



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas,  
Oceánicas y Recursos Naturales**

“OPTIMIZACIÓN MÚLTI-OBJETIVO DE UN CATAMARAN AUTÓNOMO  
PARA EXPLORACIONES BATIMÉTRICAS”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO NAVAL**

Presentado por:

**ALEJANDRO PATRICIO MONAR DELGADO**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2019**

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis padres Blanca y Rober por su amor y ayuda incondicional a pesar de la distancia que nos separa. A mí querida hermana Pamela por estar siempre dispuesta a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios por permitirme tener vida, salud y poder realizar uno más de mis propósitos que es de ser Ingeniero Naval. A mis padres Blanca y Rober por brindarme amor, apoyo y comprensión durante mi vida de estudiante. A mi tutor Rubén Paredes Alvarado por la guía y paciencia brindada para la realización de este proyecto.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me (nos) corresponde exclusivamente; y doy (damos) mi (nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

Alejandro Patricio Monar Delgado

## EVALUADORES



---

**Nadia Muñoz, Ing.**

COORDINADORA DE LA CARRERA



---

**Rubén Paredes, PhD.**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo la determinación de las características de diseño de un catamarán autónomo para exploraciones batimétricas usando optimización múltiple-objetivo aplicado con algoritmos genéticos para mejorar el método convencional de batimetría. El elevado costo logísticos del método convencional de batimetría y las restringidas zonas de exploración para las mediciones de profundidad, existe la necesidad de mejorar estos índices operacionales, disminuyendo el tiempo de exploración batimétrica, el costo operacional, el aumento de la precisión y reducción del impacto ambiental con el fin de garantizar los resultados batimétricos. Los objetivos para la búsqueda del mejor diseño del prototipo autónomo son el costo de construcción y la incertidumbre geométrica de la batimetría a partir de sus variables de diseño que son: eslora, manga del demi-hull, calado, separación entre demi-hulls, coeficiente bloque y velocidad de servicio, además con las restricciones impuestas considerando las proporciones típicas encontradas para catamaranes. Es por esto que el diseño de un catamarán autónomo mediante el uso de algoritmos genéticos resuelve el problema del método convencional de batimetría mejorando los índices operacionales.

Se desarrolló un algoritmo que permitió evaluar las formas, la determinación de la resistencia, la capacidad necesaria de la batería y maniobrabilidad. En cada proceso los diseños generados por el algoritmo evolutivo pasaron la síntesis del buque descrita para cumplir con la condición de flotabilidad, caso contrario este individuo o modelo tuvo una penalidad en las funciones objetivo, en la función costo que fue de 12000 UDS y en la función de incertidumbre geométrica de 100 cm. Por tanto, para obtener el mejor diseño del prototipo se empleó esta metodología basada en la técnica de búsqueda y selección.

Finalmente, se determinó las dimensiones principales del catamarán autónomo con el uso de la técnica de algoritmo genético. Se obtuvo eslora de 0.96 m, manga del demi-hull de 0.31 m, separación de los demi-hulls de 0.46 m, coeficiente de bloque de 0.55 y a una velocidad deservicio de 1.16 nudos, incertidumbre de 13 cm y costo de 5448.19 USD.

**Palabras Clave:** Algoritmo Genético, Múltiple-Objetivo, optimización, Catamarán, Batimetría

## **ABSTRACT**

*The objective of this project is to determine the design characteristics of an autonomous catamaran for bathymetric explorations using multi-objective optimization applied with genetic algorithms to improve the conventional bathymetry method. The high logistic cost of the conventional bathymetry method and the restricted exploration zones for the depth measurements, there is a need to improve these operational indexes, decreasing the bathymetric exploration time, the operational cost, the increase of the precision and reduction of the impact environmental in order to guarantee the bathymetric results. The objectives for the search for the best design of the autonomous prototype are the construction cost and the geometric uncertainty of the bathymetry from its design variables that are: length, demi-hull beam, draft, separation between demi-hulls, coefficient block and speed of service, in addition to the restrictions imposed considering the typical proportions found for catamarans. That is why the design of an autonomous catamaran through the use of genetic algorithms solves the problem of the conventional method of bathymetry improving the operational indexes.*

*An algorithm was developed that allowed to evaluate the forms, the determination of the resistance, the necessary capacity of the battery and maneuverability. In each process the designs generated by the evolutionary algorithm passed the synthesis of the vessel described to meet the buoyancy condition, otherwise this individual or model had a penalty in the objective functions, in the cost function that was 12,000 UDS and in the 100 cm geometric uncertainty function. Therefore, to obtain the best design of the prototype this methodology based on the search and selection technique was used.*

*Finally, the main dimensions of the autonomous catamaran were determined with the use of the genetic algorithm technique. It was obtained 0.96 m length, demi-hull beam of 0.31 m, demi-hulls separation of 0.46 m, block coefficient of 0.55 and service speed of 1.16 knots, uncertainty of 13 cm and cost of 5448.19 USD.*

**Keywords:** *Genetic Algorithm, Multiple-Objective, Optimization, Catamaran, Bathymetry*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	V
SIMBOLOGÍA .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	2
1. INTRODUCCIÓN .....	2
1.1 Descripción de problema .....	4
1.2 Justificación .....	4
1.3 Objetivos .....	5
1.3.1 Objetivo General .....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Marco teórico.....	6
1.4.1 Diseño Naval.....	6
1.4.2 Particularidades de los Catamaranes .....	7
1.4.3 Batimetría .....	9
1.4.4 Embarcaciones autónomas para Investigaciones Oceanográficas.....	12
1.4.5 Optimización multi-objetivo .....	13
CAPÍTULO 2.....	21
2. METODOLOGÍA .....	21
2.1 Modelo Síntesis del Buque.....	21
2.2 Formas del casco y tipo de embarcación .....	23



2.3	Resistencia y Propulsión .....	25
2.4	Maniobrabilidad .....	31
2.5	Estabilidad Intacta .....	34
2.6	Estimación del costo de construcción.....	37
2.7	Estimación de la precisión de batimetría .....	38
2.8	Optimización Multi-objetivo.....	39
CAPÍTULO 3.....		42
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	42
3.1	Parámetros utilizados para la Optimización Multi-Objetivo.....	42
3.2	Efecto de la Probabilidad de Cruce .....	42
3.3	Resultados de la Optimización Multi-Objetivo .....	43
3.4	Simulación del Algoritmo Genético Multi - Objetivo .....	45
3.5	Análisis de resultados.....	46
3.6	Modelo del Diseño Final .....	51
CAPÍTULO 4.....		52
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	52
	Conclusiones.....	52
	Recomendaciones.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....		54
ANEXOS.....		58
ANEXO A.....		59
BASE DE DATOS.....		59
ANEXO B.....		60
RESISTENCIA DE CATAMARANES [19].....		60
ANEXO C .....		63
CÓDIGO FUENTE MATLAB .....		63

## **ABREVIATURAS**

ASC	Autonomous Surface Craft
IHO	International Hydrographic Organization
GHS	General HydroStatics
NavCad	Predictions and Analysis of Vessel Speed and Power Performance
SHCP	Ship Hull Characteristics Program
AG	Genetic Algorithm
MOGA	Multi Objective Genetic Algorithm
GPS	Global Positioning System

## SIMBOLOGÍA

L	Eslora
B	Manga
D	Puntal
T	Calado
CB	Coefficiente de bloque
V	Velocidad
Fn	Número de Froude
Rt	Resistencia total
R <sub>app</sub>	Resistencia por apéndices
R <sub>va</sub>	Resistencia por viento
Sw	Superficie mojada

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Espiral de diseño del catamarán autónomo .....	6
Figura 1.2 Proceso del diseño [23] .....	7
Figura 1.3 Básica geometría de un Catamarán [9] .....	8
Figura 1.4 Patrón de olas de Kelvin [22] .....	9
Figura 1.5 Levantamiento batimétrico [10] .....	10
Figura 1.6 Área de exploración lago ESPOL-2017 [4] .....	11
Figura 1.7 Embarcación y equipos de Batimetría [4] .....	11
Figura 1.8 Embarcación autónoma de superficie ARTEMIS [24] .....	13
Figura 1.9 ROAZ II, embarcación autónoma de superficie [17] .....	13
Figura 1.10 Pareto de frontera para un problema de minimización 2D [18] .....	16
Figura 1.11 Diagrama de flujo básico de AGs .....	17
Figura 1.12 Operadores genéticos .....	19
Figura 2.1 Modelo de Síntesis del Buque .....	22
Figura 2.2 Modelo 3D del Catamarán autónomo .....	23
Figura 2.3 Formas del casco Wigley [12] .....	24
Figura 2.4 Apéndices Transducer [42] .....	27
Figura 2.5 Área transversal de los equipos de medición .....	29
Figura 2.6 Curva evolutiva [16] .....	33
Figura 2.7 Trayectoria de levantamiento batimétrico .....	33
Figura 2.8 Fibra de vidrio Mat 300 g/m <sup>2</sup> y Resina poliéster [28] .....	35
Figura 2.9 Procesamiento batimétrico [26] .....	39
Figura 2.10 Proceso de Optimización .....	40
Figura 3.1 Probabilidad de cruce 0.0 % - 80% .....	43
Figura 3.2 Variación de Eslora en cada generación hasta la convergencia del método AG. ....	44
Figura 3.3 Variación de Manga en cada generación hasta la convergencia del método AG. ....	44
Figura 3.4 Variación de Separación de demi-hulls en cada generación hasta la convergencia del método AG. ....	44
Figura 3.5 Exploración de la mejor Velocidad de servicio hasta la convergencia del método AG. ....	45

Figura 3.6 Simulaciones con probabilidad de cruce de 0.8 .....	46
Figura 3.7 Costo por generación entre el mejor valor y el valor promedio .....	46
Figura 3.8 Incertidumbre por generación entre el mejor valor y el valor promedio .....	47
Figura 3.9 Costo de cada embarcación autónoma por generación .....	47
Figura 3.10 Incertidumbre de cada embarcación autónoma por generación .....	47
Figura 3.11 Espacio de solución de todas las embarcaciones autónomas creadas por AG .....	48
Figura 3.12 Pareto de frontera.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Variables de Diseño.....	24
Tabla 2.2 Factor de interferencia de olas [2] .....	26
Tabla 2.3 Parámetros de diseño Resistencia por Viento-Aire .....	28
Tabla 2.4 Motores comerciales de alta gama [28] .....	30
Tabla 2.5 Equipos de batimetría .....	31
Tabla 2.6 Medidas de consumo P.R.F.V [13] .....	35
Tabla 2.7 Propiedades de la balsa .....	36
Tabla 2.8 Pesos de los equipos.....	36
Tabla 2.9 Costos de Equipos.....	37
Tabla 2.10 Costos constructivos.....	37
Tabla 3.1 Resultados.....	45
Tabla 3.2 Selección del diseño factible .....	49
Tabla 3.3 Características del diseño del catamarán .....	50

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

La batimetría es el estudio de las profundidades oceánicas mediante el esquema de mapas de isobatas. Por ejemplo, se lo utiliza en el diseño de canales de acceso a Puertos [25], en Barcelona – España, la construcción de Dique de Apoyo en Ocata -España [18], la ruta Manta – Manaos, necesita un estudio de factibilidad de mediciones batimétricas para el tránsito de embarcaciones mayores [13]. También el canal de acceso a los puertos de Guayaquil necesita un dragado constante para mantenerlos competitivos [9]. Es por esto que la batimetría es importante para el desarrollo de proyectos marítimos, ya que de esta manera se puede tener un perfil detallado del fondo marino.

Tradicionalmente, la batimetría se realiza con embarcaciones menores que usan motores de combustión interna fuera de borda que pueden contaminar el medio ambiente y la operatividad es con una tripulación mínima de tres personas. La profundidad es medida con un sonar fijando una referencia base en la costa para la determinación de la posición de la embarcación y determinación de la cota del sonar. El costo logístico es elevado debido al mayor tiempo de realizar la batimetría y la precisión no aumenta. Lo que lleva a los investigadores a buscar alternativas para disminuir los costos logísticos, el tiempo de la exploración batimétrica, el aumento de la precisión, reducción de incertidumbre y disminución del impacto ambiental.

Los avances tecnológicos en la industria naval han permitido el desarrollo de embarcaciones autónomas para investigaciones militares y científicas [11]. Actualmente, los vehículos de superficie autónomos de exploración batimétrica (“Autonomous Surface Craft”, ASC), han empezado a ganar mercado debido a su multifuncionalidad, a bajo costo de construcción y mayor precisión en los resultados. Incluso existen pocos modelos comerciales su mayoría son de tipo Catamarán. Además, los instrumentos de medición son automatizados, alimentados por baterías tipo Gel para la medición, son propulsados por motores eléctricos. La fabricación de los cascos de las embarcaciones autónomas varía entre fibra de vidrio de alta resistencia y aluminio.

En el presente proyecto, se considerará que el área de operación de la embarcación autónoma será en canales de acceso a puertos, ríos o represas, donde la cuantificación

del espacio libre debajo de la quilla es vital, de manera que, se requiere una exploración más rigurosa en el fondo acuático (International Hydrographic Organization) [10]. Se considerará la operación en aguas tranquilas, con la existencia de olas pequeñas de 50 cm y de corrientes de viento 11 m/s. De este modo para el diseño de la embarcación autónoma navegara a profundidades menores a 40 metros. Finalmente, los modelos ASC brindarán gran ayuda para las áreas de operación mencionadas anteriormente, además podrán registrar mediciones batimétricas en espacios acuáticos confinados de calado restringido.

La optimización multiobjetivo en la etapa conceptual del diseño es importante para la toma de decisiones y esto implica en tener un equilibrio cuidadoso entre el costo y el rendimiento del diseño en función de las dimensiones principales del ASC. La mayoría de los problemas de diseño de buques involucran múltiples objetivos que son interactivos para seleccionar el mejor diseño. El diseñador naval requiere la consideración cuidadosa de estos objetivos en competencia y los proyectistas deben tomar decisiones difíciles para la elección del mejor diseño. En este proyecto se utilizará la herramienta de optimización de algoritmo genético múlti-objetivo, para la toma de decisiones con dos objetivos en costo de construcción del modelo y la precisión geométrica de batimetría. En consecuencia, con el uso de esta herramienta de optimización se obtienen las características principales del buque, cumpliendo con los índices de rendimiento del diseño.



## **1.1 Descripción de problema**

Los elevados costos de operación para la realización de levantamientos batimétricos y la restricción de registrar información en áreas de navegación de calado limitado, generan limitaciones para este tipo de exploraciones. Estas son necesarias, para la construcción de obras marítimas, actualización de cartas náuticas, cálculo de volúmenes de sedimento en dragados, estudios de dinámicas costeras y oceanográficas.

## **1.2 Justificación**

El diseño del catamarán autónomo resuelve el problema de exploración y costos, disminuyendo la logística de operación y aumentando la precisión de las mediciones y áreas de batimetría. En el medio local tener una embarcación autónoma de superficie será de gran ayuda por la multifuncionalidad que desempeña a un costo de inversión moderado. El uso de un catamarán autónomo para el levantamiento batimétrico permitirá reducir el error de medición, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un catamarán optimizando sus dimensiones principales mediante el uso de un algoritmo evolutivo, para exploraciones batimétricas de forma autónoma.

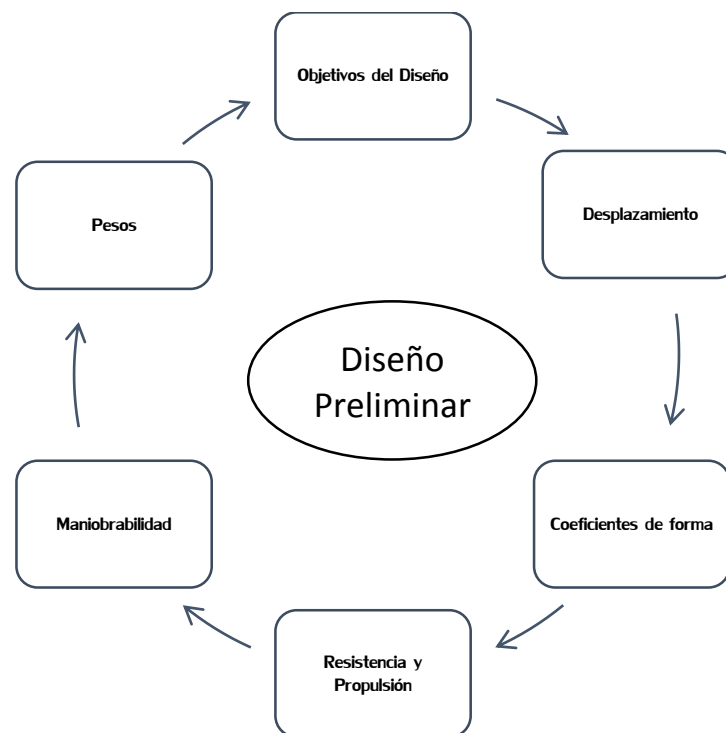
### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Comprender el procedimiento de optimización con algoritmo genético considerando múltiples objetivos para la determinación de las soluciones de optimización.
2. Establecer las funciones objetivos con los requerimientos del diseño que serán empleadas para la optimización.
3. Determinar las características del diseño de la embarcación prototipo aplicando la herramienta de algoritmo genético para la optimización de las funciones objetivos.

## 1.4 Marco teórico

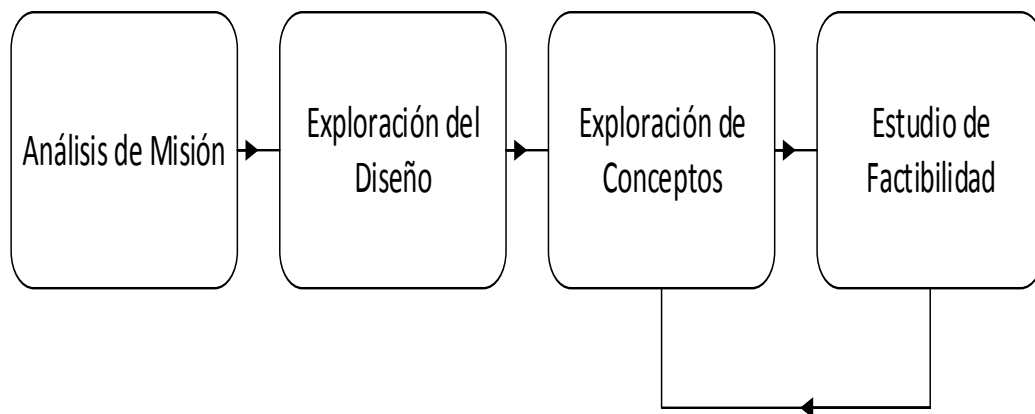
### 1.4.1 Diseño Naval

El diseño tradicional de buques es en gran medida un proceso de prueba y error. Además, existen muchos programas computacionales que se utilizan para realizar un diseño preliminar como GHS, NavCad, SHCP, and SAP [23]. Desafortunadamente, estos programas no involucran todas las categorías de la espiral de diseño ver figura 1.1 de manera sistemática. Por lo tanto, no aseguran al diseñador que la elección inicial de los parámetros del sistema cumplirá con los requisitos de diseño [19].



