



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERIA MARITIMA, CIENCIAS BIOLOGICAS,  
OCEANICAS Y RECURSOS NATURALES

DISEÑO PRELIMINAR DE UN SUBMARINO TURÍSTICO ASISTIDO POR UNA  
EMBARCACIÓN DE SUPERFICIE PARA LAS ISLAS GALÁPAGOS.

TESIS DE GRADO

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO NAVAL

Presentada por:

Serapio Clemente Rendón Paredes

Guayaquil – Ecuador

2013

## **AGRADECIMIENTO**

A DÍOS, por haberme proporcionado  
paciencia, sabiduría, y fuerza necesaria  
para la elaboración de esta Tesis

Al Ing. Patrick Townsend Valencia, por  
su paciencia y permanente apoyo para  
el desarrollo de esta Tesis

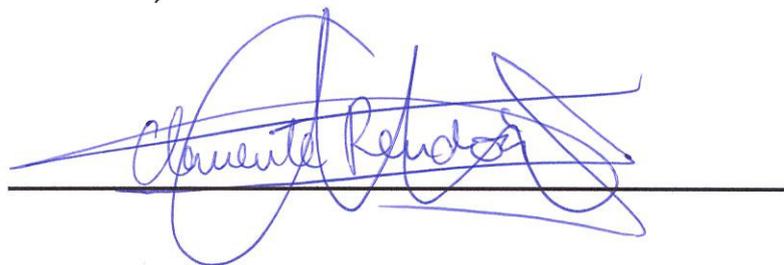
## **DEDICATORIA**

A Mis Padres Elicia y Serapio, hermanas Martha y Rosana, sobrinos Enny, Saúl, Mateo y Crystel. Y sobre todo a mi Esposa Pamela por su insistencia en la culminación de ésta tesis.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”.

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL)

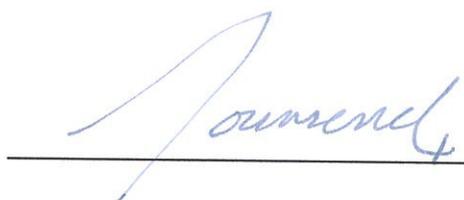


A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Clemente Rendon", is written over a solid black horizontal line. The signature is stylized and somewhat cursive.

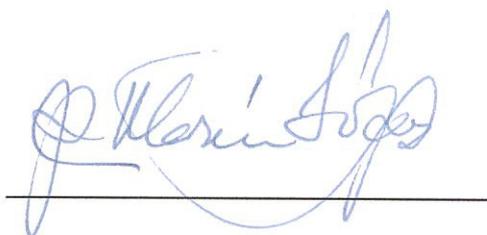
## TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Marco Velarde Toscano  
Presidente del Tribunal



Ing. Patrick Townsend Valencia.  
Director de Tesis



PhD. José Marín L.  
Miembro Principal



Ing. Bolívar Vaca Romo  
Miembro Alterno

# INDICE GENERAL.

INDICE GENERAL .....	I
INDICE DE FIGURAS .....	II
INDICE DE TABLAS .....	III
RESUMEN .....	IV
INTRODUCCION .....	V
<b>1. REQUERIMIENTOS PARA EL DISEÑO DE UNA EMBARCACIÓN SUMERGIBLE .....</b>	<b>1</b>
1.1.Requerimientos de un sumergible para turismo.....	2
1.2.Limitaciones del sumergible .....	8
1.3.Zonas de posible mayor explotación de turismo subacuático.....	10
<b>2. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REMOLQUE EMBARCACIÓN-SUMERGIBLE.....</b>	<b>13</b>
2.1.Análisis de la operación del sistema empleando un catamarán .....	14
2.2.Análisis de la operación del sistema empleando dos embarcaciones.....	17
2.3.Análisis de la operación del sistema con una embarcación operando a través de un tangón .....	19

2.4. Selección del sistema embarcación-sumergible más conveniente.....	23
<b>3. DISEÑO PRELIMINAR DEL SUMERGIBLE.....</b>	<b>30</b>
3.1. Dimensionamiento del Sumergible.....	31
3.2. Dimensionamiento Estructural.....	44
3.3. Estimación de la Resistencia al avance.....	64
3.4. Diseño del Sistema de Inmersión.....	75
3.5. Suministro de Aire y Sistema de Seguridad.....	82
<b>4. ANALISIS DE COSTOS DEL PROYECTO.....</b>	<b>88</b>
4.1. Estimación de materiales y sus costos.....	89
4.2. Estimación de costos de Construcción del sistema embarcación sumergible.....	91
4.3. Costo de Clasificación de diseño, supervisión y construcción del sumergible.....	92
4.4. Costo total del sistema.....	93
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>104</b>

## INDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 1.1.-</b> Arreglo de los principales tanques de lastre.....	3
<b>Figura 1.2.-</b> Observación del fondo marino desde un submarino de turismo.....	5
<b>Figura 1.3.-</b> Espacios requeridos para uso humano.....	6
<b>Figura 1.4.-</b> Requerimiento de espacio para los asientos.....	8
<b>Figura 1.5.-</b> Mapa Turístico de Galápagos.....	10
<b>Figura 2.1.-</b> Arreglo del sistema embarcación-sumergible con un catamarán.....	15
<b>Figura 2.2.-</b> Funcionamiento del sistema embarcación-sumergible con catamarán.....	16
<b>Figura 2.3.-</b> Sistema embarcación-sumergible operado por dos embarcaciones.....	18
<b>Figura 2.4.-</b> Funcionamiento del sistema embarcación-sumergible operada a través de un tangón o pluma.....	19
<b>Figura 2.5.-</b> Fairlead, guía para cables.....	22
<b>Figura 3.1.-</b> Diseño asociado con el proceso.....	31
<b>Figura 3.2.-</b> Relación tiempo volumen por pasajero.....	34
<b>Figura 3.3.-</b> Relación diámetro-volumen.....	37
<b>Figura 3.4.-</b> Disposición general del sumergible.....	40
<b>Figura 3.5.-</b> Proyecto CASUM de España.....	41

<b>Figura 3.6.-</b> Distribución del sumergible adicionando los tanques.....	43
<b>Figura 3.7.-</b> Uso típico de materiales para submarinos.....	44
<b>Figura 3.8.-</b> Diagrama de distribución de pesos típica.....	45
<b>Figura 3.9.-</b> Modelo de las distribución de carga en el casco del sumergible.....	46
<b>Figura 3.10.-</b> Arreglo Estructural del sumergible.....	47
<b>Figura 3.11.-</b> Gráfica de la Fuerza cortante.....	52
<b>Figura 3.12.-</b> Gráfica del Momento Flector.....	52
<b>Figura 3.13.-</b> Cuaderna maestra del sumergible.....	54
<b>Figura 3.14.-</b> Panel de plancha en el fondo.....	56
<b>Figura 3.15.-</b> Modelo de la viga, panel transversal.....	57
<b>Figura 3.16.-</b> Curva para el cálculo de $k$ en función de $a/b$ .....	59
<b>Figura 3.17.-</b> Muestra de acrílico transparente.....	63
<b>Figura 3.18.-</b> Gráfica de las componentes de las fuerzas de Resistencia.....	70
<b>Figura 3.19.-</b> Gráfico de la resistencia total.....	71
<b>Figura 3.20.-</b> Gráfico de las componentes de la potencia.....	73
<b>Figura 3.21.-</b> Curva de la potencia total, PET.....	74
<b>Figura 3.22.-</b> Escotilla de acceso para sumergible.....	75
<b>Figura 3.23.-</b> Funcionamiento de un submarino.....	76
<b>Figura 3.24.-</b> Circuito de lastrado y deslastrado de un submarino.....	77
<b>Figura 3.25.-</b> Solución gráfica de la ecuación de la conservación de la energía.....	82

**Figura 3.26.-** Esquema de introducción de oxígeno y eliminación de  
CO<sub>2</sub>..... 84

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla I.-</b> Dimensiones y uso típico.....	7
<b>Tabla II.-</b> Distancias entre los puertos y los puntos de exploración.....	11
<b>Tabla III.-</b> Matriz de decisión para evaluar el mejor de los sistemas a usarse.....	29
<b>Tabla IV.-</b> Características del Steel HY-100.....	45
<b>Tabla V.-</b> Implementación para el cálculo de Carga, Fuerza Cortante y Momento Flector.....	53
<b>Tabla VI.-</b> Cálculo de la Inercia y el Módulo Seccional.....	55
<b>Tabla VII.-</b> Resumen de resultados.....	55
<b>Tabla VIII.-</b> Cálculo de la Inercia y la distancia del eje neutro a la fibra más alejada.....	58
<b>Tabla IX.-</b> Cálculo de Esfuerzos Secundarios.....	58
<b>Tabla X.-</b> Cálculo de Esfuerzos Terciarios.....	60
<b>Tabla XI.-</b> Factores de seguridad para los esfuerzos.....	61
<b>Tabla XII.-</b> Análisis de las ventanas.....	63
<b>Tabla XIII.-</b> Tabla de resultados de resistencia al avance del vehículo sumergible.....	69
<b>Tabla XIV.-</b> Implementación del cálculo de potencia.....	72
<b>Tabla XV.-</b> Resultados de la implementación del cálculo de tanques de inmersión.....	78

<b>Tabla XVI.-</b> Implementación de los cálculos para la caída de presión.....	81
<b>Tabla XVII.-</b> Requerimientos para la supervivencia en un sumergible.....	83
<b>Tabla XVIII.-</b> Costos de equipos usados en la maniobra.....	89
<b>Tabla XIX.-</b> Lista y costo de materiales para la construcción del sumergible y los tanques de inmersión.....	90
<b>Tabla XX.-</b> Costos fijos del proyecto.....	96

## RESUMEN

Para realizar el diseño de un sumergible de tipo turístico para uso exclusivo en las Islas Galápagos. Primeramente, se estudiaron los requerimientos de espacio y confort, para dicho diseño. Posteriormente se seleccionó el sistema a utilizarse en el remolque de la capsula sumergible, de entre tres opciones que presentaban el uso de un catamarán para el remolque del sumergible, el uso de dos embarcaciones navegando en paralelo remolcando el sumergible y finalmente, el uso de una embarcación con un tangón o pluma que remolca la embarcación sumergida. De entre las tres opciones mencionadas se seleccionó la tercera, basados en criterios de estabilidad, seguridad, maniobrabilidad, versatilidad y costos.

Para el diseño preliminar del sumergible, se dimensionó la capsula habitable. Basado en estas dimensiones se propuso un sistema estructural el cual fue analizado modelando el sumergible como una viga, el cual dio buenos resultados en general. Se concluyó que los esfuerzos primarios no son de gran importancia como los terciarios en este tipo de embarcaciones. Además se comprobó que para la velocidad de operación (2kn) el arrastre y el consumo de potencia es muy bajo.

Finalmente, se realizó una evaluación de los costos de construcción del sistema en donde se analiza los costos de materiales, costos de mano de obra, clasificación y supervisión de construcción del sistema. Este costo puede ser analizado para una posible inversión.

## INTRODUCCION

En las Islas Galápagos existe gran cantidad de lugares para hacer turismo de tipo sub-acuático, pero la falta de facilidades, el elevado costo, las limitaciones físicas, y, los riesgos implícitos en el buceo, hacen que este tipo de turismo se vuelva una actividad limitada. Esta tesis propone la opción del uso de un sumergible con dependencia de una embarcación en la superficie, que permita a los pasajeros observar el fondo marino. Esta opción reducirá la inversión inicial, ya que un sumergible independiente es de muy elevado costo de construcción, además de que reducirá la restricción física a los visitantes.

