]  
 $P_{prop}$ : potencia de propulsión [W]  
 $E_{serv}$ : energía de servicio = 2 [Wh]

### Balance de energía

Si bien según el tipo de hélice elegida para el sistema de propulsión transforma la mayor cantidad de potencia solar en propulsión no se puede considerar que lo hace en su totali-



dad debido a las múltiples pérdidas que se presentan, es por ello que se considerará una transformación del 70 % de la totalidad para el balance de energía, luego:

$$E_{load}(t) = 0,7 \cdot E_{PV}(t) \quad (6.25)$$

Utilizando la Ecuación 6.24:

$$P_{prop} \cdot t_{viaje} = 0,7 \cdot E_{PV} - E_{serv} \quad (6.26)$$

Despejando la potencia de propulsión:

$$P_{prop} = \frac{0,7 \cdot E_{PV} - E_{serv}}{t_{viaje}} \quad (6.27)$$

Para obtener un balance de energía entre ambos sistemas se iguala la potencia de propulsión con la potencia efectiva obtenida anteriormente en la Ecuación 6.19.

$$\frac{0,7 \cdot E_{PV} - E_{serv}}{t_{viaje}} = \left( \frac{37,96 \cdot S}{(\log_{10}(V \cdot 1,33 \cdot 10^6) - 2)^2} + 0,37 \cdot A_{pt} \right) V^3 + (1,14 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta) V^{3,9485} \quad (6.28)$$

Reemplazando el lado izquierdo, se obtiene finalmente:

$$0,012 \cdot \frac{kWh_t}{GST} - 0,25 = \left( \frac{37,96 \cdot S}{(\log_{10}(V \cdot 1,33 \cdot 10^6) - 2)^2} + 0,37 \cdot A_{pt} \right) V^3 + (1,14 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta) V^{3,9485} \quad (6.29)$$

# Capítulo 7

## Programación de ruta

Lo que se busca es obtener la ruta a seguir por la embarcación, una vez que ya se tienen las coordenadas se le enviarán las órdenes vía satélite. Para conseguir dicha ruta se tienen cinco programas, tres de ellos en lenguaje Matlab y dos en Python; además, se cuenta con los recursos de Marine Traffic y Pysolar.

Marine Traffic es un servicio online, que mantiene una base de datos de posiciones históricas y en tiempo real de barcos provenientes de estaciones terrestres y mejorada con datos satelitales. Además, cuenta con servicio de datos (API) que permite descargar datos llamando al servicio con algún software de lenguaje computacional. En específico, se escoge el servicio PS06 correspondiente a las posiciones de buques en un área personalizada, el cual permite mantenerse al día con la ubicación actual y la información de viaje de los buques que operan en el área que define con cada solicitud; concediéndole monitorear la actividad de la embarcación alrededor de un punto de interés móvil.

En cuanto a Pysolar corresponde a una biblioteca de Python de uso libre, el cual para coordenadas, fecha y hora específicas entrega el azimut, la altitud del sol y puede predecir la irradiación directa del sol.

A continuación en la Figura 7.1 se muestra el diagrama global la programación de ruta, en color verde podemos ver los datos de entrada corresponden a las coordenadas tanto de origen como de destino y a fecha de inicio del viaje, luego en azul se muestran los programas escritos en Matlab que funcionan en paralelo con los programas de Python mostrados en color naranja, como resultado en color rojo se tiene las coordenadas minuto a minuto para cada hora de viaje.

En las siguientes secciones se explicarán los programas en profundidad, para mayor información los códigos se encuentran en los Anexos B.1, B.2, B.3, B.4 y B.5.

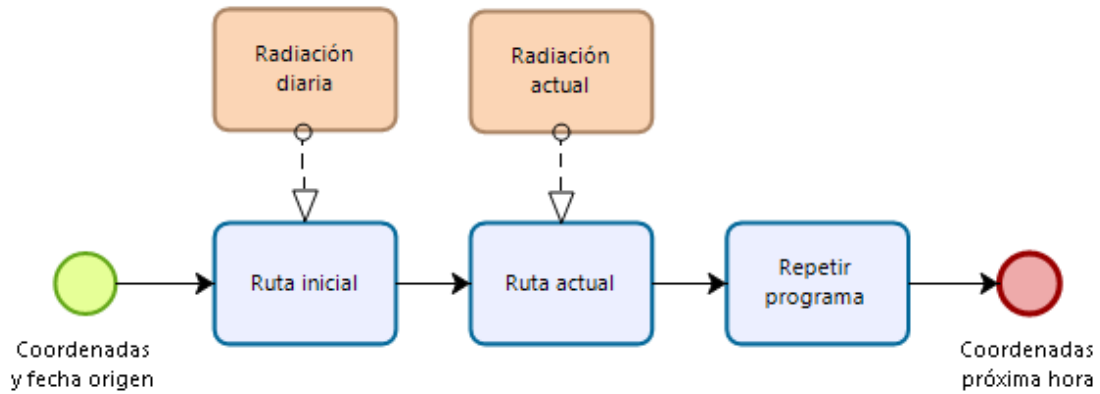


Figura 7.1: Diagrama de programación global

## 7.1. Ruta inicial

El primer programa tiene por objetivo trazar la ruta inicial del viaje, en la Figura 7.2 se puede apreciar el proceso que realiza. En verde se tiene los datos de entrada que corresponden a las coordenadas de origen y destino, fecha de origen, el número de puntos que se desea obtener y finalmente se carga el borde costero que ya se encuentra en Matlab.

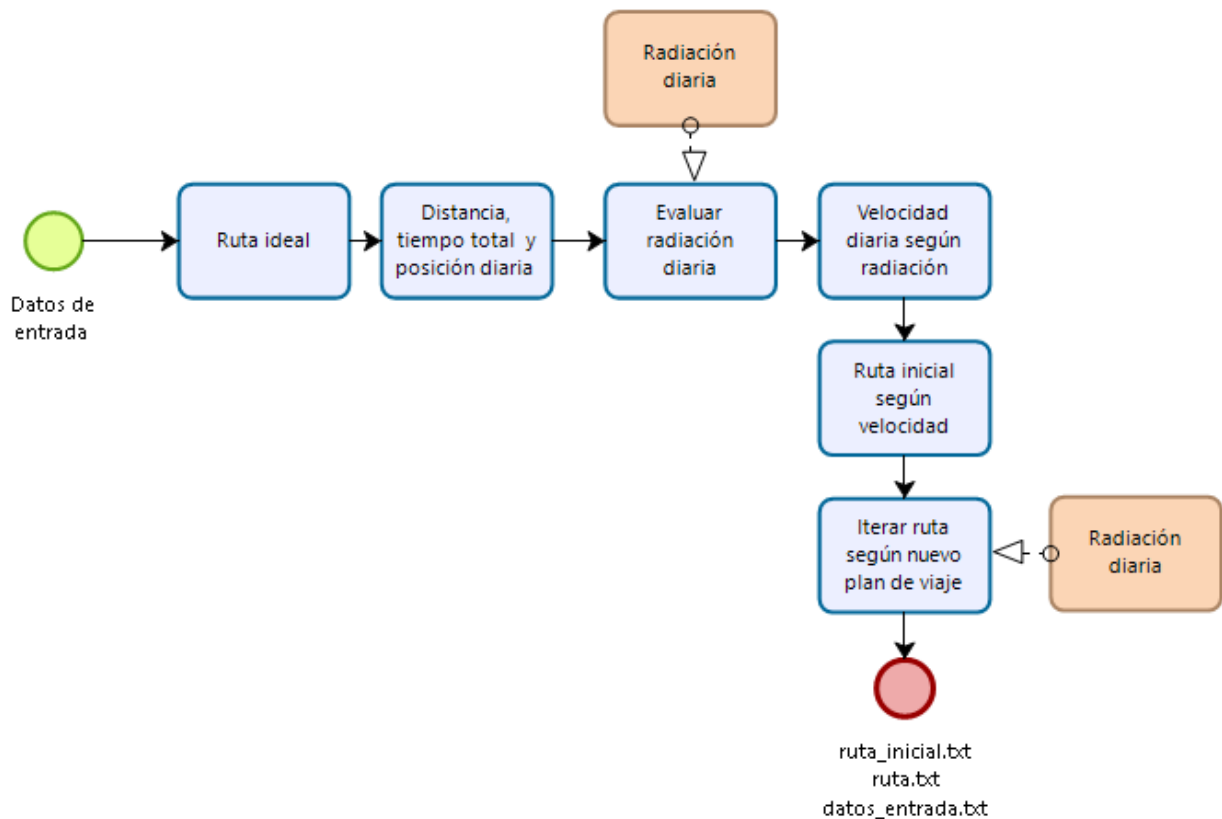


Figura 7.2: Diagrama de programa ruta inicial

Luego, se define la ruta ideal como la distancia más corta entre el origen y el destino que equivale a un línea recta entre ellos, sin embargo, se debe considerar el borde costero y las zonas de navegación para embarcaciones. Para nuestra nave en particular se le designará una distancia mínima a la costa de 25 millas náuticas aproximadamente equivalentes a 0,3 [°], mediante una instrucción condicional en el programa se cambian los puntos de la ruta que no cumplan con dicha regla y así obtener el vector ruta ideal.

Una vez obtenida la ruta ideal se calculan las distancia entre ellos, tiempo total de viaje y posiciones diarias. Para ello primero se realiza una estimación en cuanto a la velocidad, ya que esta irá variando de acuerdo a la radiación del lugar donde se encuentre, otorgándole un valor de 2 nudos que se espera sea la velocidad baja de acuerdo al diseño. También se determina un tiempo de trabajo de ocho horas diaria correspondiente al horario de 09:00 hrs. a 17:00 hrs., la radiación absorbida por los paneles fuera de este horario se usará de reserva para arrancar de otros barcos cuando esté fuera de operación y para el arranque cuando comienza su viaje diario, puesto que se requiere de mayor energía. Una última estimación es la equivalencia entre grados y kilómetros, se estima que 111,12 [km] corresponden a 1 [°].

Ya con las estimaciones determinadas se calcula cuántos kilómetros realiza al día y se recorre el vector de ruta ideal determinando la distancia entre una coordenada y su posterior utilizando el teorema de pitagoras para luego sumarla a las variables *trayectoria* y *distancia\_total*, la primera corresponde a la distancia total de la trayectoria a recorrer desde el origen hasta el destino de viaje mientras que la segundo se trata de un contador de distancia que lleva recorrida durante el día. Si la *distancia\_total* es menor o igual a los kilometro que realiza diariamente se suma a la distancia diaria y se continua analizando el siguiente punto del vector de la ruta ideal, de caso contrario se calcula la diferencia entre la distancia y se determina las coordenadas en donde acabará el recorrido ese día para agregarlo luego a al vector *coord\_diaria*. Finalmente con esos datos se puede obtener las horas totales de viaje, los días de viaje y fecha de destino.

A continuación como ya se tienen las coordenadas con sus respectivas fechas se evalúa la radiación diaria disponible para el viaje, en esta parte se utiliza un programa *radiacion\_diaria* hecho en Python explicado más adelante que tiene como datos de entrada las coordenadas y fechas, estos datos se ordenan en la matriz auxiliar *A* del programa ruta inicial para luego exportar a un archivo llamado *coordenadas.txt* y se corre el programa de radiación mediante el comando `system`. Los resultados de la radiación se encontrarán en el archivo *resultados.txt* que se importan y ordenan para crear la matriz *radiacion* que contiene en cada fila latitud, longitud y radiación en [*kWh/m<sup>2</sup>*].

Luego con los datos de la radiación y utilizando el balance de energía de la Sección 6.3 se calcula la velocidad diaria y se guardan en el vector *v\_diaria*. Al igual que con la ruta ideal se calcula la posición diaria y tiempos de viaje pero esta vez usando los datos de velocidad según la radiación, los daos son guardados en la matriz *Ruta\_dia*. Cabe mencionar que la nueva ruta difiere de la ideal creada inicialmente, es por ello que se requiere de iterar la radiación con las nuevas coordenadas y fechas para tener un resultado más acertado, repitiendo todo el proceso nuevamente dando como resultado la ruta inicial definitiva.

Para finalizar se exportan tres archivos de texto, *ruta\_inicial.txt* y *ruta.txt* que entregan las coordenadas, fechas y velocidades; la diferencia está en que el primer archivo se guarda

como ruta inicial y el segundo es el que utilizará luego para ir iterando la ruta, finalmente el tercer archivo *datos\_entrada.txt* trata de la coordenada de origen que se utilizará en el siguiente programa, cabe destacar que como se trata de la etapa de diseño conceptual es necesario el paso anterior puesto que una vez la embarcación ya entre en periodo de prueba se tendrá la ubicación actual mediante satélite.

### 7.1.1. Zonas de navegación

Si bien las zonas de navegación dependen de cada país, se cuenta con ciertas características de viento y oleaje que hacen que zonas sean mejores para cierto tipo de navegación. A continuación en la Figura 7.3 se muestran siete zonas de navegación según su distancia a la costa, para navegación oceánica se recomienda la zona 1 en donde se tiene una mayor fuerza de viento y altura de olas, para navegación en alta mar se recomiendan las zonas 2 y 3, mientras que para navegación en aguas costeras se recomiendan las zonas 4, 5 y 6; finalmente la zona 7 corresponde a navegación en aguas protegidas. Dicho esto, la embarcación si bien está diseñada para todo tipo de navegación se prefiere mayormente la oceánica y en alta mar para evitar el contacto con otros barcos.

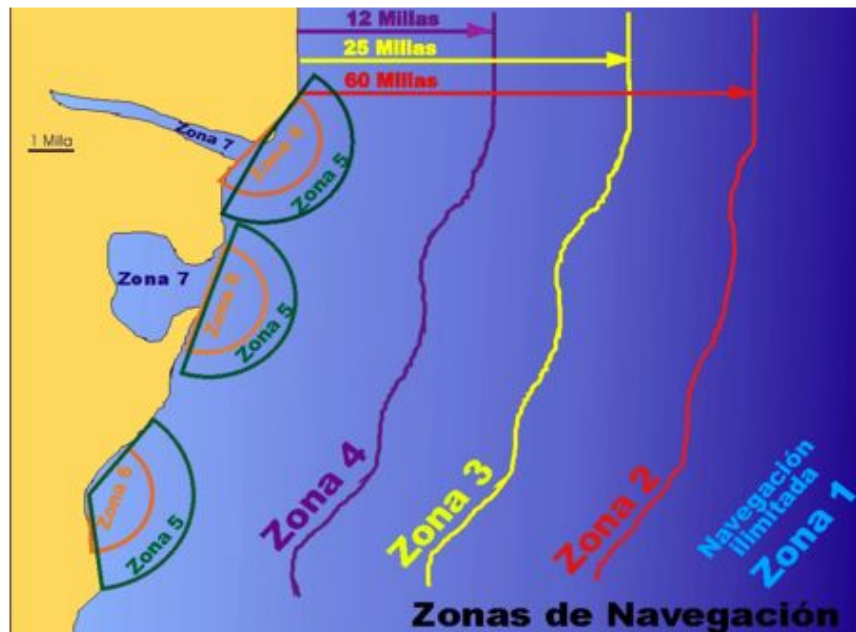


Figura 7.3: Zonas de navegación [6]

### 7.1.2. Radiación diaria

Como se dijo anteriormente y se ve en la Figura 7.4, los datos de entradas se encuentran en el archivo *coordenadas.txt* donde se tienen latitud, longitud, día, mes y año, por lo tanto el primer paso es importar dichos datos del archivo. Luego, para cada coordenada y para cada hora en el rango de 09:00 hrs a 18:00 hrs se determina la radiación minuto a minuto en  $[W/m^2]$  utilizando la biblioteca Pysolar y se suma a una variable llamada *sum*, luego se promedia y se hace la transformación a irradiancia diaria por unidad de tiempo  $[kWh/m^2]$  que se agrega al vector *radiacion*.

Posteriormente se ordenan los datos en una matriz llamada *resultados* donde en cada fila se encuentra la latitud, longitud y radiación del punto, finalmente se exporta dicha matriz al archivo *resultados.txt*.

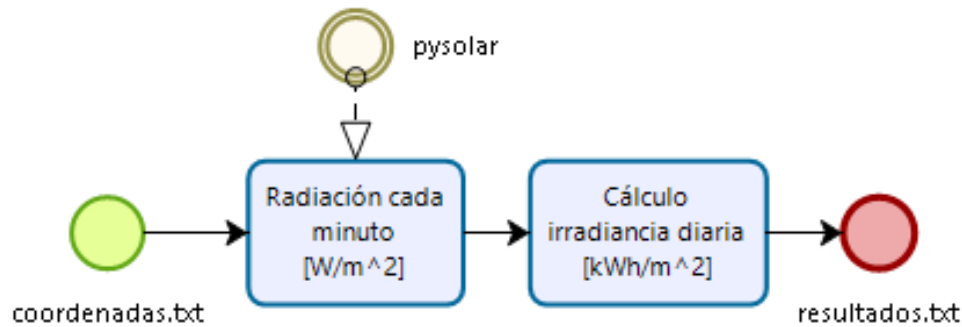


Figura 7.4: Diagrama programa radiación diaria

## 7.2. Ruta actual

El segundo programa en Matlab corresponde a la ruta actual que tiene como finalidad obtener la posición de la embarcación minuto a minuto para la próxima hora. En la Figura 7.5 se muestra el diagrama del programa, donde se tiene en verde los datos de entrada que corresponden a la posición actual del archivo *datos\_entrada.txt* y la ruta de viaje del archivo *ruta.txt*. Una vez cargados los datos se buscan los barcos alrededor para primero de genera un área crítica alrededor de la posición actual de la nave de  $0,4 [^\circ]$  a la redonda, ese valor se escoge ya que en promedio se tiene una velocidad máxima de  $30-40 [km/h]$  en buques lo que es equivalente a  $0,27-0,36 [^\circ/h]$ , con el área ya generada se llama a la api de Marine Traffic y se obtienen los datos de los barcos alrededor que luego se filtra la información como latitud, longitud, velocidad y curso, necesaria para el funcionamiento del programa.