**Figura 1.1 Espiral de diseño del catamarán autónomo**

Una alternativa a esta limitación es la implementación de un algoritmo que considere todos los sistemas del buque en un proceso de análisis racional de selección de las dimensiones principales óptimas en la etapa inicial del diseño. El proceso de diseño mostrado en la figura 1.2 representan los requerimientos generales de un buque que son determinados por el ingeniero naval y el armador.

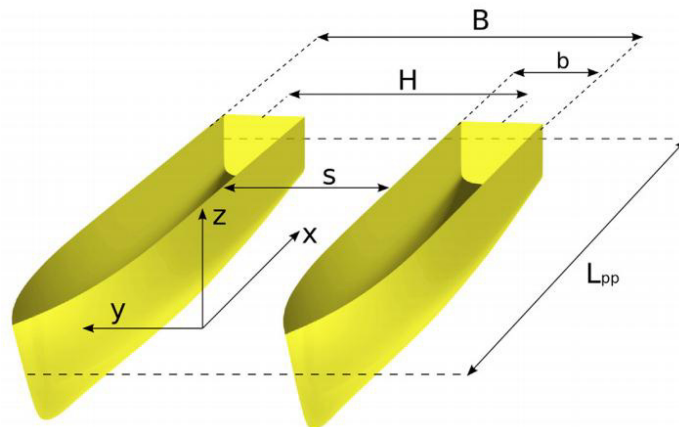


**Figura 1.2 Proceso del diseño [23]**

El análisis de misión reside en el propósito de diseño del buque y los requerimientos generales. La exploración del diseño consiste en la creación de una población inicial de individuos que se encuentren dentro del espacio de los índices de rendimiento de la embarcación. La exploración de conceptos, evaluar todos los sistemas del buque, y en consecuencia se determina la factibilidad de cada individuo.

#### **1.4.2 Particularidades de los Catamaranes**

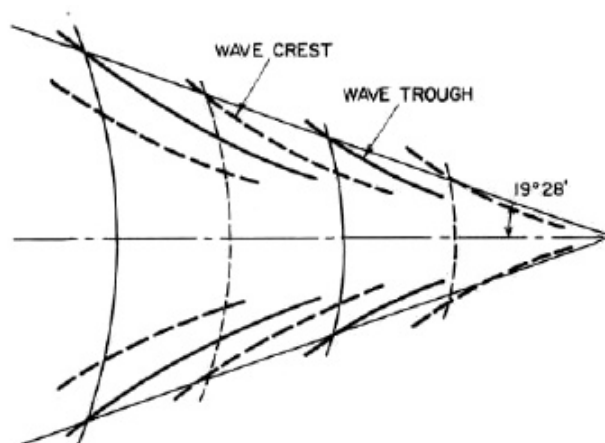
Existen embarcaciones múlti-cascos con dos, tres o cinco cascos conectados entre sí, siendo el de dos cascos los más comunes denominados catamaranes. Entre las principales ventajas de tener dos cascos separados entre sí, se tiene un área de cubierta mayor y una excelente estabilidad transversal lo que los hacen ideales para el turismo y pasaje. Son considerados de desplazamiento, semi-desplazamiento y de planeo, dependiendo de su velocidad de navegación, para el proyecto el rango de desplazamiento esta entre 60 kg y 200 kg. Ver figura 1.3 [5]



**Figura 1.3 Básica geometría de un Catamarán [9]**

Como todo cuerpo desplazándose en agua, necesita vencer la fuerza de resistencia usando una hélice acoplado a un motor, por lo tanto, la resistencia puede ser descompuesta en componentes de resistencia friccional y residual. Utilizando la experiencia experimental se sabe que la resistencia al avance para los catamaranes es afectada por las relaciones de superficie mojada ( $S_w/vol^{2/3}$ ), esbeltez ( $L/vol^{1/3}$ ) y separación entre demi-hulls ( $S/L$ ). Si la velocidad de servicio es baja de  $F_n = V/(gL)^{0.5} \leq 0.35$ , la componente viscosa es dominante. En el caso de los catamaranes, la superficie mojada es mayor que un monocasco, por lo que se considera que tiene un pobre desempeño. A velocidades mayores a un número de Froude,  $F_n = V/(gL)^{0.5} \approx 0.5$ , los bajos trimados dinámicos asociados con los demi-hulls del catamarán conducen a un rendimiento favorable.

La separación entre demi-hulls es cuantificado con una resistencia adicional, producido por superposición de los sistemas de olas generados por cada demi-hulls del catamarán, ver fig. 1.4, además de la interferencia dinámica del flujo en un casco producto de la presencia del otro casco. [5]

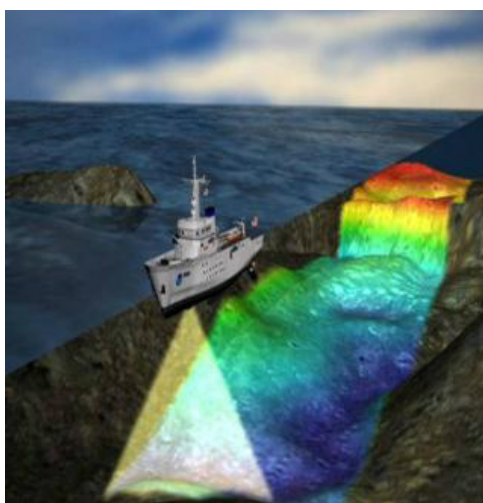


**Figura 1.4 Patrón de olas de Kelvin [22]**

### **1.4.3 Batimetría**

El objetivo de la batimetría es el levantamiento del relieve submarino con un aumento de precisión y reducción de la incertidumbre geométrica en los resultados ver fig. 1.5. El levantamiento batimétrico es obtener las características de la superficie subacuática para asegurar la navegación por terrenos acuáticos desconocidos. Antiguamente, para medir las profundidades se utilizaba una piedra atada a una cuerda. La parte más compleja del proceso batimétrico, es la determinación de la profundidad, coordenada z.

En la actualidad, se utiliza un ecosonda para estas realizar mediciones batimétricas. La ecosonda envía una pulsación de sonido desde el casco o fondo de un buque hasta el fondo del océano. La profundidad es determinada usando el tiempo que demora el pulso en salir, rebotar en el fondo y regresar al buque. Sin embargo, la precisión de estas mediciones sigue siendo limitada, por los equipos que no utilizan sistemas digitales conectados de manera satelital (GPS) controlando en tiempo real los datos que se registran y con esto se mejoraría la precisión batimétrica. El buque del que se toman las medidas está en constante movimiento, cambiando la profundidad del fondo marino en centímetros o en pies. Además, errores pueden ser introducidos cuando de organismos submarinos, como las ballenas, interrumpen el camino de la onda sonora. [3]



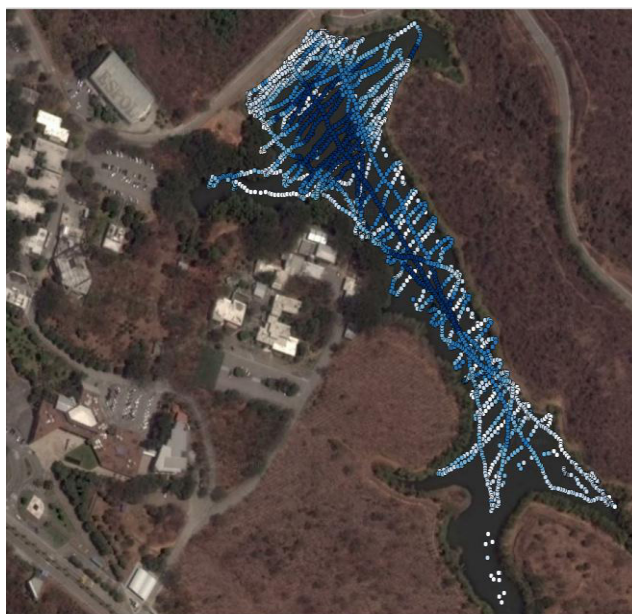
**Figura 1.5 Levantamiento batimétrico [10]**

La Organización Internacional de Hidrografía (OIH), recomienda como método para clasificar los datos batimétricos en zonas de confianza, considerando la precisión de la profundidad dependiendo de la zona explorada de la siguiente manera:

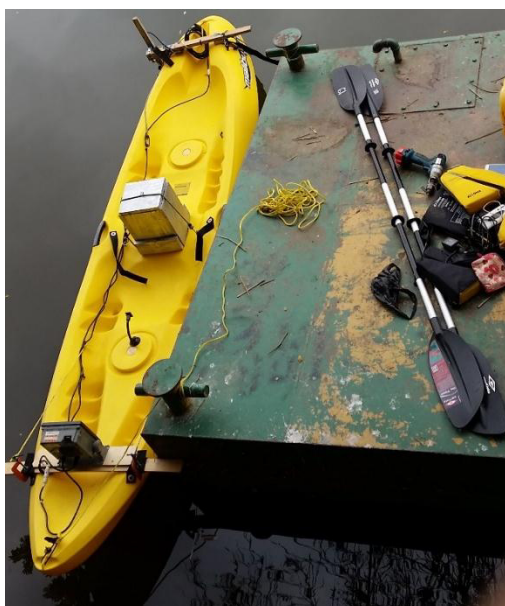
$$\pm\sqrt{a^2 + (b * Z)^2} \quad (1.2)$$

Donde, “a” representa la parte de la incertidumbre que no varía con la profundidad, “b” representa la parte que varía con la profundidad “Z”. Los valores de “a y b” son constantes determinadas por los estándares de la (OIH) [10], según la zona de confianza explorada.

Recientemente, los estudiantes de la carrera de Ingeniería en Oceanografía de ESPOL, realizaron mediciones de batimetría en uno de los lagos de ESPOL, registrando 3100 puntos de medición en un área de 48900 m<sup>2</sup> ver fig. 1.6, utilizando un kayak, como equipo de medición un fish finder de bajo costo, realizando la siguiente ruta de exploración mostrados en la fig.1.7.



**Figura 1.6 Área de exploración lago ESPOL-2017 [4]**



**Figura 1.7 Embarcación y equipos de Batimetría [4]**

Con los datos de profundidades registrados en el 2017, se estimó la profundidad promedio del lago artificial, de aproximadamente 4.94 metros.

Por lo tanto la precisión de batimetría de los datos registrados en el lago artificial de ESPOL es de  $\pm 25$  centímetros.

Para cuantificar la confiabilidad de las mediciones realizadas se pueden utilizar el método de interpolación de ponderación inversa (IDW), método de Kriging, método de predicción



espacial, método de Shepard y método de B-Spline. Se utilizó método IDW que se fundamenta en asignar pesos que varían entre 1 y 0 a los datos registrados que van a ser interpolados para determinar el dato central en función inversa a la distancia que los separa, ver ecuación 1.1, además de su fácil manejo de datos para la interpolación [25].

$$Z = \frac{\sum \frac{z_i}{d_i^\beta}}{\sum \frac{1}{d_i^\beta}} \quad (1.1)$$

Donde “Z”, representa la determinación de la profundidad, “z<sub>i</sub>”, la altura en cada punto de medición, “d<sub>i</sub>”, la distancia entre los puntos medidos para la interpolación y “β”, el exponente de ponderación que controla la forma en la que el peso asignado al dato disminuya con la distancia.

#### **1.4.4 Embarcaciones autónomas para Investigaciones Oceanográficas**

Los vehículos autónomos bajo el agua se introdujeron en la década de 1990 para los levantamientos hidrográficos, y se hicieron factibles para operaciones militares. Están limitados en el tiempo de funcionamiento por la capacidad de la batería, y en muchos diseños requieren que las baterías se recarguen internamente antes de volver a la operación [16]. Las embarcaciones autónomas de superficie fueron los primeros en introducir ampliamente los sistemas de navegación automatizados, a través del uso de pilotos automáticos para el control de rumbo durante la exploración [16].

El desarrollo de embarcaciones autónomas de superficie (Autonomous Surface Craft”, ASC) ha recibido mucho esfuerzo en los últimos años [6,9,13,16,19]. Son embarcaciones estables y maniobrables en la superficie del agua. Debido a que pueden realizar operaciones sofisticadas en una plataforma físicamente pequeña, son candidatos ideales para operar en espacios acuáticos confinados y realizar estudios batimétricos. Por ejemplo, desde 1993, el MIT Sea Grant College Program, desarrolló varias embarcaciones de superficies autónomas entre las más reconocida el ARTEMIS fig. 1.8. La primera embarcación autónoma de superficie tuvo el nombre de ARTEMIS [24]. Este diseño fue utilizado para sistemas de control, navegabilidad y para la adquisición de datos de levantamientos batimétricos de alta confiabilidad de resultados, de manera que fue realizado en Charles River en Cambridge, Massachusetts.



**Figura 1.8 Embarcación autónoma de superficie ARTEMIS [24]**

El ROAZ es un catamarán autónomo de superficie creado por Autonomous Systems Laboratory, Porto Polytechnic Institute. Para el desarrollo de sistemas networked en vehículos autónomos para estudios oceanográficos, morfología costera y para aplicaciones de seguridad fig. 1.9. Tiene una estructura múltiple casco con dos motores eléctricos para propulsión y gobierno [17].



**Figura 1.9 ROAZ II, embarcación autónoma de superficie [17]**

#### **1.4.5 Optimización múltiple-objetivo**

Los métodos de optimización tradicionales, tienen limitaciones cuando son usados para analizar los problemas reales de diseño del buque. El diseño de un buque es un proceso complejo, porque debe considerarse todos los sistemas de la embarcación. Todas estas limitaciones han sido superadas en los últimos años con el desarrollo de técnicas modernas de diseño por ejemplo el método de algoritmos genéticos; con la capacidad de análisis y síntesis de situaciones complejas, y el desarrollo de nuevos métodos para tratar problemas de optimización múltiple-objetivo [26]. Por ejemplo, el armador busca

reducir el costo de construcción de dichos diseños, mientras que se desea el maximizar el rendimiento.

La mayoría de los problemas de diseño de embarcaciones implican múltiples objetivos para alcanzar el mejor buque, como la inevitable compensación entre la efectividad y el costo. El diseño naval requiere una consideración cuidadosa de estos criterios competitivos para que los proyectistas puedan tomar decisiones sobre el diseño con la menor incertidumbre. Para resolver el problema de optimización, con funciones múlti-objetivos, la herramienta computacional algoritmo genético es implementado para obtener un conjunto de soluciones no dominadas.

Para cualquier diseño de optimización con múltiples funciones, el problema de optimización se define de manera general desde el enfoque matemático, como un procedimiento que consiste en seleccionar un elemento del conjunto en base a reglas o restricciones que se establecen. En particular al diseño de buques, se especifican variables de diseño para definir los sistemas del buque, tales como la parametrización para las formas del casco, variables de control para el sistema de propulsión, de manera que asegure los cumplimientos de los objetivos del diseño. Para el presente proyecto se considerará dos funciones costo de construcción de la embarcación y precisión batimétrica. Cada conjunto referido como conjunto de posibles soluciones, es un subconjunto del espacio de solución  $V_x$ . Este conjunto está limitado por la imposición de restricciones, y el conjunto limitado es llamado conjunto de soluciones factibles  $\Phi$  [30]. Cada elemento del espacio  $V_x$  es un vector de las variables de diseño  $x \in V_x$ . figura 1.10. El espacio de solución  $V_x$  puede ser un espacio Euclidiano, si todas sus coordenadas son números:

$$x = [L, B, T, S, CB, V] \in V_x$$

Para la resolución de problemas de optimización múlti-objetivo primero se encuentra una combinación de los valores de las variables de diseño  $x = [L, B, T, S, CB, V]^T$ , que optimiza al mismo tiempo todos los componentes del vector de funciones objetivos

$f(x) = [f_1(x) f_2(x) \dots f_s(x) \dots f_s(x)]^T$ . La formulación matemática de la optimización múlti-objetivo se presenta de la siguiente manera:

- Variables de diseño o variables independientes

$$x = [L, B, T, S, CB, V] \in V_x$$

$$x_{i,min} \leq x_i \leq x_{i,max}, i = 1, 2, \dots, n$$

El vector  $x$ , representa los parámetros de diseño de una embarcación para este proyecto:

L, Eslora [m],  $L_{min} \leq x_1 \leq L_{max}$

B, Manga del semi-casco [m],  $B_{min} \leq x_2 \leq B_{max}$

T, Calado [m],  $T_{min} \leq x_3 \leq T_{max}$

S, Separación entre cascos desde crujía [m],  $S_{min} \leq x_4 \leq S_{max}$

cb, Coeficiente Bloque [-],  $cb_{min} \leq x_5 \leq cb_{max}$

V, Velocidad de servicio [m/s],  $V_{min} \leq x_6 \leq V_{max}$

- Funciones de optimización: maximizar o minimizar  $f(x)$

$$f(x) = [f_1(x) \ f_2(x)]^T$$

- Restricciones:

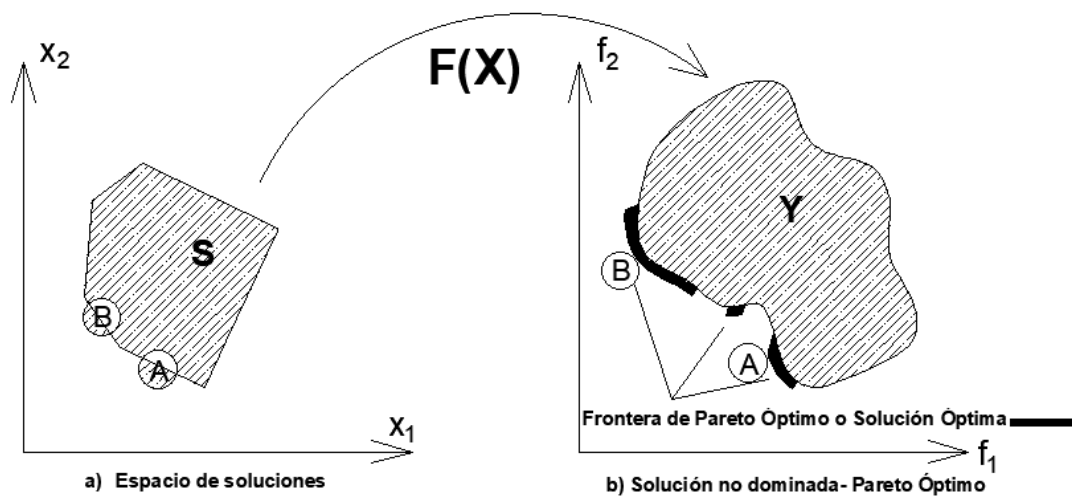
$$h_k(x) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, m_1$$

$$g_j(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_2$$

Las funciones múltiple-objetivos se involucran en la mayoría de los problemas de optimización en el mundo real. Las decisiones del proyectista no se basan en una función única o independiente. Cualquier selección entre las alternativas implica minimizar o maximizar las funciones objetivas al mismo tiempo, lo cual no es posible cuando están en conflicto entre ellas.