El objetivo general de esta tesis es la elaboración del diseño preliminar de una embarcación sumergible con dependencia de una embarcación de superficie, que permita hacer observaciones del fondo marino en las Islas Galápagos.

Específicamente este trabajo pretende:

- Definir los requerimientos y limitaciones en el dimensionamiento de una embarcación de tipo sumergible, para la observación submarina en las Islas Galápagos.

- Analizar alternativas del sistema embarcación-sumergible a nivel conceptual y sus condiciones de operatividad.
- Realizar el diseño a nivel preliminar de una embarcación sumergible para observación submarina en las Islas Galápagos.
- Estimar los costos de construcción y operación, para luego analizar la factibilidad del proyecto.

Debido a la poca explotación de este tipo de turismo en nuestro país, finalmente se tendrá la posibilidad de una alternativa de turismo con la opción de atracción de capitales. Además se podrá adaptar el proceso de diseño aprendido durante la etapa de formación teórica de Ingeniería Naval.

Hipótesis: El diseño preliminar de una embarcación sumergible con dependencia de una embarcación de superficie para turismo permite que se pueda analizar su factibilidad de construcción y operación.

# Capítulo 1

## Requerimientos para el diseño de una embarcación Sumergible.

En este capítulo se estudiará primeramente los requerimientos para un submarino, en un principio de una manera general y posteriormente se mostrará los requerimientos para embarcaciones de turismo, para luego superponer ambas características. Se continuará presentando las limitaciones de un sumergible destinado al turismo, ventajas y desventajas que se presentan en un sistema formado por una embarcación de superficie y una cápsula sumergible. Finalmente se presentará la zona de operación del sistema y su profundidad promedio. Éste parámetro es de vital importancia en el diseño de un sumergible; y determinante en su configuración estructural.

### **1.1 Requerimientos para un sumergible para turismo.**

Esencialmente un submarino es un tubo largo en que la disposición de la mayoría de sus volúmenes se coloca longitudinalmente con una pequeña porción de elementos que varían verticalmente.

Uno de los principales aspectos es de darle al casco una forma de resistencia mínima al movimiento de avance, consistente con otras demandas que se mostrarán el capítulo 3 como la selección de las formas y su influencia en la disposición o arreglo general.

El requerimiento para una eficiente configuración estructural para el casco, que estará sometido a presión, no siempre es completamente compatible con la aerodinámica o desarrollo del casco exterior de baja resistencia.

El espacio entre los límites exteriores e interiores, tienen que ser de dimensiones tales que permitan; durante la etapa de construcción poder soldar y durante la etapa de funcionamiento poder dar mantenimiento a estos lugares de difícil acceso.

A continuación se muestran las opciones que se presentan en la referencia [5], en donde se presentan las diferentes configuraciones de ubicación de tanques de lastre.

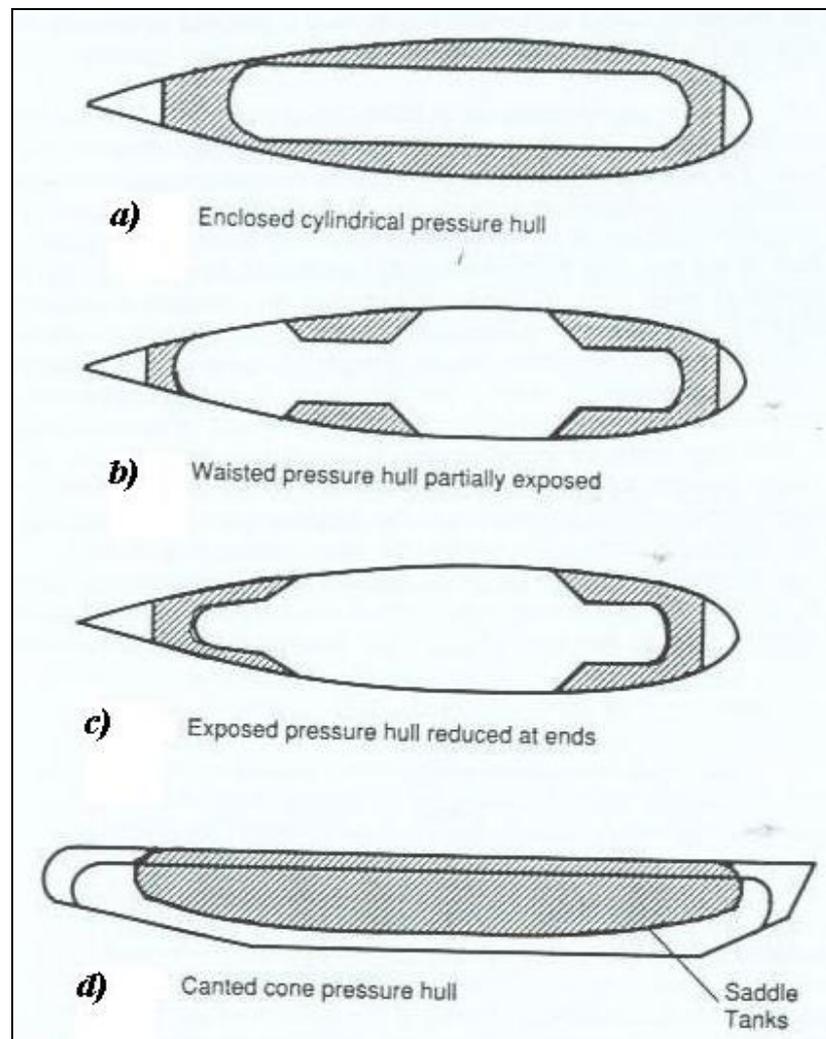


Figura 1.1.- Arreglo de los principales tanques de lastre. [5].

- En este arreglo se puede ver como toda la habitabilidad es envuelta por los tanques de lastre, es decir este no es aplicable para turismo.
- Se muestra en este caso como parte de la habitabilidad es expuesta al casco que soporta la presión de una manera parcial.

- c. Este caso resulta muy interesante ya que gran porcentaje de la habitabilidad del vehículo está expuesta a la presión directamente.
- d. En este último caso se puede ver que los tanques reposan a lo largo de las bandas del casco, lo cual dificultaría la ubicación de ventanas y por ende la visión.

Las embarcaciones turísticas, como es el caso del tipo de la presente tesis, se orientan al ocio colectivo no al individual; y se conciben para realizar las llamadas actividades recreativas, tales como:

- Paseo, pesca deportiva, buceo, excursiones e inmersiones.
- Relax, talasoterapia, marinoterapia, reuniones.

Entre las características de este tipo de embarcaciones, en su mayoría podemos citar:

- Son de pequeño o mediano tamaño.
- Tienen muy poca tripulación.
- Sus prestaciones son programadas.
- En ciertos países suelen tener gran influencia en las economías locales de su entorno operativo.
- Su diseño constituye una innovación producto/proceso, muy clara y determinante. [9]

Basado en estas características se plantea la necesidad de suficiente espacio y comodidad para el diseño de una embarcación sumergible de

turismo. Debido a que esta es una embarcación de tipo turístico, se requiere que los pasajeros se encuentren cómodamente ubicados con suficiente espacio para que puedan realizar sus observaciones.

En este caso se revisarán los espacios necesarios para el movimiento de los pasajeros desde el momento de abordar el sumergible, movimiento por los pasillos y finalmente la ubicación en sus respectivos asientos. Se debe de recordar que los pasajeros deben quedar ubicados cómodamente en sus asientos con la suficiente libertad de movimiento, como se muestra en la figura 1.2.



Figura 1.2.- Observación del fondo marino desde un submarino de turismo.

[24].

De acuerdo a lo antes mencionado, se considera las posibles posiciones en las que pueden estar los pasajeros dentro del sumergible durante la

travesía. Tal como se ve en la figura 1.3, que corresponde a la tabla I, que muestra a un pasajero primeramente sentado y los espacios requeridos para su comodidad y luego un pasajero de pie con los mismos requerimientos de espacio.

Estas medidas ergométricas, aplicables para embarcaciones de turismo, y en el diseño de un submarino en general, son críticas.

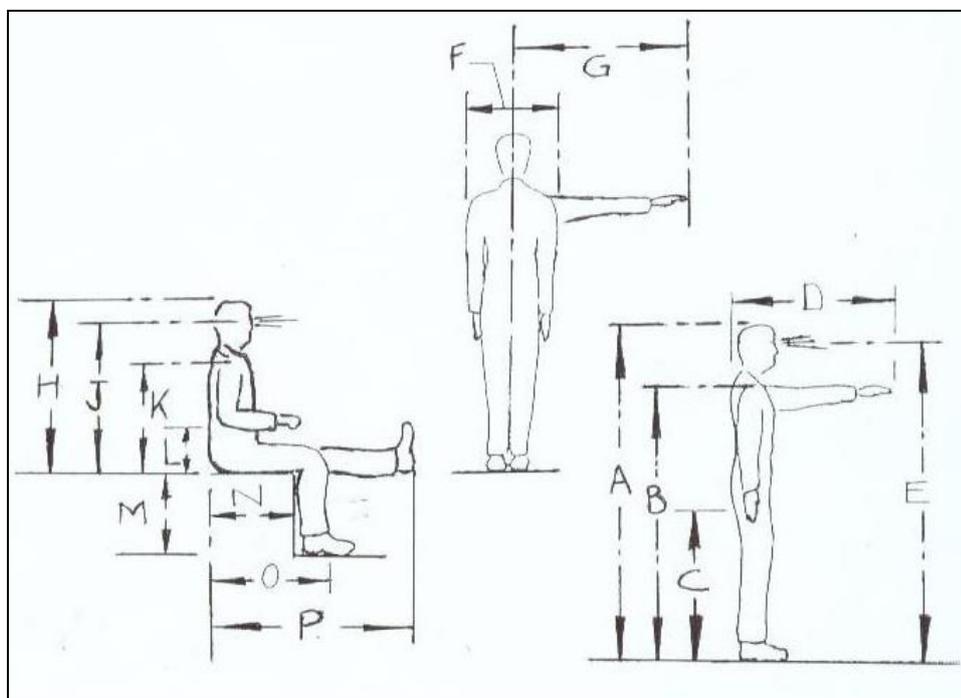


Figura 1.3.- Espacios requeridos para uso humano. [11].

Como se puede apreciar se tiene tres tipos de tallas; alto, promedio y pequeño que es usado para mujeres. Para ser más conservador y guardar márgenes de seguridad suficientes tomaremos las medidas denominadas

"hombre alto" (primera columna) de donde se derivan el resto de medidas para las distintas posiciones.

Dimensiones y Medidas de uso Típico		Hombre Grande		Hombre Promedio		Mujer Pequeña	
		mm	ft & in	mm	ft & in	Mm	ft & in
A	Altura	1880	6' 2"	1740	5' 8 1/2"	1455	4' 9 1/4"
B	Altura del hombro	1435	4' 8 1/2"	1400	4' 7"	1200	3' 11 1/4"
C	Altura de la mano - Para cuando se está de pie	840	2' 9"	740	2' 5"	655	2' 1 3/4"
D	Alcance hacia delante	925	3' 1/2"	845	2' 9 1/4"	600	1' 11 1/2"
E	Altura de la vista de pie - nivel de ventanas	1745	5' 8 3/4"	1630	5' 4 1/4"	1340	4' 4 3/4"
F	Espacios estrechos formados por las anchura del hombro	505	1' 7 3/4"	465	1' 6 1/4"	375	1' 2 3/4"
G	Alcance lateral	925	3' 1/4"	885	2' 11"	765	2' 6"
H	Espacio libre sobre el asiento	960	3' 1 1/4"	900	2' 11 1/2"	740	2' 5 1/4"
J	Altura de la vista sobre el asiento	845	2' 9 1/4"	730	2' 4 3/4"	620	2' 1/2"
K	Altura del hombro sobre el asiento	640	2' 1 1/4"	580	1' 10 3/4"	480	1' 7"
L	Altura del codo sobre el asiento	270	0' 10 3/4"	220	8 3/4"	145	0' 5 3/4"
M	Altura del asiento	470	1' 6 1/2"	420	1' 4 1/4"	365	1' 2 1/4"
N	Longitud del muslo	520	1' 8 1/2"	480	1' 7"	420	1' 4 1/2"
O	Distancia del asiento hacia la rodilla	660	2' 1/2"	590	1' 11 1/4"	520	1' 8 1/2"
P	Distancia del pie extendido	1185	3' 10 3/4"	1060	3' 5 3/4"	890	2' 11"

Tabla I- Dimensiones y uso típico. [11].