Con los datos recolectados de los otros barcos, se determina la trayectoria de cada barco minuto a minuto, para ello se crea la matriz *Trayectoria* donde su primera columna corresponde al tiempo desde 0 a 59 minutos, mientras que las siguientes columnas pertenecen a la latitud y longitud de cada barco según el tiempo correspondiente, para obtener la coordenada en cada minuto primero es necesario obtener cuánto avanza tanto el latitud como el longitud durante un minuto, para ello con el dato de velocidad se calcula el modulo de la distancia que recorre en  $[^\circ/min]$  y con el curso ya tenemos el ángulo en que se dirige pudiendo descomponer la distancia recorrida en latitud y longitud. Finalmente lo más lógico sería agregar los delta latitud y longitud minuto a minuto sin embargo se debe hacer una consideración primero que es el borde costero, es por esto que se agrega la condición de si la nueva coordenada tiene una distancia menor a  $0,1 [^\circ]$  se repetirá la coordenada anterior hasta el fin de la hora.

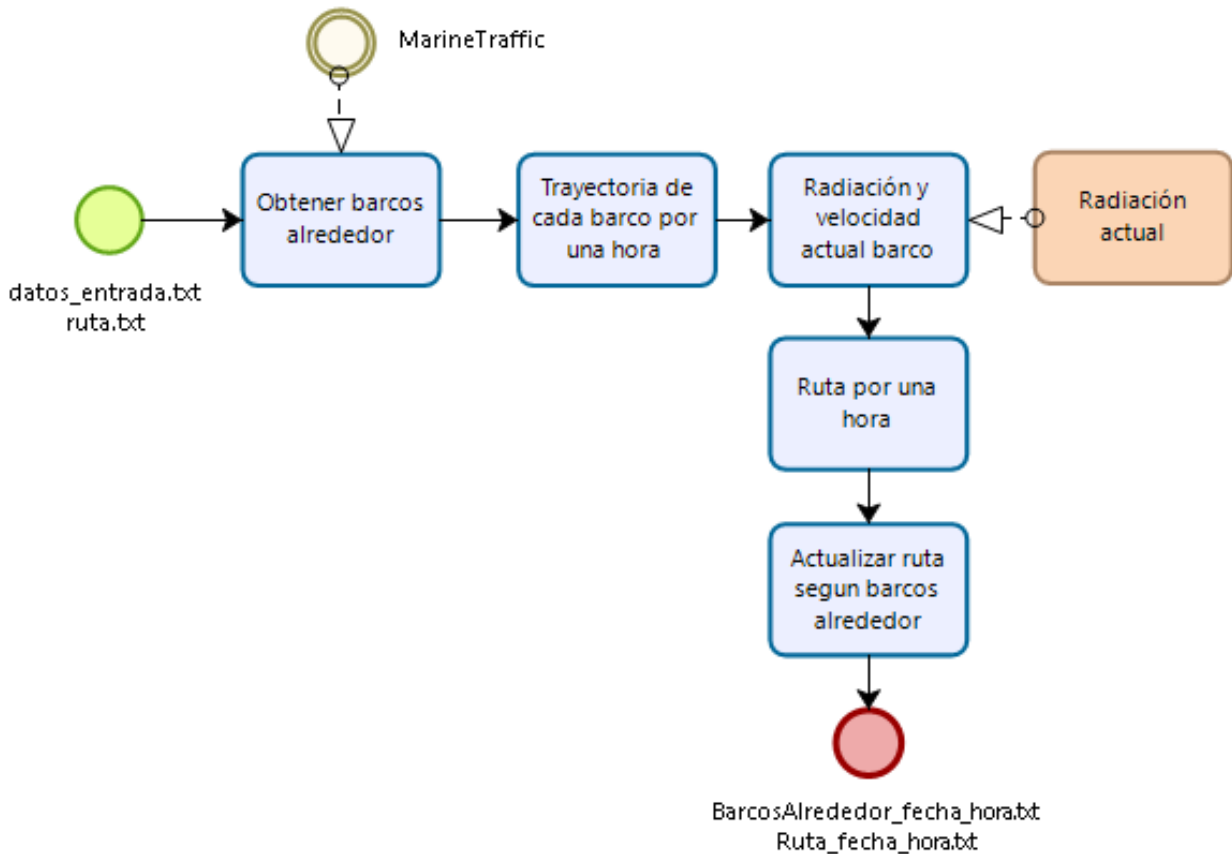


Figura 7.5: Diagrama de programa ruta actual

Posteriormente se busca obtener los datos de la embarcación para determinar la ruta en la próxima hora, para obtener la radiación actual se utiliza un programa Python al igual que en el programa de ruta inicial llamado *radiacion\_actual* luego utilizando el balance de energía se calcula la velocidad actual, como estará en operación dentro de cierto horario es necesario agregar una condición de velocidad cero cuando se encuentre fuera de dicho horario.

Con los datos obtenidos se procede a determinar la ruta en la próxima hora, al igual que con los barcos alrededor primero se calcula la distancia que recorre en un minuto y después se requiere determinar el curso de la embarcación, para ello se busca el punto de la ruta más cercana a la posición actual y se calcula el curso para llegar a él. Por último con el curso y la velocidad se calcula el delta latitud y longitud por minuto para agregarlo a la matriz *Ruta\_hora*.

Aunque ya se tiene la matriz de la ruta durante la próxima hora se tiene que evaluar si alguno de los barcos cercanos se cruce en ella y se deba modificar, para cada minuto se calcula el modulo de la distancia entre el barco diseñado y los barcos alrededor en la zona, se determina un margen critico de  $0,01$  [°] ya que según la velocidad máxima promedio ya mencionada anteriormente se avanza  $0,0023$  [°] en un minuto, luego si la distancia es menor se calcula la distancia tanto para latitudes como longitudes y se establece un segundo margen de  $0,005$  [°]; si la distancia es menor al margen se agrega un nuevo punto cambiando la latitud o longitud según corresponda para que se cumpla dicho margen. Ya con el nuevo punto definido

se procede a calcular el nuevo curso y finalmente la nueva coordenada, como se modifica un punto de la ruta es necesario actualizar todos los puntos de la ruta a continuación y se repite nuevamente el proceso para todos los tiempos.

Para terminar se exportan los datos a archivos de texto, el primero con los barcos alrededor de la matriz *Trayectoria* llamado *BarcosAlrededor\_fecha.txt*, las coordenadas de la ruta para la próxima hora en uno llamado *Ruta\_fecha.txt* y finalmente la última coordenada de la hora para la próxima iteración en *datos\_entrada.txt*.

### 7.2.1. Radiación actual

De manera similar al programa de radiación diaria se sigue el mismo proceso como se ve en la Figura 7.6, los datos de entradas se encuentran en el archivo *rad\_actual.txt* donde se tienen las coordenadas actuales, día, mes y año, por lo tanto el primer paso es importar dichos datos del archivo. Luego se determina la radiación minuto a minuto en  $[W/m^2]$  en la hora actual, utilizando la biblioteca Pysolar y se suma a una variable llamada *sum* que se promedia y se hace la transformación a irradiancia diaria por unidad de tiempo  $[kWh/m^2]$  que se agrega a la variable *radiacion*.

Posteriormente se ordenan los datos en el vector llamado *resultados* donde se encuentra la latitud, longitud y radiación del punto, finalmente se exporta el resultado al archivo *resultados\_rad\_actual.txt*.

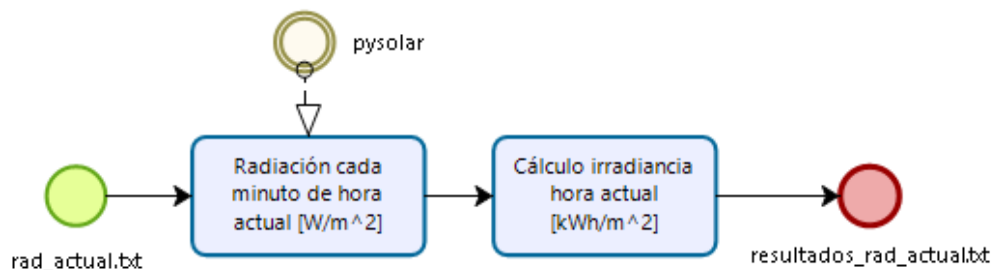


Figura 7.6: Diagrama de programa radiación actual

### 7.3. Repetir programa

Para concluir con la serie de programas, como la ruta actual según los barcos alrededor determina las coordenadas solo por una hora es necesario algún programa que repita la iteración, para ello se utiliza un bucle mediante el comando *while*. Luego mientras sea cierto se corre el programa *Ruta\_actual* y se realiza una pausa de 3.597 segundos, se restas 3 segundos a la hora ya que es lo que se demora en funcionar el programa de ruta aproximadamente.



# Capítulo 8

## Resultados y discusión

Dentro del presente trabajo se pretende estudiar dos viajes de distinta duración, el primero comienza en la playa Jama del país de Ecuador hasta Sta. Teresa ubicada en Costa Rica, mientras que el segundo viaje se realiza dentro de Chile desde el Puerto de Talcahuano hasta el Puerto de Valparaíso.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de viaje de los programas ya descritos en la sección anterior, los cuales se encuentran divididos en dos secciones principales: ruta inicial y ruta actual.

### 8.1. Ruta inicial

Como se dijo previamente la lógica del programa es que con los datos de coordenadas de origen, fecha de origen y coordenadas final, se pueda trazar la ruta a seguir por la embarcación. En primera instancia se traza una ruta recta entre ambos puntos, la cual luego se mejora con una restricción de distancia al borde costero. La finalidad además de conseguir la ruta a seguir, es estimar el tiempo de viaje, radiación diaria promedio y velocidad estimada.

#### 8.1.1. Viaje 1: Playa Jama (Ecuador) - Sta. Teresa (Costa Rica)

El primer resultado son las coordenadas de ruta de viaje, en la Figura 8.1 se muestra en color rojo, además se traza el borde costero para tener una mejor idea de los límites continentales. En la Figura 8.2 se puede ver en mayor detalle la ruta, en este caso corresponde a una línea recta desde el origen en el país de Ecuador hasta Costa Rica lo que indica que no hay cambios respecto a la ruta ideal.

La fecha de inicio del viaje corresponde al 13 de Marzo del 2020 a las 13:00 [*hrs*], cabe destacar que en cuanto a su ubicación se está cercano a la línea del Ecuador en donde se encuentran las mayores radiaciones del planeta.



Figura 8.1: Ruta inicial entregada en el mapa para viaje 1



Figura 8.2: Detalle ruta inicial entregada en el mapa para viaje 1

Una vez determinada la ruta, con la velocidad de diseño para la radiación del día y posición de origen, se determina el tiempo total de viaje y la posición diaria de la embarcación, considerando un tiempo de navegación diaria de ocho horas.

Luego, con dicho plan inicial de viaje se evalúa la radiación promedio diaria de cada coordenada según su fecha, en la Figura 8.3 se muestran los resultados de dicha radiación para cada punto de la ruta trazada.

Como es de esperar a medida que la embarcación se aleja de la línea del Ecuador la radiación diaria promedio va disminuyendo, sin embargo los valores siguen siendo elevados, partiendo inicialmente en los  $4,26 [kWh/m^2]$  para terminar en  $3,95 [kWh/m^2]$  de manera aparentemente lineal.

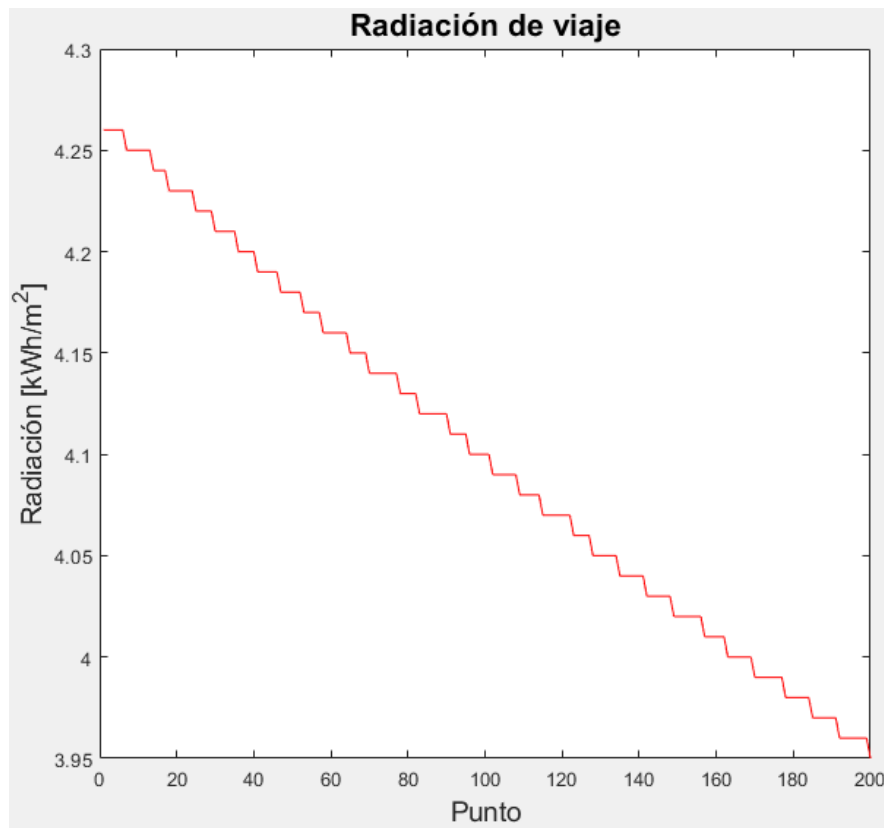


Figura 8.3: Gráfico radiación diaria promedio para cada punto de la ruta

Finalmente, con la radiación y la Ecuación 6.29 se obtiene la velocidad para cada punto y se determina las coordenadas diarias. A continuación en la Figura 8.4 se muestran los resultados para la velocidad diaria, la cual como es esperarse tiene un comportamiento similar al de la radiación, en donde va disminuyendo a medida que se acerca al punto de destino. Otra resultado a destacar es la fecha de termino del viaje, el cual concluye el 31 de Marzo del mismo año dando como resultado 19 días de viaje.

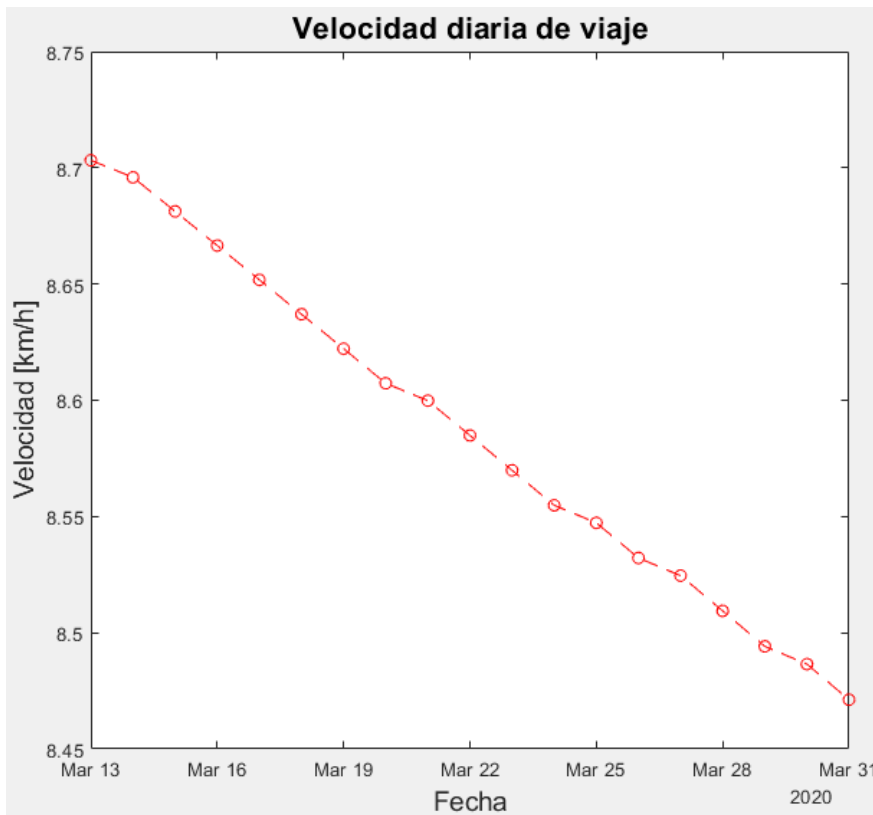


Figura 8.4: Gráfico velocidad diaria promedio según fecha para viaje 1

### 8.1.2. Viaje 2: Pto. de Talcahuano (Chile) - Pto. de Valparaíso (Chile)

El segundo viaje entregado al programa como se dijo anteriormente va desde el puerto de Talcahuano hasta el puerto de Valparaíso con fecha de origen del 23 de Marzo de 2020. En la Figura 8.5 se observa la ruta inicial trazada por el programa, a diferencia del viaje anterior en este es relevante la distancia al borde costero, puesto de la ruta bordea el continente, por lo que cumple la distancia mínima a la costa de 25 millas náuticas.

Ya determinada las coordenadas para la ruta inicial, se continua con la evaluación de la radiación, en la Figura 8.6 se muestra los resultados para la radiación solar diaria promedio, se puede observar que el viaje comienza con una radiación de  $4,23 [kWh/m^2]$  y al segundo día tiene un aumento de  $0,02 [kWh/m^2]$  en el cual se mantiene durante los próximos tres días para finalmente disminuir en  $0,01 [kWh/m^2]$  durante los últimos dos días.

Una vez obtenida la radiación diaria promedio, se procede a calcular la velocidad de la embarcación. En la Figura 8.7 se muestran los resultados de la velocidad para cada día del viaje, la cual al igual que en el viaje anterior sigue el comportamiento de la radiación como es lo esperado, el primer día se tiene una velocidad cercana a los  $8,68 [km/h]$  para luego aumentar a  $8,70 [km/h]$  el segundo día y mantenerse ahí los próximos tres días; finalmente los últimos dos días disminuye a  $8,69 [km/h]$ .