La selección de la mejor opción se realiza utilizando el concepto de dominancia o Pareto óptimo que define la situación en la que no es posible mejorar a una sola función sin perjudicar a las demás, entonces sea  $x_1$  y  $x_2$  dos soluciones posibles de un problema de optimización multidimensional con  $N$  objetivos. Se dice que una solución  $x_1$  es fuertemente no dominada por una solución  $x_2$  si, y solo si, a) para todas las funciones evaluadas en  $x_1$  son menores o iguales a las mismas funciones evaluadas en  $x_2$  o b) que exista una función que evaluada en  $x_1$  sea menor a las mismas funciones evaluadas en

$x_2$ , es decir, si una solución  $x$  es un Pareto óptimo si, y solo si, no existe una solución  $y$  que satisfice las dos condiciones de dominio que se describieron. En otras palabras, la descripción previa define que una solución es un Pareto óptimo, si y solo si no existe otra solución posible que mejore todas las funciones objetivos simultáneamente. Un ejemplo, el Pareto de frontera para un caso de dos dimensiones de minimización se muestra en la siguiente fig. 1.10.



**Figura 1.10 Pareto de frontera para un problema de minimización 2D [18]**

**A** es una solución no dominada que pertenece a la frontera de Pareto si no existe otro punto **B** que domine **A**. En general, para cada región posible de **S** existe un subconjunto de **S** que tiene las soluciones no dominadas ver fig. 1.10.

#### 1.4.5.1 Algoritmo Genético

Los algoritmos genéticos son estrategias evolutivas que se basa en la teoría de la selección natural. Tienen fundamento estocástico, inspiradas en el mecanismo de la evolución natural. Generalmente, un algoritmo genético usa una representación binaria para las variables independientes y una estrategia evolutiva empleando números reales.

#### Evaluación del Más Apto

El algoritmo genético es un proceso iterativo, empieza con la exploración de una población inicial aleatoria de soluciones, llamadas cromosomas o individuos. Los individuos seleccionados como más aptos son evaluados en las funciones objetivos, dependiendo de la dominancia en cada objetivo, estos pueden ser el mejoramiento de una función objetivo y el empeoramiento de las otras funciones objetivos, este proceso

se repite hasta la convergencia del algoritmo. El AG, aplica la supervivencia del más apto para seleccionar las mejores soluciones y mejorar las características de la población con la aplicación de operaciones genéticas de cruce y mutación. Los términos que son empleados usualmente por los AG son [18]:

- **Cromosoma:** Son también llamados individuos y comprenden un conjunto de variables de diseño, por lo tanto, son una solución del problema  $[L, B, T, S, CB, V]$ .
- **Gen:** Un sucesivo número de genes forman un cromosoma, es la característica de una variable de diseño.
- **Población:** Es el conjunto de  $N$  cromosomas o individuos.
- **Generaciones:** Es el número finito total de iteraciones que son ejecutadas.
- **Operadores Genéticos:** Se aplica un procedimiento para seleccionar los cromosomas, que conformaran la nueva población  $N$  después de haber evaluado la población inicial y formar la generación  $N+1$ .
- **Función de Aptitud:** Es una medida de rendimiento o de aptitud de cada cromosoma.

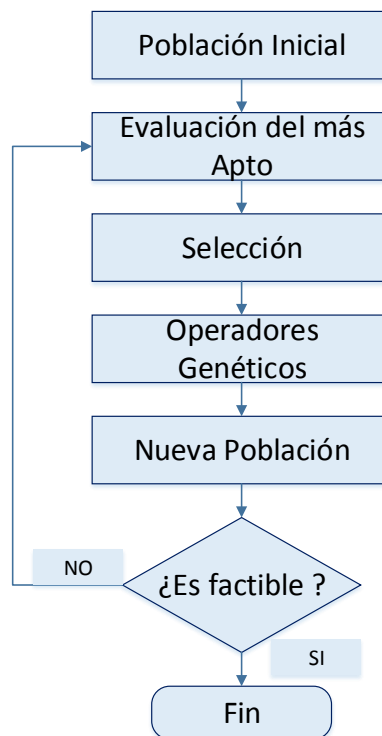


Figura 1.11 Diagrama de flujo básico de AGs

### **Selección por Ruleta**

Consiste en asignar a cada individuo una probabilidad de ser elegido. La probabilidad de asignación varía entre 0 y 1. La suma de los porcentajes de la ruleta debe ser la unidad. Se construye una ruleta donde cada una de las porciones representa un individuo, por lo tanto, la porción de ruleta es proporcional a la aptitud de cada individuo. El método es fácil de usar, pero no es eficiente, individuos con peores aptitudes pueden ser seleccionados más de una vez.

### **Selección por Torneo**

La selección por torneo se efectúa mediante la competición de N individuos elegidos aleatoriamente desde la población. Los individuos vencedores serán los que tengan mejores aptitudes. La ventaja de este tipo de selección es la capacidad de evitar la convergencia anticipada.

### **Operadores Genéticos**

Los individuos con mejores aptitudes tienen grandes posibilidades para ser seleccionados y continuar con el proceso de optimización y con peores aptitudes tienen probabilidades de no ser tomados en cuenta. El proceso de selección define si puede ser elegido un cromosoma más de una vez dependiendo de su aptitud. [18]

La selección será por torneo implementado por Matlab es decir que serán comparaciones directas entre individuos. La selección por torneo será de manera determinística, que es el método de selección que utiliza MATLAB. En la manera determinística se selecciona aleatoriamente un número "p" de cromosomas por lo general son dos cromosomas que serán los cromosomas padres para la siguiente generación. Entre los cromosomas seleccionados se escoge el más apto para pasarlo a la siguiente generación [17].

### **Cruce**

El cruce es la combinación de los cromosomas padres seleccionados para formar un nuevo individuo de la siguiente generación.

## Mutación

La mutación realiza pequeños cambios aleatorios en los cromosomas de la generación N para mantener la diversidad de individuos y permitir que el algoritmo genético tenga un espacio de búsqueda más amplio.

### Cromosomas: A y B

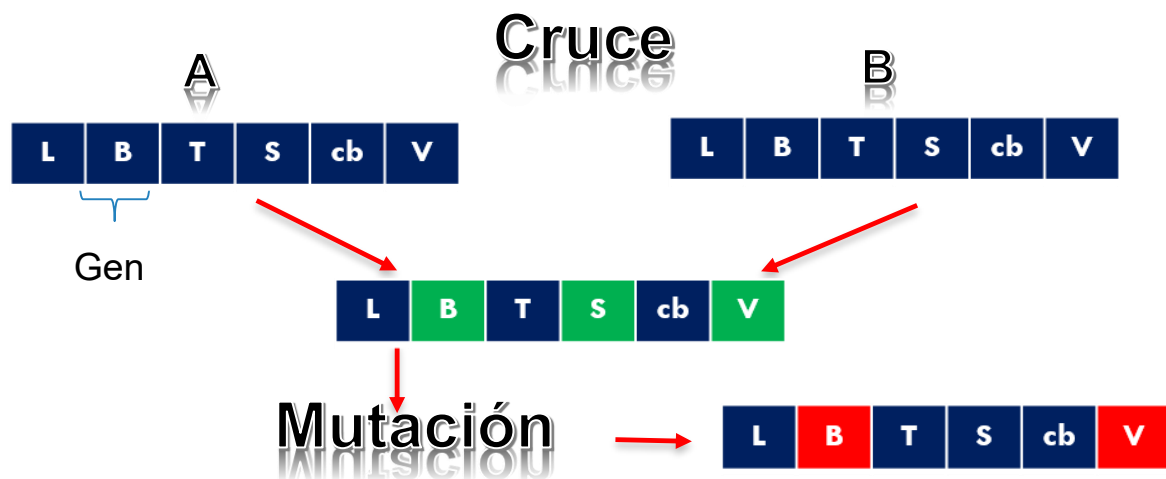


Figura 1.12 Operadores genéticos

#### 1.4.5.2 Ventajas y Desventajas de los Algoritmos Genéticos

A partir de trabajos disponibles [1, 2, 7, 26, 38, 39] se pueden listar las siguientes ventajas y desventajas:

##### Ventajas

- Son utilizados en una gran variedad de problemas, presentando un buen desempeño para la solución de problemas.
- Son de fácil implementación y proporcionan flexibilidad al tratamiento del problema.
- Operan de manera paralela con varias soluciones, tomando variedad de información de los cromosomas.
- Aplica operadores aleatorios y no operadores determinísticos, lo que hace que la convergencia del algoritmo varíe con respecto el tiempo.



## **Desventajas**

- La convergencia del algoritmo genético demanda un tiempo excesivo, esto dependerá del tamaño de la población, número de generaciones o de los procesadores del equipo computacional.
- El lenguaje de programación debe tener la capacidad de tolerar cambios aleatorios que se generan dentro del algoritmo genético; que no lleguen a producir resultados sin sentido o errores fatales. [6]

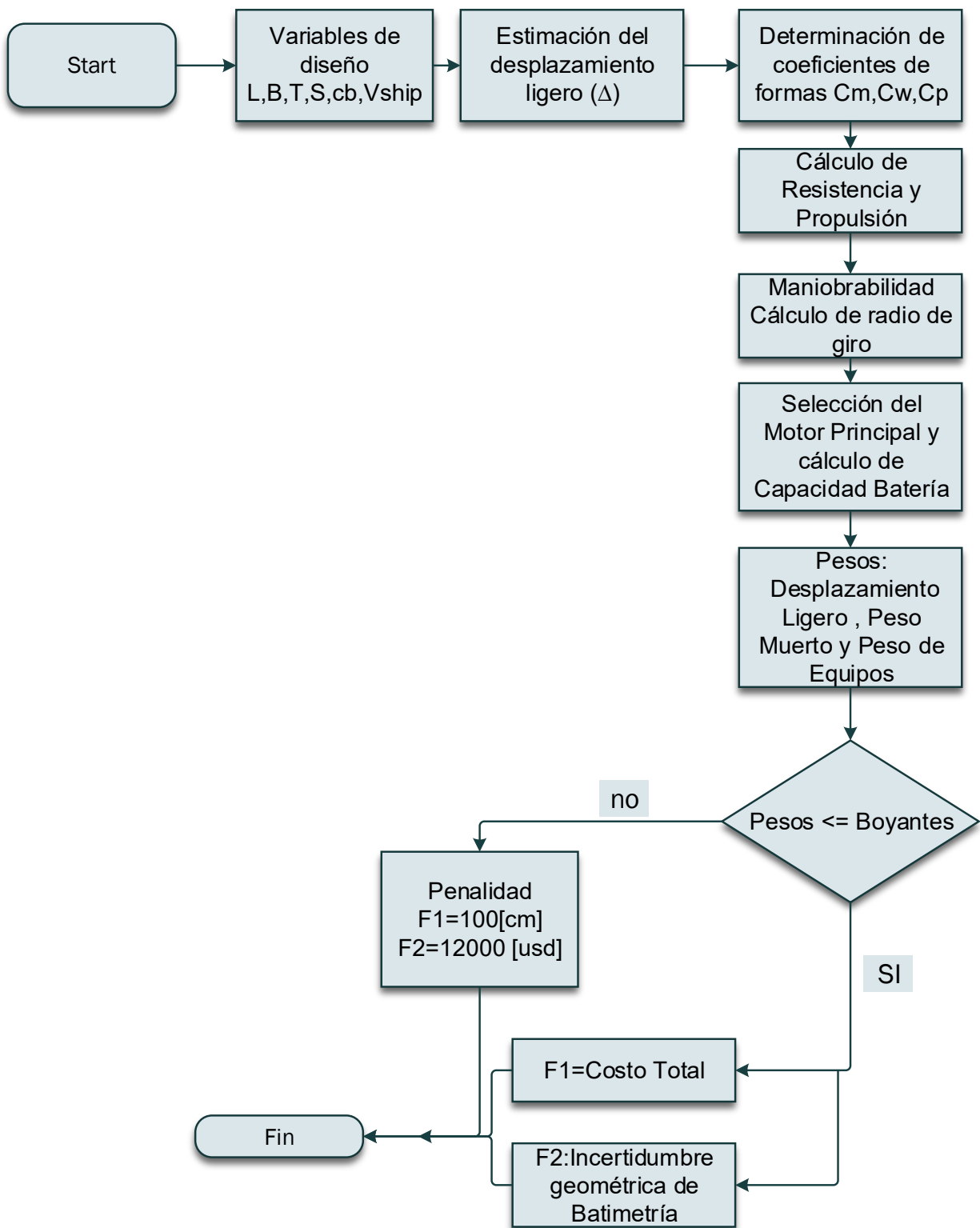
# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Modelo Síntesis del Buque

En el presente trabajo, se utilizó el procedimiento racional de la espiral de diseño para determinar el costo de construcción del prototipo y la incertidumbre de la batimetría de cada individuo de la generación N y determinar su fitness que es necesario en el algoritmo genético. El desarrollo empieza a partir de una base de datos recopilada por el autor ver anexo A, con la determinación de cada una de las variables de diseño y sus restricciones para la optimización, posteriormente el algoritmo genético selecciona el vector de soluciones más apto. Se implementó un modelo de buque que permite analizar si el individuo no dominante o vector de soluciones, cumple con la factibilidad del diseño en cada sistema que componen a la embarcación, como la flotabilidad, estimación de pesos, sistema de propulsión y costos.

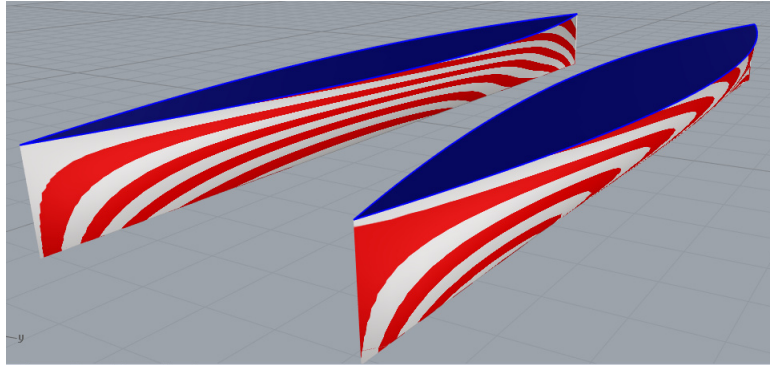
Se implementará en el software Matlab versión 2017 de MathWorks la síntesis del buque de cada sistema, esta herramienta se la usa para balancear cada modelo de buque en el optimizador que también es una herramienta de Matlab 2017 [27]. La síntesis de modelo de cada sistema se describirá en las secciones de este capítulo.



**Figura 2.1 Modelo de Síntesis del Buque**

## 2.2 Formas del casco y tipo de embarcación

En este presente trabajo se escogió que el prototipo será de tipo Catamarán debido a que provee mayor espacio en cubierta para la carga útil y estabilidad. Al diseñar este modelo de embarcación se consideró en mantener un calado pequeño, para operar en aguas no mayor a 40 m de profundidad.



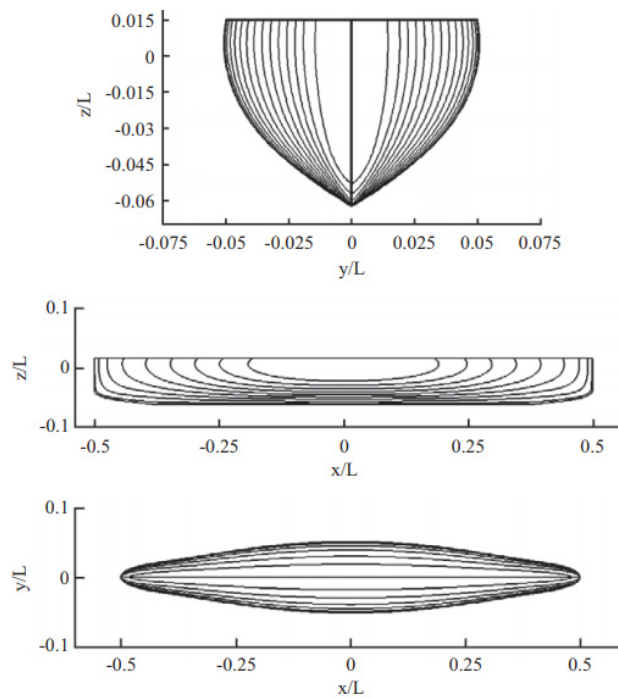
**Figura 2.2 Modelo 3D del Catamarán autónomo**

Se usó como base las formas del casco Wigley por su forma característica para el diseño de este tipo de prototipos. Las dimensiones principales se determinaron mediante el proceso de optimización AG el cual identifica las mejores características del diseño.

La forma del casco se describe con el siguiente modelo matemático [36]:

$$y = \pm \frac{B}{2} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{L} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{2z}{T} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

Donde “x”, “y” y “z” son la eslora, magna y puntal, respectivamente.



**Figura 2.3 Formas del casco Wigley [12]**

Las formas características del casco son controladas por las variables de diseño que son las dimensiones principales de la embarcación:

**Tabla 2.1 Variables de Diseño**

Descripción de las variables de Diseño	
<b>Eslora [m]</b>	$0.5 < L < 3$
<b>Manga del demihull [m]</b>	$0.15 < B < 1$
<b>Calado [m]</b>	$0.05 < T < 0.5$
<b>Separación entre cascos desde crujía [m]</b>	$0.15 < S < 1.5$
<b>Coefficiente de bloque</b>	$0.4 < C_b < 0.45$
<b>Velocidad [nudos]</b>	$0.1 < v < 10$

Las 4 primeras variables mostradas en la tabla 2.1 define la forma real del casco y la variable de separación entre cascos (S) determina el área total de carga útil y el aporte de la interacción de los cascos en la resistencia al avance. Esto hace que el optimizador elija una variedad de formas y tamaños de embarcaciones, al mismo tiempo que permite que los modelos matemáticos o funciones objetivos varíen las demisiones sin afectar las formas generales del modelo.