Se considera adicional, los requerimientos mínimos para los asientos de los pasajeros, tal como se ve en la figura 1.4.

El dibujo mostrado en la figura 1.4 muestra el arreglo de una mesa y de una silla; en nuestro caso solamente consideraremos la silla, ya que el tipo de embarcación, es de observación submarina, por lo cual no se requiere de mesa sino del espacio de observación al exterior.

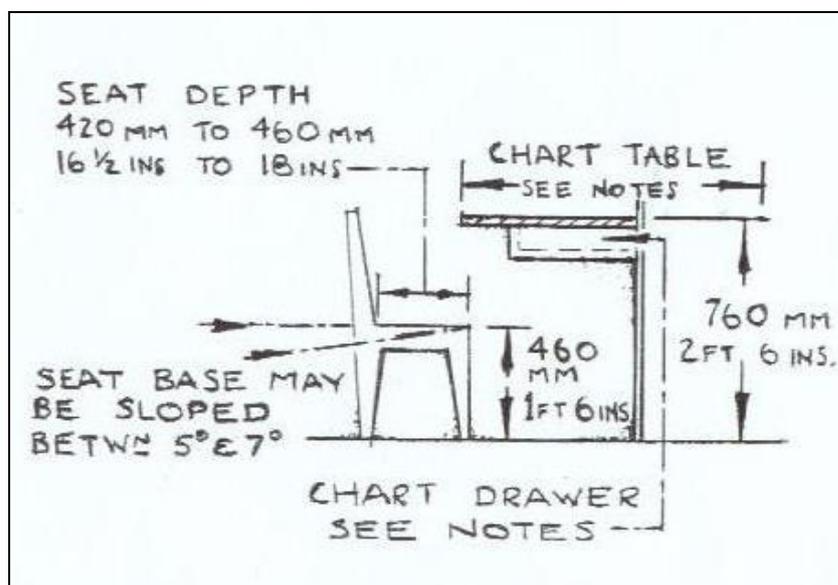


Figura 1.4.- Requerimiento de espacio para los asientos. [11].

Todas las medidas consideradas hasta el momento serán empleadas en el dimensionamiento preliminar del sumergible. Estas referencias son útiles para seleccionar el parámetro de volumen necesario por pasajero, que en este tipo de nave es el más crítico.

## 1.2 Limitaciones del sumergible.

Con el fin de cumplir las normas que existen en el Parque Nacional Galápagos, que prohíben el uso de embarcaciones sumergibles que pueden con el ruido estresar las especies que habitan en el fondo del mar, se seleccionará un sumergible no propulsado, impulsado por una embarcación de superficie ya que no produce ruido. Esto con el fin de reducir la inversión

inicial, además de argumentar que existen leyes en Galápagos que prohíben el uso de embarcaciones sumergibles que pueden con el ruido estresar las especies que habitan el fondo del mar. Es importante comentar que como ventaja adicional de este sistema, se reducen los costos de la inversión inicial haciendo más atractivo el proyecto. Esto lo vemos a continuación en una comparación entre ventajas y desventajas del sistema no propulsado sobre el sistema autopropulsado.

### **Ventajas**

- Baja emisión de ruido y poca contaminación.
- Muy segura debido al anclaje con una embarcación de superficie.
- Llevará más espacio que un submarino normal.
- Bajo costo en la inversión inicial comparado con un sumergible independiente.
- Bajos costos de operación y mantenimiento.
- Sistemas de seguridad tanto a bordo del sumergible como de la embarcación de superficie.
- Permanente comunicación con una unidad en la superficie.
- En caso de emergencia se puede rescatar izándolo hacia la superficie.

### **Desventajas**

- No posee propulsión ni gobierno independiente, estando a merced de las corrientes.



En la figura 1.5 se observa el mapa turístico de la provincia de Galápagos en donde se muestra las mejores zonas para el buceo turístico alrededor de todas las islas, se observa además que existen los siguientes puntos escogidos. A pesar de existir muchos lugares para bucear alrededor de todas las islas estos puntos han sido escogidos debido a su estratégica ubicación cercana a los puertos Puerto Villamil y de Puerto Ayora. Que son escogidos por poseer medios para embarque y desembarque de pasajeros.

Como se aprecia desde Puerto Villamil se tiene cercanía a los puntos 1 y 2, y desde Puerto Ayora se tiene cercanía a los puntos 2 y 3.

La distancia a estos puertos es muy buena ya que se pueden considerar puntos de abastecimiento para las embarcaciones, además de manejar distancias relativamente cortas que pueden ser atravesadas por las embarcaciones en poco tiempo.

<b><i>Distancias (MN)</i></b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>
<b>Pto. Villamil</b>	12.6	23.8	48.0
<b>Pto. Ayora</b>	42.6	18.5	24.7

Tabla II.- Distancias entre los puertos y los puntos de exploración. [16].

En la Tabla II se presentan las distancias promedios que existen entre los puntos escogidos y los puertos. Además se sabe que la distancia entre el

Puerto Villamil y Puerto Ayora es de 39.6 MN, distancia que puede considerarse relativamente corta.

Además de la cercanía hacia los puertos se usan estos puntos como exploración debido a que existen profundidades que varían de la siguiente manera: Para el punto uno se manejan profundidades menores de 48m, en el punto dos profundidades entre 37 y 47m y para el punto 3 profundidades entre 20 a 46 m, según la referencia [10].

## **Capítulo 2**

### **Selección del Sistema de Remolque Embarcación-Sumergible.**

En este capítulo se plantea, el uso de tres sistemas para remolque del sumergible. Se propondrá la distribución sobre la cubierta de la embarcación, se describirá la maniobra, y se seleccionará finalmente a través de una evaluación de las características que presenta cada uno de los sistemas propuestos. Se escogerá de entre tres sistemas que son los de mayor facilidad de aplicación en nuestro medio, por la facilidad que presenta conseguir cada una de las embarcaciones.

Los sistemas a evaluar son: el uso de un catamarán para arrastre del sumergible, el uso de dos embarcaciones para remolque; y finalmente se estudiará el caso del uso de una sola embarcación, pero que usará un tangón para remolcar el sumergible.

Se conocerá el sistema más apropiado para llevar a cabo la maniobra, y los elementos y sus características principales que serán necesarios; esto es grúas, cables, winche.

### **2.1 Análisis de la operación del sistema empleando un catamarán.**

Al evaluar el caso del sumergible maniobrado por un catamarán, se debe conocer las actividades que se llevan a cabo en la maniobra.

En la figura 2.1 se muestra en perspectiva la instalación del sistema embarcación-sumergible, como se observa, la maniobra se lleva a cabo desde la popa de la embarcación, en donde se encuentran instalados a una banda, la grúa para maniobra de izado del sumergible y a la otra banda se tiene un winche para la maniobra de arrastre del sumergible.

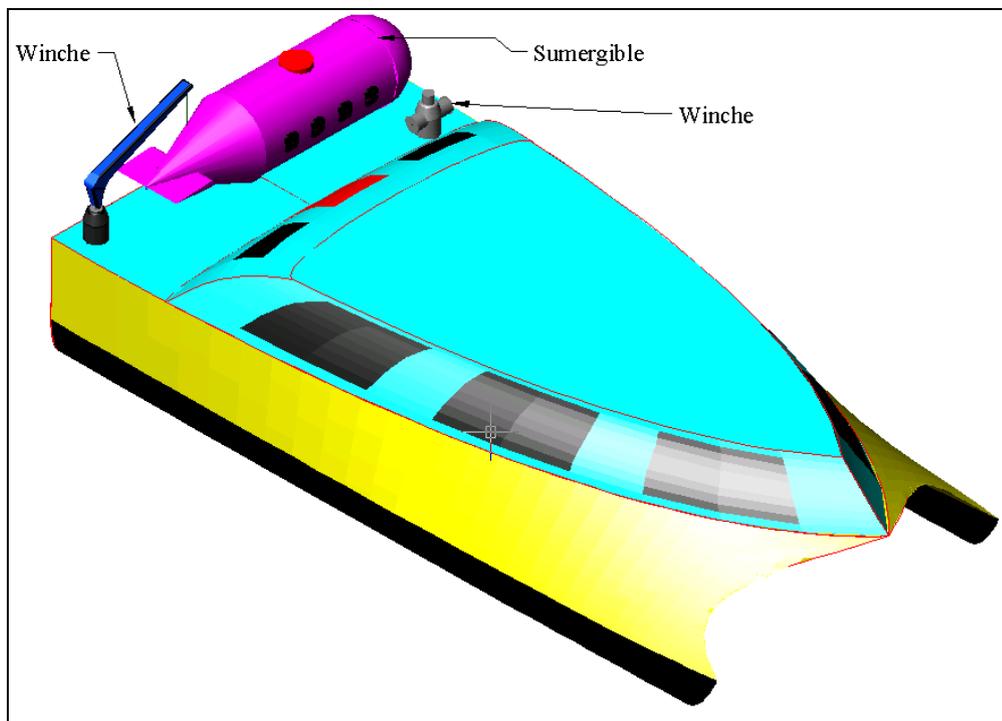


Figura 2.1. Arreglo del sistema embarcación-sumergible con un catamarán.

[20].

El funcionamiento de este sistema, desde el izado hasta el abordaje del sumergible consiste en llegar hasta la zona de inmersión, luego la grúa izará (elevará y después bajará) el sumergible hasta la línea de flotación, es decir hasta el agua. Todo esto siempre con el cable que está siendo controlado por el winche, además de la grúa que es el elemento que permite el izado del sumergible.

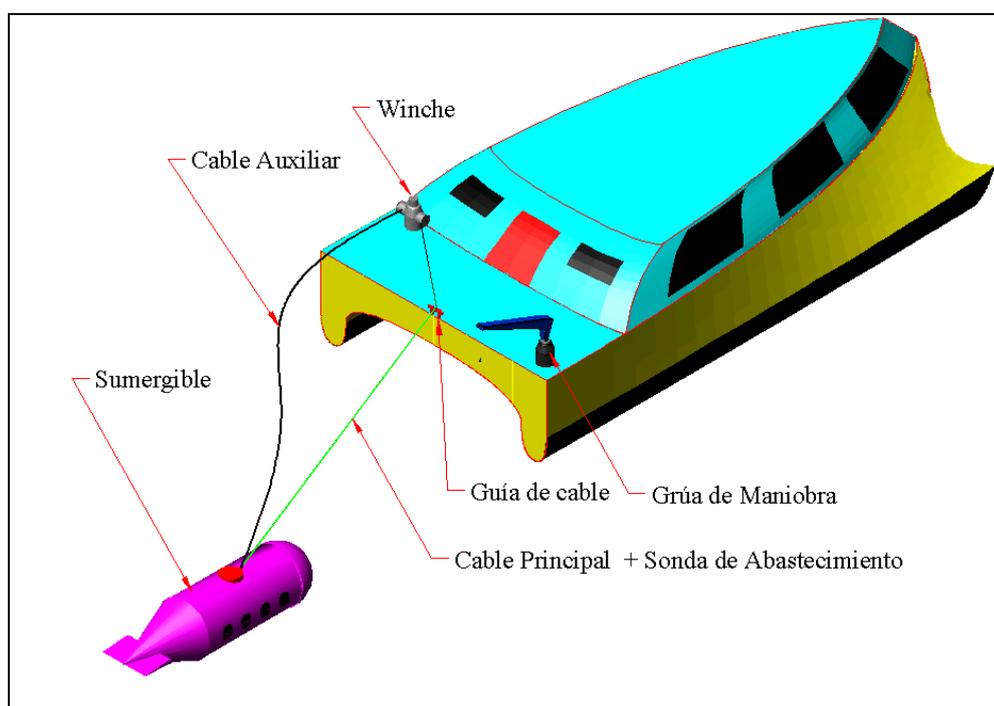


Figura 2.2.- Funcionamiento del sistema embarcación-sumergible con catamarán. [20].