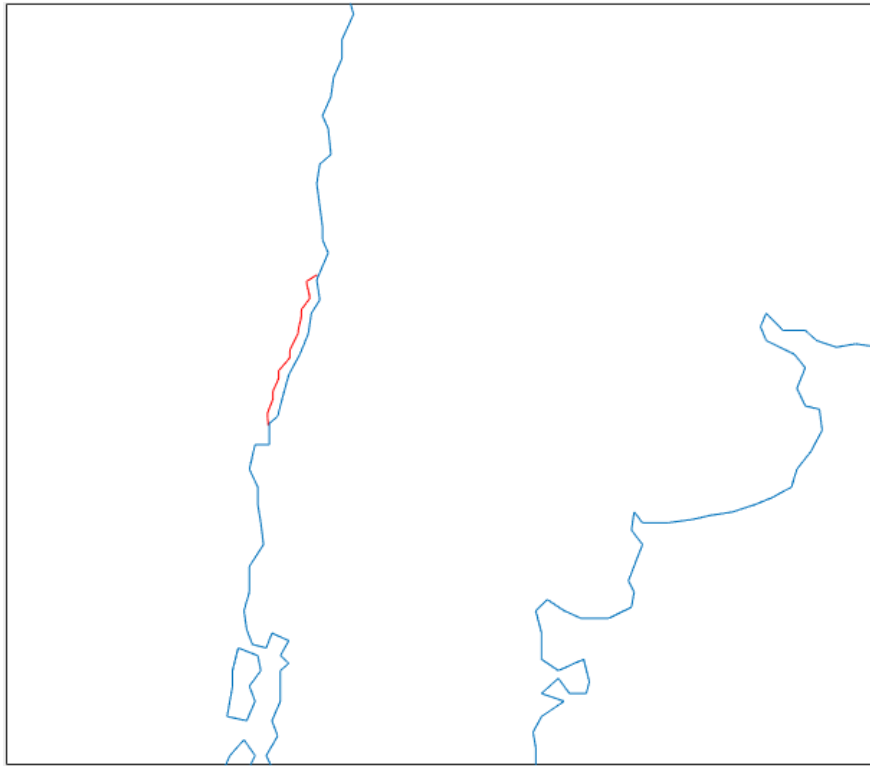


Figura 8.5: Ruta inicial entregada en el mapa para viaje 2

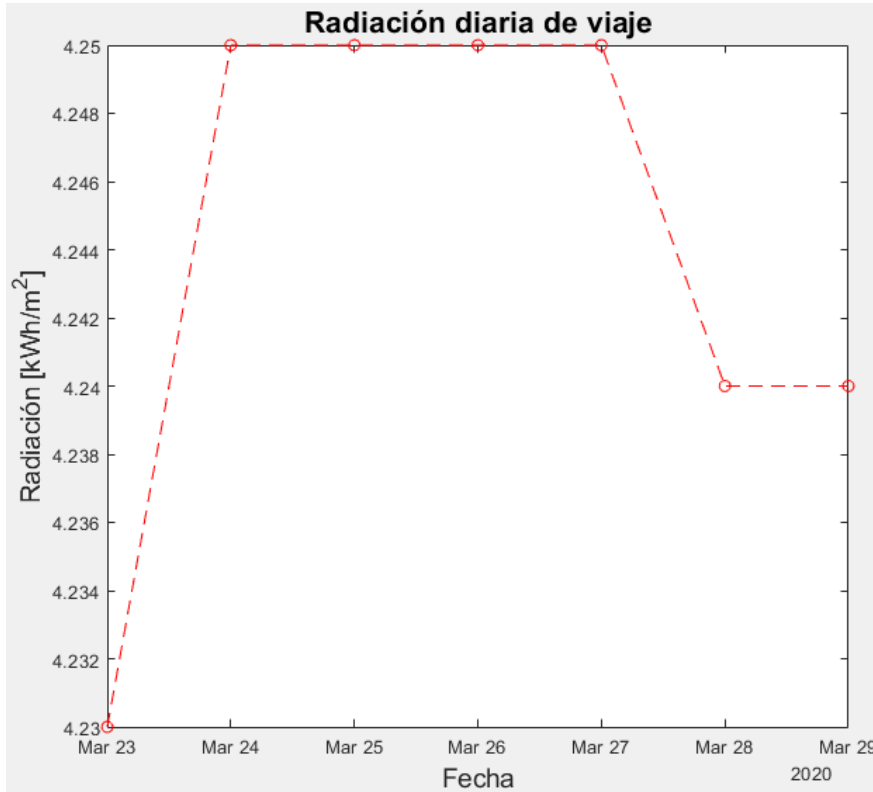


Figura 8.6: Gráfico de radiación diaria promedio según fecha para viaje 2

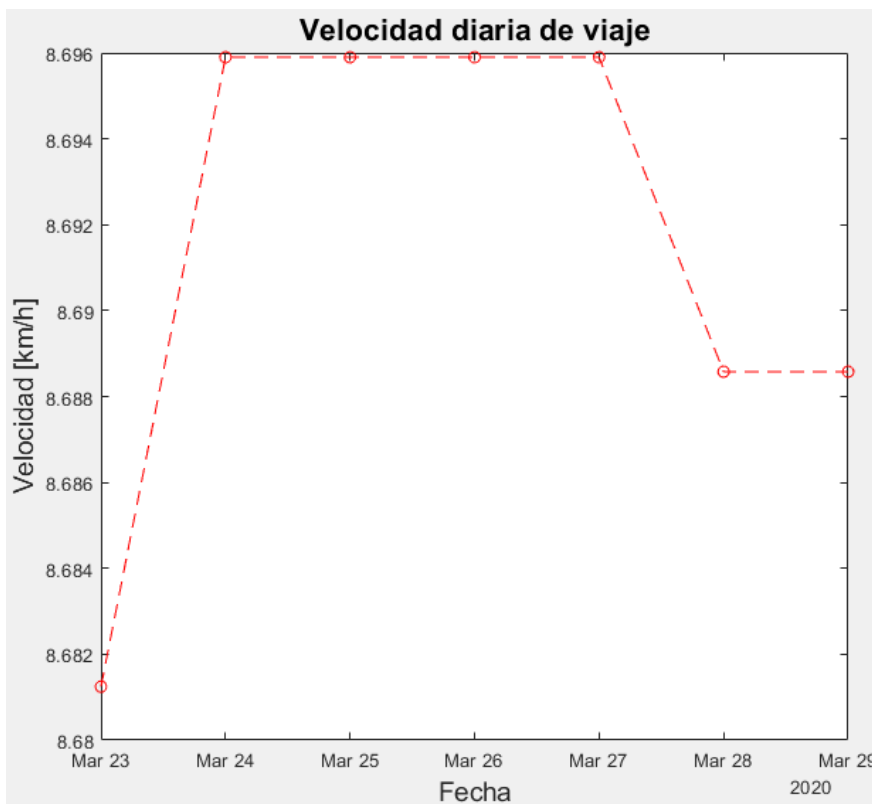


Figura 8.7: Gráfico de velocidad diaria promedio según fecha para viaje 2

## 8.2. Ruta actual

Lo que se busca principalmente en esta sección es comparar los resultados entregados en la ruta inicial con los de la ruta actual, tanto en trayectoria, radiación y velocidad.

En este programa se tienen como datos de entradas la posición actual de la embarcación y la ruta inicial determinada anteriormente, según la posición se genera un área de seguridad de  $0,4$  [°] a la redonda para pedir datos a Marine Traffic de los barcos que se encuentran ahí.

Una vez identificado los barcos alrededor se procede a calcular la trayectoria de dichos barcos en el periodo de una hora, las cuales serán comparadas con la matriz de ruta inicial distinguiendo cuales pasan cerca de ella, para ello se agregara un margen de seguridad a la ruta inicial.

### 8.2.1. Viaje 1: Playa Jama (Ecuador) - Sta. Teresa (Costa Rica)

En la Figura 8.8 se muestra gráficamente en el mapa la comparación entre la ruta inicial y la ruta actual total, en rojo se encuentran los datos para la ruta inicial mientras que la línea azul punteada corresponde a los datos de la ruta actual. Como se aprecia, el comportamiento es idéntico lo que indica que durante el viaje no se tuvieron barcos lo suficientemente cercanos para provocar un cambio en su ruta o por lo menos no una considerable que pudiera apreciarse en el mapa.

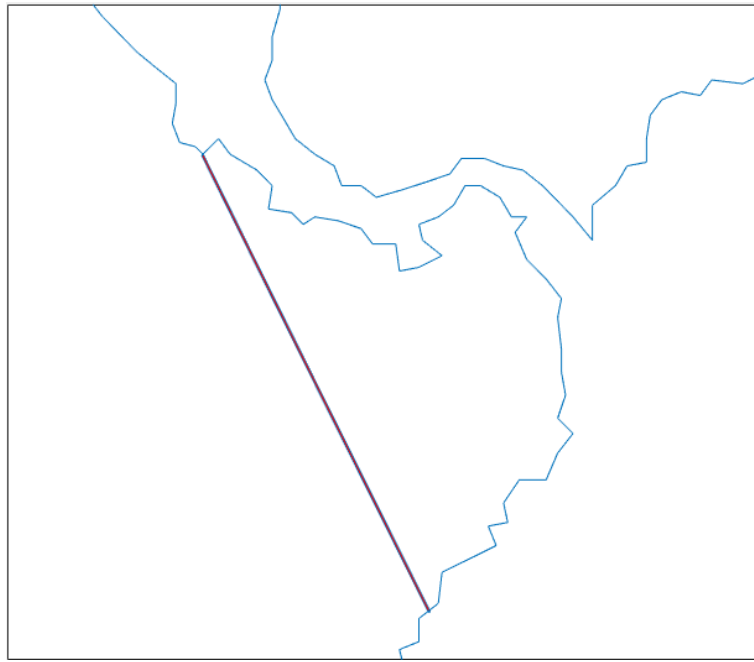


Figura 8.8: Comparación ruta inicial y ruta actual viaje 1

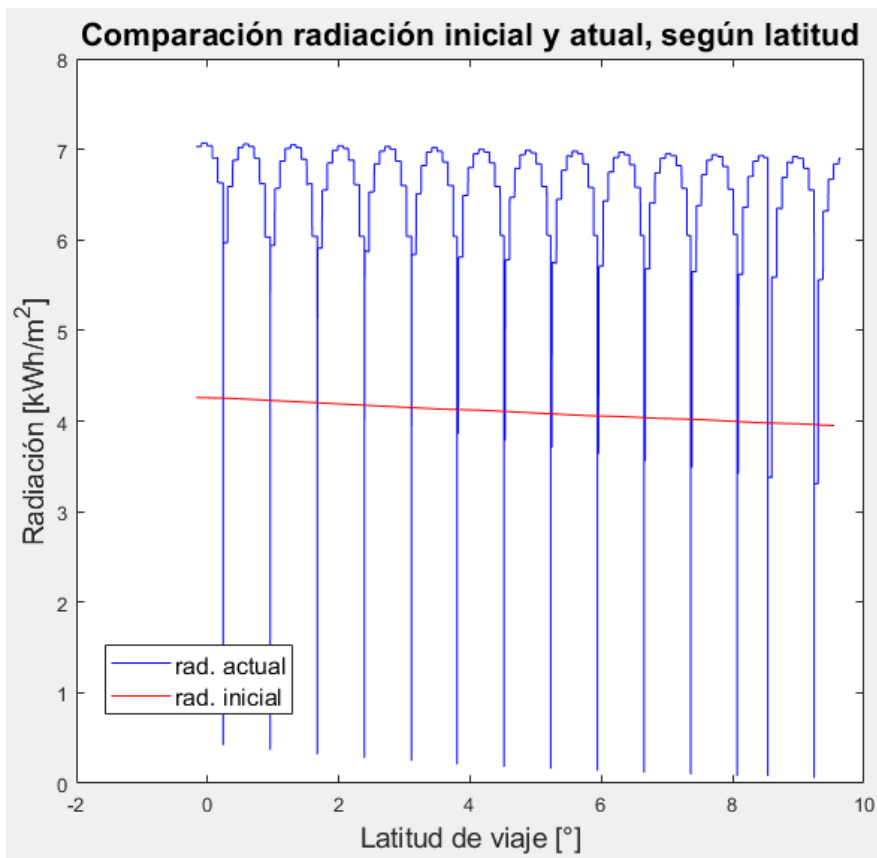


Figura 8.9: Comparación radiación inicial y actual según latitud para viaje 1

Continuando con los resultados, en la Figura 8.9 se muestra un gráfico de la comparación

de la radiación inicial en rojo y actual en color azul según la latitud de viaje de la embarcación, como se dijo anteriormente la radiación inicial corresponde al promedio diario por lo que se tiene un comportamiento más lineal comparado con la actual, mientras que la actual es la radiación promedio obtenida para cada hora del día por lo que se tiene una mayor variación en su comportamiento teniendo peaks diarios.

Sin embargo, como se esperaba los valores van disminuyendo a medida que se encuentran en latitudes más lejanas a la línea del Ecuador, y la línea de la radiación inicial se encuentra centrada lo que indica que efectivamente corresponde al promedio de los datos obtenidos en la radiación actual.

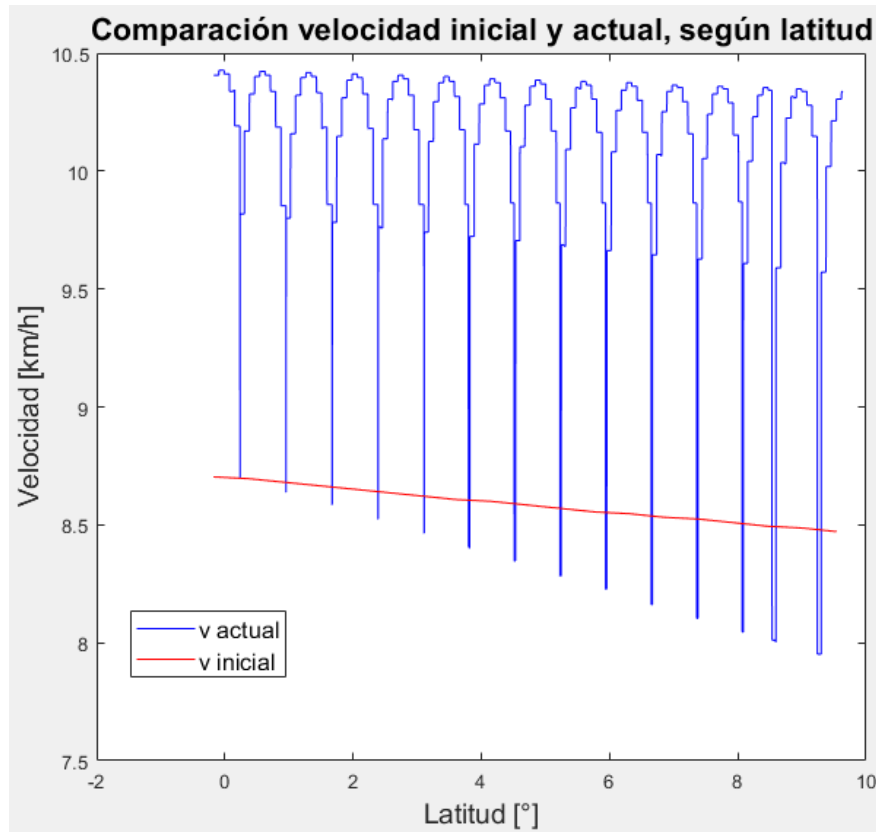


Figura 8.10: Comparación velocidad inicial y actual según latitud para viaje 1

En la Figura 8.10 se muestra la comparación entre la velocidad de la ruta inicial en rojo y de la ruta actual en color azul de la embarcación según la latitud de viaje en donde se encuentre. Al igual que en el gráfico anterior la velocidad inicial presenta un comportamiento más lineal que la velocidad actual, puesto que corresponde al valor promedio diario obtenido a partir de la radiación promedio diaria, mientras que la velocidad actual presenta peaks durante el día y no se alcanza valores cercanos a ceros como en el caso anterior para la radiación actual.



Se tiene que a diferencia de la radiación los valores iniciales no representan el promedio de la velocidad actual, esto se debe a que no se utiliza toda la radiación absorbida por los paneles para la navegación diaria, ya que se detiene antes para poder cargar las baterías con las últimas horas de radiación del día. En consecuencia la velocidad actual sólo representa los valores donde se tiene mayor radiación a diferencia de la velocidad inicial que toma como radiación el promedio diario para el cálculo. Esto explicaría por qué el tiempo de viaje total de la ruta actual es menor al de la ruta inicial, puesto que termina su viaje el día 27 de Marzo a las 18:00 [hrs] que es cuatro días antes de lo esperado inicialmente.

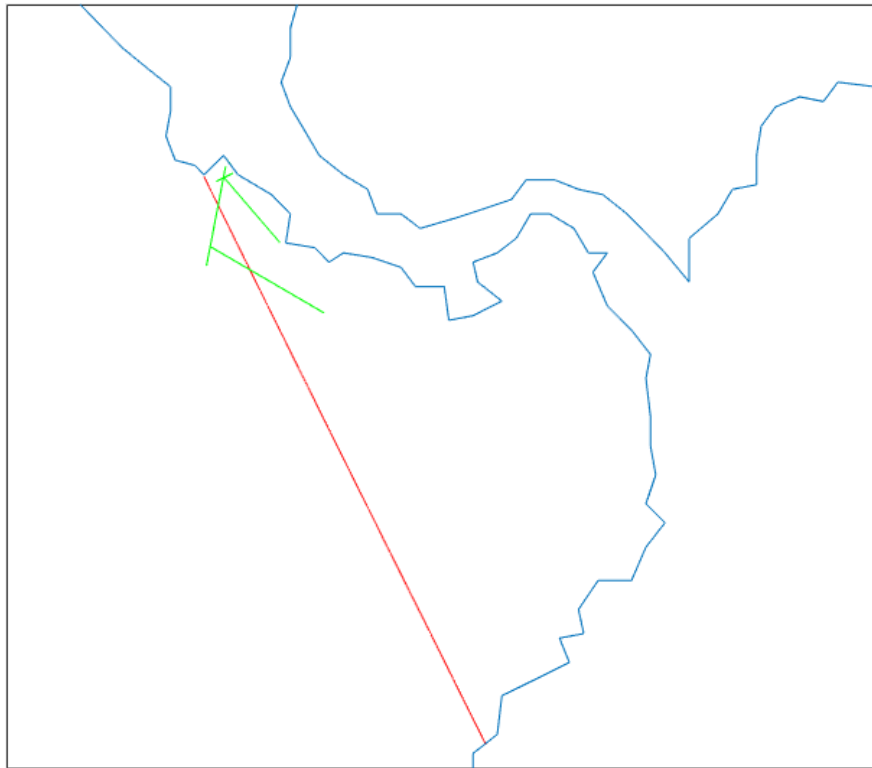


Figura 8.11: Barcos alrededor de la embarcación para viaje 1

Anteriormente se dijo que una de las posibles razones por la que las trayectorias inicial y actual fueran iguales era la poca cantidad de barcos navegando cerca de la nave, luego en la Figura 8.11 se muestran los barcos alrededor en color verde, mientras que en rojo se tiene la ruta actual total del viaje. Se observa que al final del viaje se encuentra con barcos en su camino, en donde solo dos de ellos se cruzan en su ruta de navegación y por los resultados obtenidos en la comparación de rutas se presume que cruzan la trayectoria en tiempos distintos a la embarcación lo que explicaría el por qué no se modifica la ruta inicial.