## 2.3 Resistencia y Propulsión

Se implementó en el programa computacional Matlab 2017b para calcular la resistencia al avance del prototipo autónomo definido por las variables de diseño luego se determinó la potencia del motor requerido y la capacidad de batería.

### Resistencia Viscosa y Resistencia por formación de olas

Se estimó la resistencia de la embarcación y la potencia necesaria para ser impulsado, para fines prácticos, usando la formulación de Isel y Molland [34]:

$$C_t = (1 + \beta k) * cf + \tau * C_w \quad (2.2)$$

Donde:

$C_t$ : Coeficiente de la resistencia total por viscosidad y formación de olas.

$cf$ : Coeficiente de resistencia por fricción obtenida por la fórmula del ITTC'S 57

$C_w$ : Coeficiente de resistencia por olas, en este caso el estudio del  $C_w$  se calculó aplicando las formulaciones de Holtrop & Mennen [21].

$\tau$ : Factor de interferencia por resistencia por olas.

El término  $(1 + \beta k)$  es llamado como factor de forma viscoso, la formulación empírica para calcular este parámetro es presentada en la ecuación (2.3). La referencia [2], añade la variable  $S/L$  y genera formulas empíricas para calcular el factor por interferencia de olas ( $\tau$ ), para u Numero de Froude ( $Fn$ ). Para calcular la resistencia total del catamarán se aplicó la ecuación (2.10)

$$(1 + \beta k) = 3.03 \left( \frac{L}{vol^{1/3}} \right)^{-0.4} + 0.016 \left( \frac{S}{L} \right)^{-0.65} \quad (2.3)$$

$$\tau = 0.068 \left( \frac{S}{L} \right)^{-1.38}, \text{ para } Fn = 0.19 \quad (2.4)$$

$$\tau = 0.068 \left( \frac{S}{L} \right)^{-0.87}, \text{ para } Fn = 0.28 \quad (2.5)$$

$$\tau = 0.068 \left( \frac{S}{L} \right)^{-0.33}, \text{ para } Fn = 0.37 \quad (2.6)$$

$$\tau = 0.068 \left( \frac{S}{L} \right)^{-0.14}, \text{ para } Fn = 0.47 \quad (2.7)$$

$$\tau = 0.068 \left(\frac{S}{L}\right)^{-0.31}, \text{ para } Fn = 0.56 \quad (2.8)$$

$$\tau = 0.501 \left(\frac{S}{L}\right)^{-0.18}, \text{ para } Fn = 0.65 \quad (2.9)$$

Donde:

$\left(\frac{S}{L}\right)$  = Relación la eslora y la separación entre cascos.

$vol$  =Volumen de buque sumergido [m<sup>3</sup>].

$$R_t = 0.5 * \rho * SURF * V^2 * Ct \quad [N] \quad (2.10)$$

Donde:

$R_t$ : Resistencia total [N]

$\rho$ : Densidad del agua [1025 kg/m<sup>3</sup>]

$SURF$ : Área de la superficie mojada [m<sup>2</sup>]

$V$ : Velocidad de la embarcación [m/s]

Para obtener el factor de interferencia de la ola a un cierto Número Froude, esto debería ser interpolado usando el método de interpolación cubica, y se tuvo como resultados:

**Tabla 2.2 Factor de interferencia de olas [2]**

Froude [Fn]	S/L=0.2	S/L=0.3	S/L=0.4
0.20	0.901	0.550	0.387
0.25	1.443	0.966	0.724
0.30	1.365	1.00	0.804
0.35	1.070	0.885	0.776
0.40	0.926	0.864	0.819
0.45	0.974	0.927	0.893
0.50	0.966	0.893	0.847
0.55	0.858	0.763	0.702
0.60	0.720	0.625	0.564
0.65	0.669	0.622	0.591

## Resistencia por Apéndice

También, se consideran la atribución del apéndice el equipo de Transducer ver fig. 2.4, el mismo emite una señal al fondo marino y en un instante de tiempo recibe la respuesta de la señal emitida con las características del fondo marino.



**Figura 2.4 Apéndices Transducer [42]**

La formulación aplicada es la siguiente ecuación 2.11:

$$R_{app} = 0.5 * \rho * A_{pp} * f * V^2 \quad [N] \quad (2.11)$$

Donde:

$R_{app}$ : Resistencia por apéndices [N]

$A_{pp}$ : Área transversal de los apéndices [m<sup>2</sup>]

$f$ : Factor de apéndice

$V$ : Velocidad de la embarcación [m/s]

El área total de los apéndices es de 0.12 m<sup>2</sup> y el factor de forma es 1.

## Resistencia por Viento - Aire

Para el diseño del catamarán se consideró las siguientes características:



**Tabla 2.3 Parámetros de diseño Resistencia por Viento-Aire**

<b>Escala de Beaufort</b>	5	(Brisa fresca)
<b>Velocidad del aire [m/s]</b>	11	
<b>Área frontal [m<sup>2</sup>]</b>	0.155+ Af(L,M,T,S,cb)	
<b>Densidad del aire @25°C [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1.184	

El termino Af (L, M, T, S, cb), es el área transversal del prototipo autónomo medido desde la línea de máxima carga hacia toda la obra muerta ver fig. 2.5, esta media depende de las características dimensionales, el valor de 0.155 m<sup>2</sup>, es el área de los equipos que están en cubierta, siendo este un parámetro fijo.

La formulación aplicada es la siguiente ecuación 2.12:

$$R_{va} = 0.5 * \rho_{aire} * A_{frontal} * c_d * V^2 \quad [N] \quad (2.12)$$

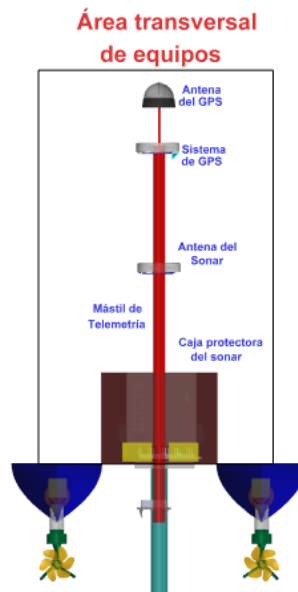
Donde:

$R_{va}$ : Resistencia por viento-aire [N]

$A_{frontal}$ : Área transversal sobre el calado a máxima carga [m<sup>2</sup>]

$c_d$ : 0.8

$V$ : Velocidad de la embarcación [m/s]



**Figura 2.5 Área transversal de los equipos de medición**

Finalmente, la resistencia total será estimada como exprese la ecuación 2.13:

$$RT = 2 * (Rt(viscos - olas) + Rapp + Rva) \quad (2.13)$$

Para la estimación del cálculo de la potencia propulsiva se asumió el coeficiente quasipropulsivo de 0.55, por lo tanto, la potencia se calculó con la siguiente expresión:

$$POWERENGINE = \frac{RT * V}{0.55} \text{ [Watts]} \quad (2.14)$$

Esta potencia calculada se dividió para dos y así tener en cada casco un motor, para mantener la estabilidad de la embarcación. Para la selección se consideró motores de la marca Maxon Motor [28], funcionan con corriente directa.

**Tabla 2.4 Motores comerciales de alta gama [28]**

Potencia nominal [ watts]	Costo [\$]	RPM nominal	Amperios nominal	Peso [kg]
2	257.08	33.100	0.41	0.006
3	307.06	22.800	0.39	0.006
12	241.66	40.000	0.916	0.024
20	207.51	45.300	1.24	0.037
25	226.12	63.000	1.45	0.05
30	213.36	43.600	1.74	0.072
40	224.64	54.000	2.05	0.078
50	280.58	66.400	2.58	0.078
60	244.63	55.200	2.91	0.078
80	242.93	61.600	4.82	0.097
120	270.05	57.900	6.21	0.12
150	304.30	47.800	6.67	0.14
160	201.88	2.720	6.39	0.49
170	337.275	9.120	7.39	0.58
180	587.23	4.220	7.61	0.82
200	754.75	16.100	8.96	0.95

### **Estimación de la capacidad de la Batería**

Para estimar la capacidad de la batería es necesario tomar en cuenta los requerimientos de todos los equipos electrónicos a bordo, incluyendo motores y hélices considerando el tiempo de operación necesaria para cubrir el área de 5 ha. Los equipos de batimetría son un factor constante para la estimación de los cálculos, ya sea en costos, potencia y corriente, de igual manera los empujadores, caso contrario de los motores que se estimó las características del motor dentro de la síntesis del buque en función de las variables de diseño y de la velocidad requerida, esta velocidad fue determinada por la síntesis del buque tal que cumpla con la flotabilidad de la embarcación.

Para el prototipo autónomo se le asignó un empujador tipo azimutal de 130 watts para cada casco con 11.5 [AH] y 0.30 [kg] de peso para cada motor.

**Tabla 2.5 Equipos de batimetría**

	<b>Descripción</b>	<b>Amp [A]</b>
<b>Automatización</b>	Pixhawk PX4 Vuelo Controller w/Amortiguador + GPS neo-m8 N 915 mhz radio Wireless Telemetry Set OSD Module ppm módulo I2 C Splitter extender módulo Power Module For FPV Quadcopter multirotor	0.5
	FrSky X8R 2.4 G 16 CH SBUS Smart Port Telemetry Receiver	0.1
<b>Acústica</b>	Raspberry pi 3	2.5
	ezyync USB a RS-485/RS-422 magnético aislado Serial convertidor, ezyync2303	0.7
	Furuno –Color LCD Sounder	1
	Intensidad de corriente de los equipos batimétricos	5.6

Una vez estimada la potencia del motor y seleccionado del catálogo comercial el amperaje del motor.

Por lo tanto, la capacidad de la batería se estima de la siguiente manera:

$$AH = (AENGINE + AEQUIPOS) * Time + AHTHRUSTER \quad (2.15)$$

Siendo,

*AH*: Capacidad de la batería [amperios-horas].

*AENGINE*: Corriente nominal del motor [amperios].

*AEQUIPOS*: Corriente nominal de los equipos de medición [amperios].

*Time*: Tiempo de operación [horas].

*AHTHRUSTER*: Amperios hora del empujador (hélices).

## **2.4 Maniobrabilidad**

Es necesario cuantificar las cualidades de maniobrabilidad del modelo específicamente su radio de giro. El prototipo autónomo es diseñado para realizar mediciones de batimetría siguiendo una trayectoria predeterminada dentro del área de exploración. De modo que debe tener un alto rendimiento de maniobrabilidad, para poder determinar la separación que habrá entre cada track o trayectoria longitudinal y determinar la cantidad de giros que realizara la embarcación en toda el área figura 2.6. Finalmente, la suma de las trayectorias longitudinales y la suma de la cantidad de giros multiplicada por el diámetro táctico, se obtiene la distancia total del recorrido que hará la embarcación.

### Calculo del diámetro táctico:

Las siguientes formulaciones empíricas [5], determina la maniobrabilidad de la embarcación. Ver fig. 2.6.

Para dos hélices:

$$L \left[ 0.727 - 197 \frac{CB}{\delta R} + 41 \frac{TRIM}{L} - \frac{4.65B}{L} + \frac{188}{\delta R} - 218 \frac{Sp \cdot Ch}{L \cdot T} * (ST - 1) + \right. \\ \left. + 1.77 * \frac{V}{L^{0.5}} \right] \quad (2.16)$$

$$\text{Diámetro táctico } DT = L * \left( 0.14 + \frac{STD}{L} \right)$$

$$DT = L * \left( 0.14 + \left[ 0.727 - 197 \frac{CB}{\delta R} + 41 \frac{TRIM}{L} - \frac{4.65B}{L} + \frac{188}{\delta R} - 218 \frac{Sp \cdot Ch}{L \cdot T} * (ST - 1) + \right. \right. \\ \left. \left. + 1.77 * \frac{V}{L^{0.5}} \right] \right) \quad (2.17)$$

Donde:

*CB*: Coeficiente de bloque

*L*: Eslora [m]

*V*: Velocidad de la embarcación [nudos]

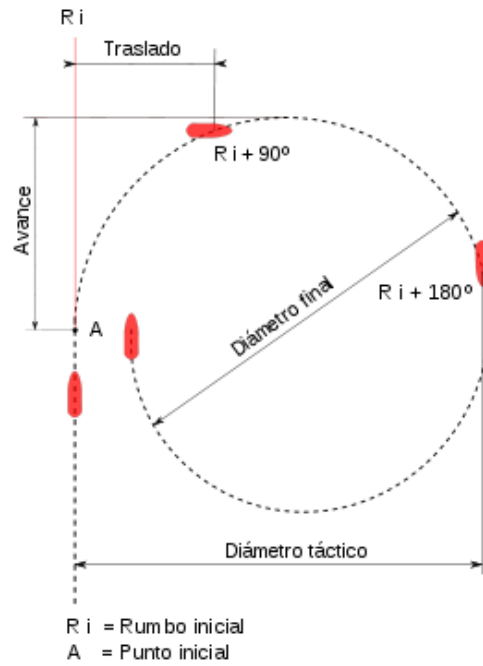
*ST*: Diámetro de giro [m]

*DT*: Diámetro táctico [m]

*TRIM*: Trimado

*T*: Calado a máxima carga [m]

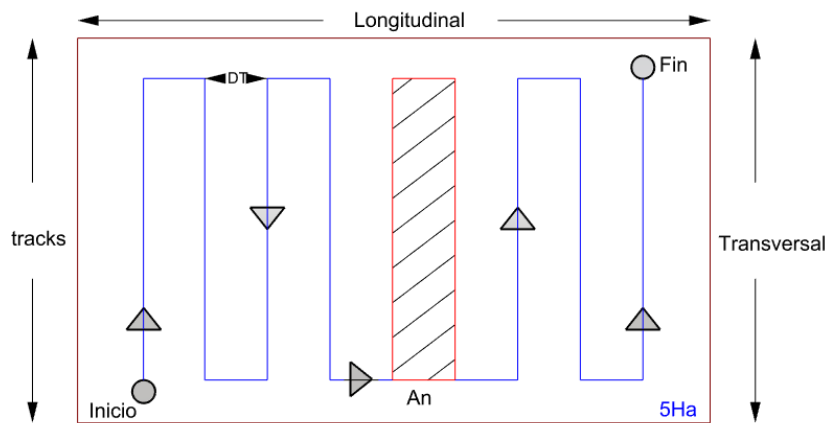
*STD*: Tipo de popa (cerrada=1, abierta=2)



**Figura 2.6 Curva evolutiva [16]**

**Estimación de la distancia total de batimetría:**

El armador necesita explorar un área de 5 hectáreas ver fig. 2.7.



**Figura 2.7 Trayectoria de levantamiento batimétrico**

La cantidad de tracks y de diámetros tácticos (giros) determinaran la distancia total de medición, se asume lo siguiente:

$$\text{Área}_{\text{exploración}} = \text{LONG} * \text{TRANS} \quad (2.18)$$

$$\text{AREA} = 100 * 500 \quad (2.19)$$

$$\sum \text{Áreas } n = A_n = \text{Área}_{\text{exploración}}$$

$$\eta * (\text{TRANS} * \text{DT}) = \text{Área}_{\text{exploración}} \quad (2.20)$$

$$\eta = \frac{\text{Área}_{\text{exploración}}}{\text{TRANS} * \text{DT}}, \eta \text{ giros} \quad (2.21)$$

$$\text{DISTANCIA TOTAL} = \eta_1 * \text{DT} + \eta_2 * \text{TRANS} \quad (2.22)$$

$$\text{DISTANCIA TOTAL} = \eta_{\text{giros}} * \text{DT} + (\eta_{\text{giros}} + 1) * \text{TRANS} \quad (2.23)$$

Reemplazando la ecuación 2.20 en la ecuación 2.22:

$$\text{DISTANCIA TOTAL} = \left( \frac{\text{Área}_{\text{exploración}}}{\text{TRANS} * \text{DT}} \right) * \text{DT} + \left( \frac{\text{Área}_{\text{exploración}}}{\text{TRANS} * \text{DT}} + 1 \right) * \text{TRANS} \quad (2.24)$$

$\eta$ : Cantidad de giros o de transversales.

## 2.5 Estabilidad Intacta

La estimación de la estabilidad en la fase inicial del proyecto, del peso en rosca, de las coordenadas del centro de gravedad, es una de las tareas más importantes y que también genera grandes dificultades. En esta sección se presenta las formulaciones para calcular aproximadamente el peso y centros de gravedad del buque.

### Estimación del centro de boyantes transversal (KB)

La altura del centro de boyantes sobre la quilla se estima con la siguiente ecuación 2.25 presentada por Schneekluth [38].

$$KB = T(0.9 - 0.3CM - 0.1CB) \quad (2.25)$$

### Estimación del centro de boyantes longitudinal (lcb)

El centro de boyantes longitudinal se estima con la ecuación 2.26 presentada por Schneekluth [38].

$$\%lcb = ((8.80 - 38.9Fn)/100) \quad (2.26)$$

El "lcb" es estimado en porcentaje con respecto a la eslora de la embarcación.

### Estimación del radio metacéntrico transversal (BMT)

La estimación del radio metacéntrico es definida por la ecuación 2.27 que fue presentado por Normand [38].

$$BMT = \frac{(0.096 + 0.89 * CWP^2) * B^2}{12 * T * CB} \quad (2.27)$$

### Estimación de la altura metacéntrica (KM)

La altura metacéntrica es calculada con la ecuación 2.28, definida por Schneekluth [38].

$$KM = B * \left( \frac{0.08}{\sqrt{CM}} * \frac{B}{T} + \left( 0.9 - 0.3CM - \frac{0.1CB}{\frac{B}{T}} \right) \right) \quad (2.28)$$

### Estimación de pesos

Para el cálculo del peso de los cascos, se estableció para el diseño que la fibra de vidrio sea de tipo MAT con un peso de 300 gr/m<sup>2</sup>, aplicando 4 capas, la impregmentación es de tipo sándwich por lo tanto el núcleo será de balsa de 2 mm de espesor.