Una vez en el agua, los pasajeros deben abordar el sumergible, a través de una escala que sea capaz de ser instalada y desinstalada con facilidad; y finalmente se conecta la sonda de abastecimiento para cerrar la escotilla principal de acceso. Después se asegura el cable y la zona por donde se ubicará el mismo, es decir; por sectores donde a parte de que debe pasar el cable, existe paso de personas. Finalmente, se empieza la maniobra de inmersión del sumergible.

## **2.2 Análisis de la operación del sistema empleando dos embarcaciones.**

En la figura 2.3 se muestra la configuración que se obtiene al usar dos embarcaciones, para operar en la maniobra del izado y remolque del vehículo sumergible.

En este caso se va a operar con dos embarcaciones, lo que hará más segura en cuanto a estabilidad se refiere la maniobra; el sumergible puede viajar en cualquiera de las dos embarcaciones, mientras se navega en busca de la zona de inmersión. No será necesario que ambas embarcaciones lleven instalados todos los equipos, solo sería necesario que sean instalados en la embarcación que llevará en su cubierta el vehículo sumergible. Pero si de seguridad se trata se aconsejaría que los equipos fuesen instalados en ambas embarcaciones.

La maniobra, consiste en navegar hasta la zona de inmersión. La embarcación que lleva el sumergible inicia la maniobra de izado con la grúa, sin dejar de contar con la seguridad que ofrece el winche.

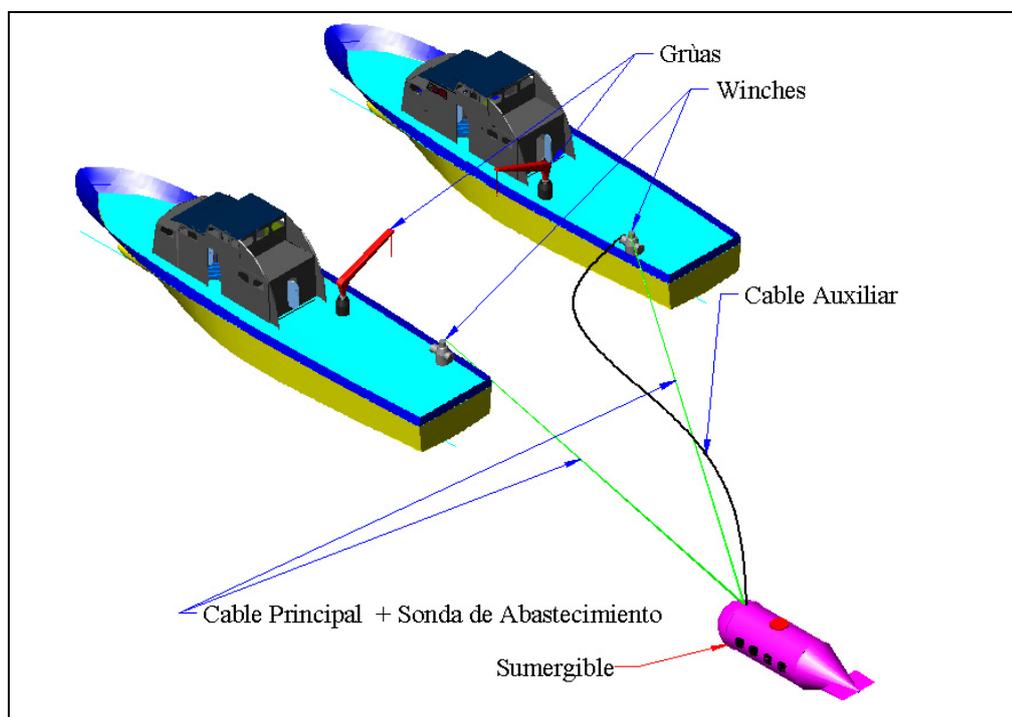


Figura 2.3.- Sistema embarcación-sumergible operado por dos embarcaciones. [20].

Una vez en el agua, el sumergible debe ser enganchado y asegurado en la cubierta de ambas embarcaciones, conectada la sonda de abastecimiento a una o las dos embarcaciones. Hecho esto, se procede a abordar el sumergible por los pasajeros y tripulación, a través de una escala desmontable. Finalmente, se inicia la maniobra de inmersión y remolque.

En resumen, se puede decir que este es un sistema que se considera altamente seguro, pero de un elevado costo de operación por la presencia de dos embarcaciones. Al término del capítulo se evaluará que tan factible es el uso de este sistema, comparado con los otros dos sistemas propuestos.

### 2.3 Análisis de la operación del sistema con una embarcación operando a través de un tangón.

A continuación en la figura 2.4, se muestra la operación del sistema embarcación-sumergible operada a través de un tangón.

En este caso se puede analizar el caso de un sistema embarcación-sumergible unidos a través de un tangón, pluma o pescante; que deberá estar instalado, correctamente anclado y reforzado en la cubierta de la embarcación.

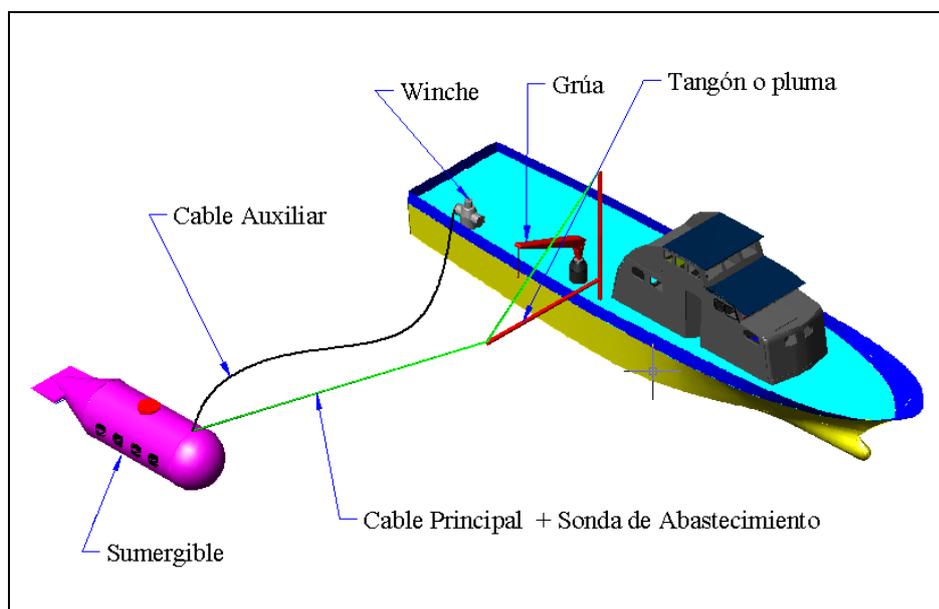


Figura 2.4.- Funcionamiento del sistema embarcación-sumergible operada a través de un tangón o pluma. [20].

En este caso la maniobra se la inicia en la cubierta de la embarcación, con el izado del sumergible que se debe colocar en el agua, para luego debe ser abordado por los pasajeros y tripulantes. Finalmente, se inicia la maniobra de inmersión y remolque.

Para los tres casos, en los equipos de maniobra se debe considerar los siguientes criterios para la grúa, el winche, los cables y diseño de la zona de anclaje.

#### **Grúa.**

La grúa debe ser calculada con la potencia necesaria para izar el sumergible, que debe estar sin pasajeros ni tripulantes. Se requerirá de la grúa, para elevar y bajar el sumergible hasta el agua. Esta grúa debe tener la característica de poseer suficiente fuerza para el levante del vehículo sumergible.

Además, su instalación debe poseer espacio suficiente para maniobrar y la versatilidad de que mientras no esté en uso pueda ser recogida para que no dificulte el paso de los pasajeros y de la tripulación.

**Winche.**

Este elemento será el que enlazará al sistema embarcación-sumergible, además proveerá suficiente tensión para que la embarcación pueda arrastrar el sumergible durante el tour. Como no se trata de una embarcación de pesca el tiempo que dure la recogida del cable es irrelevante, pero si se debe tener una rápida respuesta en caso de emergencias.

**Cables.**

Los cables que serán usados para arrastrar al sumergible deben de presentar la garantía de seguridad, es decir deben ser certificados o clasificados. Además deben tener la característica de ser resistentes y capaces de trabajar bien en un medio que además de ser corrosivo puede ser abrasivo. Se menciona abrasivo porque durante la maniobra de lanzamiento o recogida del sumergible, el cable debe pasar por una guía o *fairlead* que es un elemento muy usado en el tipo de maniobras donde se usan cables.

A continuación se mostrará los requerimientos para los elementos que deberán ser instalados en cubierta para llevar a cabo la maniobra de izado y remolque del sumergible.

**Guía de cables.**

En la figura 2.5 se muestra un fairlead o guía para cable el cual es muy usado en éste tipo de maniobras para evitar el desgaste excesivo de los cables que por ahí pasan, debido a que se componen de tambores que al contacto con los cables giran para evitar el excesivo desgaste debido a la fricción.



Figura 2.5.- Fairlead, guía para cables. [18].

**Zona de Anclaje.**

Se requerirá además de un buen sistema soporte y anclaje para el sumergible, es decir cuando no se esté en maniobra y la embarcación esté en crucero, el sumergible debe estar correctamente ubicado sobre cubierta y además muy bien anclado. Se debe, según la forma y peso del sumergible, diseñar los soportes o bancadas sobre la cubierta donde descansará el

sumergible. Además, se debe diseñar un dispositivo de anclaje que ajuste y sujete muy bien el sumergible a dichos soportes.

#### **Pluma de remolque o pescante (para el tercer caso).**

Se debe considerar que este dispositivo debe tener sobre todo en la base, una fuerte estructura reforzada, ya que dicho dispositivo estará sometido a cargas de compresión y momentos de torsión. Por lo que se debe de tomar en consideración, de que la zona donde sea instalado permita dicho reforzamiento.

#### **2.4 Selección del sistema embarcación-sumergible más conveniente.**

Una vez conocida la operación de cada uno de los sistemas se procede primero a la enumeración de las características que se evalúan y se califica con el valor de 2 al mejor, 1 al intermedio y 0 al menos conveniente para el sistema.