Luego en la Figura 8.12 se tiene el gráfico de la distancia en grados entre los barcos alrededor y la embarcación del proyecto según el minuto de distintas horas en que se acercan, en rojo se muestra el margen crítico de distancia de 0,01 [°] correspondiente a 1,1 [km] aproximadamente mientras que en azul se muestran las distancias correspondientes a los barcos alrededor.

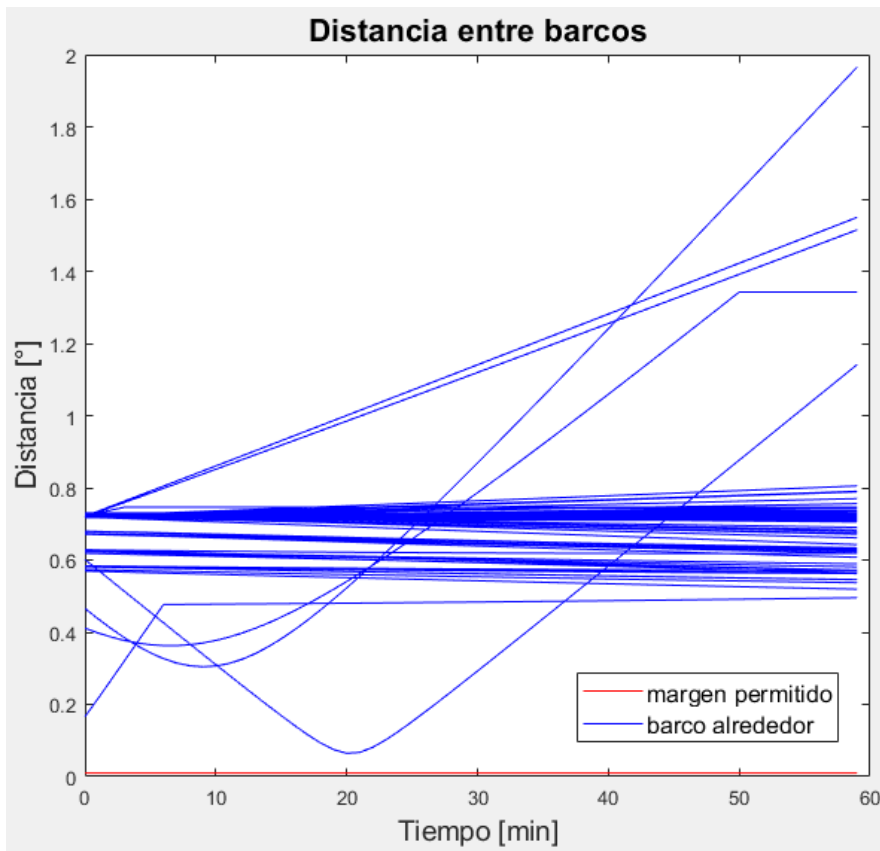


Figura 8.12: Distancia entre embarcación y barcos alrededor para viaje 1

Se observa que solo una embarcación se acerca al margen crítico permitido pero no lo suficiente para provocar un cambio en la ruta de la embarcación, también se tiene una gran cantidad de líneas horizontales lo que indica que uno de los barcos tiene una ruta relativamente paralela a la actual, lo que se puede advertir en la Figura 8.11.

### 8.2.2. Viaje 2: Pto. de Talcahuano (Chile) - Pto. de Valparaíso (Chile)

Al igual que en el viaje anterior, el primer resultado obtenido corresponde a la comparación entre la ruta inicial en color rojo y actual en la línea azul punteada mostradas en la Figura 8.13. A simple vista las rutas se ven igual, sin embargo si las vemos en mayor detalle como se muestra en la Figura 8.14 se observan pequeñas variaciones entre ellas, lo que indicaría que no se tuvieron embarcaciones alrededor que afectaran de manera significativa a la ruta trazada inicialmente.

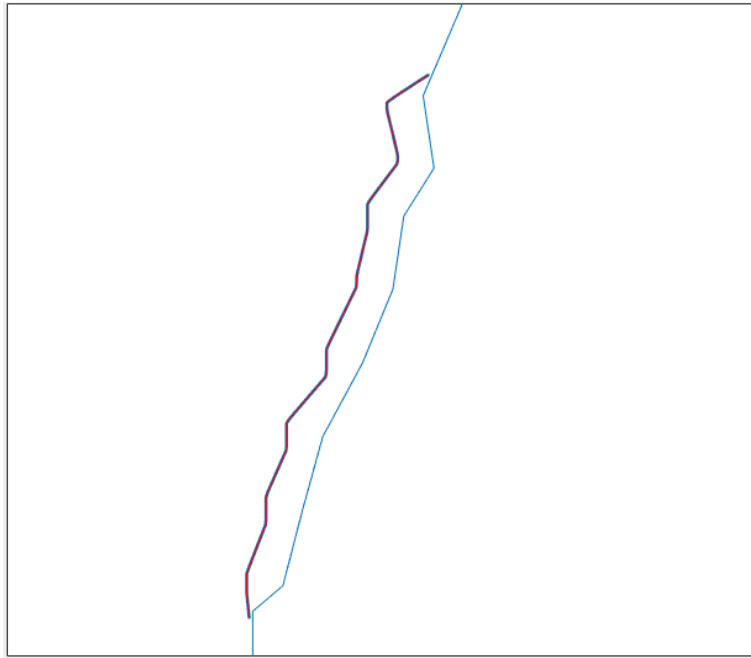


Figura 8.13: Comparación ruta inicial y ruta actual viaje 2

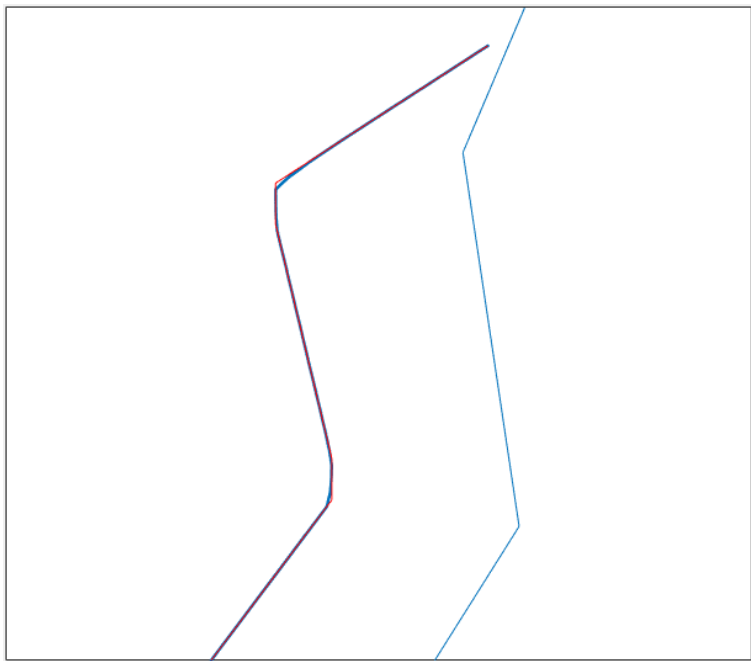


Figura 8.14: Detalle comparación ruta inicial y ruta actual viaje 2

En la Figura 8.15 se muestra el gráfico con la comparación de la radiación inicial y actual según la latitud de viaje en donde se encuentre la embarcación, como se esperaba la radiación actual tiene un comportamiento similar para cada día, exceptuando el tercer día en donde por fallas de la simulación el barco estuvo detenido por medio día.

Además, de manera similar al viaje anterior se tiene que la línea de radiación inicial representa el promedio de las radiación actual como era de esperarse, cabe destacar que a medida que se acerca al destino los mínimos de radiación actual son menores a pesar de ello los peaks son similares para todos alrededor de los  $6,8 [kWh/m^2]$ .

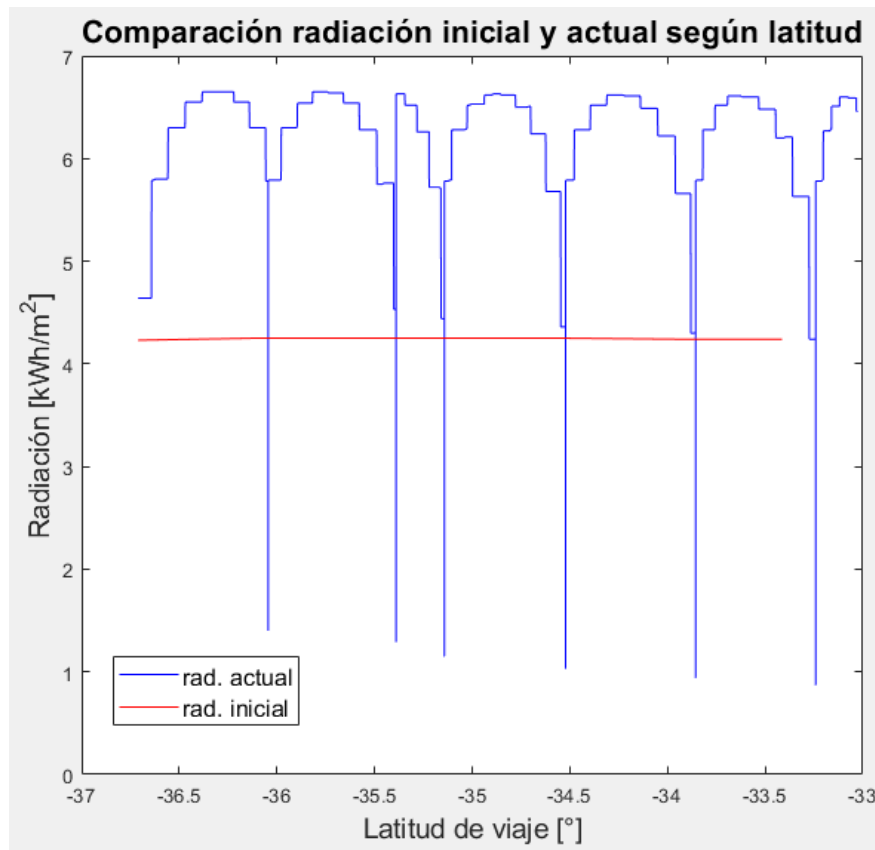


Figura 8.15: Comparación radiación inicial y actual según latitud para viaje 2

Posteriormente se procede a la comparación de velocidades entre la calculada por la ruta inicial y la ruta actual, al igual que en el viaje anterior la velocidad promedio diaria calculada en la ruta inicial es menor a la velocidad actual calculada para cada hora de viaje, a pesar de ello se ve una diferencia mayor entre las curvas que en el viaje 1 en donde se tenían puntos de intersección entre las curvas.

Además, se observa que a medida que pasan los días el mínimo de velocidad es cada vez menor al igual que los peaks diarios que se mantienen cercano a los  $10,2 [km/h]$ , en cuanto a la duración de viaje se tiene que la fecha de llegada a destino corresponde al 29 de Marzo de 2020 a las 14:06 [hrs] como era lo esperado, no obstante se debe considerar que durante el tercer día de viaje estuvo medio día sin funcionar por lo que hubiera podido llegar un día antes a termino.

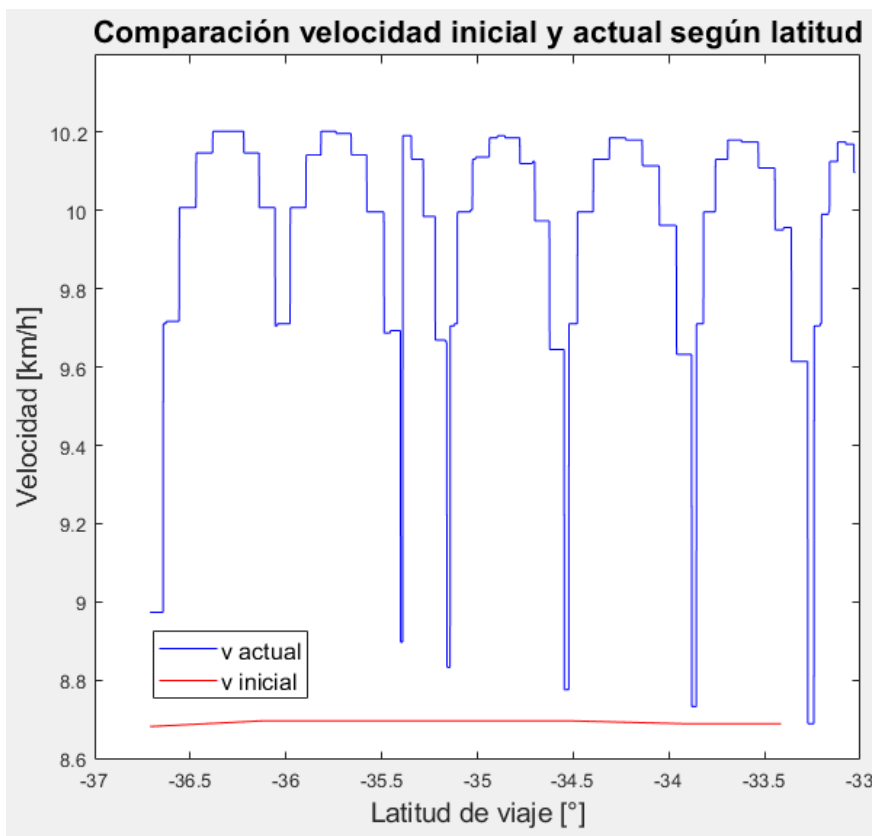


Figura 8.16: Comparación velocidad inicial y actual según latitud para viaje 2

Continuando con los resultados, en la Figura 8.17 se muestran las rutas de los barcos alrededor de la embarcación en color verde y la ruta simulada en color rojo, en este viaje se tiene un mayor número de naves en comparación al anterior en donde varios de ellos coinciden con el plan de viaje, lo que no explicaría que no se tengan mayores desvíos de la ruta actual respecto a la creada inicialmente.

Se tiene una mayor concentración de barcos en el principio y fin de la ruta, lo que es de esperarse debido a que tanto el origen como el destino corresponden a ciudades del tipo portuarias, igualmente se puede observar un barco que tiene un trazado paralelo al de la nave de prueba en gran parte del viaje.

En total el programa calculó 380 rutas, de las cuales algunas se empalman debido a que pasado el tiempo el barco continuaba dentro del rango de estudio de  $0,4 [^\circ]$  a la redonda. Durante el primer día de viaje correspondiente al 23 de marzo se tiene registro de cinco horas en donde se tuvieron otros navíos en las proximidades de la nave en donde se trazaron 191 rutas, cabe destacar que a pesar de ser un gran número se debe considerar que varias de ellas se encuentran detenidas en el puerto por lo que no se logran apreciar en la Figura 8.17, continuando con el viaje no se tienen nuevos registros ya hasta el día 27 de marzo en donde se tuvo otro encuentro con un barco por el periodo de una hora. Como se dijo anteriormente en el final de la travesía correspondiente a los días 28 y 29 de marzo se tiene una lata concentración de barcos, en el primero se tiene registro de diez horas de proximidades en donde el programa realizó el trazando de 16 rutas para dicho tiempo mientras que para el último día se tiene

un registro de 13 horas con barcos en las cercanías trazando 172 rutas, al igual que en el primer día se tiene la presencia de barcos cercanos que se encuentran detenidos en el puerto.



Figura 8.17: Barcos alrededor de la embarcación para viaje 2

Debido a la alta cantidad de rutas trazadas por el programa se decide presentar los resultados para la distancia entre barcos en tres partes. La primera corresponde a la Figura 8.18 donde se presentan los resultados obtenidos para el día 23 de marzo, en rojo se muestra el margen crítico de proximidad de  $0,01 [^\circ]$  mientras que en azul se tienen las 191 rutas trazadas durante la simulación, se ve que a medida que pasa el tiempo la distancia entre los barcos va aumentando alejándose de la línea de margen crítico lo que explicaría el hecho de que no se realizara un cambio en la ruta de la embarcación, sin embargo en los primeros 20 minutos se tiene una cercanía entre las líneas.

En la Figura 8.19 se ve en mayor detalle lo que ocurre para los primeros 20 minutos, en donde se aprecia la existencia de siete curvas que infringen el margen crítico permitido para la distancia entre barcos, en particular cinco de ellas se encuentran dentro de dicho margen en el minuto cero y a medida que avanza la embarcación la distancia va aumentando por lo que se puede considerar como una condición inicial cuando se salió del puerto que al minuto ocho ya se encuentran a una distancia segura, en cuanto a las otras dos rutas trazadas ambas traspasan el margen en el minuto siete y vuelven a la zona de seguridad en el minuto trece aproximadamente. Si bien todas las rutas nombradas pasan a la zona crítica, la embarcación logra aumentar la distancia con ellas evitando una posible colisión, representando una variación pequeña que no es visible en la Figura 8.13 donde se muestra la comparación entre la ruta inicial y actual.