**Figura 2.8 Fibra de vidrio Mat 300 g/m<sup>2</sup> y Resina poliéster [28]**

**Tabla 2.6 Medidas de consumo P.R.F.V [13]**

CANTIDAD DE FIBRA DE VIDRIO Y RESINA POLIÉSTER POR M2 Y POR CAPA						
Capas	Fibra 450 gr/m <sup>2</sup>	Resina Pol.	Fibra 300 gr/m <sup>2</sup>	Resina Pol.	Fibra 220 gr/m <sup>2</sup>	Resina Pol.
1	0.45	1.125	0.3	0.75	0.22	0.25
2	0.9	2.25	0.6	1.5	0.44	0.5
3	1.35	3.38	0.9	2.25	0.66	0.75
4	1.8	4.5	1.2	3	0.88	1
5	2.25	5.6	1.5	3.75	1.1	1.25
*Cantidades expresadas en kg						



La estimación del peso se realizó, aprovechando la definición matemática del casco Wigley, con lo que es posible determinar el área total de impregnación, considerando el número de capas aplicadas ver tabla 2.6.

$$\text{Área Hulls} = L * (4.8 * T + 0.7853 * B + S) \quad (2.29)$$

$$\text{Peso fibra} = \text{Área Hulls} * \frac{300gr}{m^2} [kg] \quad (2.30)$$

$$\text{Peso Resina} = \text{Área Hulls} * kg/m^2 [kg] \quad (2.31)$$

Características de la balsa:

**Tabla 2.7 Propiedades de la balsa**

Descripción	
$\rho_{balsa}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	1.2
Espesor [mm]	2

$$\text{Peso Balsa} = \text{Área Hulls} * \rho_{balsa} [kg] \quad (2.32)$$

Finalmente, el peso de la embarcación es la suma de las componentes estimadas anteriormente.

$$\text{Peso}_{Hulls} = 2 * (\text{Peso Resina} + \text{Peso Balsa}) \quad (2.33)$$

El peso de los empujadores y de los equipos son valores constantes y se presentan en la siguiente tabla 2.8:

**Tabla 2.8 Pesos de los equipos**

	Descripción	$\Delta$ [kg]
Automatización	Pixhawk PX4 Vuelo Controller w/Amortiguador + GPS neo-m8 N 915 mhz radio Wireless Telemetry Set OSD Module ppm módulo I2 C Splitter extender módulo Power Module For FPV Quadcopter multirotor	0.081
	Piksi Multi Evaluation Kit (915MHz)	0.026
	FrSky X8R 2.4 G 16 CH SBUS Smart Port Telemetry Receiver	0.0166
Acústico	Raspberry pi 3	0.136
	ezsync USB a RS-485/RS-422 magnético aislado Serial convertidor, ezsync2303	0.04
	Furuno	2.4
	cables	0.0114
	antenas	0.088
	caja	1.364
	Margen de riesgo del 75% (sobre cubierta) [kg]	7.28
	Propulsor	0.59
	<b>TOTAL</b>	<b>7.87</b>

El peso de los motores y de la batería se estima con las formulaciones regresiones de la base de datos:

PesoMotor: De la base de datos de la tabla 2.4 se obtiene el peso del motor [kg]

Por lo tanto, el peso total de la embarcación será la suma de todos elementos anteriores.

$$Peso = Peso Hulls + Peso equipos + PesoMotor + PesoBatería [kg]$$

## 2.6 Estimación del costo de construcción

El de costo de la embarcación autónoma se determina en función del costo de construcción de los cascos, costo de los motores, costo de la batería y costo de los equipos de batimetría y automatización.

El costo de los equipos son valores constantes en la función objetivo, que no dependen directamente de las dimensiones del prototipo.

**Tabla 2.9 Costos de Equipos**

Equipos	
Automatización	\$3,251.42
Procesamiento de datos	\$ 1,172.19
Sonar	\$139.98
Empujadores (c/u)	\$119
Total de Equipos	\$4,563.59

**Tabla 2.10 Costos constructivos**

Costos constructivos	
Fibra de Vidrio Mat 300 g/m <sup>2</sup>	<b>3.45 [\$/m<sup>2</sup>]</b>
Resina poliéster	3.38 [\$/m <sup>2</sup> ]
Balsa (t=2mm)	3.28 [\$/m <sup>2</sup> ]

Finalmente, el costo de baterías y costo de baterías se estiman mediante las regresiones lineales de la base de datos.

$Costos_{Motor}$ : De la tabla 2.4 se obtiene el costo del motor.

$$Costos_{Baterias} = 0.4054 * (AH/2) + 183.62$$

$$Costos_{cascos} = 3 * (3.45 + 3.38 + 3.2 + 15) * Ahull$$

Función objetivo de costos es:

$$f_1(L, B, T, S, cb, v)_{costo} = Costos_{Cascos} + Costos_{Motor} + Costos_{Baterias}$$

## 2.7 Estimación de la precisión de batimetría

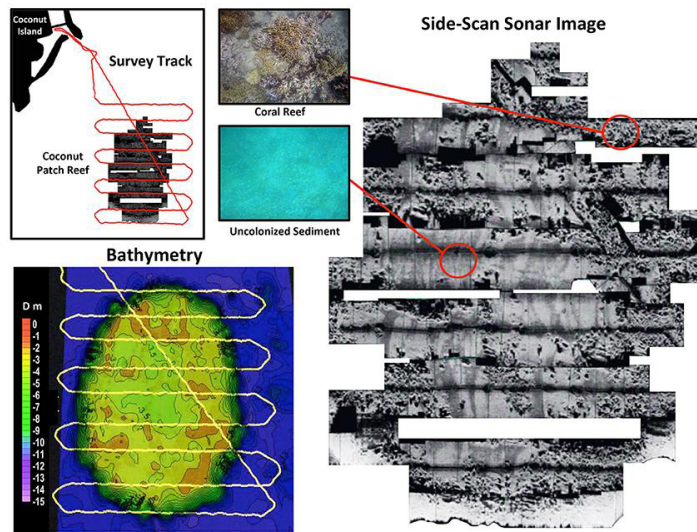
El modelo para determinar la precisión de la batimetría realizada se considera la precisión equipo y las dimensiones principales de la embarcación.

La función objetivo de precisión relaciona las variables de diseño, la precisión del equipo. Las características principales determinan la cantidad de puntos de medición en el área de exploración, es decir que, a mayor cantidad de puntos, más preciso será el levantamiento batimétrico. Es importante saber que la medición será el equipo fish finder, es decir que registrara la medida en cada punto ruteado en la trayectoria total de la batimetría.

La función objetivo depende del área de exploración donde se registrarán los puntos de medida de profundidad, la distancia de los tracks, el diámetro táctico de la embarcación que involucra las variables de diseño de la embarcación autónoma y la precisión del equipo.

El error incluye errores de levantamiento, transformación y digitalización, etc. La precisión de la posición no necesita ser calculada rigurosamente, pero puede estimarse según el tipo de equipo, el régimen de calibración, etc., por lo tanto, el equipo que se dispone registrará adecuadamente a una posición promedio de 20 m de profundidad. Los datos de posición y profundidad recogidos de acuerdo con los procedimientos y precisiones, tiene como objetivo asegurar que se detecten todas las características importantes y se midan las profundidades [10].

$$f_2(L, B, T, S, cb, v)_{incertidumbre_g} = \text{sqrt}((((((V_{ship}/3) * (20)^2)/Dist)$$



**Figura 2.9 Procesamiento batimétrico [26]**

El criterio de validación de los puntos de medida en el área de exploración que registre la embarcación autónoma será mediante la siguiente expresión definida por la IHO.

$$\pm\sqrt{a^2 + (b * z)^2} \quad [10]$$

## 2.8 Optimización Múlti-objetivo

La mayoría de los problemas de diseño pueden formularse para determinar un conjunto de variables de diseño sujeta a ciertas relaciones y restricciones de estas variables. Las variables de diseño deben satisfacer estas condiciones para que optimice alguna medida de mérito. Para la optimización Múlti-objetivo se utilizó la herramienta de optimización de Matlab 2017 GAMULTIOBJ.

Funciones objetivos:

$$f_1(L, B, T, S, cb, v)_{costo} = Costos_{Casco} + Costos_{Motor} + Costos_{Baterías}$$

$$f_2(L, B, T, S, cb, v)_{incertidumbre_g} = sqrt((((V_{ship}/3)) * (20)^2)/Dist)$$

Donde las variables de diseño son:

$$x = [L, B, T, S, CB, V]$$

Sujetos a:

$$B < \frac{L}{3} \quad ; \quad B > \frac{L}{10} \quad ; \quad S > 0.2 L \quad ; \quad S < 0.5 L \quad ; \quad cb > 0.3;$$

$$cb > 0.6 ; S > 1.5B ; B \geq 0.5T ; B \leq 2.5T$$

$$0.5 < L < 3 ; m$$

$$0.15 < B < 1 ; m$$

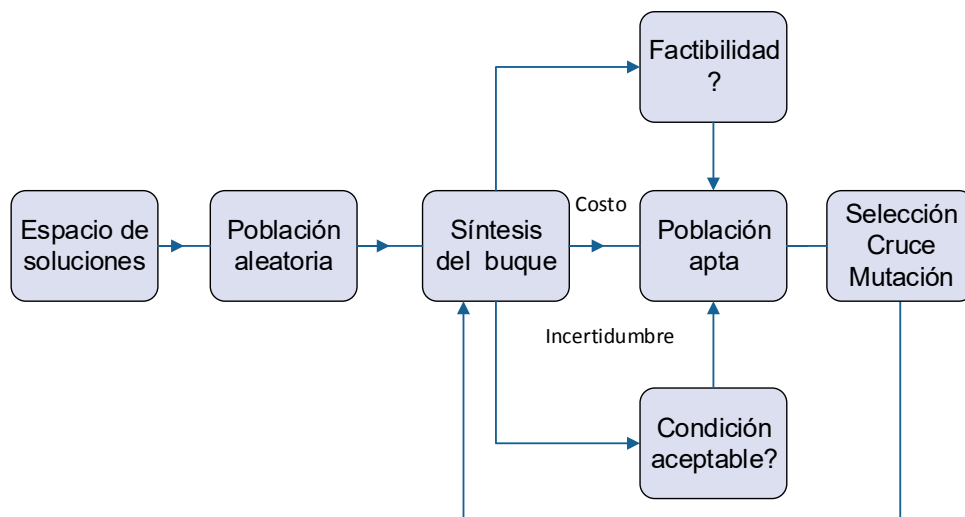
$$0.05 < T < 0.5 ; m$$

$$0.15 < S < 1.5 ; m$$

$$0.4 < cb < 0.45 ; m$$

$$1 < V < 10 ; \text{nudos}$$

$$\text{Área de exploración} = 50000 \text{ m}^2$$



**Figura 2.10 Proceso de Optimización**

En el presente trabajo se crea una población inicial aleatoria de 200 embarcaciones considerando las variables de diseño dentro del espacio del diseño. Los modelos autónomos definidos por estos cromosomas se equilibran y se evalúan utilizando la síntesis de los sistemas del buque. Se determinó costo y precisión para cada diseño. A continuación, los diseños se ordenan en capas de dominancia. Cada capa contiene diseños que son dominantes para capas posteriores. Se asigna una probabilidad de selección geoméricamente decreciente a cada diseño basado en su capa. Los diseños son penalizados por infactibilidad peso > boyantes. Después de calcular las probabilidades de selección, se realiza la selección de la siguiente generación. Una vez

que se selecciona una población sobreviviente, los pares se seleccionan al azar para cruzar los parámetros de diseño (genes), y un pequeño porcentaje de los genes en los cromosomas de diseño seleccionados se eligen al azar para mutar. Estas operaciones genéticas producen nuevos y en promedio mejores diseños. Después de completar estas operaciones, los diseños en la nueva población se envían al modelo de síntesis del barco y los ciclos del proceso hasta la convergencia. Cada ciclo define una nueva generación. Las generaciones finales de este proceso convergen a una frontera no dominada o de Pareto.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

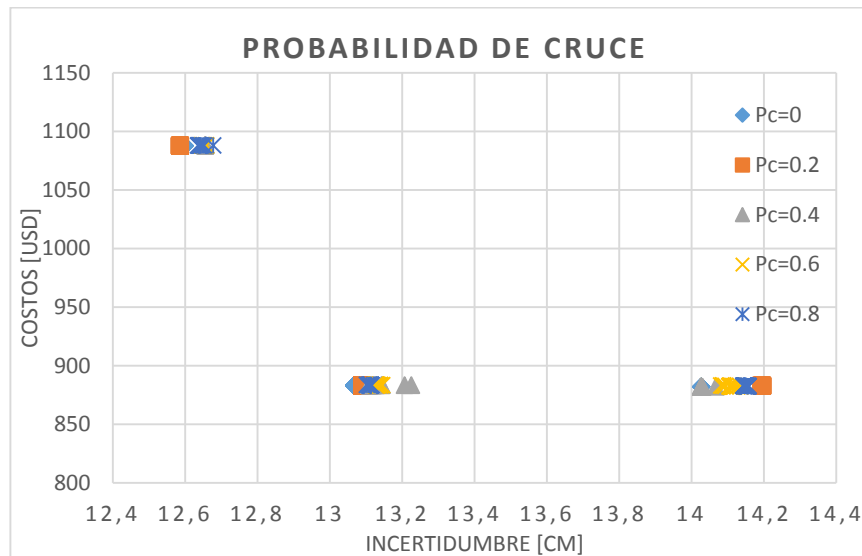
### 3.1 Parámetros utilizados para la Optimización Multi-Objetivo

Para el proceso de la optimización multi-objetivo con algoritmo genético se configura la herramienta de optimización en Matlab en las siguientes opciones:

- a) Selección=Torneo (2), seleccionará dos individuos padres para la descendencia.
- b) Factor de probabilidad de cruce = 0.0 ,0.2 ,0.4 ,0.6 ,0.8, 1.0
- c) Factor de probabilidad de mutación= 0.1
- d) Máximo número de generaciones = 500
- e) Fracción de Pareto = 0.45, porcentaje de selección de individuos elite del Pareto de frontera.
- f) Tamaño de la población = 200, tamaño de población en cada generación hasta la convergencia.

### 3.2 Efecto de la Probabilidad de Cruce

La probabilidad de cruce indica la posibilidad de que dos cromosomas intercambien sus genes en cada generación y el factor de probabilidad de mutación influye en que haya diversidad en cada generación. Este último factor evita la convergencia anticipada y soluciones erróneas, se usó un factor de mutación constante de 0.1. La probabilidad de cruce es el factor que efectúa el cruce de genes entre los cromosomas de la población inicial para formar la siguiente población con nuevas cromosomas. Es necesario que los cromosomas de la población inicial pasen a la siguiente población sin intercambiar sus genes. Se realizaron varias simulaciones variando el factor de probabilidad de cruce desde 0.0 hasta 1.0 en un intervalo de 0.2.



**Figura 3.1 Probabilidad de cruce 0.0 % - 80%**

Se observa que en la figura 3.1 la variación de las probabilidades de cruce, el Pareto de frontera presenta resultados cercanos en las dos funciones objetivo. Se escogieron los resultados del Pareto de frontera con  $P_c=0.80$ , ya que este presenta resultados en un punto intermedio con respecto a los otros resultados de las probabilidades de cruce restantes. En total 100000 embarcaciones autónomas fueron analizadas, donde algunas embarcaciones fueron descartadas debido a la penalidad que se menciona en el capítulo anterior 2.8. Finalmente, se obtuvo un Pareto de frontera que representan 90 embarcaciones autónomas comparadas entre las funciones objetivo.

### 3.3 Resultados de la Optimización Multi-Objetivo

Los resultados son mostrados en las figuras 3.2 a 3.5 donde se muestra la exploración de las variables de diseño más representativas que MOGA hizo hasta llegar a la convergencia de la optimización. En el caso de la Eslora ver fig. 3.2, la convergencia del algoritmo genético fue alrededor de  $1 \text{ m} \pm 0.1$ . La Manga del demi-hull ver fig. 3.3, converge a un valor de  $0.30 \text{ m} \pm 0.1$ . La separación entre demi-hulls ver fig. 3.4, converge alrededor de  $0.48 \text{ m} \pm 0.1$  y finalmente la velocidad de servicio ver fig. 3.5, converge a un valor de  $1.2 \text{ nudos} \pm 0.2$ . De manera que la exploración del MOGA en la búsqueda de las mejores aptitudes de cada variable de diseño fue simultáneamente realizada a medida que pasaba de generación en generación hasta llegar al conjunto de soluciones óptimas del frente de Pareto.



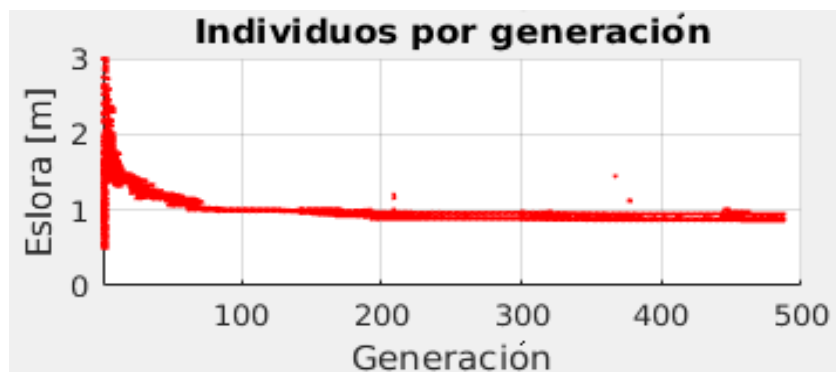


Figura 3.2 Variación de Eslora en cada generación hasta la convergencia del método AG.

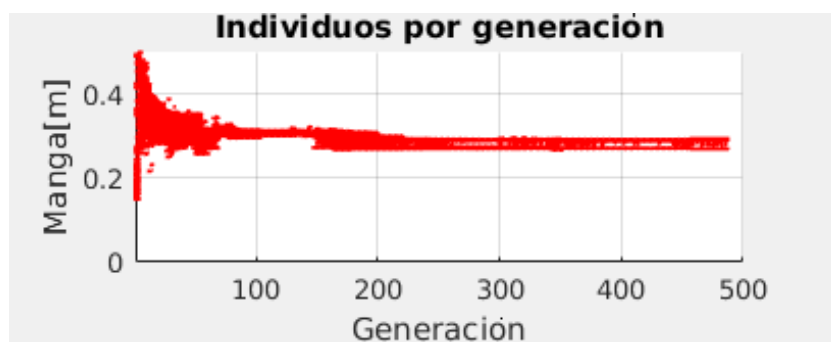


Figura 3.3 Variación de Manga en cada generación hasta la convergencia del método AG.