Estas características serán clasificadas de acuerdo a los siguientes factores; estabilidad, maniobrabilidad, seguridad y comodidad. Se tiene lo siguiente:

**Estabilidad.**

1. Estabilidad Longitudinal; se pondera tomando en cuenta el sistema que produce menos asiento a la embarcación de los tres sistemas, durante el tiempo que el sumergible permanece sobre la cubierta y durante la maniobra de izado.
2. Estabilidad transversal: Se mide de acuerdo al sistema que produce menos escora a la embarcación durante el tiempo que el sumergible está sobre la cubierta, y sobre todo la escora producida durante el izado del vehículo.
3. Ubicación de la grúa: la grúa debe estar ubicada de una manera tal, que la operación sea lo más sencilla posible y no produzca excesiva escora y/o asiento del buque durante el izado del sumergible.

**Maniobrabilidad.**

4. Espacio para maniobra: Se pondera como mejor, al sistema que presenta espacio de mayor comodidad.
5. Facilidad de montaje y desmontaje de equipos para maniobra: Se debe recordar que la embarcación de superficie es parte del sistema, pero no el objeto principal de este trabajo, por tanto se debe tener presente que se puede variar de embarcación dependiendo de ciertas

condiciones, por tanto el mejor sistema debe presentar la versatilidad en el montaje y desmontaje de los equipos utilizado en la maniobra.

6. Colocación de la sonda: Se pondera como mejor, al sistema que presente facilidad y sencillez de conexión y desconexión de la sonda de abastecimiento.
7. Ubicación de vientos: en toda maniobra de izado, se debe siempre considerar la ubicación de cabos de izado que reducen el riesgo de golpes del sumergible debido al movimiento propio de la embarcación. Se considera mejor al que presente facilidades para la instalación de dichos cabos.
8. Cantidad de personal para maniobra: Se considera como mejor al sistema que presente menos cantidad de personas en la maniobra sin descuidar la seguridad.

### **Seguridad.**

9. Problemas con el sistema de propulsión: Se considera como mejor al que no presente problemas de enredarse con el eje de propulsión, hélice o una posible tobera durante la maniobra de inmersión y remolque del sumergible.
10. Seguridad para el sumergible en crucero: Se evalúa como mejor al sistema que presente menos problemas durante la navegación, es

decir, por su configuración, mayor seguridad en el momento de asegurar o anclar el sumergible.

11. Facilidad para movilización en cubierta: mientras los pasajeros se encuentren abordando la embarcación, debe existir espacio y suficiente seguridad en el tránsito. Se considera mejor, al sistema que presente dicho espacio y seguridad.
12. Material del casco de la embarcación: Se evaluará como mejor al sistema al casco que presente material más resistente a los posibles impactos del sumergible debido al movimiento del sumergible en el agua.
13. Ubicación de bitas o fairleads: los cables que tiran del sumergible deben pasar por cubierta y estos deben estar correctamente asegurados y pasar por zonas de poca circulación de personas. Se considera mejor al sistema que brinde mejores oportunidades de aseguramiento del sumergible sin que estos accesorios se vuelvan un peligro para los pasajeros que transiten ésta zona.
14. Cantidad de bitas o fairleads: Se estima que es mejor el sistema que presenta mayor espacio para la ubicación de bitas o fairleads, para asegurar el sumergible con más seguridad.

**Comodidad.**

15. Influencia de la turbulencia: Durante la maniobra de remolque se puede presentar excesiva turbulencia, lo que puede generar problemas en la sonda de abastecimiento; el mejor es aquel que presente en menor cantidad, éste problema.
16. Problemas con la vibración: Se pondera como mejor, al sistema que presente la mejor ubicación del sumergible en donde la vibración producida por la máquina o por la hélice genere la menor cantidad de problemas con el vehículo.
17. Facilidad para montar equipos de acceso: En este caso se considera mejor al sistema en donde sea mayor la facilidad de ubicar y retirar una escala de acceso para pasajeros, esto es para poder movilizar a los pasajeros desde la cubierta hasta el sumergible en el agua.
18. El francobordo: es otro de los parámetros que se debe medir; mientras menor sea el francobordo será más fácil el abordaje del sumergible a flote.
19. Colocación de la sonda: Se pondera como mejor al sistema que presente facilidad y sencillez de conexión y desconexión de la sonda de abastecimiento.
20. Capacidad de almacenamiento de elementos móviles: Se considera mejor al sistema que tenga mayor capacidad de almacenamiento de equipos tales como, cables, cabos y la sonda de abastecimiento.

**Costos.**

21. Costos de instalación: En este caso se considera cual de los tres casos es más económico en la parte de instalación de los elementos del sistema.
22. Costos de Operación: Se pondera como mejor, al sistema que tiene menos costos de mantenimiento y operación.
23. Costos implícitos en llevar a cabo un cambio: Se considera mejor al sistema más versátil al momento de hacer un cambio de una embarcación a otra, es decir cuál de ellos produce menos daños en desinstalar los equipos para traslado a una nueva embarcación.

Ahora se procede a realizar la matriz de decisión para la selección del sistema más idóneo que puede ser usado en la maniobra.

Además se mide de la siguiente manera: bueno equivalente a dos puntos, medio equivalente a un punto y malo o deficiente con un valor de cero, esto con el fin de al final poder evaluar qué sistema es más conveniente.

Al final de las evaluaciones y la ubicación final de dichos resultados en una matriz de decisión se llega a la conclusión que el sistema más conveniente es el que usa una embarcación ayudada por un tangón.

Características medidas		Catamarán	Dos Embarcaciones	Embarcación tangón
	<b>Estabilidad</b>			
1	Estabilidad Longitudinal	0	2	2
2	Estabilidad transversal	2	2	1
3	Ubicación de la grúa	1	2	2
	<b>Maniobrabilidad</b>			
4	Espacio para maniobra	0	2	1
5	Facilidad de montaje y desmontaje de equipos	2	1	2
6	Colocación de la sonda	1	2	1
7	Ubicación de vientos	1	1	2
8	Cantidad de personal para maniobra	0	2	2
	<b>Seguridad</b>			
9	Problemas con el sistema de propulsión	0	1	2
10	Seguridad para el sumergible en crucero	0	2	2
11	Facilidad para movilización en cubierta	1	2	1
12	Material del casco de la embarcación	0	2	2
13	Ubicación de bitas o fairleads	1	1	1
14	Cantidad de bitas o fairleads	1	0	2
	<b>Comodidad</b>			
15	Influencia de la turbulencia	0	1	2
16	Problemas con la vibración	0	2	1
17	Facilidad para montar equipos de acceso	1	2	1
18	El francobordo	2	1	1
19	Colocación de la sonda	1	2	1
20	Capacidad de almacenamiento de elementos móviles	0	2	1
	<b>Costos</b>			
21	Costos de instalación	1	1	2
22	Costos de Operación	2	0	2
23	Costos implícitos en realizar un cambio	1	0	2
24	Cantidad de equipos a instalarse	1	0	1
	<b>Total</b>	<b>19</b>	<b>33</b>	<b>37</b>

Tabla III.- Matriz de decisión para evaluar el mejor de los sistemas a usarse.

[20].

Como se puede apreciar en la tabla III, éste sistema resulta más conveniente debido a que al final en la evaluación económica resulta más económico frente a los otros dos, a pesar de que el sistema que usa dos embarcaciones muestra mayor comodidad.

## Capítulo 3

### Diseño Preliminar de un Sumergible.

En este capítulo se diseñará la embarcación sumergible de una manera preliminar. Se iniciará dimensionando el vehículo de tal forma que cumpla con los requerimientos de espacios expuestos en el capítulo 1. Para continuar, se dimensionará estructuralmente y se modelará el sumergible como una viga para medir los esfuerzos a los que se someterá. Posteriormente, se estimará la resistencia al avance del sumergible, a pesar de no contar con propulsión independiente, se realizará esta estimación debido a que se necesitará conocer el valor de la potencia mínima de la embarcación. Se continuará con la estimación de bombas que serán usadas en el sistema de inmersión y sistema de boyantez. Finalmente, se calculará el sistema de Suministro de Aire, eliminación de CO<sub>2</sub> y Sistemas de Seguridad.

### 3.1. Dimensionamiento del Sumergible.

Primeramente se muestra el proceso de diseño presentado en la referencia [2], que es el equivalente de la espiral de diseño en una embarcación de superficie, en esta referencia lo presentan para el diseño de un submarino.

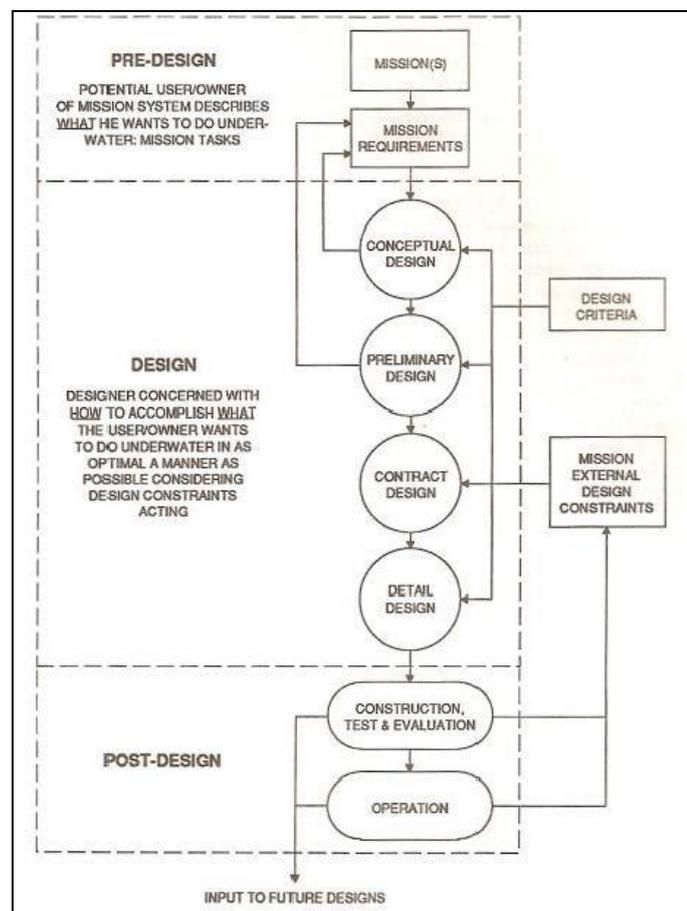


Figura 3.1.- Diseño asociado con el proceso [2].

Como se observa en la figura 3.1, se explica que en la fase de pre-diseño en donde el armador indica la misión y los requerimientos del submarino. En la

siguiente fase llamada de diseño en donde se analiza el diseño conceptual, diseño preliminar, diseño contractual y diseño de detalles. Estos dos últimos se llevan a cabo cuando el diseño preliminar ha sido terminado y aprobado. Finalmente, se muestra la fase de post-diseño donde el proyecto ya ha sido aprobado y entra la parte de construcción, pruebas y evaluación, además de la parte de operación en donde, basado en el diseño anterior se procede a mejorar, de ser posible, el siguiente diseño.

Toda la descripción antes mencionada referente al proceso de diseño de un submarino está basada en proceso de diseño en serie, es decir cuando se va a construir una flota de submarinos es más conveniente usar este algoritmo, que nos permite ir mejorando a medida que avanza la construcción en serie de la flota.

Ahora, el objeto de nuestro estudio se estará centrado en el dimensionamiento de la cápsula sumergible. Se inicia con el cálculo de uno de los principales parámetros, para este tipo de embarcaciones, que es volumen del sumergible y está dado por la siguiente fórmula:

$$V_{PH} = \frac{n \cdot V_m}{(1 - C)} \quad [\text{pie}^3] \quad (3.1)$$

Donde:

$V_{PH}$  = Volumen del casco del sumergible.

$n$  = Número de personas dentro del sumergible.

$V_m$  = Pies cúbicos por persona, dados en la figura 3.2. [ $\text{pies}^3$ ].

$C$  = Fracción o factor ocupado por ítems a parte de las personas, dentro del casco. [adimensional].