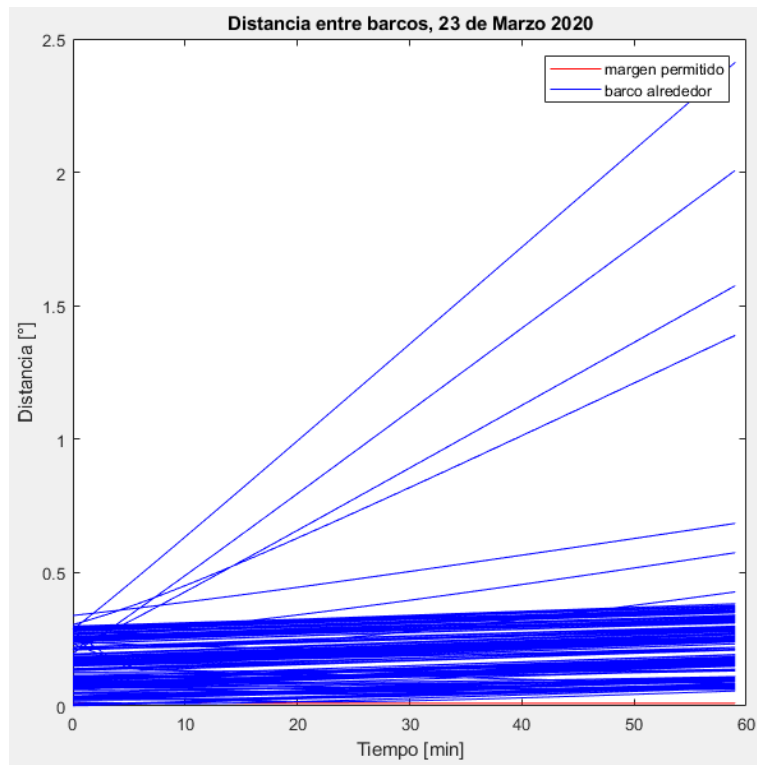


Figura 8.18: Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 23 de Marzo 2020

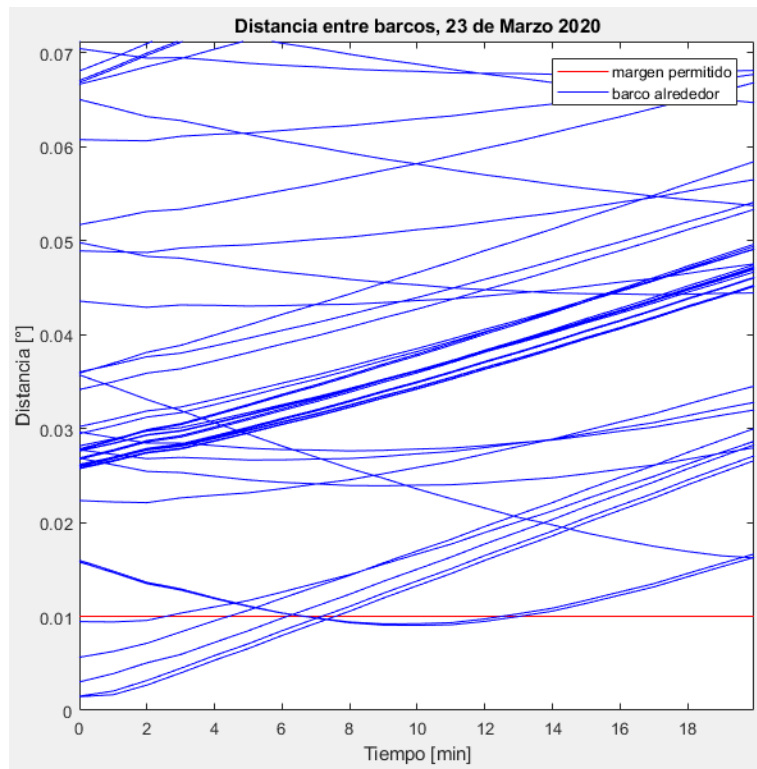


Figura 8.19: Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 23 de Marzo 2020 detalle

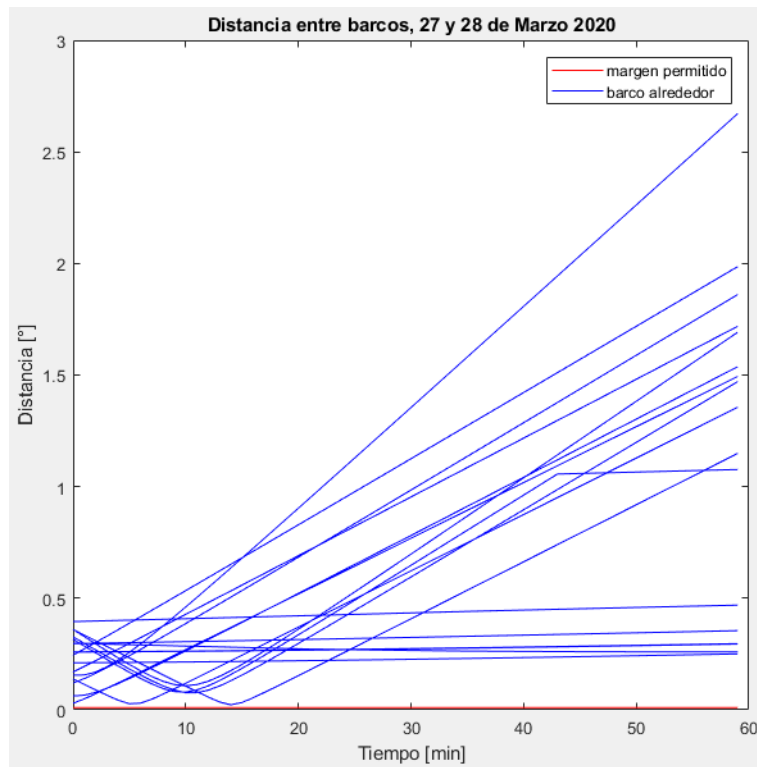


Figura 8.20: Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 27 y 28 de Marzo 2020

El segundo tramo de los resultados para la distancia entre barcos, mostrado en la Figura 8.20, corresponde a los días 27 y 28 de marzo en donde se trazan 17 rutas para barcos cercanos de los cuales ninguna traspasa el margen de seguridad permitido por lo que no se tienen desvíos de la ruta actual respecto a la inicial, además se aprecian cinco trazados paralelos al eje horizontal que podrían corresponder a la ruta paralela vista en la Figura 8.17.

Finalmente el último tramo corresponde al termino del viaje, 29 de marzo, en donde similar al primer día se tiene una gran densidad de trazados de barcos cercanos como se puede ver en la Figura 8.21 a continuación, pero en este caso al pasar los minutos la diferencia entre los barcos alrededor y la embarcación van disminuyendo en la mayoría de los casos, lo cual tiene sentido ya que se va acercando al puerto.

En cuanto al margen de seguridad permitido ningún trazo lo cruza hasta el minuto 30, en la Figura 8.22 se ve en mayor detalle lo que ocurre para los últimos 30 minutos donde dos de las curvas pasan a la zona critica, la primera lo hace en el minuto cuarenta y llega hasta una cercanía de 330 [m] para luego tener una distancia segura en el minuto 52, en cuanto al segundo trazo entra en el minuto 46 alcanzando una distancia mínima de 1 [km] a la embarcación y luego salir del margen critico en el minuto 51. Si bien ambas curvas alcanzan una distancia menor a la permitida, ninguna representa un colisión para la nave y logra tomar una distancia segura de ellos.



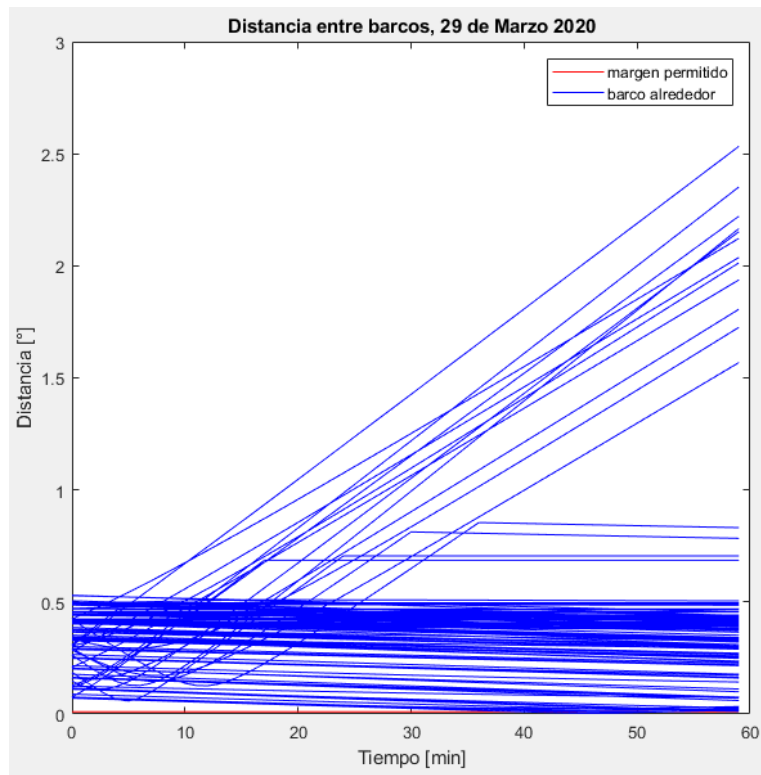


Figura 8.21: Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 29 de Marzo 2020

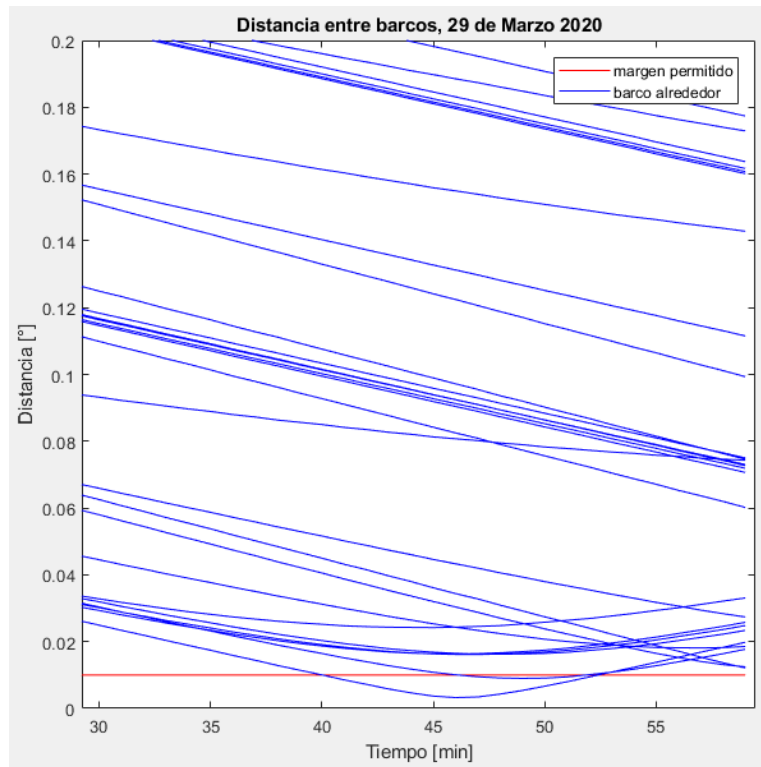


Figura 8.22: Distancia entre embarcación y barcos alrededor durante viaje 2, 29 de Marzo 2020 detalle

# Capítulo 9

## Propuesta de trabajo y conclusiones

En primer lugar, se desarrolló lo establecido en el objetivo general y los objetivos específicos. En resumen, se estudiaron modelos similares para generar una base de datos y así establecer parámetros de diseño en cuanto a dimensiones y peso, luego se seleccionó la tecnología adecuada para cada equipo, a partir de esto se obtuvieron las dimensiones principales del modelo y se realizó un balance de energía entre los distintos sistemas. Posteriormente se desarrolló una herramienta computacional utilizando diversos recursos para la simulación de dos viajes, según la radiación disponible y barcos alrededor.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que, los tiempos de viaje se encuentran dentro de los rangos aceptables a pesar de que se tenga un funcionamiento de 8 horas al día, debido a que se escogió un rango de funcionamiento en donde se tienen los mayores valores para la radiación por sobre el promedio diario de las locaciones. En cuanto a la comparación entre los tiempos obtenidos, los tiempos de viajes de la ruta actual conseguidos en las simulaciones son menores o igual a lo esperado según el programa de ruta inicial, por lo cual se concluye agregar una mejora al programa que permita calcular la velocidad para cada coordenada agregando una variable de tiempo de la hora en que se encuentra navegando en vez de utilizar la radiación promedio diaria.

Al comparar los resultados obtenidos para la velocidad según la radiación en el programa de ruta inicial, solo viendo los datos del segundo viaje se podría decir que tienen un comportamiento estrictamente lineal entre ellos con igual variación entre los valores, mientras que en el primer viaje las variaciones son de  $0,31 [kWh/m^2]$  en la radiación y  $0,24 [km/h]$  en la velocidad descartando dicha posibilidad, esto se debe a que en el segundo viaje las variaciones son menores por lo cual se plantea la posibilidad de crear una relación más simple y directa del balance de energía para casos como este.

En cuanto a la interacción que se tuvo con otra embarcaciones, estas no afectaron en gran medida al plan de ruta teniendo solo pequeñas variaciones respecto al plan inicial en el segundo viaje. En el primer viaje se tuvo menor presencia de otros barcos en comparación al segundo, debido a que en el primero se trataba de playas mientras que en segundo tanto el origen como el destino eran ciudades portuarias.

Respecto a la distancia entre embarcaciones alcanzadas, en el primer viaje ninguno presentó una amenaza crítica para la embarcación teniendo una distancia mínima de 14,45 [km]. Mientras que en el segundo viaje se tuvieron ocho trazados que traspasaron el margen crítico donde la mayoría de ellos se presentaron en el momento de salida del punto de origen, sin embargo la mínima distancia se alcanzó llegando al puerto de destino con un valor de 330 [m], a pesar de todo esto la nave logró tomar tomar distancia evitando cualquier colisión.

Dentro de las propuestas de trabajo para continuar con el proyecto se plantea considerar otros factores climáticos y geográficos como nubosidad, viento y corrientes oceánicas que afectan al movimiento de la embarcación; también se propone calcular la cantidad de energía obtenida de reserva para cada día durante las horas fuera del rango de operación.

Por otro lado, durante el desarrollo del informe solo se consideraron las colisiones con otros barcos, sin embargo durante el trayecto de la embarcación puede encontrar otros obstáculos como animales y rocas, entre otros. Es por ello que se propone el desarrollo de un sistema anticolidión mediante sensores y programación para desviarse de dichos obstáculos y no terminar atrapado o destrozado, además de ser más amigable con el ambiente en particular la fauna, correspondiente a una de las motivaciones del proyecto.

En cuanto a diseño aún queda mucho por hacer, como por ejemplo desarrollar un perfil de casco que sea mas aerodinámico y así aumentar el rendimiento, también se recomienda realizar un análisis mediante algún software de modelamiento para comparar con los resultados obtenidos en el capítulo de balance de energía para el sistema de propulsión. Además dentro del balance de energía se deben agregar las pérdidas más finas de los equipos y cableado, tanto para los del sistema fotovoltaico como para los de propulsión.

Si bien las simulaciones entregaron los primeros datos respecto al comportamiento de la embarcación y su viaje, se recomienda realizar más simulaciones con distintos orígenes y destinos de viajes, con el fin de tener una mayor información para distintas condiciones de funcionamiento. En particular se recomienda ejecutar uno de meses de viaje que cruce por distintas latitudes del planeta para estudiar su comportamiento cuando se tienen radiaciones bajas.

Para finalizar, dentro de las limitaciones que se tiene en una etapa de diseño conceptual y considerando los resultados obtenidos para velocidad y tiempos de viaje, se concluye que el diseño es técnicamente factible y se recomienda continuar con las etapas de ingeniería básica y de detalle del proyecto.

# Bibliografía

- [1] Autosolar Energy Solutions S.L.U. Conexión de las placas solares: tipos y puntos a tener en cuenta [Internet]. 2019 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/conexion-de-las-placas-solares-tipos-y-puntos-a-tener-en-cuenta>.
- [2] Autosolar Energy Solutions S.L.U. Paneles Solares Fotovoltaicos [Internet]. 2013 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://autosolar.es/paneles-solares>.
- [3] Henri Bergson, Isidore Caubin, Esta Rr, Isidore Caubin, and Isidore Caubin. Charla 7 de construcción naval Tema XLI: Resistencia al avance de la carena, propulsión del buque. 1941.
- [4] J.S. Carlton. Waterjet Propulsion. In *Marine Propellers and Propulsion*, pages 399–408. 2019.
- [5] Juan Alberto Carrasco. Integración de un UAV (vehículo aéreo no tripulado) en la plataforma robótica ARGOS. 2015.
- [6] Club Fondear. Zonas de navegacion [Internet]. 2007 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.fondear.org/infonautic/Saber{ }Marinero/Titulaciones{ }Nauticas/ZonasNavegacion/Zona{ }Navegacion.htm>.
- [7] Ministerio de defensa nacional. Decreto Ley 2222, 2005.
- [8] Escola Port. PNB-PER Nomenclatura náutica [Internet]. 2017 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://aulanautica.org/unidad/pnb-per-nomenclatura-nautica/>.
- [9] Hans Ekdahl Espinoza. Embarcaciones propulsadas por energía solar. *Revismar*, 1:72–81, 2014.
- [10] FPVMax. Variador electrónico (ESC): Qué es y cómo funciona [Internet]. 2016 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://fpvmax.com/2016/12/21/variador-electronico-esc-funciona/>.
- [11] Fundación El Desafío del Océano. Manual Básico para Patrones de Embarcaciones Deportivas [Internet]. 2015 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/reylanegras/>

manual-bsico-para-patrones-de-embarcaciones-deportivas.