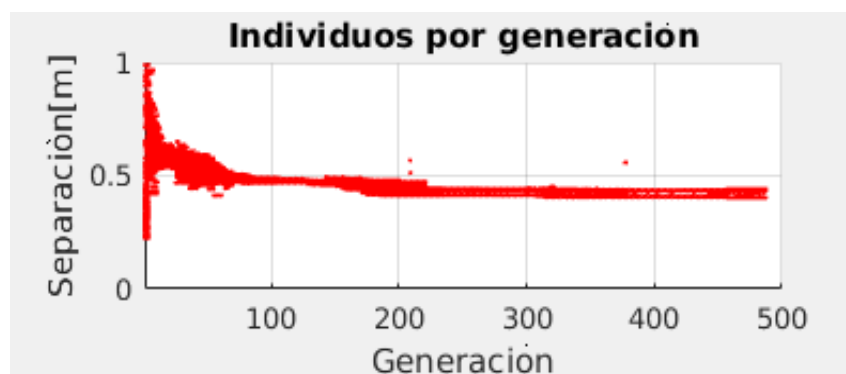


Figura 3.4 Variación de Separación de demi-hulls en cada generación hasta la convergencia del método AG.



**Figura 3.5 Exploración de la mejor Velocidad de servicio hasta la convergencia del método AG.**

En resumen, las variables de diseño convergieron a:

**Tabla 3.1 Resultados**

<b>Eslora [m]</b>	<b>1 m ± 0.1</b>
<b>Manga [m]</b>	<b>0.3 m ± 0.1</b>
<b>Separación entre cascos [m]</b>	<b>0.48m ± 0.1</b>
<b>Velocidad [nudos]</b>	<b>1.2 nudos ± 0.2</b>

### 3.4 Simulación del Algoritmo Genético Múlti - Objetivo

En este proyecto se realizó un total de diez simulaciones manteniendo constante la probabilidad de cruce de 0.8 y la probabilidad de mutación e 0.1. El propósito de estas simulaciones es analizar el comportamiento de las soluciones en el Pareto de frontera. El algoritmo genético es un proceso estocástico, lo cual indica que en “n” simulaciones no se tiene las mismas soluciones de la simulación anterior ver fig. 3.6. Las simulaciones 1, 2, 3, 4, 6, 8,9 y 10 presentan resultados cercanos, pero con la diferencia que el número de individuos en el Pareto de frontera difiere alrededor del 51%. Las simulaciones 5 y 7 presentan resultados que varían en la función incertidumbre geométrica desde 13.3 cm hasta 14.15 cm y con respecto a la función costo desde 882.22 USD y 1091.35 USD, número de individuos en el Pareto de frontera difiere alrededor del 68%.

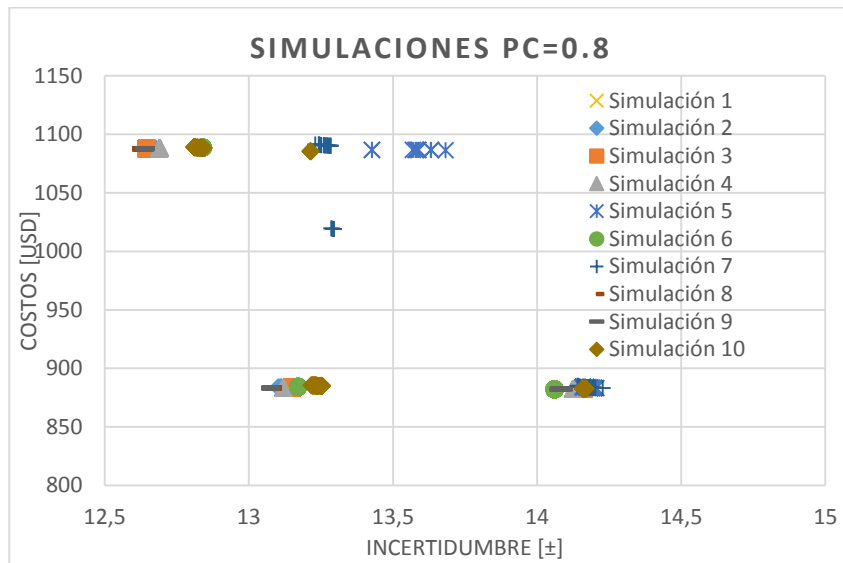


Figura 3.6 Simulaciones con probabilidad de cruce de 0.8

### 3.5 Análisis de resultados

El costo de construcción del modelo autónomo y la incertidumbre geométrica batimétrica en el proceso de optimización es mostrado en las figuras 3.7 y 3.8. La diferencia que hay entre el mejor costo del conjunto de soluciones con mejores aptitudes se encuentra por debajo del valor promedio como se observa en la figura 3.7, es debido a los individuos que son penalizados, nombrados individuos de peores aptitudes. Por otro lado, en la figura 3.8 que el conjunto de soluciones de mejor incertidumbre y el valor promedio por cada generación se encuentran estrechamente cerca hasta la convergencia de la optimización.

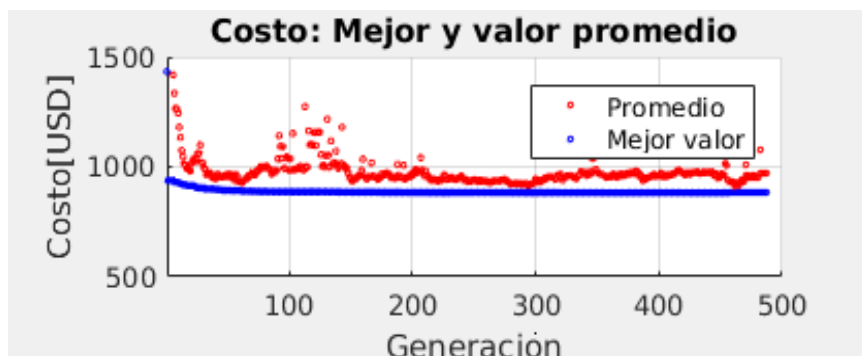
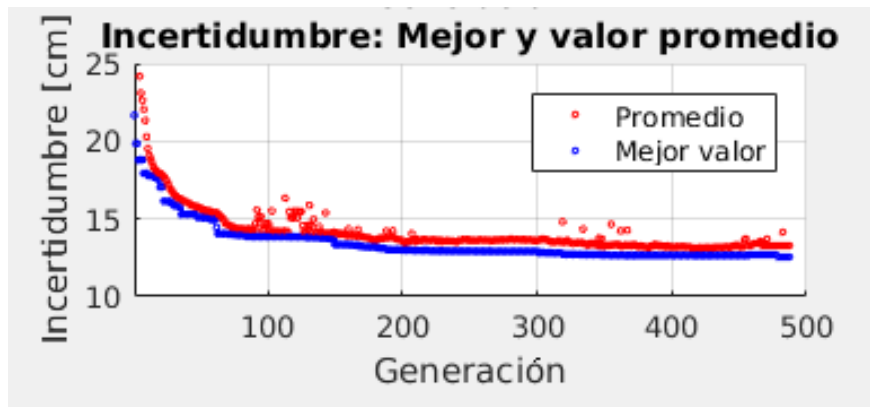
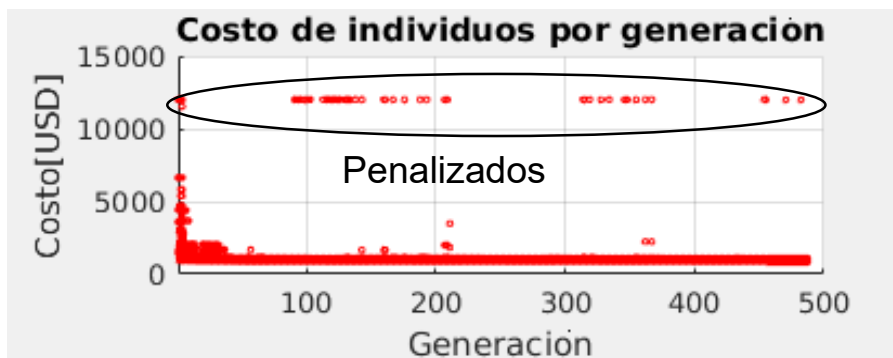


Figura 3.7 Costo por generación entre el mejor valor y el valor promedio

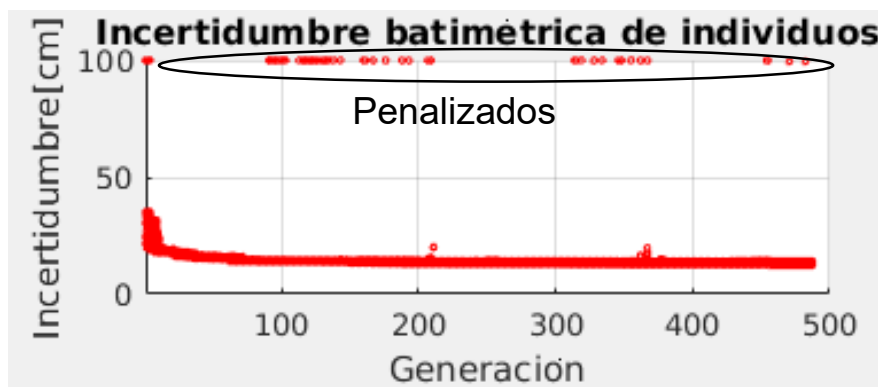


**Figura 3.8 Incertidumbre por generación entre el mejor valor y el valor promedio**

En las figuras mostradas 3.9 y 3.10 representan el espacio de soluciones de las funciones objetivos, donde muestran los individuos con mejores características del diseño y los individuos penalizados que no cumplieron con la condición de flotabilidad.



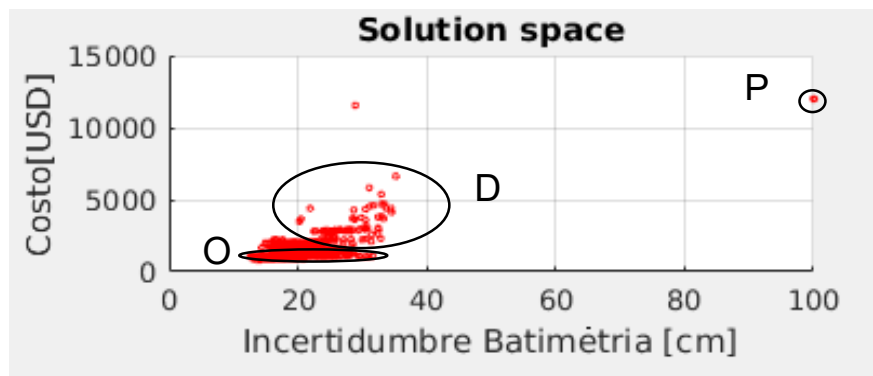
**Figura 3.9 Costo de cada embarcación autónoma por generación**



**Figura 3.10 Incertidumbre de cada embarcación autónoma por generación**

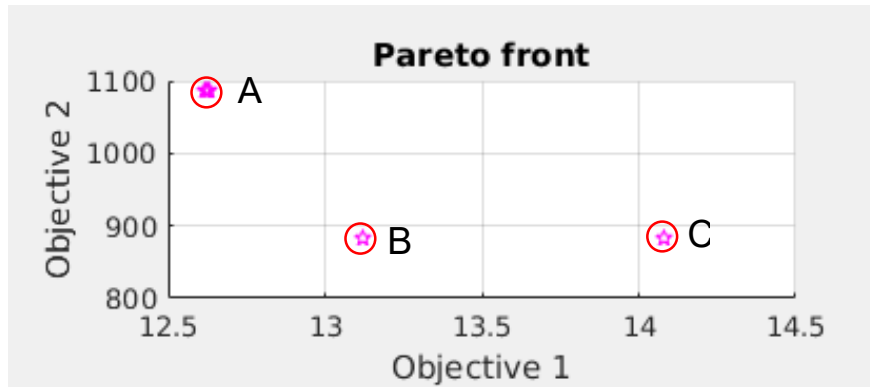
Se agruparon las soluciones en tres sectores ver fig. 3.11, el conjunto de soluciones D son los modelos autónomos de peores aptitudes. El individuo P, representa al penalizado

por no cumplir con la condición de flotabilidad, de manera puntual se asignó la penalidad de 12000 USD en el objetivo 1 y 100 cm en el objetivo 2. El conjunto de soluciones O, es el más marcado y donde se observó que MOGA ha convergido con el conjunto de soluciones mejores para las funciones objetivos Costo de construcción del modelo autónomo e Incertidumbre geométrica de batimetría. Como resultado del espacio de soluciones se obtienen en el Pareto de frontera con los mejores prototipos autónomos con mejores características de diseño.



**Figura 3.11** Espacio de solución de todas las embarcaciones autónomas creadas por AG

Por ejemplo, el Pareto de frontera de la figura 3.12, las embarcaciones autónomas A, B y C son diseños no dominados. Se observó que para la embarcación autónoma A se tiene un costo elevado de construcción del prototipo y una menor incertidumbre, en las embarcaciones autónomas B y C se encontró un balance con respecto al objetivo 2 que es de costo de construcción, pero en el objetivo 1 que es la incertidumbre de la batimetría varió alrededor de  $1 \text{ cm} \pm 0.05 \text{ cm}$ . Por tanto, el prototipo autónomo B es un diseño no dominado, que a un costo moderado de 884.6 USD y una incertidumbre  $\pm 13 \text{ cm}$ , se seleccionó características de diseño del catamarán.



**Figura 3.12 Pareto de frontera**

En la tabla 3.2 se muestra las características de diseño de las ebacaciones A,B y C .

**Tabla 3.2 Selección del diseño factible**

I	L [m]	B [m]	T [m]	S [m]	Cb [m]	V [kn]	Precisión [cm]	Costo [\$]
A	0.96	0.24	0.28	0.48	0.51	1.2	12.62	1087.96
B	0.91	0.31	0.27	0.457	0.55	1.16	13.35	884.6
C	0.94	0.29	0.25	0.46	0.54	1.12	14.08	882.2

Finalmente, la embarcación tendrá un costo total incluyendo el costo de equipo para la batimetría de 5448.19 USD con una incertidumbre de 13 cm. A continuación, se muestra en la tabla 3.3 las características de diseño del catamarán.

**Tabla 3.3 Características del diseño del catamarán**

<b>Descripción</b>	<b>Detalle</b>
L [m]	<b>0.91</b>
B [m]	<b>0.31</b>
T[m]	<b>0.27</b>
S [m]	<b>0.457</b>
cb	<b>0,55</b>
V [nudos]	<b>1.16</b>
Motor	<b>2@175 Watts</b>
Batería	<b>2@75 AH Tipo Gel 12V</b>

3.6 Modelo del Diseño Final





# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se aplicó la Optimización Multi-Objetivo usando Algoritmos Genéticos que se encuentra implementado en el software de Matlab, determinando las características de diseño del catamarán autónomo para exploraciones batimétricas garantizando una disminución de costo de construcción de la embarcación e incertidumbre geométrica de batimetría, se puede concluir lo siguiente:

### Conclusiones

1. La optimización de objetivos múltiples desarrollado se basa en el proceso aleatorio, por lo que los resultados obtenidos deben interpretarse en el sentido estadístico.
2. Se cumplió con la optimización de las dimensiones principales dentro del espacio de diseño del prototipo autónomo, cumpliendo con los índices de rendimiento de diseño.
3. Este prototipo autónomo podrá detectar objetos submarinos de longitudes 13 [cm] en adelante y tendrá un costo de construcción de 5448.19 USD incluyendo los equipos de batimetría.
4. Esta embarcación puede ser utilizada para el levantamiento batimétrico de zonas que requieren una alta fidelidad como canales de acceso a Puertos.
5. La aplicación de optimización MOGA provee una vía rápida de determinar las características principales de la embarcación.
6. La penalización implementada en el programa logro un menor número de soluciones pertenecientes a la frontera del parteo óptimo.
7. Los resultados de los cálculos analizados permiten la confiabilidad de que el algoritmo elaborado puede considerarse una herramienta aplicable para la optimización de objetivos múltiples para este tipo de prototipos en la etapa de diseño preliminar.
8. El presente proyecto pretende ser una aplicación simple de la metodología MOGA a la optimización de diseño de embarcaciones. Los resultados presentados mostraron que MOGA tiene una amplia gama de aplicaciones en

el diseño de buques. La posibilidad de combinar muchas disciplinas diferentes, restricciones y criterios de decisión llevó a una gran flexibilidad del uso de esta herramienta para futuros proyectos.

### **Recomendaciones**

1. Implementar un método para estimar la incertidumbre de la batimetría considerando los errores debido a precisión de los equipos, movimientos de la embarcación.
2. La exigencia computacional de MOGA demanda de mucho tiempo para obtener resultados en comparación a los métodos tradicionales de, por lo tanto, se recomienda una súper computadora para minimizar el tiempo de espera.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brown , A., & Salcedo, J. (October 2003). Multiple-Objective Optimization in Naval Ship Design. *Journal of the American Society of Naval Engineers* (págs. 49-62). American Society of Naval Engineers.
- [2] Iqbal, M., & Trimulyono, A. (2014). *OPTIMIZATION OF CATAMARAN DEMIHULL FORM IN EARLY STAGES OF THE DESIGN PROCESS*.
- [3] (8 de Mayo de 2018). Obtenido de <https://www.yoingeniero.xyz/topografia/que-es-la-batimetria/>
- [4] Altamirano, L. M., Aguirre, K. E., & Cárdenas, J. W. (2017). *A Preliminary 3D Model of a Reservoir in Ecuador using an Unconvensional Low-Budget Hydroacustical System*. Guayaquil.
- [5] Alvariño Castro, R., Azpíroz Azpíroz , J., & Meizoso Fernández, M. (2007). *El Proyecto Básico del Buque Mercante* . Madrid .
- [6] *Artificial Intelligence (IAS)*. (23 de 05 de 2013). Obtenido de <http://sistemainteligenciaartificial.blogspot.com/2013/05/ventajas-y-desventajas-de-los.html>
- [7] Bernard Gachelin, J. E. (2007). *OPTIMIZACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AVANCE DE UN MULTICASCO A TRAVÉS DE ALGORITMOS GENÉTICOS Y FLUJOS POTENCIALES*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- [8] Blaich, M., Wirtensohn , S., Oswald, M., Hamburger , O., & Reuter , J. (2013). Design of a Twin Hull Based USV with Enhanced Maneuverability. *Conference on Control Applications in Marine Systems* (págs. 17-20). Osaka,Japón: The International Federation of Automatic Control.
- [9] Broglia, B., Jacob, B., Zaghi, S., Stern, F., & Olivieri, A. (2013). *Experimental investigation of interference effects for high-speed catamarans*.
- [10] Bureau, I. H. (2008). *IHO Standars for Hydrographic Surveys* . Monaco.