Ahora hace mención del uso de las cantidades numéricas y justificación, en cada uno de los parámetros involucrados en la anterior fórmula:

- Número de personas dentro del sumergible: La Ley sobre turismo en Galápagos no permite que se agrupen más de veinte personas para hacer observaciones, por tanto el número máximo de personas que podrán ir a bordo del sumergible es de 18, en este número ya se incluyen los tres tripulantes, el piloto, el guía y un ayudante.
- Pies cúbicos por persona: Éste parámetro se lo puede obtener utilizando la figura 3.2, en donde, en función del tiempo de travesía que será de aproximadamente 2 o 3 horas, pero el parámetro escogido permite hasta 6 horas de inmersión, es de 30 pies cúbicos por persona.

- Fracción o factor de ocupación: Este parámetro se lo tomará como de 0.15, debido a que se trata de una embarcación de confort se requiere llevar buena porción de espacio disponible, por tanto se necesita que los asientos sean lo más cómodos, pero que no ocupen mucho espacio.

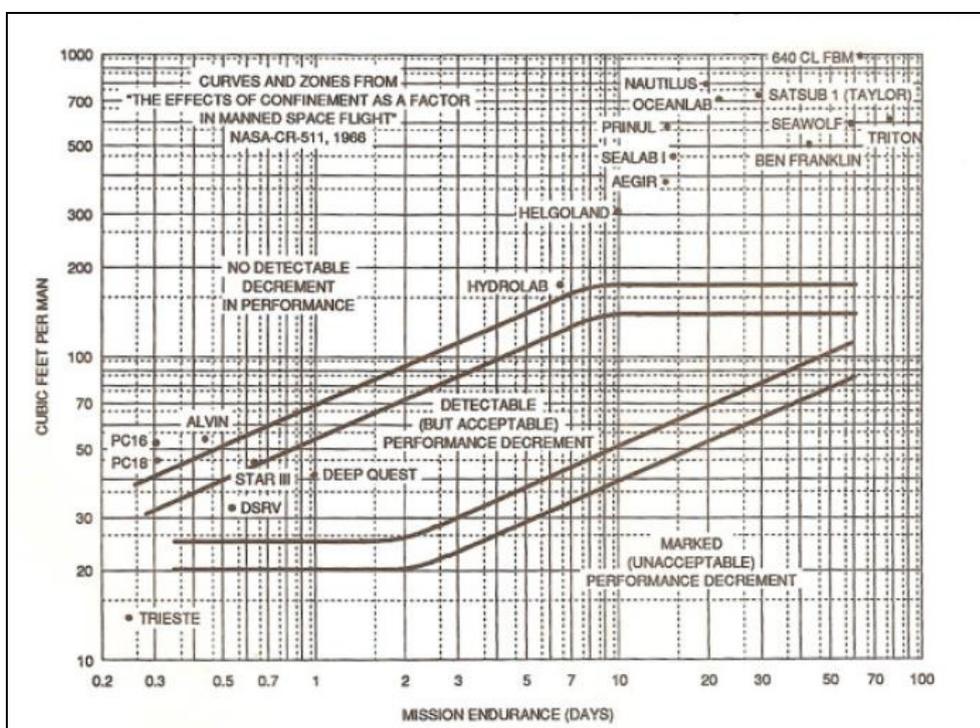


Figura 3.2.- Relación tiempo volumen por pasajero. [2]

Al revisar el gráfico de la figura 3.2, conocida como la “curva y zonas del efecto de confinamiento como un factor de efectos en un vuelo espacial tripulado” usado por la NASA [2], no hay submarinos para turismo, pero es

aplicado en el dimensionamiento de varios sumergibles de investigación y militares. Se puede observar tres regiones, la superior se la llama no detectable en donde se puede observar que las condiciones de dimensionamiento son excesivas. La segunda se la llama, detectable pero aceptable en donde existe optimización del espacio requerido por pasajeros. Finalmente, se tiene la tercera conocida como inaceptable, ya que existe espacio insuficiente para la sobre vivencia de pasajeros a bordo. Las curvas paralelas que existen en el límite de cada región delimitan las regiones conocidas como “regiones de transición”.

Al realizar los cálculos en la fórmula 3.1, se tiene lo siguiente:

$$V_{PH} = \frac{18 * 35}{(1 - 0.22)} \text{ pie}^3$$

$$V_{PH} \approx 808 \text{ pie}^3$$

Ahora, con éste volumen entramos a la curva que muestra la figura 3.3 que nos permite estimar el diámetro del sumergible.

Se entra a la curva que muestra la mayor longitud de las propuestas en la familia de curvas, además que muestra el diseño más sencillo, con el valor de  $808 \text{ pie}^3$  y se obtiene como resultado el diámetro del sumergible de 8.00

pies. Se puede observar que dicha curva solo nos permite evaluar volúmenes hasta 700 pies<sup>3</sup>, pero se ha realizado una extrapolación que resulta bastante confiable.

Como se puede observar el uso típico que se da a estas curvas en gran parte es orientado al diseño de sumergible relativamente pequeños (de investigación) y a su vez de gran profundidad, con lo que, queda implícito que al momento de seleccionar el número de cubiertas a usarse dentro del sumergible será uno, que a su vez será una estiba. Todo esto de acuerdo a las alturas disponibles en estas curvas varían alrededor de la altura promedio de una persona.

Una vez obtenido el diámetro del sumergible, se calculan las otras dimensiones del vehículo. Considerando que los submarinos a pesar de tener formas variables, para el presente caso se toma el tipo de forma más sencillo, y luego se analiza en tres partes por separado y al final se unen las partes calculadas.

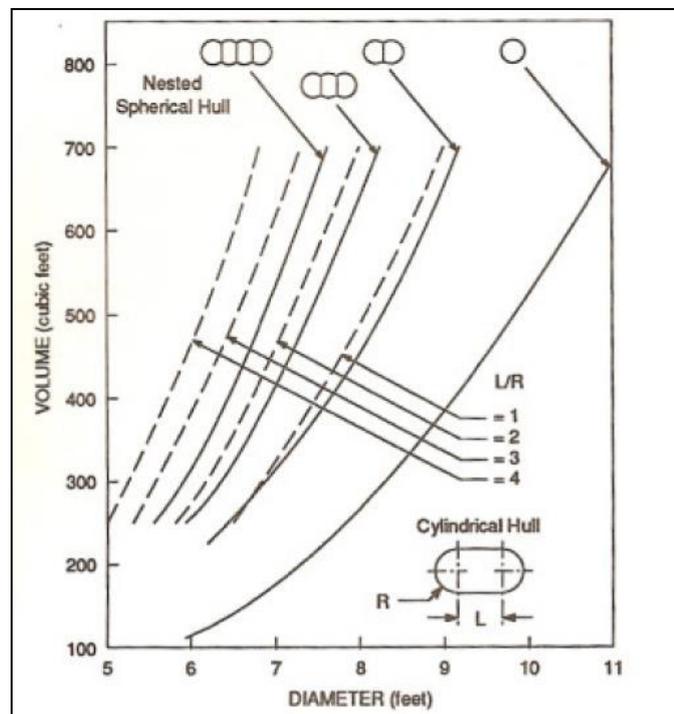


Figura 3.3.- Relación diámetro-volumen [16].

La primera parte es la proa que tienen forma de una semi-esfera, se continúa con el cuerpo medio que toma la forma de un cilindro con el mismo diámetro que el de la proa; finalmente, se tiene la popa que lleva la forma idéntica a la de la proa, lo que nos ayuda además de vencer la resistencia al avance a ubicar los pasajeros cómodamente.

Se empieza por la proa, la cual es una semi-esfera de 8.0 pies de diámetro, o lo que es lo mismo 4.00 pies de radio, y usa la siguiente fórmula.

$$V_{\text{PROA}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{2} \quad [\text{pies}^3] \quad (3.2)$$

Se divide entre dos, ya que solo se usará un hemisferio de la esfera, es decir solo la mitad. Al introducir valores numéricos a la fórmula 3.2 se obtiene lo siguiente:

$$V_{\text{PROA}} = \frac{\frac{4}{3}\pi(4.00)^3}{2} = 134.04 \text{ pies}^3$$

Ahora, se calcula el cuerpo de popa que es de la misma forma que el de la proa, por tanto; el volumen de la popa es de:

$$V_{\text{PROA}} = 134.04 \text{ pies}^3$$

Finalmente, se debe de calcular el cuerpo medio del sumergible. El volumen del cuerpo medio se lo puede calcular ya que se conoce los volúmenes de proa y popa además del volumen total del sumergible. Por tanto el volumen del cuerpo medio es:

$$V_{\text{MEDIO}} = V_{\text{SUMERGIBLE}} - (V_{\text{PROA}} + V_{\text{POPA}}) \quad [\text{pies}^3] \quad (3.3)$$

Luego de plantear la fórmula se procede a introducir los valores numéricos y se calcula el volumen del cuerpo medio:

$$V_{\text{MEDIO}} = [808 + (134.04 + 134.04)] \text{pies}^3 = 539.2 \text{ pies}^3$$

Una vez obtenido el volumen del cuerpo medio y conociendo el radio que es el mismo de la proa y de la popa, se calcula la longitud que debe de tener esta parte del sumergible. La fórmula que se obtiene para dicho cálculo es la siguiente:

$$L = \frac{V_{\text{MEDIO}}}{\pi r^2} \quad [\text{pies}] \quad (3.4)$$

A través de ésta fórmula se puede calcular la longitud del cuerpo medio, que será necesario para calcular la eslora total del sumergible, lleva los siguientes valores numéricos:

$$L = \frac{539.2 \text{ pies}^3}{\pi * (4.00 \text{ pies})^2} = 10.74 \text{ pies}$$

Con la longitud del cuerpo medio se procede a calcular el resto de longitudes que tiene el sumergible. Dichos valores son conocidos, ya que la longitud de la proa es le mismo radio, por tanto se puede decir que las longitudes de proa y de popa son iguales, entonces se puede concluir que la eslora del sumergible es:

$$L_{\text{TOTAL}} = L_{\text{PROA}} + L_{\text{MEDIO}} + L_{\text{POPA}} \quad [\text{pies}] \quad (3.5)$$

Entonces al llevar a cabo el cálculo definitivo, se tiene lo siguiente:

$$L_{\text{TOTAL}} = [4.0 + 10.74 + 4.0] \text{ pies} = 18.74 \text{ pies}$$

Finalizando, se tiene la siguiente distribución general del sumergible.