- [12] Grupo Navega. El catamarán "Turanor PlanetSolar" alimentado por energía solar, estudia los efectos del cambio climático en la corriente del Golfo [Internet]. 2013 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.nauticalnewstoday.com/>.
- [13] GWL Power. Lithium & solar power LiFePO4 [Internet]. 2016 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://gwl-power.tumblr.com/post/140925159571/the-cycle-life-of-winston-batttery-cells-versus>.
- [14] How To Mechatronics. How Brushless Motor and ESC Work [Internet]. 2019 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>.
- [15] Solacity Inc. How to Find Happiness With LiFePO4 (Lithium-Ion) Batteries [Internet]. 2018 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.solacity.com/how-to-keep-lifepo4-lithium-ion-batteries-happy/>.
- [16] International AkzoNobel. ¿Cuánto anti-incrustante necesito? [Internet]. 2018 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.international-yachtpaint.com/es/es/asistencia/consejos-expertos-pintura-para-barcos/how-much-antifouling-paint-do-i-need>.
- [17] Sang-Hoon Kim. Brushless direct current motors. *Electric Motor Control*, (Dc):389–416, 2017.
- [18] Carolina Lopez. Hidrodinámica Marina Ii. 2007.
- [19] Maquinac. El drone acuático Waste Shark permite limpiar canales, lagos y mares [Internet]. 2019 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://maquinac.com/2019/09/el-drone-acuatico-waste-shark-permite-limpiar-canales-lagos-y-mares/>.
- [20] Marina Port Premia. Diferencias entre hélices y turbinas: Propulsión Waterjet [Internet]. 2018 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.marinapremia.com/diferencias-entre-helices-y-turbinas-propulsion-waterjet/>.
- [21] Bruce R. Munson. *Fundamental of Fluid Mechanics*. Don Fowley, sixth edit edition, 2009.
- [22] Ahmad Nasirudin, Ru Min Chao, and I. Ketut Aria Pria Utama. Solar powered boat design optimization. *Procedia Engineering*, 194:260–267, 2017.
- [23] Nomo Group Co Limited. Lo que debe saber sobre las baterías LiFePO4 [Internet]. 2018 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.smartnewenergy.com/info/sth-you-need-to-know-about-lifepo4-batteries-23935605.htm>.
- [24] PowerTech Systems. Lithium ion battery advantages [Internet]. 2013 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/lithium-ion-battery-advantages/>.

- [25] RELiON. The Total Cost of Ownership of RELiON's Lithium Iron Phosphate Batteries [Internet]. 2018 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://reliionbattery.com/blog/total-cost-ownership-lithium>.
- [26] John Teale. *Cómo diseñar un barco*. Ediciones Tutor, S.A., España, 2 edition, 2002.
- [27] Woodbank Communications Ltd. Battery and Energy Technologies [Internet]. 2005 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.mpoweruk.com/chemistries.htm>.
- [28] World Bank Group. Global Solar Atlas [Internet]. 2019 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://globalsolaratlas.info/map>.
- [29] Adriana Zurita Villamizar. Estado del arte y perspectivas de la tecnología CSP y de sistemas de almacenamiento en baterías [Internet]. 2017 [citado 7 de abril de 2020]. Disponible en: <https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno17/csp/Principios{ }funcionamiento.html>.

# Anexo A

## Fichas técnicas de equipos

## A.1. Panel solar

### PV-FLEX Series

Modelo	Flex018W12V	Flex025W12V	Flex050W12V	Flex060W12V	Flex060W24V	Flex100W12V	Flex120W12V
Potencia máxima	18W	25W	50W	60W	60W	100W	120W
Tensión máxima	19,4V	19,8V	17,6V	17,5V	35,2V	17,8V	22,0V
Corriente máxima	0,93A	1,26A	2,84A	3,43A	1,71A	5,62A	5,45A
Tensión en circuito abierto	23,7V	23,4V	21,2V	21,0V	42,3V	21,6V	26,4V
Corriente de corto circuito	1,03A	1,34A	3,05A	3,84A	1,86A	5,97A	5,87A
Máxima tensión del sistema	600V	600V	600V	600V	600V	600V	600V
Fusible	10A	10A	10A	10A	10A	10A	10A
Coefficiente de temperatura (Potencia)	-0,38%/°C	-0,38%/°C	-0,38%/°C	-0,38%/°C	-0,38%/°C	-0,38%/°C	-0,38%/°C
Coefficiente de temperatura (Tensión)	-60,8mV/°C	-60,8mV/°C	-60,8mV/°C	-60,8mV/°C	-60,8mV/°C	-60,8mV/°C	-60,8mV/°C
Coefficiente de temperatura (Corriente)	2,2mA/°C	2,2mA/°C	2,2mA/°C	2,2mA/°C	2,2mA/°C	2,2mA/°C	2,2mA/°C
Eficiencia de la célula	20,5%	19,5%	21,5%	19,6%	19,60%	19,9%	20,0%
Número de células	36	36	32	64	64	32	40
Tolerancia máxima	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%	±5%
Ancho	277mm	277mm	535mm	535mm	535mm	540mm	540mm
Alto	434mm	626mm	545mm	725mm	725mm	1050mm	1305mm
Profundo	3mm	3mm	3mm	3mm	3mm	3mm	3mm
Peso	0,29kg	0,55kg	0,70kg	0,93kg	0,93kg	1,35kg	1,80kg
Grado de flexibilidad	Max. 30°	Max. 30°	Max. 30°	Max. 30°	Max. 30°	Max. 30°	Max. 30°

Nota: Todos los valores eléctricos han sido realizados en condiciones estandar de certificación (irradiación de 1000W/m<sup>2</sup>, AM 1.5G, temperatura de célula de 77°F/25°C).



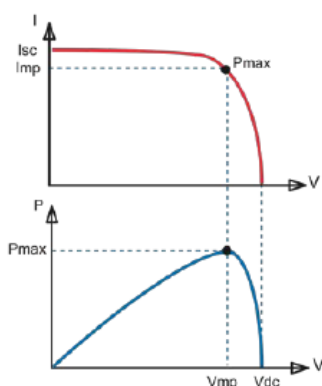
## A.2. Ficha técnica del regulador de carga

### Controlador de carga BlueSolar MPPT 75/10, 75/15 y MPPT 100/15

www.victronenergy.com



Controlador de carga solar  
MPPT 75/15



#### Seguimiento del punto de potencia máxima

##### Curva superior:

Corriente de salida (I) de un panel solar como función de tensión de salida (V).

El punto de máxima potencia (MPP) es el punto Pmax de la curva en el que el producto de I x V alcanza su pico.

##### Curva inferior:

Potencia de salida  $P = I \times V$  como función de tensión de salida.

Si se utiliza un controlador PWM (no MPPT) la tensión de salida del panel solar será casi igual a la tensión de la batería, e inferior a  $V_{mp}$ .

#### Seguimiento ultrarrápido del Punto de Máxima Potencia (MPPT, por sus siglas en inglés).

Especialmente con cielos nublados, cuando la intensidad de la luz cambia continuamente, un controlador MPPT ultrarrápido mejorará la recogida de energía hasta en un 30%, en comparación con los controladores de carga PWM, y hasta en un 10% en comparación con controladores MPPT más lentos.

#### Salida de carga

Se puede evitar que la batería se descargue en exceso conectando todas las cargas a la salida de carga. Esta salida desconectará la carga cuando la batería se haya descargado cuando llegue a una tensión preestablecida. También se puede optar por establecer un algoritmo de gestión inteligente de la batería: ver BatteryLife.

La salida de carga es a prueba de cortocircuitos.

Algunas cargas (especialmente los inversores) pueden conectarse directamente a la batería, y el control remoto del inversor a la salida de carga. Puede que se necesite un cable de interfaz especial; por favor, consulte el manual.

#### BatteryLife: gestión inteligente de la batería

Cuando un controlador de carga solar no es capaz de recargar la batería a plena capacidad en un día, lo que sucede es que el ciclo de la batería cambia continuamente entre los estados "parcialmente cargada" y "final de descarga". Este modo de funcionamiento (sin recarga completa periódica) destruirá una batería de plomo-ácido en semanas o meses.

El algoritmo BatteryLife controlará el estado de carga de la batería y, si fuese necesario, incrementará día a día el nivel de desconexión de la carga (esto es, desconectará la carga antes) hasta que la energía solar recogida sea suficiente como para recargar la batería hasta casi el 100%. A partir de ese punto, el nivel de desconexión de la carga se modulará de forma que se alcance una recarga de casi el 100% alrededor de una vez a la semana.

#### Algoritmo de carga de batería programable

Consulte la sección Asistencia y Descargas > Software en nuestra página web para más información.

#### Temporizador día/noche y opción de regulador de luminosidad

Consulte la sección Asistencia y Descargas > Software en nuestra página web para más información.


#### Opciones de datos en pantalla en tiempo real

- Smartphones, tabletas y otros dispositivos Apple y Android: consulte "VE.Direct y la mochila Bluetooth Low Energy"
- Panel ColorControl




Controlador de carga BlueSolar	MPPT 75/10	MPPT 75/15	MPPT 100/15
Tensión de la batería	Selección automática: 12/24 V		
Corriente de carga nominal	10 A	15 A	15 A
Potencia FV máxima, 12V 1a,b)	135 W	200 W	200 W
Potencia FV máxima, 24V 1a,b)	270 W	400 W	400 W
Desconexión automática de la carga	Sí, carga máxima 15 A		
Tensión máxima del circuito abierto FV	75 V	100 V	
Eficiencia máxima	98 %		
Autoconsumo	10 mA		
Tensión de carga de "absorción"	14,4 V / 28,8 V (ajustable)		
Tensión de carga de "flotación"	13,8 V / 27,6 V (ajustable)		
Algoritmo de carga	variable multietapas		
Compensación de temperatura	-16 mV / °C, -32 mV / °C resp.		
Corriente de carga continua/cresta	15A/50A		
Desconexión de carga por baja tensión	11,1 V / 22,2 V o 11,8 V / 23,6 V o algoritmo de BatteryLife		
Reconexión de carga por baja tensión	13,1 V / 26,2 V o 14 V / 28 V o algoritmo de BatteryLife		
Protección	Polaridad inversa de la batería (fusible) Corto circuito de salida / sobrecalentamiento		
Temperatura de trabajo	-30 a +60°C (potencia nominal completa hasta los 40°C)		
Humedad	95 %, sin condensación		
Puerto de comunicación de datos	VE.Direct Consulte el libro blanco sobre comunicación de datos en nuestro sitio web		
<b>CARCASA</b>			
Color	Azul (RAL 5012)		
Terminales de conexión	6 mm <sup>2</sup> / AWG10		
Tipo de protección	IP22 (área de conexiones)		
Peso	0,5 kg		
Dimensiones (al x an x p)	100 x 113 x 40 mm		
<b>ESTÁNDARES</b>			
Seguridad	EN/IEC 62109		
1a) Si se conecta más potencia FV, el controlador limitará la potencia de entrada al máximo estipulado. 1b) La tensión FV debe exceder en 5V la Vbat (tensión de la batería) para que arranque el controlador. Una vez arrancado, la tensión FV mínima será de Vbat + 1V.			

## A.3. Bateria



### PowerBrick+

12v Lithium-Ion battery pack




#### 12V battery pack - Lithium Iron-Phosphate (LiFePO<sub>4</sub>) - 12Ah

- **High lifespan:** two thousand cycles and more (see chart)
- **Deep discharge** allowed up to 100 %
- Ultra safe **Lithium Iron Phosphate** chemistry (no thermal run-away, no fire or explosion risks)
- **Embedded BMS** (Battery Management System) : Improve lifespan AND secure the battery
- **No Lead, no heavy metal, no toxic element**
- **Calendar life > 10 years**
- **Excellent temperature robustness** (-20 °C up to +60 °C)
- **Flexible deployment** : up to 10 packs in parallel and 4 in serial
- **Constant power** during discharge (very low internal resistance)
- **Very low Peukert's losses** (energy efficiency >96 %)
- **Very low self discharge** (<3 % per month)
- **No memory effect**
- **About 50 % lighter and 40% smaller** than equivalent Lead-AGM battery with same usable energy
- **Certification** : CE, RoHS

#### Technical Specifications

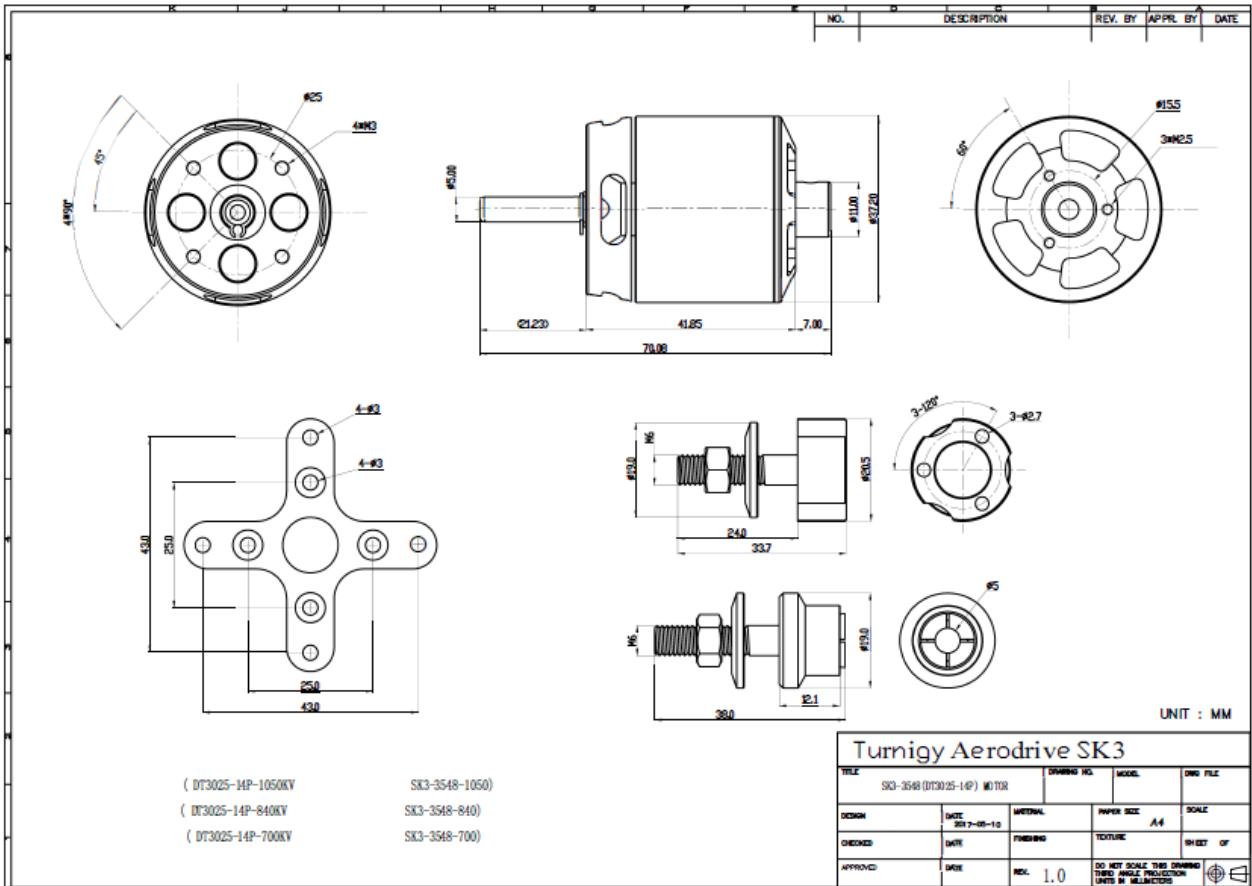
Electric	Nominal voltage	12.8V
	Nominal capacity	12 Ah
	Stored energy	153.6 Wh
	Internal resistance	≤ 50mΩ
	Cycles	>2000 cycles (see chart)
	Self discharge	< 3% per month
	Energy efficiency	> 96%
Standard Charge	Charge voltage	14.4V ± 0.2V
	Charge mode	CC/CV : Constant Current / Constant Voltage
	Continuous charge current / Maximum charge current	6 A / 12A
	BMS charge cut-off voltage	14.8V ± 0.1V
Standard Discharge	Continuous discharge current	24 A (307 W)
	Maximum discharge current (< 30s)	30 A (384 W)
	BMS discharge cut-off voltage	10 V
Environment	Charge temperature range	0°C à 45°C @60±25% relative humidity
	Discharge temperature range	-20°C à 60°C @60±25% relative humidity
	Storage temperature	0°C à 40°C @60±25% relative humidity
	IP protection level	IP 66
Mechanical	Cell assembly	18650 - 458P
	Casing material	ABS
	Dimensions	L: 151mm x P: 98mm x H: 95 mm
	Weight	1.55 kg
	Terminal	Clip Faston 6.35mm



#### APPLICATIONS

- Electrical vehicles and utilities
- Solar and wind energy storage
- Marine
- Street lightning
- CCTV and security camera
- UPS, electric back-up
- Telecom
- Medical equipments
- ...

# A.4. Plano motor



## A.5. Variador de tensión (ESC)



Thank you for purchasing Aerostar RVS Brushless Electronic Speed Controller (ESC). Designed for fixed wing, it features super smooth start up, linear throttle, multiple protection features, and a great value for the cost. Please read this manual carefully before using this product. Hobbyking has no control over the use, installation, application, or maintenance of this product, thus no liability shall be assumed nor accepted for any damages, losses of costs resulting from the use of this item.

### Aerostar RVS SERIES SPECS

Type	Size (MM)	Cont/Burst Current (A)	Battery Cell NiXX/LiPo	Weight (g)	BEC Output	Connector
Aerostar RVS 20A	25x43x8	20/30A	5-12NiXX/2-4LiPo	24g	5V/2A	XT60
Aerostar RVS 30A	25x43x8	30/40A	5-12NiXX/2-4LiPo	26g	5V/2A	XT60
Aerostar RVS 40A	27x52x11	40/50A	5-12NiXX/2-4LiPo	36g	5V/3A	XT60
Aerostar RVS 50A	30x56x14	50/60A	5-18NiXX/2-6LiPo	44g	5.5V/5A	XT60
Aerostar RVS 60A	30x56x14	60/70A	5-18NiXX/2-6LiPo	44g	5.5V/5A	XT60
Aerostar RVS 70A	37x68x14	70/80A	5-18NiXX/2-6LiPo	80g	5.5V/5A	XT90
Aerostar RVS 80A	37x68x14	80/90A	5-18NiXX/2-6LiPo	82g	5.5V/5A	XT90

### FEATURES

- ▶ Pre-Installed motor and battery connectors
- ▶ Propeller brake
- ▶ Battery Type
- ▶ Low voltage cutoff treshold
- ▶ Adjustable motor timing
- ▶ Soft start mode for helicopters and gearboxes
- ▶ Heli mode
- ▶ Motor rotation
- ▶ Over heat and lost signal protection
- ▶ Low voltage cut-off type

### CONNECTING YOUR ESC

Aerostar RVS ESC's have pre-installed female bullet connectors making motor connection easy. Upon testing if you find motor rotation reversed, simply swap any two of the three motor wires. Battery connectors are sized to accommodate the amp rating of the ESC. If changing motor or battery connectors, carefully solder and then protect the connections with heat shrink tubing. Plug the servo connector into the throttle channel of your receiver. Consult your radio's instructions for the proper channel mapping.