- [11] Carvalho Vasconcelos, J. F. (s.f.). Design of Autonomous Surface Vessels. *Centre for Marine Technology and Engineerin*. Lisboa .
- [12] Choi, J. H., Park, D. W., & choi, M.-S. (s.f.). *Study on Optimized Hull Form of Basic Ships Using Optimization Algorithm*.
- [13] Dávalos , J. (Noviembre 2008). *Gran impulso al eje Manta-Manaos*.
- [14] Delta Glass. (s.f.). Obtenido de <http://www.deltaglass.com.ar>
- [15] Diario el Comercio. (21 de Marzo de 2018). *Diario El Comercio*. Obtenido de <http://www.elcomercio.com/actualidad/dragado-canal-puertos-guayaquil-jaimenebot.html>
- [16] Fernández Díaz, C. (s.f.). *Curva evolutiva*. Obtenido de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Curva\\_evolutiva](https://es.wikipedia.org/wiki/Curva_evolutiva)
- [17] Ferreira , H., Almeida , C., Martins , A., Almeida , J., Dias, N., & Silva , E. (2009). Autonomous Bathymetry for Risk Assessment with. *Oceans'09 IEEE Bremen*, (págs. 2-3). Porto .
- [18] Fraile Castañeda , A. M., Escartín García , J. F., & Marciglob. (2018). *PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE UN DIQUE DE APOYO EN LA PLAYA DE OCATA; T.M. DE EL MASNOU (BARCELONA)*. Barcelona .
- [19] Frontiers in Marine Science. (2017). Obtenido de [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org)
- [20] Gestal, M. (s.f.). Obtenido de <http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/AAGGtutorial/node10.html>
- [21] Holtrop, J., & Mennen, G. (s.f.). *An APROXIMATE POWER PREDICTION METHOD*
- [22] Lewis , E. V. (1988). *Principles of Naval Architecture Volume II • Resistance, Propulsion and Vibration*. Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- [23] Manda, D., Thein, M.-W., D'Amore, A., & Armstrong , A. (Marzo 2015). A Low Cost System for Autonomous Surface Vehicle based Hydrographic Survey . *International Conference On U.S hydro*, (págs. 1-17). Washington DC, USA.

- [24] Manley, J. E., Marsh, A., Whitney, C., & Wiseman, C. (2000). *Evolution of the Autonomous Surface Craft AutoCat*. Providence ,RI,USA: Massachusetts Institute of Technology.
- [25] Marítimas, M. S. (s.f.). Obtenido de <http://mesemar.com/batimetricas-estudios-hidrograficos/>
- [26] Martins, M. R., & Sarzosa Burgos, D. F. (Junio 2008). Multi-Objective Optimization Technique Applied to Preliminary Design of a Tanker. *Proceedings of the ASME 27 th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Estoril,Portugal.
- [27] MathWorks. (2017). *Matlab*.
- [28] Maxonmotor. (s.f.). Obtenido de [www.maxonmotor.es](http://www.maxonmotor.es)
- [29] Mish , W., Adamos , E., Kaczmarek, R., Staggers, S., & Van Vooren, C. (2000). *Optimum Risk Tanker Design Report*. Virginia Tech: Ocean Engineering Design Report.
- [30] Nazza. (s.f.). Obtenido de [www.nazza.es](http://www.nazza.es)
- [31] OCEANALPHA. (2016). Obtenido de <http://www.oceanalpha.com/Products/detail/id/20.html>
- [32] Osorio Álvarez, D., Matiz León , J. C., & Contreras Cárdenas, A. (2011). *Modelos Digitales Batimetricos Generados por Metodos de Interpolación IDW,KRIGING,SHEPARD y B-SPLINE en el Archipiélago de Islas del Rosario*. Bogotá.
- [33] Parson , M. G. (Julio 2009). Applications of Optimization in Early Stage Ship Design. *Ship Science & Technology*. Michigan.
- [34] Percival , S., Hendrix , D., & Noblesse, F. (2001). *Hydrodynamic optimization of ship hull forms*. Bethesda.
- [35] Pérez Fernández, R., & Lamas Pardo, M. (2011). *El comportamiento en la mar de estructuras flotantes*. Madrid: Asociación de Ingenieros del ICAI.

- [36] Perez G., C., Tan, M., & Wilson, P. (s.f.). *Validation and Verification of Hull Resistance Components Using a Commercial CFD Code.*
- [37] Sahoo, P. K., Salas, M., & Schwetz, A. (s.f.). *PRACTICAL EVALUATION OF RESISTANCE OF HIGH-SPEED CATAMARAN HULL FORMS.*
- [38] Schneekluth , H., & Bertran, V. (1998). *Ship Design for Efficiency and Economy.* British Library Cataloguing.
- [39] Sedano, Á. (2013). *METODOLOGÍA DE SÍNTESIS ÓPTIMA DIMENSIONAL DE MECANISMOS.* Santander.
- [40] Sekulski, Z. (2011). Multi-objetivo optimization of high speed vehicle-passenger catamaran by genetic algorithm, Pat I. *POLISH MARITIME RESEARCH* (págs. 6-18). Poland: Gdansk University of Technology.
- [41] Shmuel, S. (1998). *Naval Ship Concept Design: an Evolutionary Approach.* Massachusetts.
- [42] [www.svb24.com](http://www.svb24.com). (s.f.).

# **ANEXOS**

## ANEXO A

### BASE DE DATOS

<u>Nombre</u>	<u>Eslora</u> <u>[m]</u>	<u>Manga</u> <u>[m]</u>	<u>Calado</u> <u>[m]</u>	<u>Sep.</u> <u>Cascos</u> <u>[m]</u>	<u>cb</u>	<u>Autonomía</u> <u>[horas]</u>
ESM30 AUTONOMOUS	1.15	0.25	0.155	0.50	0.551	4
TC40 USV AUTONOMOUS	1.64	0.22	0.25	0.54	0.522	2
ME70 AUTONOMOUS	1.47	0.25	0.27	0.65	0.529	6
CATAROB -AST-03	1.80	0.23	0.17	0.77	0.521	4
HERON USV	1.35	0.22	0.12	0.76	0.525	3
Hydrone -ASV	1.14	0.27	0.15	0.46	0.517	5
HYDROMETRA USV	1.60	0.45	0.25	0.80	0.522	5
M40A	3.3	0.58	0.250	1.45	0.520	6
HYCAT	1.8	0.14	0.15	0.72	0.66	6
SURVEY CATAMARAN	3.9	0.692	0.4	1.71	0.55	24



## ANEXO B

### RESISTENCIA DE CATAMARANES [19]

#### 2. Resistance prediction

The total resistance of a ship has been subdivided into:

$$R_{\text{total}} = R_F(1+k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A$$

where:

$R_F$  frictional resistance according to the ITTC-1957 friction formula

$1+k_1$  form factor describing the viscous resistance of the hull form in relation to  $R_F$

$R_{APP}$  resistance of appendages

$R_W$  wave-making and wave-breaking resistance

$R_B$  additional pressure resistance of bulbous bow near the water surface

$R_{TR}$  additional pressure resistance of immersed transom stern

$R_A$  model-ship correlation resistance.

For the form factor of the hull the prediction formula:

$$1+k_1 = c_{13} \{ 0.93 + c_{12} (B/L_R)^{0.92497} (0.95 - C_p)^{-0.521448} (1 - C_p + 0.0225 lcb)^{0.6906} \}$$

can be used.

In this formula  $C_p$  is the prismatic coefficient based on the waterline length  $L$  and  $lcb$  is the longitudinal position of the centre of buoyancy forward of  $0.5L$  as a percentage of  $L$ . In the form-factor formula  $L_R$  is a parameter reflecting the length of the run according

$$L_R/L = 1 - C_p + 0.06 C_p lcb / (4 C_p - 1)$$

The coefficient  $c_{12}$  is defined as:

$$c_{12} = (T/L)^{0.2228446} \quad \text{when } T/L > 0.05$$

$$c_{12} = 48.20(T/L - 0.02)^{2.078} + 0.479948 \quad \text{when } 0.02 < T/L < 0.05$$

$$c_{12} = 0.479948 \quad \text{when } T/L < 0.02$$

In this formula  $T$  is the average moulded draught. The coefficient  $c_{13}$  accounts for the specific shape of the afterbody and is related to the coefficient  $C_{\text{stern}}$  according to:

$$c_{13} = 1 + 0.003 C_{\text{stern}}$$

For the coefficient  $C_{\text{stern}}$  the following tentative guidelines are given:

Afterbody form	$C_{\text{stern}}$
V-shaped sections	- 10
Normal section shape	0
U-shaped sections with Hogner stern	+ 10

The wetted area of the hull can be approximated well by:

$$S = L(2T + B) \sqrt{C_M} (0.453 + 0.4425 C_B + 0.2862 C_M - 0.003467 B/T + 0.3696 C_{WP}) + 2.38 A_{BT}/C_B .$$

In this formula  $C_M$  is the midship section coefficient,  $C_B$  is the block coefficient on the basis of the

The wave resistance is determined from:

$$R_W = c_1 c_2 c_3 \nabla \rho g \exp \{ m_1 F_n^d + m_2 \cos(\lambda F_n^{-2}) \}$$

with:

$$c_1 = 2223105 c_7^{3.78613} (T/B)^{1.07961} (90 - i_E)^{-1.37565}$$

$$c_7 = 0.229577 (B/L)^{0.33333} \quad \text{when } B/L < 0.11$$

In this figure the transverse area of wedges placed at the transom chine should be included.

In the formula for the wave resistance,  $F_n$  is the Froude number based on the waterline length  $L$ . The other parameters can be determined from:

$$\lambda = 1.446 C_p - 0.03 L/B \quad \text{when } L/B < 12$$

$$\lambda = 1.446 C_p - 0.36 \quad \text{when } L/B > 12$$

$$m_1 = 0.0140407 L/T - 1.75254 \nabla^{1/3}/L + \\ - 4.79323 B/L - c_{16}$$

$$c_{16} = 8.07981 C_p - 13.8673 C_p^2 + 6.984388 C_p^3 \\ \text{when } C_p < 0.80$$

$$c_{16} = 1.73014 - 0.7067 C_p \quad \text{when } C_p > 0.80$$

$$m_2 = c_{15} C_p^2 \exp(-0.1 F_n^{-2})$$

The coefficient  $c_{15}$  is equal to  $-1.69385$  for  $L^3/\nabla < 512$ , whereas  $c_{15} = 0.0$  for  $L^3/\nabla > 1727$ .

For values of  $512 < L^3/\nabla < 1727$ ,  $c_{15}$  is determined from:

$$c_{15} = -1.69385 + (L/\nabla^{1/3} - 8.0)/2.36$$

$$d = -0.9$$

The half angle of entrance  $i_E$  is the angle of the waterline at the bow in degrees with reference to the centre plane but neglecting the local shape at the stem. If  $i_E$  is unknown, use can be made of the following formula:

$$i_E = 1 + 89 \exp\{- (L/B)^{0.80856} (1 - C_{WP})^{0.30484} \\ (1 - C_p - 0.0225 lcb)^{0.6367} (L_R/B)^{0.34574} \\ (100 \nabla/L^3)^{0.16302}\}$$

This formula, obtained by regression analysis of over 200 hull shapes, yields  $i_E$  values between  $1^\circ$  and  $90^\circ$ . The original equation in [1] sometimes resulted in negative  $i_E$  values for exceptional combinations of hull-form parameters.

The coefficient that determines the influence of the bulbous bow on the wave resistance is defined as:

$$c_3 = 0.56 A_{BT}^{1.5} / \{BT(0.31 \sqrt{A_{BT}} + T_F - h_B)\}$$

## ANEXO C

### CÓDIGO FUENTE MATLAB

```
function f = OPCATAG_v2p0(x)
% x(1)=Eslora [m]
% x(2)=Manga [m]
% x(3)=Calado [m]
% x(4)=Separacion entre cascos [m]
% x(5)=Coeficiente Bloque
% x(6)= ship speed
%rho:densidad del fluido [kg/m^3]
%despla:Desplazamiento del catamaran [kg]
%vol:Volumen desplazado [m^3]
% Cm:Coeficiente de seccion media
% Cw:Coeficiente del plano de flotacion
%vk:Velocidad de buque en [nudos]
%g:Gravedad [m/s^2]
%Fn:Froude

disp('speed: '),x(6)
% vk=x(6);
rho=1025; % Densidad del fluido donde va a navegar [kg/m^3]
g=9.8; %Gravedad en [m/s2]
PesoEngine=0;
POTENCIAINST=0.;
POWERTOTAL=0.;
AENGINE=0;
ve=[];
%disp('*** Volumen de desplazamiento [m^3] ***')
vol=(x(1)*x(2)*x(3)*x(5)); %Volumen desplazado en [m^3]
%disp('*** Desplazamiento [kg] ***')
despl=vol*rho; % Desplazamiento [kg]
%disp('*** Fuerza de Boyantes [kg] ***')
Boyantes=2*despl
Peso=0; %[kg]
RTmax=0;
delta_speed = 0.1;

%Estimacion de peso del casco y equipos (sin motor ni bateria)
PesoThruster= 0.59; %Peso del Empujador es 0,295 x 2 (c/casco):0.59 $119
PesoEquipos= 7; % peso de equipos
Ahull=(x(1)*(4.8*x(3)+0.7853*x(2)+x(4))) %Area de los cascos
Pbalsa=Ahull*1.25; % Balsa de 2 mm de espesor 100 mm x 1000 mm @ 1.2 kg/m^3
Presina=3.0*Ahull; %Peso de la resina (poliester)
Phull=1.25*((1.2*Ahull+Presina)+Pbalsa); %Peso de los cascos 4 capas Tela 300
gr/m^2

Peso_ligero = PesoThruster + PesoEquipos + Phull %Peso del casco y equipos
sin motor ni bateria

if ( Peso_ligero <= Boyantes)
    %vk = 0.1;
    Peso = Peso_ligero;
```

```

%while (Peso <= Boyantes)
n_steps = ceil(x(6)/delta_speed);

for i = 1:1:n_steps
    %Peso
    %Boyantes
    vk = delta_speed*i

%disp('=====
=====
=====')

    %disp('Velocidad [nudos] :'),vk
    %COEFICIENTES
    %disp('*** COEFICICIENTE DE FORMAS ***')
    %disp('*** Coeficientes de Sección Media***')
    Cm = 1.006-0.0056*x(5)^-3.56; % Coeficiente de secci{on media formula
de Karlen 1970
    %disp('*** Coeficientes del Plano de Flotaciï¿½n ***')
    Cw = x(5)/(0.471+0.551*x(5)); %Coeficiente de area de flotaciï¿½n
formula de Parson 2003
%    disp('*** Coeficientes Prismï¿½tico ***')
    Cp= x(5)/Cm; %Coeficiente Prismaticob*B*T)%Volï¿½men desplazado en
[m^3]

    %RESISTENCIA
    %disp('*** RESISTENCIA & PROPULSION ***')

    Fn=(vk*0.5144)/((g*x(1))^0.5); %Ni¿½merho de froude
    ratio=x(4)/x(1) ; % relaciï¿½n de esbeltez
    fac=3.03*((x(1)/(vol)^0.333333)^-0.40) + 0.016*(x(4)/x(1))^-0.65 ; %
factor de forma PARA CATAMARANES
    nu=0.000001188 ;%Viscosidad cinemática m2/s
    Re= (vk*0.5144*x(1))/nu ; %Ni¿½mero de Reynolds
    cf=0.075/(log10(Re)-2)^2 ; % coeficiente friccional ITTC 1957
    lcb=(8.80-38.9*Fn)/100 ;%
    Awp=Cw*x(1)*x(2) ; %ï¿½rea del plano de Flotaciï¿½n [m^2]
    surf=(sqrt(x(2)^2+(x(3))^2)/x(2))* (1.2434*Cm^3-
1.4545*Cm^2+0.6935*Cm+0.81614)*Awp ;%Superficie Mojada [m^2]

    %disp('          RESISTENCIA POR APENDICES [N]          ');
    App=0.15; %Área del apéndice [m^2]
    fa=1 ; %Factor del apéndice adimensional ,Cilindro
    Rapp=0.5*rho*App*fa*cf*(vk*0.5144)^2;%Resistencia por apéndices [N]
    %disp('=====');
    %disp('          RESISTENCIA POR OLAS [N]          ');
    if (ratio <= 0.24)
        %CALCULO DEL FACTOR DE INTERFERENCIA ENTRE LOS CASCOS
        Fnr=[0.2,0.25,0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65]';
        IF=[0.901,1.443,1.365,1.070,0.926,0.974,0.966,0.858,0.720,0.669]';%S/L=0.2

        ve=interp1(Fnr,IF,Fn,'spline');
        %disp('Factor de Interferencia "          ');
        %disp('=====');
        %disp('Fn(i)          IF          ');
        %disp('=====');

```

```

        fprintf('%8.3f   %8.3f   \n', [Fn,ve]');
        disp('-----');
elseif ((ratio >= 0.25) && (ratio <= 0.34))
    Fnr=[0.2,0.25,0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65]';
IF=[0.550,0.966,1.000,0.885,0.864,0.927,0.893,0.763,0.625,0.622]'; %S/L=0.3
    ve=interp1(Fnr,IF,Fn,'spline');
%       disp('Factor de Interferencia "           ');
%       disp('=====');
%       disp('Fn(i)           IF           ');
%       disp('=====');
%       fprintf('%8.3f   %8.3f   \n', [Fn,ve]')
%       disp('-----');
elseif (ratio >= 0.35)
    Fnr=[0.2,0.25,0.3,0.35,0.4,0.45,0.5,0.55,0.6,0.65]';
IF=[0.387,0.724,0.804,0.776,0.819,0.893,0.847,0.702,0.564,0.591]'; %S/L=0.4
    ve=interp1(Fnr,IF,Fn,'polyfit');
%       disp('Factor de Interferencia "           ');
%       disp('=====');
%       disp('Fn(i)           IF           ');
%       disp('=====');
%       fprintf('%8.3f   %8.3f   \n', [Fn,ve]')
%       disp('-----');
end

%Valor de c7
if (x(2)/x(1))>=0.25
    c7=0.5-0.0625*(x(1)/x(2));
elseif 0.11<(x(2)/x(1)) && (x(2)/x(1))<0.25
    c7=(x(2)/x(1));
elseif (x(2)/x(1))<=0.11
    c7=0.229577*(x(2)/x(1))^0.33333;
end

% Angulo de entrada iE
LR = x(1)*(1-Cp+(0.06*Cp*1cb)/(4*Cp-1));
ie=1+89*exp(-(x(1)/x(2))^0.80856)*(1-Cw)^0.30484*(1-Cp-
0.0225*1cb)^0.6367*(LR/x(2))^0.34574*((100*vol/x(1)^3)^0.16302);
% Valor de c1
c1=2223105*(c7^3.78613)*((x(3)/x(2))^1.07961)*(90-ie)^(-1.37565);
% Valor de c3 - Coeficiente que determina la influencia del bulbo de
proa
c3=0;
% Valor de c2
c2=1;
% Valor de c5
ATR=21*(x(2)/25)*(x(3)/13);
c5=1-0.8*ATR/(x(2)*x(3)*Cm);
% Valor de Lambda
if (x(1)/x(2))<12
    Lambda=1.446*Cp-0.03*x(1)/x(2) ;
elseif (x(1)/x(2))>=12
    Lambda=1.446*Cp-0.36;
end

% Valor de c16
if Cp<0.8
    c16=8.07981*Cp-13.8673*Cp^2+6.984388*Cp^3;