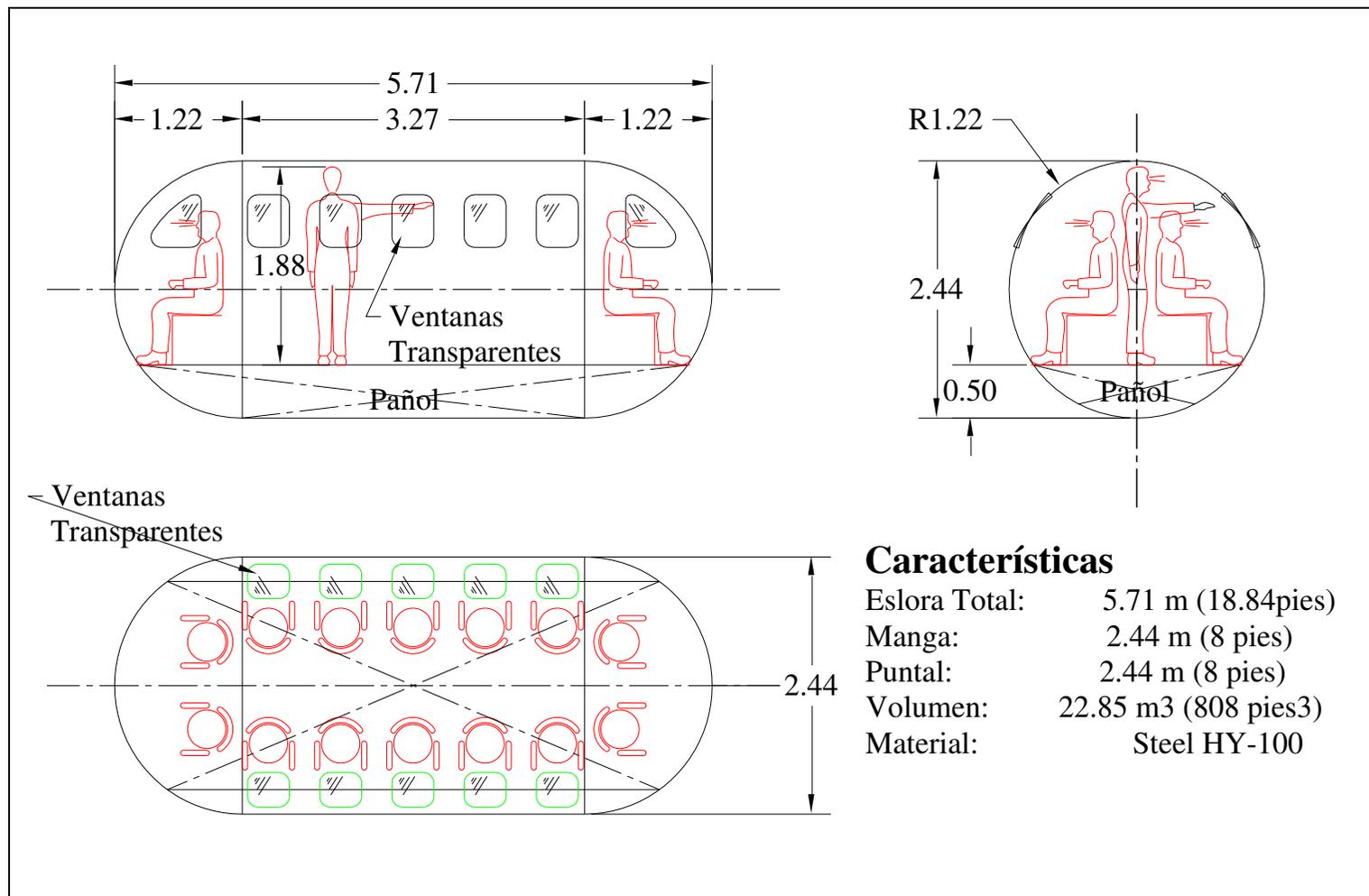


Figura 3.4.- Disposición general del sumergible. [20].

Como se puede observar en la figura 3.3, se tiene un plano de disposición general del sumergible, hay que anotar que se ha dimensionado solo el sumergible, aún faltan los tanques de lastre o de inmersión.

Para el dimensionamiento de los tanques de inmersión se parte del hecho de tener un volumen del sumergible de  $22.85 \text{ m}^3$  por tanto un desplazamiento de 23.42 ton. Este será el desplazamiento que deben llevar los tanques de inmersión.



Figura 3.5.- Proyecto CASUM de España. [9].

Basado en la distribución mostrada en la referencia [9], en donde la habitabilidad es un casco y los tanques de inmersión son otros, como se muestra en la figura 3.5, en nuestro diseño se hará lo mismo, es decir los

tanques de inmersión del sumergible estarán ubicados al exterior del casco de habitabilidad. Adicionalmente, se menciona las dimensiones de los tanques de inmersión, pero no se mostrará el cálculo hasta el sub-capítulo 3.4, ya que dichos tanques pertenecen al sistema de inmersión.

Las dimensiones de los tanques de inmersión son:

Radio de cada tanque: 0.84 m.

Longitud: 5.71 m, la misma eslora que la del sumergible.

La forma de estos tanques son de semiesféricos en los extremos y cilíndrico en el cuerpo medio, es decir de la misma forma que la del sumergible, pero con distintas medidas.

Como se observa pueden ir a bordo del sumergible catorce personas correctamente sentadas, pero se excluye uno ya que se puede decir que es el piloto o el intérprete que guía el sumergible. Mientras que los guías pueden ir de pie desplazándose por el pasillo mientras explican sobre el recorrido. Todo esto hace que el total de personas a bordo llegue a un número de 17, a pesar de que el sumergible fue calculado para un número de 18, esto se debe a que bajo la estiba estarán instaladas las bombas de lastre, que se usarán en la maniobra de inmersión.

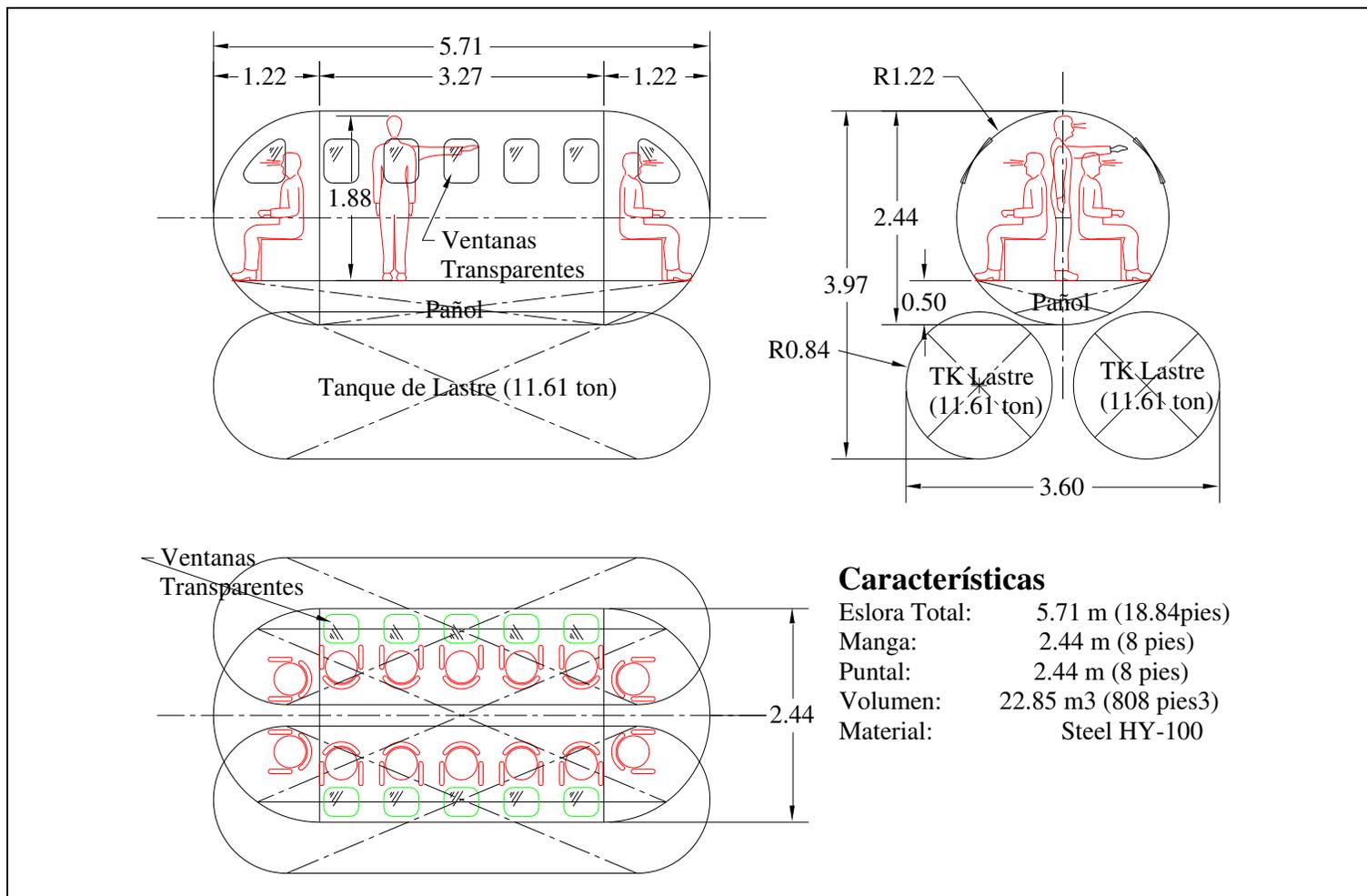


Figura 3.6.- Distribución del sumergible adicionando los tanques. [20].

### 3.2. Dimensionamiento Estructural.

Primeramente se realizará un breve análisis del uso de materiales en este tipo de vehículos. Luego, se procederá a modelar la embarcación como una viga, esto permitirá conocer los niveles de esfuerzos en la estructura del sumergible.

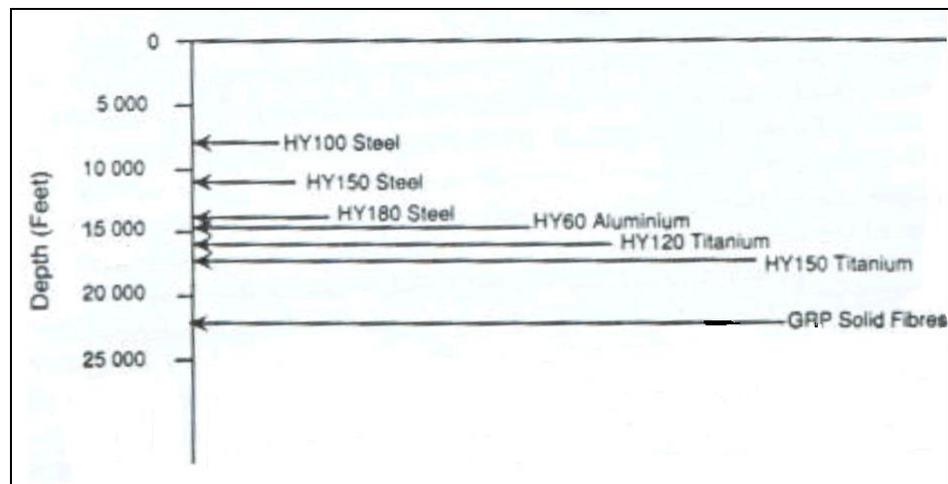


Figura 3.7.- Uso típico de materiales para submarinos. [5].

Se observa en la Figura 3.7 que el uso de los materiales está en función de la profundidad de operación. Para nuestro caso que se trata de un sumergible de turismo que operará entre los 45 y 50 metros de profundidad es decir entre 147 y 164 pies de profundidad se observa que lo ideal es el uso del HY 100 Steel.

Este material es muy usado por la US Navy Ships para la construcción de sus sumergibles y vehículos de tipo naval militar [2]. En la tabla IV se muestra las principales características del Steel HY-100.

$\sigma_y$	1,00E+05 psi
	7045,468636 Kg/cm <sup>2</sup>
E	2,90E+07 psi
	2043185,905 Kg/cm <sup>2</sup>
$\rho$	0,286 lb/in <sup>3</sup>
	7916,5 Kg/m <sup>3</sup>

Tabla IV.- Características del Steel HY-100. [2].

El proceso que se usará para el dimensionamiento estructural será el siguiente: Basado en la distribución general se procede a escantillonar el sumergible, y se calcula el módulo seccional de la cuaderna maestra. Esto permite luego comparar con los resultados que se obtengan al analizar y modelar el sumergible como una viga, como lo sugiere la referencia [2] y se muestra en la figura 3.8.