# Anexo B

## Códigos de programas



## B.1. Ruta inicial

06-04-20 20:03 C:\Users\grace\Document...\ruta inicial.m 1 of 6

---

```
clear all
close all
clc
format
% _____ DATOS DE ENTRADA _____
Lat_origen=-36.710901 ;
Lon_origen=-73.109377 ;
Lat_destino=-33.026925 ;
Lon_destino=-71.630229 ;
Dia_origen= 23;
Mes_origen= 03;
Year_origen= 2020;
Fecha_origen=datetime([Year_origen Mes_origen Dia_origen]);
n=200; %número de puntos (min=20)
%Cargar borde costero
load coast;
Borde=[lat long];
% _____ RUTA IDEAL _____
%Ruta más corta (línea recta)
Ruta=[Lat_origen Lon_origen];
a=(Lat_destino-Lat_origen)/n;
b=(Lon_destino-Lon_origen)/n;
for i=1:n
    lat_aux=Ruta(i,1)+a;
    lon_aux=Ruta(i,2)+b;
    Ruta=[Ruta; lat_aux lon_aux];
end
%Zona de navegación (considerar el borde costero)
c=0.3; %distancia minima a la costa (aprox 25 millas nauticas)
R_aux=[Lat_origen Lon_origen];
d=round(n/20);
for i=d:n+1-d
    for k=1:9865
        if Ruta(i,1)-0.1<Borde(k,1) && Borde(k,1)<Ruta(i,1)+0.1
            dist=abs(Borde(k,2)-Ruta(i,2));
            if dist<c
                if Ruta(i,2)-dist==Borde(k,2)
                    R_aux=[R_aux ; Ruta(i,1) (Borde(k,2)+c)];
                else
                    R_aux=[R_aux ; Ruta(i,1) (Borde(k,2)-c)];
                end
            else
                R_aux=R_aux;
            end
        else
            R_aux=R_aux;
        end
    end
end
R_aux=[R_aux ; Lat_destino Lon_destino];
%Vector ruta ideal
Ruta_id=[Lat_origen Lon_origen];
for i=1:length(R_aux)-1
    aa=abs((R_aux(i,1)-R_aux(i+1,1))/a); %cant de puntos entre lat de R_aux
    bb=(R_aux(i+1,2)-R_aux(i,2))/aa; %division entre longitudes en partes iguales
```

```

    for j=1:aa
        Ruta_id=[Ruta_id ; (R_aux(i,1)+a*j) (R_aux(i,2)+(bb*j))];
    end
end
% _____ ESTIMACIONES _____
v_aprox1=3.7; %[km/h] ~ 2 [nudos]
t_navegacion_diaria=8; %[horas]
% _____ DISTANCIA, TIEMPO TOTAL DE VIAJE Y POSICION DIARIA _____
trayectoria=0;
km=111.12; %valor aporximado de 1°
dist_diaria=v_aprox1*t_navegacion_diaria; %cuantos km recorro diariamente
d_tot_diaria=0;
distancia_total=0;
coord_diaria=[];
latitud_diaria=[];
longitud_diaria=[];
for i=1:length(Ruta_id)-1;
    lado1=abs(Ruta_id(i,2)-Ruta_id(i+1,2));
    lado2=abs(Ruta_id(i,1)-Ruta_id(i+1,1));
    trayectoria=trayectoria+km*sqrt(lado1^2+lado2^2);
    distancia_total=d_tot_diaria+km*sqrt(lado1^2+lado2^2);
    if distancia_total <= dist_diaria
        d_tot_diaria=d_tot_diaria+km*sqrt(lado1^2+lado2^2);
    else
        diferencia=dist_diaria-d_tot_diaria;
        d_tot_diaria=km*sqrt(lado1^2+lado2^2)-diferencia;
        coord_diaria=[coord_diaria; Ruta_id(i,1)+(diferencia*lado2/sqrt(
lado1^2+lado2^2)) Ruta_id(i,2)+(diferencia*lado1/sqrt(lado1^2+lado2^2))];
        latitud_diaria=[latitud_diaria Ruta_id(i,1)+(diferencia*lado2/sqrt(
lado1^2+lado2^2))];
        longitud_diaria=[longitud_diaria Ruta_id(i,2)+(diferencia*lado1/sqrt(
lado1^2+lado2^2))];
    end
end
coord_diaria=[Ruta_id(1,1) Ruta_id(1,2);coord_diaria];
latitud_diaria=[Ruta_id(1,1) latitud_diaria];
longitud_diaria=[Ruta_id(1,2) longitud_diaria];
t_viaje=trayectoria/v_aprox1; %tiempo total de viaje
dias_viaje=ceil(t_viaje/t_navegacion_diaria); %dias total de viaje
%fecha de destino
Fecha_destino=Fecha_origen+days(dias_viaje);
Dia_destino=day(Fecha_destino);
Mes_destino=month(Fecha_destino);
Year_destino=year(Fecha_destino);
year_diario=[];
mes_diario=[];
dia_diario=[];
for i=0:dias_viaje-1
    fecha=Fecha_origen+days(i);
    year_diario=[year_diario year(fecha)];
    mes_diario=[mes_diario month(fecha)];
    dia_diario=[dia_diario day(fecha)];
end
% _____ EVALUAR RADIACION DIARIA _____
%Exportar datos a txt

```



```

A = [latitud_diaria;longitud_diaria;year_diario;mes_diario;dia_diario];
fileID = fopen('coordenadas.txt','w');
fprintf(fileID,['%3.4f %3.4f %2.0f %2.0f %2.0f'],A);
type('coordenadas.txt');
fclose(fileID);
%Usar datos en Python
system('python radiacion_diaria.py');%%correr programa python
%Importar datos
fileID=fopen('resultados.txt','r');
tline = fgetl(fileID);
texto=tline;
index1=strfind(texto,'[');
index2=strfind(texto,']'); %t=str2num(infl{3,4})
cont=length(index2);%cantidad de datos
rad=[];
for i=1:cont
    h=texto(index1(i):index2(i));
    j=strfind(h,' ');
    aux={};
    aux(end+1)=h(2:j(1)-2);
    aux(end+1)=h(j(1)+1:j(2)-2);
    aux(end+1)=h(j(2)+1:length(h)-1);
    rad=[rad;aux];
end
radiacion=zeros(cont,3); %cada fila: [latitud,longitud,radiacion]
for i=1:cont
    radiacion(i,3)=str2num(rad{i,3});
    radiacion(i,2)=str2num(rad{i,2});
    radiacion(i,1)=str2num(rad{i,1});
end
%_____VELOCIDAD DIARIA SEGUN RADIACION_____
%datos
v_diaria=[]; %velocidad diaria segun diseño y radiacion obtenida
P_fv=50; %potencia panel [W]
x_fv=2; %cantidad paneles
n_s=0.8; %eficiencia del sistema debido a cableado, temperatura,etc
n_c=0.85; %eficiencia de carga
E_serv=2; %energía de servicio [Wh]
rho=1027; %densidad agua de mar [kg/m^3]
A_tran=1.404; %área transversal al movimiento [m^2]
D=1.5; %largo característico (eslora) [m]
nu=1.13125*10^(-6); %viscosidad cinemática agua de mar [m^2/s]
for i=1:dias_viaje
    syms v_d
    rad_dia=radiacion(i,3) ; %radiacion diaria
    E_pv=P_fv*n_s*n_c*x_fv*rad_dia; %energía sist fovoltaico [Wh]
    eqn= ((E_pv-E_serv)/t_navegacion_diaria) == 0.5*rho*A_tran*(v_d^3)*0.075/((log10
(v_d*D/nu)-2)^2); %velocidad en [m/s]
    sol_vel=3.6*abs(solve(eqn,v_d)); %velocidad en [km/h]
    v_diaria=[v_diaria ; sol_vel];
end
v_diaria1=v_diaria; %guardar dato
%_____RUTA INICIAL SEGUN VELOCIDAD_____
Ruta_in=[Lat_origen Lon_origen Dia_origen Mes_origen Year_origen];
d_tot_dia=0;

```

```

vel=1; %indice en matriz velocidad
dia=0; %contador de dias
coord_diaria2=[Lat_origen Lon_origen Dia_origen Mes_origen Year_origen];
for i=1:n-1;
    Fecha=Fecha_origen+days(dia);
    km_diario=v_diaria(vel)*t_navegacion_diaria;
    lado1=abs(Ruta_id(i,2)-Ruta_id(i+1,2));
    lado2=abs(Ruta_id(i,1)-Ruta_id(i+1,1));
    d_tot_dia=d_tot_dia+km*sqrt(lado1^2+lado2^2);
    Ruta_in=[Ruta_in ; Ruta_id(i,1) Ruta_id(i,2) day(Fecha) month(Fecha) year(Fecha)];
    if d_tot_dia <= km_diario
        d_tot_dia=d_tot_dia;
    else
        dia=dia+1;
        coord_diaria2=[coord_diaria2; Ruta_id(i,1) Ruta_id(i,2) day(Fecha) month
(Fecha) year(Fecha)];
        if dia <= dias_viaje
            vel=vel+1;
            d_tot_dia=km*sqrt(lado1^2+lado2^2);
        else
            vel=vel;
            d_tot_dia=km*sqrt(lado1^2+lado2^2);
        end
    end
end
end
% _____ ITERAR RUTA INICIAL SEGUN NUEVO PLAN DE VIAJE _____
if dia < dias_viaje
    B=[];
    cc=length(coord_diaria2);
    aux_ruta=transpose(coord_diaria2);
    B=[aux_ruta(1:2,1:cc); aux_ruta(5,1:cc);aux_ruta(4,1:cc);aux_ruta(3,1:cc)];
    fileID = fopen('coordenadas.txt','w');
    fprintf(fileID, '[%3.4f %3.4f %2.0f %2.0f %2.0f]',B);
    type('coordenadas.txt');
    fclose(fileID);
    system('python radiacion_diaria.py');%%correr programa python
    fileID=fopen('resultados.txt','r');
    tline = fgetl(fileID);
    texto=tline;
    index1=strfind(texto,[' ');
    index2=strfind(texto,[' ']); %t=str2num(inf1{3,4})
    cont=length(index2);%cantidad de datos
    rad=[];
    for i=1:cont
        h=texto(index1(i):index2(i));
        j=strfind(h,' ');
        aux={};
        aux(end+1)=h(2:j(1)-2);
        aux(end+1)=h(j(1)+1:j(2)-2);
        aux(end+1)=h(j(2)+1:length(h)-1);
        rad=[rad;aux];
    end
    radiacion=zeros(cont,3); %cada fila: [latitud,longitud,radiacion]
    for i=1:cont
        radiacion(i,3)=str2num(rad{i,3});
    end
end

```

```

radiacion(i,2)=str2num(rad{i,2});
radiacion(i,1)=str2num(rad{i,1});
end
dias_viaje=dia
v_diaria=[];
for i=1:cc
    syms v_d
    rad_dia=radiacion(i,3) ; %radiacion diaria
    E_pv=P_fv*n_s*n_c*x_fv*rad_dia; %energía sist fovoltaico [Wh]
    eqn= ((E_pv-E_serv)/t_navegacion_diaria) == 0.5*rho*A_tran*(v_d^3)*0.075/
((log10(v_d*D/nu)-2)^2); %velocidad en [m/s]
    sol_vel=3.6*abs(solve(eqn,v_d));%velocidad en [km/h]
    v_diaria=[v_diaria ; sol_vel];
end
Ruta_in=[Lat_origen Lon_origen Dia_origen Mes_origen Year_origen];
d_tot_dia=0;
vel=1; %indice en matriz velocidad
dia=0; %contador de dias
velocidades=[];
for i=1:n-1;
    Fecha=Fecha_origen+days(dia);
    km_diario=v_diaria(vel)*t_navegacion_diaria;
    lado1=abs(Ruta_id(i,2)-Ruta_id(i+1,2));
    lado2=abs(Ruta_id(i,1)-Ruta_id(i+1,1));
    d_tot_dia=d_tot_dia+km*sqrt(lado1^2+lado2^2);
    velocidades=[velocidades; v_diaria(vel)];
    Ruta_in=[Ruta_in ; Ruta_id(i,1) Ruta_id(i,2) day(Fecha) month(Fecha) year
(Fecha)];
    if d_tot_dia <= km_diario
        d_tot_dia=d_tot_dia;
    else
        dia=dia+1;
        if dia <= dias_viaje
            vel=vel+1;
            d_tot_dia=km*sqrt(lado1^2+lado2^2);
        else
            vel=vel;
            d_tot_dia=km*sqrt(lado1^2+lado2^2);
        end
    end
end
end
largo_vel=length(v_diaria);
velocidades=[v_diaria(1);velocidades;v_diaria(largo_vel)];
Fecha=Fecha_origen+days(dia);
Ruta_in=[Ruta_in ; Ruta_id(n,1) Ruta_id(n,2) day(Fecha) month(Fecha) year(Fecha)];
aux_inicial=[];
for i=1:length(Ruta_in)
    aux_inicial=[aux_inicial; Ruta_in(i,1) Ruta_in(i,2) Ruta_in(i,3) Ruta_in(i,4)
Ruta_in(i,5) velocidades(i)];
end
aux_inicial=double(aux_inicial);
%_____EXPORTAR RUTA INICIAL A TXT_____
fileID = fopen('ruta_inicial.txt','w');
fprintf(fileID,['%3.4f %3.4f %2.0f %2.0f %2.0f %3.4f'],transpose(aux_inicial));

```

```
type('ruta_inicial.txt');
fclose(fileID);
%_____EXPORTAR RUTA A TXT_____
fileID = fopen('ruta.txt','w');
fprintf(fileID,'%3.4f %3.4f %2.0f %2.0f %2.0f',transpose(Ruta_in));
type('ruta.txt');
fclose(fileID);
%_____EXPORTAR DATOS INICIALES_____
Datos_in=[Lat_origen ,Lon_origen];
fileID = fopen('datos_entrada.txt','w');
fprintf(fileID,'%8.4f %8.4f',Datos_in);
type('datos_entrada.txt');
fclose(fileID);
%_____EXPORTAR VALORES DIARIOS_____
C=[radiacion v_diaria];
C=double(C);
fileID = fopen('valores_diarios.txt','w');
fprintf(fileID,'%3.4f %3.4f %3.4f %3.4f',transpose(C));
type('valores_diarios.txt');
fclose(fileID);
```



## B.2. Radiación diaria

```
from pysolar.solar import *
import datetime

## _____ IMPORTAR COORDENADAS _____
g=open('coordenadas.txt','r')
#print(g.read());
dg=g.readlines()
#print(dg)
datos=" ".join(str(x) for x in dg);
cantidad_datos=datos.count(',')
x1=[];
for i in range(len(datos)):
    if datos[i]==' ':
        x1.append(i)
    else:
        pass
x2=[];
for i in range(len(datos)):
    if datos[i]==',':
        x2.append(i)
    else:
        pass
valores_entrada=[]
for i in range(len(x1)):
    aux=(datos[x1[i]+1:x2[i]]);
    h=aux.split(' ');
    while len(h)>5:
        h.remove(' ');
    valores_entrada.append(h)
coordenadas=[];
año=[];
mes=[];
dia=[];
radiacion=[];
for i in range(len(valores_entrada)):
    coordenadas.append(valores_entrada[i][0:2]);
    año.append(int(valores_entrada[i][2]));
    mes.append(int(valores_entrada[i][3]));
    dia.append(int(valores_entrada[i][4]));
## _____ RADIACION _____
for i in range(len(coordenadas)):
    rad=[]
    for hora in range(9,18):
        for minuto in range(0,60):

date=datetime.datetime(año[i],mes[i],dia[i],hora,minuto,tzinfo=datetime.timezone
.utc)

altitude_deg=get_altitude(float(coordenadas[i][0]),float(coordenadas[i][1]),date
)
    rad.append(radiation.get_radiation_direct(date,altitude_deg))
    sum=0
    for j in range(0,len(rad)):
        sum=sum+rad[j]
```

```

    promedio=round(((sum(len(rad)))*7/24)*24/1000,2) ##7 horas efectivas de
radiacion
    print(promedio)
    radiacion.append(promedio)
## _____ RESULTADOS _____
resultados=[]
for i in range(len(coordenadas)):
    resultados.append([coordenadas[i],radiacion[i]])
    #print('Coordenada',resultados[i][0],':',resultados[i][1], '[kWh/m^2/día]')
resultados_ord=[]
for i in range(len(coordenadas)):

resultados_ord.append([float(coordenadas[i][0]),float(coordenadas[i][1]),radiaci
on[i]]);
result=" ".join(str(x) for x in resultados_ord);
## _____ EXPORTAR RESULTADOS _____
f=open('resultados.txt','w')
f.write(result);
f.close()