```

```

elseif Cp>=0.8
    c16=1.73014-0.7067*Cp;
end

% Valor de m1
m1=0.0140407*(x(1)/x(3))-(1.75254*(vol^(1/3))/x(1))-
4.79232*(x(2)/x(1))-c16;

% Valor de c15
if (x(1)^3/vol<=512)
    c15=-1.69385;
elseif (x(1)^3/vol>=1727)
    c15=0;
else
    c15=-1.69385+((x(1)/vol^(1/3)) - 8)/2.36;
end

% Valor de m2
m2=c15*0.4*exp(-0.034*Fn^-3.29);
% Resistencia
cwdh=((c1*c2*c5*exp(m1*Fn^(0.9))+m2*cos(Lambda*Fn^(-2))))/9.8);
u=ve;
CT=fac*cf+u*cwdh;
% disp(' RESISTENCIA AL VIENTO [N] ');
rhoair=1.184; %kg/m^3 @ 25 Centigrados
Vrela=11; %11 m/s velocidad del aire escalad de Beaufort 5 Brisa
fresca
Afront=2*(1.2*x(3)-x(3))+0.155; %area transversal de la caja
cd=0.5; %Para catamaranes por lo generla es de 0.4-0.5
Rva=0.5*rhoair*Afront*cd*(Vrela+(vk*0.5144))^3;
% disp('*** RESISTENCIA TOTAL [N] ***')
RT= 2*((CT*0.5*rho*surf*(vk*0.5144)^2)+Rapp+Rva ); %Resistencia en N

if (RT>= RTmax)
    RTmax = RT;
end
end

%disp('*** POTENCIA NECESARIA DEL MOTOR ***')
POWERengine=(RTmax*(vk*0.5144))/0.55; % Potencia en Watts %Potencia del
motor , *Se considera un coeficiente quasipropulsivo de 0.55
%disp('*** POTENCIA NECESARIA EN CADA CASCO DEL CATAMARI;½N ***')

if (POWERengine <= 400)
    nEngines = 2;
else
    nEngines = fix(POWERengine/200)+1;
end

POWERch= (POWERengine/nEngines) % Potencia necesaria a instalar en cada
casco [Watts]

%Tabla MOTORES comera qcial www.maxonmotor.es/

%Valores de Froude
POTC=[2,3,12,20,25,30,40,50,60,80,120,150,160,170,180,200]'; %POTENCIAS
COMERCIALES MOTORES DE DC ALTA GAMA

```

```

    Bi=[260,310,245,210,230,215,225,280,245,245,270,305,205,340,590,755]';
%cOSTO DEL MOTOR EN DOLARES

Bii=[33100,22800,40000,45300,63000,43600,54000,66400,55200,61600,57900,47800,
2720,9120,4220,16100]'; %RPM DEL MOTOR
    Biii=
[0.406,0.391,0.916,1.24,1.45,1.74,2.05,2.58,2.91,4.82,6.21,6.67,6.39,7.39,7.6
1,8.96]'; % AMPERIOS DEL MOTOR

Biv=[0.006,0.006,0.024,0.037,0.05,0.072,0.078,0.078,0.078,0.097,0.12,0.14,0.4
9,0.58,0.82,0.95]'; %pESO DEL MOTOR EN KG
    M = [Bi,Bii,Biii,Biv];
    %
disp('=====')
=====')
    %          disp('POTENCIA[WATTS]          COSTO[$]          VEL.DEL
MOTOR [RPM]          AMPERIOS[A]          PESO [KG]          ')
    %
disp('=====')
=====')
    %          fprintf('%8.3f          %8.3f          %8.3f
%8.3f          %8.3f          \n', [POTC,M]');
    %          disp('-----')
-----')

if (POWERch < 2)
    POTENCIAINST=POTC(1,1);
    PesoEngine = Biv(1,1);
    AENGINE = Biii(1,1);
    costo_motor = Bi(1,1);

elseif(POWERch > 2) & (POWERch <= 3)
    POTENCIAINST=POTC(2,1);
    PesoEngine = Biv(2,1);
    AENGINE = Biii(2,1);
    costo_motor = Bi(2,1);

elseif POWERch>3 & POWERch<=12
    POTENCIAINST=POTC(3,1);
    PesoEngine = Biv(3,1);
    AENGINE = Biii(3,1);
    costo_motor = Bi(3,1);

elseif POWERch>12 & POWERch<=20
    POTENCIAINST=POTC(4,1);
    PesoEngine = Biv(4,1);
    AENGINE = Biii(4,1);
    costo_motor = Bi(4,1);

elseif POWERch>20 & POWERch<=25
    POTENCIAINST=POTC(5,1);
    PesoEngine = Biv(5,1);
    AENGINE = Biii(5,1);
    costo_motor = Bi(5,1);

elseif POWERch>25 & POWERch<=30
    POTENCIAINST=POTC(6,1);
    PesoEngine = Biv(6,1);
    AENGINE = Biii(6,1);
    costo_motor = Bi(6,1);

```



```

elseif POWERch>30 & POWERch<=40
    POTENCIAINST=POTC(7,1);
    PesoEngine = Biv(7,1);
    AENGINE = Biii(7,1);
    costo_motor = Bi(7,1);

elseif POWERch>40 & POWERch<=50
    POTENCIAINST=POTC(8,1);
    PesoEngine = Biv(8,1);
    AENGINE = Biii(8,1);
    costo_motor = Bi(8,1);

elseif POWERch>50 & POWERch<=60
    POTENCIAINST=POTC(9,1);
    PesoEngine = Biv(9,1);
    AENGINE = Biii(9,1);
    costo_motor = Bi(9,1);

elseif POWERch>60 & POWERch<=80
    POTENCIAINST=POTC(10,1);
    PesoEngine = Biv(10,1);
    AENGINE = Biii(10,1);
    costo_motor = Bi(10,1);

elseif POWERch>80 & POWERch<=120
    POTENCIAINST=POTC(11,1);
    PesoEngine = Biv(11,1);
    AENGINE = Biii(11,1);
    costo_motor = Bi(11,1);

elseif POWERch>120 & POWERch<=150
    POTENCIAINST=POTC(12,1);
    PesoEngine = Biv(12,1);
    AENGINE = Biii(12,1);
    costo_motor = Bi(12,1);

elseif POWERch>150 & POWERch<=160
    POTENCIAINST=POTC(13,1);
    PesoEngine = Biv(13,1);
    AENGINE = Biii(13,1);
    costo_motor = Bi(13,1);

elseif POWERch>160 & POWERch<=170
    POTENCIAINST=POTC(14,1);
    PesoEngine = Biv(14,1);
    AENGINE = Biii(14,1);
    costo_motor = Bi(14,1);

elseif POWERch>170 & POWERch<=180
    POTENCIAINST=POTC(15,1);
    PesoEngine = Biv(15,1);
    AENGINE = Biii(15,1);
    costo_motor = Bi(15,1);

elseif POWERch>180 & POWERch<=200
    POTENCIAINST=POTC(16,1);
    PesoEngine = Biv(16,1);

```

```

AENGINE = Biii(16,1);
costo_motor = Bi(16,1);
else

end

POWERTOTAL=2.*POTENCIAINST

%disp('La potencia total a instalar es [watts]:'),POWERTOTAL

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%AUTONOMIA
%disp('***          AUTONOMIA          ***')

Aexplo = 50000; %area de exploraci; %n **** RESTRICCI; %n ****
Long = 100; %Parametro longitudinal del area de exploracion
Trans = 500; %Parametro transversal del i; %rea de exploraci; %n
alfa=40.0; % i; %ngulo de la helice
popa = 1; %tipo de popa 1 (cerrada) 2 (abierta)
At = (x(1)*0.01)*x(3)*(1+50*(x(5)^2))*(x(2)/x(1))^2;%area de timon
[m^2]
Dg = x(1)*((0.727-
(197*(x(5)/alfa)))+(4.65*(x(2)/x(1)))+(188/alfa)+((1.77*vk)/(sqrt(x(1)))));%
Diametro de giro [m]
Dt=x(1)*(0.14+(Dg/x(1))); % Diametro tactico [m]
Dist = ((Aexplo/(Trans*Dt))*Dt) + (((Aexplo/(Trans*Dt))+1)*Trans)
%Distancia total de exploracion [m]
timeOperation = ((Dist/(vk*0.5144))/3600) % Tiempo de operacion horas

AHThruster=23 ; % Consumo de amperios del Empujador con diametro de
Helice 10 cm 4200rpm
AEQUIPOS=5.6; %Amoperaje de los equipos
%timeOperation=3; % tiempo de operacion en horas **** RESTRICCION
****

%disp('Capacidad de Bateria en Amperios - Hora')
AH=(AENGINE+AEQUIPOS)*timeOperation + AHThruster %Capacidad de
Bateria : Potencia del motor+Potencia del Thruster +Potencia de Equipos
[watts]

if AH<=200
    nBaterias = 2;
else
    nBaterias = fix(AH/100)+1;
end
%PESOS
%PesoBateria =-0.0035*(AH/2.)^2 + 0.9023*(AH/2.) - 24.082 %Peso de
bateria constante
PesoBateria = 0.3377*(AH/2.)-2.2611
Peso = Peso_ligero + nEngines*PesoEngine + nBaterias*PesoBateria
%Desplazamiento Total
%ESTABILIDAD
%disp( '**          ESTABLIDAD          **')
%disp( 'Estimacion del centro de Boyantes [m]')
KB = x(3)*(0.9-0.3*Cm-0.1*x(5));%Centro de boyantes por Schneeklth
Transversal
%disp( 'Estimacion del centro de gravedad longitudinal [m]')
lcb =(8.80-38.9*Fn)/100; % % L AV MS

```

```

FAC = 0.096+0.89*Cw^2; %FACTOR DE REDUCCION POR NORMAND
%disp( 'Radio Metacentrico Transversal [m]')
BMT = (FAC*x(1)*x(2)^3)/(12*x(1)*x(2)*x(3)*x(5)); %Radio metacentrico
transversal
%disp( 'Altura Metacéntrica [m]')
KM = x(2)*(((0.08/sqrt(Cm))*x(2)/x(3)))+((0.9-0.3*Cm-
0.1*x(5))/(x(2)/x(3))); % Altura metacentrica por Schneekluth

%vk = vk + delta_speed;
%disp(vk);
%vh=vk;
%end

%disp('La velocidad de Diseno es [nudos]:')

%vship=vk-delta_speed;
vship = x(6);
%costo de fibra de vidrio+Costo de resina +costo de balsa + costo de
%mano de obra
costo_bateria = 0.4054*(AH/2)+ 183.62
costo_casco = 3*(3.45 +3.38 + 3.2 + 15)*Ahull
costo_motor = costo_motor

if (Peso <= Boyantes)
    f(1) = sqrt(((vship/3)*(20)^2)/(Dist)) %incertidumbre de batimetria
    f(2) = nEngines*costo_motor + nBaterias*costo_bateria + costo_casco
%costo de fibra de vidrio+Costo de resina +costo de balsa
else
    f(1) = 100
    f(2) = 5000
end

%pause
% options = gaoptimset('OutputFcns',@my_view);
elseif (Boyantes < Peso_ligero)

    f(1) = 100
    f(2) = 12000

end
end

FitnessFunction = @OPCATAG_v2p0; % Function handle to the fitness function
numberOfVariables = 6; % Number of decision variables
lb = [0.5,0.15,0.05,0.15,0.4,0.1]; % Lower bound
ub = [3,1.0,0.5,1.5,0.6,10]; % Upper bound

% Linear inequality constraints
A = [-1,3,0,0,0,0;... % B<L/3
1,-10,0,0,0,0;... % B>L/10
0.2,0,0,-1,0,0;... % S >0.2*L
-0.5,0,0, 1,0,0;... % S < 0.5*L
0,0,0,0,-1,0;... % Cb > 0.3
0,0,0,0, 1,0]; ... % Cb < 0.6
0,1.5,0,-1,0,0;... % S > 1.5B
0,-1.0,0.5,0,0,0;... % B >= 0.5T
0,-1.0,2.5,0,0,0]; % B <= 2.5T

```

```

b = [0;0;0;0;-0.3;0.6]; % Linear inequality constraints
Aeq = []; % Linear equality constraints
beq = []; % Linear equality constraints
options =
optimoptions(@gamultiobj, 'PlotFcn',{@gaplotpareto,@gaplotscores,@gaplotstoppi
ng,...
    @gaplotgenealogy,@gaplotdistance,@gaplotsselection,...
    @gaplotscorediversity,@gaplotparetodistance,...
    @gaplotrankhist,@gaplotspread,...
    @gaplot_eslora,@gaplot_manga,@gaplot_separacion,@gaplot_speed,...
    @gaplot_cheapestMean,@gaplot_precisionBatimetria});

options.DistanceMeasureFcn = {@distancecrowding, 'genotype'};
options.CrossoverFraction = 0.8; %0 %0.2 %0.4 %0.6 %0.8 %1.0
options.MaxGenerations = 500;
options.ParetoFraction = 0.45;
options.PopulationSize = 200;
parpool('local');
% options.UseParallel=true;
%options.SelectionFcn = 'selectiontournament';
%{'selectiontournament'}
%options = optimoptions(options, 'ParetoFraction',0.45);
% options = optimoptions(options, 'FunctionTolerance',1e-
5, 'MaxStallGenerations',150, 'patternsearch', 'SearchFcn',);
% interline=500;
% gapo=optimoptions('gamultiobj', 'UserParallel',true);

[x,Fval,exitFlag,Output] = gamultiobj(FitnessFunction,numberOfVariables,A,
b,Aeq,beq,lb,ub,@mycon,options);

fprintf('The number of points on the Pareto front was: %d\n', size(x,1));
fprintf('The number of generations was : %d\n', Output.generations);
fprintf('The average distance measure of the solutions on the Pareto front
was: %g\n', Output.averagedistance);
fprintf('The spread measure of the Pareto front was: %g\n', Output.spread);

function state = gaplot_eslora(options, state, flag)
% GAPLOTCHANGE Plots the logarithmic change in the best score from the
% previous generation.
%
%persistent last_best % Best score in the previous generation

if(strcmp(flag,'init')) % Set up the plot
    xlim([1,options.MaxGenerations]);
    ylim([0,3]);
    hold on;
    grid minor
    xlabel('Generacion')
    title('Individuos por generacion')
    ylabel ('Eslora [m]')

    hold on ;
    grid minor
end
    hold on ;
    grid on
    grid minor

```

```

% plot(state.Generation,state.Population(:,1),'or');

plot(state.Generation,state.Population(:,1),'or','MarkerSize',1);
end

function state = gaplot_manga(options, state, flag)
% GAPLOTCHANGE Plots the logarithmic change in the best score from the
% previous generation.
%persistent last_best % Best score in the previous generation

if(strcmp(flag,'init')) % Set up the plot
    xlim([1,options.MaxGenerations]);
    ylim([0,1]);
    hold on;
    grid minor
    xlabel('Generacion')
    title('Individuos por generacion')
    ylabel('Manga[m]')

    hold on ;
    grid minor
end
    hold on ;
    grid on
    grid minor
% plot(state.Generation,state.Population(:,2),'or');

plot(state.Generation,state.Population(:,2),'or','MarkerSize',1);
end

function state = gaplot_separacion(options, state, flag)
% GAPLOTCHANGE Plots the logarithmic change in the best score from the
% previous generation.
%
%persistent last_best % Best score in the previous generation

if(strcmp(flag,'init')) % Set up the plot
    xlim([1,options.MaxGenerations]);
    ylim([0,2]);
    hold on;
    grid minor
    xlabel('Generacion')
    title('Individuos por generacion')
    ylabel ('Separacion[m]')

    hold on ;
    grid minor
end
    hold on ;
    grid on

```

```

    grid minor
% plot(state.Generation,state.Population(:,1),'or');

    plot(state.Generation,state.Population(:,4),'or','MarkerSize',1);
end

function state = gaplot_speed(options, state, flag)
% GAPLOTCHANGE Plots the logarithmic change in the best score from the
% previous generation.
%
%persistent last_best % Best score in the previous generation

if(strcmp(flag,'init')) % Set up the plot
    xlim([1,options.MaxGenerations]);
    ylim([0,3]);
    hold on;
    grid minor
    xlabel('Generacion')
    title('Individuos por generacion')
    ylabel ('Speed [knots]')

    hold on ;
    grid minor
end
    hold on ;
    grid on
    grid minor

    plot(state.Generation,state.Population(:,6),'or','MarkerSize',1);
end

function state = gaplot_precisionBatimetria(options, state, flag)
% GAPLOTCHANGE Plots the logarithmic change in the best score from the
% previous generation.
%
%persistent last_best % Best score in the previous generation

if(strcmp(flag,'init')) % Set up the plot
    xlim([1,options.MaxGenerations]);
    ylim([0,1000]);
    hold on;
    grid minor
    xlabel('Generacion')
    title('Incertidumbre: Mejor y valor promedio por generacion')
    ylabel('Incertidumbre [m]')

    hold on ;
    grid minor
end
    hold on ;
    grid on
    grid minor

```

```
plot(state.Generation,mean(state.Score(:,1)), 'or', 'MarkerSize',2);
hold on
plot(state.Generation,min(state.Score(:,1)), 'ob', 'MarkerSize',2);

legend('Promedio','Mejor valor')
end
function [c,ceq] = mycon(x)
c(1) = 0.625*x(1)^0.5 - x(6) ;      % Compute nonlinear inequalities at x.
c(2) = -1.25*x(1)^0.5 + x(6);
c(3)=-0.8*x(1)+0.08*x(4)^-1;
ceq = []; % Compute nonlinear equalities at x.
end
```