```





## B.3. Ruta actual

06-04-20 20:03 C:\Users\grace\Documents...\ruta actual.m 1 of 7

---

```
clear all
close all
clc
% _____ DATOS DE ENTRADA _____
%fecha actual
hora=hour(datetime);
dia=day(datetime);
mes=month(datetime);
year=year(datetime);
% _____ IMPORTAR POSICION ACTUAL _____
fileID=fopen('datos_entrada.txt','r');
tline = fgetl(fileID);
texto=tline;
index01=strfind(texto, ' ');
index02=strfind(texto, ']');
index03=strfind(texto, '[');
Lat=str2num(texto(index03(1)+1:index01(1)))
Lon=str2num(texto(index01(1)+1:index02(1)))
% _____ CARGAR RUTA _____
fileID=fopen('ruta.txt','r');
tline = fgetl(fileID);
texto=tline;
index1=strfind(texto, '[');
index2=strfind(texto, ']'); %t=str2num(infl{3,4})
cont=length(index2);%cantidad de datos
ruta_inicial=[];
for i=1:cont
    h=texto(index1(i):index2(i));
    j=strfind(h, ' ');
    lat_i=str2num(h(2:j(1)-1));
    lon_i=str2num(h(j(1)+1:j(2)-1));
    dia_i=str2num(h(j(2)+1:j(3)-1));
    mes_i=str2num(h(j(3)+1:j(4)-1));
    year_i=str2num(h(j(4)+1:length(h)-1));
    ruta_inicial=[ruta_inicial; lat_i lon_i dia_i mes_i year_i];
end
% _____ BARCOS ALREDEDOR _____
%Generar área (cada grado~110km)
delta_area=0.4; %en grados
minlat=num2str(Lat-delta_area);
maxlat=num2str(Lat+delta_area);
minlon=num2str(Lon-delta_area);
maxlon=num2str(Lon+delta_area);
%Pedir datos a MARINETRAFFIC
a=char(strcat('C:\curl-7.69.1-win64-mingw\bin\curl.exe -k https://services.
marinetraffic.com/api/exportvessels/v:
8/9e0bf12809fc22293136f1414077473ddleb3c00/MINLAT:',minlat, '/MAXLAT:',
maxlat, '/MINLON:',minlon, '/MAXLON:',maxlon, '/timespan:10/protocol:json'));
[status,cmdout]=system(a);
%Limpiar datos
a=cmdout
b=strfind(a, '[');
c=strfind(a, ']]');
d=a(b+1:c);
e=strfind(d, '[');
```

```

f=strfind(d, 'j');
g=length(e); %cantidad de barcos cerca
titulos={'MMSI', 'IMO', 'SHIP_ID', 'LAT', 'LON', 'SPEED (in knots x10)', 'HEADING (in
degrees)', 'COURSE (in degrees)', 'STATUS', 'TIMESTAMP (in UTC)', 'DSRC',
'UTC_SECONDS'};
titulos=[titulos];
inf1=[];
for i=1:g
    h=d(e(i):f(i));
    j=strfind(h, '');
    aux1={};
    for k=1:12 %numero de datos por barco
        aux1{end+1}=h(j(2*k-1)+1:j(2*k)-1);
    end
    inf1=[inf1;aux1];
end
%Resultados
BarcosAlrededor=[titulos;inf1];
%Filtrar datos que necesitamos
aux3=size(BarcosAlrededor);
BARCOS=aux3(1)-1;
Datos=[BarcosAlrededor(2:BARCOS+1,4:8)]; %[LAT LON SPEED(in knots x10) HEADING
(degrees) COURSE(degrees)]
Datos1=[]; %cambia de formato los datos para trabajar
for i=1:BARCOS
    Datos1=[Datos1; str2num(cell2mat(Datos(i,1))) str2num(cell2mat(Datos(i,2)))
str2num(cell2mat(Datos(i,3))) str2num(cell2mat(Datos(i,4))) str2num(cell2mat(Datos(i,
5)))];
end
%_____TRAYECTORIA DE CADA BARCO CADA 1 MIN_____
Trayectoria=[0];%TIEMPO_0 LAT_0 LON_0
for i=1:BARCOS
    Trayectoria=[Trayectoria Datos1(i,1) Datos1(i,2)];
end
delta=zeros(BARCOS,2); %[delta(LAT) delta(LON)]
for i=1:BARCOS
    d_n=(1.852*Datos1(i,3)/60)/111.12;%distancia que recorre en un minuto (modulo) [°
/min]
    alpha_aux=Datos1(i,5); %course: hacia donde se dirige
    delta(i,1)=d_n*cos(alpha_aux*pi/180); %delta latitud por minuto
    delta(i,2)=d_n*sin(alpha_aux*pi/180); %delta longitud por minuto
end
%Cargar borde costero
load coast;
Borde=[lat long];
%agregar lat y lon a matriz trayectoria
for i=2:60
    aux=[];
    for j=1:BARCOS
        vector=[];
        for k=1:9865
            if Trayectoria(i-1,j*2)-0.1 < Borde(k,1) && Borde(k,1) < Trayectoria(i-1,
j*2)+0.1
                dist=abs(Borde(k,2)-Trayectoria(i-1,j*2+1));
                if dist < 0.1

```

```

        vector(end+1)=k;
    else
        vector=vector;
    end
else
    vector=vector;
end
end
if isempty(vector)
    latitud=delta(j,1)+Trayectoria(i-1,j*2);
    longitud=delta(j,2)+Trayectoria(i-1,j*2+1);
else
    latitud=Trayectoria(i-1,j*2);
    longitud=Trayectoria(i-1,j*2+1);
end
aux=[aux latitud longitud];
end
Trayectoria=[Trayectoria ; i-1 aux]; %[Tiempo LAT1 LON1 LAT2 LON2 ...]
end
% _____ DATOS BARCO _____
%[v=0 fuera de horario, radiacion fuera de tiempo para cargar baterias]
%exportar datos a txt
Datos_rad=[Lat Lon year mes dia];
fileID = fopen('rad_actual.txt','w');
fprintf(fileID,['%8.4f %8.4f %4.0f %2.0f %2.0f'],Datos_rad);
type('rad_actual.txt');
fclose(fileID);
%Usar datos en Python
system('python radiacion_actual.py');%correr programa python
%Importar datos
fileID=fopen('resultados_rad_actual.txt','r');
tline = fgetl(fileID);
texto=tline;
index1=strfind(texto,[' ');
index2=strfind(texto,[')']);
h=texto(index1:index2);
j=strfind(h,' ');
aux={};
radiacion_actual=str2num(h(j(2)+1:length(h)-1))
%velocidad actual (fuera del horario de trabajo es 0)
P_fv=50; %potencia panel [W]
x_fv=2; %cantidad paneles
n_s=0.8; %eficiencia del sistema debido a cableado, temperatura,etc
n_c=0.85; %eficiencia de carga
E_serv=2; %energia de servicio [Wh]
rho=1027; %densidad agua de mar [kg/m^3]
A_tran=1.404; %area transversal al movimiento [m^2]
D=1.5; %largo caracteristico (eslora) [m]
nu=1.13125*10^(-6); %viscosidad cinematica agua de mar [m^2/s]
syms v_d
E_pv=P_fv*n_s*n_c*x_fv*radiacion_actual; %energia sist fovoltaico [Wh]
eqn= ((E_pv-E_serv)/8) == 0.5*rho*A_tran*(v_d^3)*0.075/((log10(v_d*D/nu)-2)^2); %
velocidad en [m/s]
if hora>=9 && hora<17
    velocidad_actual=double(3.6*abs(solve(eqn,v_d))) %velocidad en [km/h]

```

```

else
    velocidad_actual=0; %fuera de horario de funcionamiento, acumulando energía
end
%_____ RUTA EN UNA HORA _____
d_barco_km=velocidad_actual/60; %distancia que recorre en un minuto (modulo)[km/min]
d_barco=d_barco_km/111.12; %[°/min]
Ruta_hora=[0 Lat Lon];
ultimo_punto=length(ruta_inicial);
velocidades=[];
velocidades=[velocidades;d_barco]; %[°/min] velocidades
for i=2:60
    velocidades=[velocidades;d_barco];
    d_puntos=[]; %distancia entre punto y la ruta
    delta_puntos=[]; %delta lat y delta lon entre punto y ruta
    for j=1:ultimo_punto %calcular course de viaje (degrees)
        delta_lat=ruta_inicial(j,1)-Ruta_hora(i-1,2);
        delta_lon=ruta_inicial(j,2)-Ruta_hora(i-1,3);
        dis=sqrt((delta_lat^2)+(delta_lon^2));
        d_puntos=[d_puntos; dis];
        delta_puntos=[delta_puntos;delta_lat delta_lon];
    end
    c=min(d_puntos)
    y=max(find(d_puntos==c))
    if y==length(delta_puntos)
        curso=atan(delta_puntos(y,2)/delta_puntos(y,1))*180/pi;
    else
        curso=atan(delta_puntos(y+1,2)/delta_puntos(y+1,1))*180/pi; %curso desde la
coordenada actual hasta el siguiente pto de la ruta
    end
    alpha=curso; %course: hacia donde se dirige
    delta_latitud=d_barco*cos(alpha*pi/180); %delta latitud por minuto
    delta_longitud=d_barco*sin(alpha*pi/180); %delta longitud por minuto
    latitud=delta_latitud+Ruta_hora(i-1,2);
    longitud=delta_longitud+Ruta_hora(i-1,3);
    Ruta_hora=[Ruta_hora ; i-1 latitud longitud]
end
%_____ BARCOS CRITICOS Y ACTUALIZAR RUTA _____
[AJUSTAR:MAS DE UN BARCO,=t?]
%barcos criticos
margen=0.01; %margen de seguridad de la ruta inicial [grados]
b_critico=[]; %barcos cercanos [min lat_b lon_b dist_b indice_barco]
Nueva_ruta=[];
if BARCOS~=0
    for i=3:61 %determinar puntos de encuentro o criticos, se asume que no
interseccion en min=0
        for j=1:BARCOS %objetivo: nueva coordenada
            delta_lat=Ruta_hora(i-1,2)-Trayectoria(i-1,j+1); %i-1=2, corresponde al
minuto 1
            delta_lon=Ruta_hora(i-1,3)-Trayectoria(i-1,2*j+1);
            dist_b=sqrt((delta_lat^2)+(delta_lon^2));%distancia entre barcos [°]
            if dist_b<= margen %comparar con el margen
                dif=margen-dist_b; %diferencia para zona segura
                b_critico=[b_critico; i-1 Trayectoria(i-1,j+1) Trayectoria(i-1,2*j+1)
dist_b j] %borrar (opcional)
                nuevo_p=[]; %nuevas coordenadas del punto

```

```

margen2=0.005; %>grados que se avanza a velocidad maxima (0.0023)
if abs(delta_lat)<margen2 %Latitud
    if Ruta_hora(i-1,2)-abs(delta_lat)==Trayectoria(i-1,j+1)
        nuevo_p=[Ruta_hora(i-1,2)+abs(delta_lat)];
    else
        nuevo_p=[Ruta_hora(i-1,2)-abs(delta_lat)];
    end
else
    nuevo_p=[Ruta_hora(i-1,2)];
end
if abs(delta_lon)<margen2 %Longitud
    if Ruta_hora(i-1,3)-abs(delta_lon)==Trayectoria(i-1,2*j+1)
        nuevo_p=[nuevo_p Ruta_hora(i-1,3)+abs(delta_lon)];
    else
        nuevo_p=[nuevo_p Ruta_hora(i-1,3)-abs(delta_lon)];
    end
else
    nuevo_p=[nuevo_p Ruta_hora(i-1,3)];
end
%calcular nueva coordenda y curso
v_b=d_barco; %velocidad de nuestro barco [°/min]
alpha_b=atan((nuevo_p(1,2)-Ruta_hora(i-1,3))/(nuevo_p(1,1)-Ruta_hora
(i-1,2)))*180/pi;%nuevo curso de desvio
v_b_lon=v_b*sin(alpha_b*pi/180); %longitud en un minuto [°/min]
v_b_lat=v_b*cos(alpha_b*pi/180); %latitud en un minuto [°/min]
latitud=v_b_lat+Ruta_hora(i-2,2); %i-2=1, corresponde al minuto 0
longitud=v_b_lon+Ruta_hora(i-2,3);
Nueva_coord=[i-2 latitud longitud];
else
    Nueva_coord=[i-2 Ruta_hora(i-1,2) Ruta_hora(i-1,3)]; %si noy problema
la coordenada se mantiene
end
end
%objetivo: actualizar ruta desde tiempo t=i-1 en adelante
Nueva_ruta=[Ruta_hora(1:i-2,1:3);Nueva_coord];
for k=i:60
    d_puntos=[]; %distancia entre punto y la ruta
    delta_puntos=[]; %delta lat y delta lon entre punto y ruta
    delta_lat=Ruta_hora(k,2)-Nueva_ruta(k-1,2);
    delta_lon=Ruta_hora(k,3)- Nueva_ruta(k-1,3);
    curso=atan(delta_lon/delta_lat)*180/pi ; %curso desde la coordenada actual
hasta el siguiente pto de la ruta
    alpha=curso; %course: hacia donde se dirige
    delta_latitud=d_barco*cos(alpha*pi/180); %delta latitud por minuto
    delta_longitud=d_barco*sin(alpha*pi/180); %delta longitud por minuto
    latitud=delta_latitud+Nueva_ruta(k-1,2);
    longitud=delta_longitud+Nueva_ruta(k-1,3);
    Nueva_ruta=[Nueva_ruta ; k-1 latitud longitud];
end
Ruta_hora=Nueva_ruta; %se actualiza la ruta final de una hora
end
end
%De noche y hay barcos cerca
if BARCOS~=0 && d_barco==0
    for i=3:61 %determinar puntos de encuentro o criticos, se asume que no

```

```

interseccion en min=0
    for j=1:BARCOS %objetivo: nueva coordenada
        delta_lat=Ruta_hora(i-1,2)-Trayectoria(i-1,j+1); %i-1=2, corresponde al
minuto 1
        delta_lon=Ruta_hora(i-1,3)-Trayectoria(i-1,2*j+1);
        dist_b=sqrt((delta_lat^2)+(delta_lon^2));%distancia entre barcos [°]
        nudos=0; %velocidad de escape
        if dist_b<= margen %comparar con el margen
            dif=margen-dist_b; %diferencia para zona segura
            b_critico=[b_critico; i-1 Trayectoria(i-1,j+1) Trayectoria(i-1,2*j+1)
dist_b j] %borrar (opcional)
            nuevo_p=[]; %nuevas coordenadas del punto
            margen2=0.005; %>grados que se avanza a velocidad maxima (0.0023)
            if abs(delta_lat)<margen2 %Latitud
                nudos=2;
                if Ruta_hora(i-1,2)-abs(delta_lat)==Trayectoria(i-1,j+1)
                    nuevo_p=[Ruta_hora(i-1,2)+abs(delta_lat)];
                else
                    nuevo_p=[Ruta_hora(i-1,2)-abs(delta_lat)];
                end
            else
                nuevo_p=[Ruta_hora(i-1,2)];
            end
            if abs(delta_lon)<margen2 %Longitud
                nudos=2;
                if Ruta_hora(i-1,3)-abs(delta_lon)==Trayectoria(i-1,2*j+1)
                    nuevo_p=[nuevo_p Ruta_hora(i-1,3)+abs(delta_lon)];
                else
                    nuevo_p=[nuevo_p Ruta_hora(i-1,3)-abs(delta_lon)];
                end
            else
                nuevo_p=[nuevo_p Ruta_hora(i-1,3)];
            end
            %calcular nueva coordenda y curso
            v_b=(nudos*3.6/60)/111.12; %velocidad de nuestro barco [°/min]
            alpha_b=atan((nuevo_p(1,2)-Ruta_hora(i-1,3))/(nuevo_p(1,1)-Ruta_hora
(i-1,2)))*180/pi;%nuevo curso de desvio
            v_b_lon=v_b*sin(alpha_b*pi/180); %longitud en un minuto [°/min]
            v_b_lat=v_b*cos(alpha_b*pi/180); %latitud en un minuto [°/min]
            latitud=v_b_lat+Ruta_hora(i-2,2); %i-2=1, corresponde al minuto 0
            longitud=v_b_lon+Ruta_hora(i-2,3);
            Nueva_coord=[i-2 latitud longitud];
            velocidades(i-2,1)=v_b;
        else
            Nueva_coord=[i-2 Ruta_hora(i-1,2) Ruta_hora(i-1,3)]; %si noy problema
la coordenada se mantiene
        end
    end
    %objetivo: actualizar ruta desde tiempo t=i-1 en adelante
    Nueva_ruta=[Ruta_hora(1:i-2,1:3);Nueva_coord];
    for k=i:60 %barco arranca y se queda en el nuevo punto
        Nueva_ruta=[Nueva_ruta ; k-1 Nueva_coord(1,2) Nueva_coord(1,3)];
    end
    Ruta_hora=Nueva_ruta; %se actualiza la ruta final de una hora
end

```







## B.4. Radiación actual

```
from pysolar.solar import *
import datetime
## _____ IMPORTAR COORDENADAS _____
g=open('rad_actual.txt','r')
#print(g.read());
dg=g.readlines()
print(dg)
datos=" ".join(str(x) for x in dg);
cantidad_datos=datos.count(',')
x1=[];
for i in range(len(datos)):
    if datos[i]==',':
        x1.append(i)
    else:
        pass
x2=[];
for i in range(len(datos)):
    if datos[i]==']':
        x2.append(i)
    else:
        pass
valores_entrada=[]
for i in range(len(x1)):
    aux=(datos[x1[i]+1:x2[i]]);
    h=aux.split(' ');
    while len(h)>6:
        h.remove('');
    valores_entrada.append(h)
coordenadas=[];
año=[];
mes=[];
dia=[];
hora=[];
radiacion=[];
for i in range(len(valores_entrada)):
    coordenadas.append(valores_entrada[i][0:2]);
    año.append(int(valores_entrada[i][2]));
    mes.append(int(valores_entrada[i][3]));
    dia.append(int(valores_entrada[i][4]));
    hora.append(int(valores_entrada[i][5]));
## _____ RADIACION _____
now = datetime.datetime.now()
a=(now.strftime("%H")); #hora actual
for i in range(len(coordenadas)):
    rad=[];
    for minuto in range(0,60):

date=datetime.datetime(año[i],mes[i],dia[i],hora[i],minuto,tzinfo=datetime.timezone
one.utc)

altitude_deg=get_altitude(float(coordenadas[i][0]),float(coordenadas[i][1]),date
)
    rad.append(round(radiation.get_radiation_direct(date,altitude_deg),2))
sum=0
```

```

    for j in range(0,len(rad)):
        sum=sum+rad[j]
    promedio=round(((sum/len(rad))*7/24)*24/1000,2) ##7 horas efectivas de
radiacion
    radiacion.append(promedio)
    print(promedio)
## _____ RESULTADOS _____
resultados=[]
for i in range(len(coordenadas)):
    resultados.append([coordenadas[i],radiacion[i]])
    #print('Coordenada',resultados[i][0],':',resultados[i][1],'[kWh/m^2/día]')
resultados_ord=[]
for i in range(len(coordenadas)):

resultados_ord.append([float(coordenadas[i][0]),float(coordenadas[i][1]),radiaci
on[i]]);
result=" ".join(str(x) for x in resultados_ord);
## _____ EXPORTAR RESULTADOS _____
f=open('resultados_rad_actual.txt','w')
f.write(result);
f.close()

```

## B.5. Repetir programa

06-04-20 20:03 C:\Users\grace\Docu...\repetir programa.m 1 of 1

```
clear all
close all
clc
while 1
    try
        ruta_actual
    end
    pause(3597) %segundos
end
```