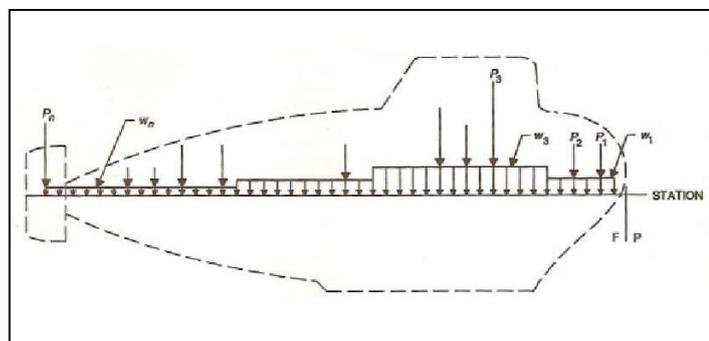


Figura 3.8.- Diagrama de distribución de pesos típica. [2].

En el análisis antes mencionado se debe recordar que se hace un análisis de la estructura primaria, secundaria y terciaria. En la figura 3.10 se muestra la configuración estructural que es comparada, se asume que hasta el momento estos estructurales cumplen con el mínimo de exigencias para responder a las cargas de trabajo.

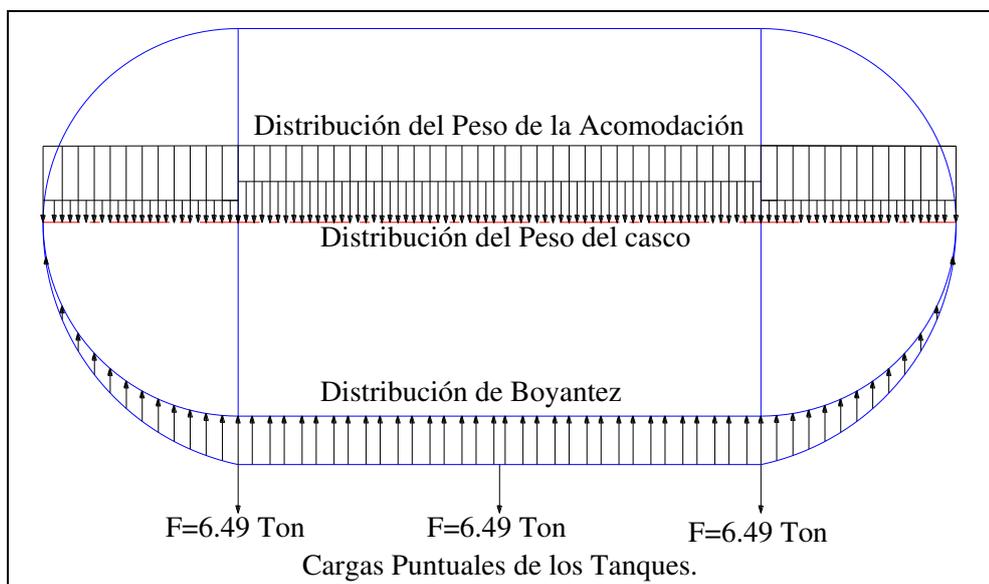


Figura 3.9.- Modelo de las distribución de carga en el casco del sumergible.

[20]

Para el análisis estructural se usa el modelo mostrado en la figura 3.9, en donde se muestra la distribución de cargas en el sumergible. Esta distribución de cargas proviene de la combinación de la boyantes, peso del casco, peso de la acomodación y de las cargas puntuales que produce la unión de los tanques de inmersión.

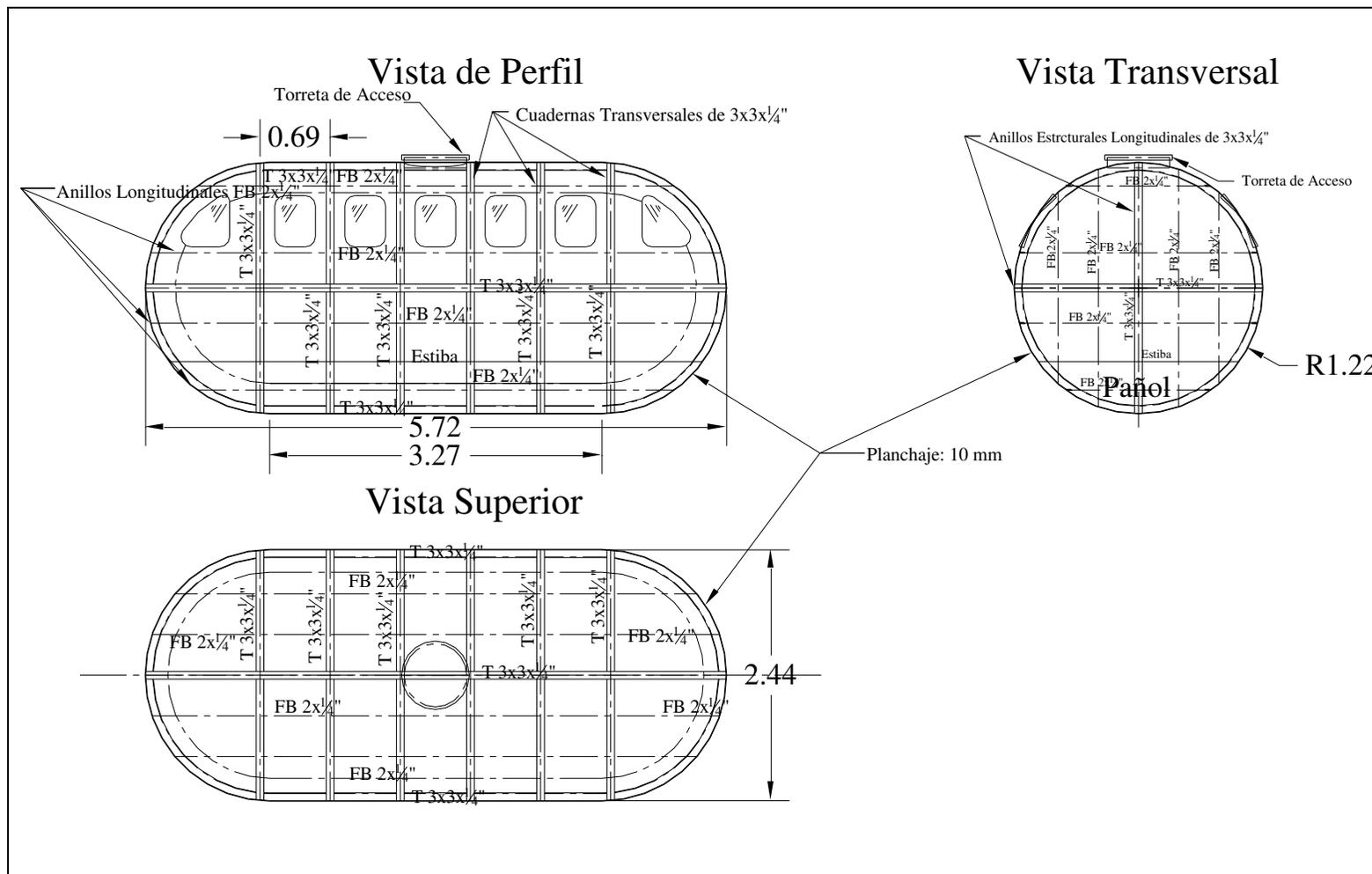


Figura 3.10.- Arreglo Estructural del sumergible. [20].

Para facilitar el análisis estructural del sumergible se debe mencionar que:

- Como se puede apreciar la distribución se asume simétrica ya que la forma del sumergible lo permite, por tanto se analiza solo hasta la mitad de la eslora y el resto es simétrico.
- La forma del casco en los extremos es esférico y a 1.22 m de cada extremo es cilíndrico. Por tanto, se describe a través de una ecuación de cónicas la forma del casco y se asume como una función constante la parte cilíndrica.

Se debe recordar que para encontrar la carga se usa el siguiente principio descrito matemáticamente:

$$\text{Carga} = \text{Pesos} - \text{Boyantez}^* \quad [\text{ton/m}] \quad (3.6)$$

Se analiza primero la distribución de pesos en el primer tramo, es decir, en los extremos, de la distribución de peso del casco, se tiene:

$$w_1(x) = -0.00359x + 0.6137 \quad [\text{ton/m}] \quad (3.7)$$

De la distribución de pesos de acomodación se tiene una constante:

$$w_2(x) = 0.137 \quad [\text{ton/m}] \quad (3.8)$$

\* : El análisis de pesos se puede observar más detalladamente en los anexos.

Finalmente, para este tramo, se tiene la distribución de la boyantez:

$$w_3(x) = \pi(1.22^2 - (x - 1.22)^2)\gamma \quad [\text{ton/m}] \quad (3.9)$$

Al sumar las dos primeras ecuaciones y luego restarle la ecuación (3.9), se tiene lo siguiente:

$$w(x) = -0.00359x + 0.7507 - \pi(1.22^2 - (x - 1.22)^2); \quad 0 \leq x \leq 1.22$$

[ton/m] (3.10)

Ahora para el tramo que va desde el inicio de la parte cilíndrica hasta la sección media del sumergible, se tienen las siguientes ecuaciones:

Para el peso del casco:

$$w_1(x) = 0.6093 \quad [\text{ton/m}] \quad (3.11)$$

Para la distribución de la acomodación:

$$w_2(x) = 0.257 \quad [\text{ton/m}] \quad (3.12)$$

Para la boyantez:

$$w_3(x) = 4.6759 \quad [\text{ton/m}] \quad (3.13)$$

Ahora en este tramo se aumentan las cargas concentradas por los tanques de inmersión, con lo que se tiene al final la siguiente ecuación:

$$w(x) = 6.49\delta(x - 1.22)^{-1} + 6.49\delta(x - 2.855)^{-1} - 3.8106; \quad 1.22 \leq x \leq 2.855$$

[ton/m]      (3.14)

Al integrar estas ecuaciones se tiene el cálculo del esfuerzo cortante  $V(x)$ :

$$V(x) = \int (-0.00359x + 0.7507 - \pi(1.22^2 - (x - 1.22)^2)) dx$$

$$V(x) = \int (6.49\delta(x - 1.22)^{-1} + 6.49\delta(x - 2.855)^{-1} - 3.8106) dx$$

[ton]      (3.15)

Luego de la integración se tiene lo siguiente:

$$V(x) = 1.047x^3 - 3.8344x^2 - 8.6x + 1.9015; \quad 0 \leq x \leq 1.22$$

$$V(x) = 6.49\delta(x - 1.22)^0 + 6.49\delta(x - 2.855)^0 - 3.8106(x - 1.22) \quad 1.22 < x < 3.855$$

[ton]      (3.16)

Se integra nuevamente y se obtiene el Momento Flector:

$$\begin{aligned}
 M(x) &= -0.2617x^4 + 1.2781x^3 + 4.3x^2 - 1.9015x; & 0 \leq x \leq 1.22 \\
 M(x) &= -6.49\delta(x - 1.22) - 6.49\delta(x - 2.85) + 1.905x; & 1.22 \leq x \leq 3.855
 \end{aligned}$$

[ton-m] (3.17)

Se implementa las ecuaciones 3.16 y 3.17 en una hoja electrónica y se obtiene como resultado la tabla 3.1. Y al graficarlas se obtienen las figuras 3.10 y 3.11.

En la tabla V se obtiene el máximo momento flector, que es que se usa para el cálculo del esfuerzo primario a través de la siguiente fórmula:

$$\sigma_{\text{prim}} = \frac{M}{Z} \quad [\text{Kg/cm}^2] \quad (3.17)$$

En donde:

M: Es el máximo momento flector calculado. Se usa el de mayor magnitud.

z: Es el Módulo Seccional.

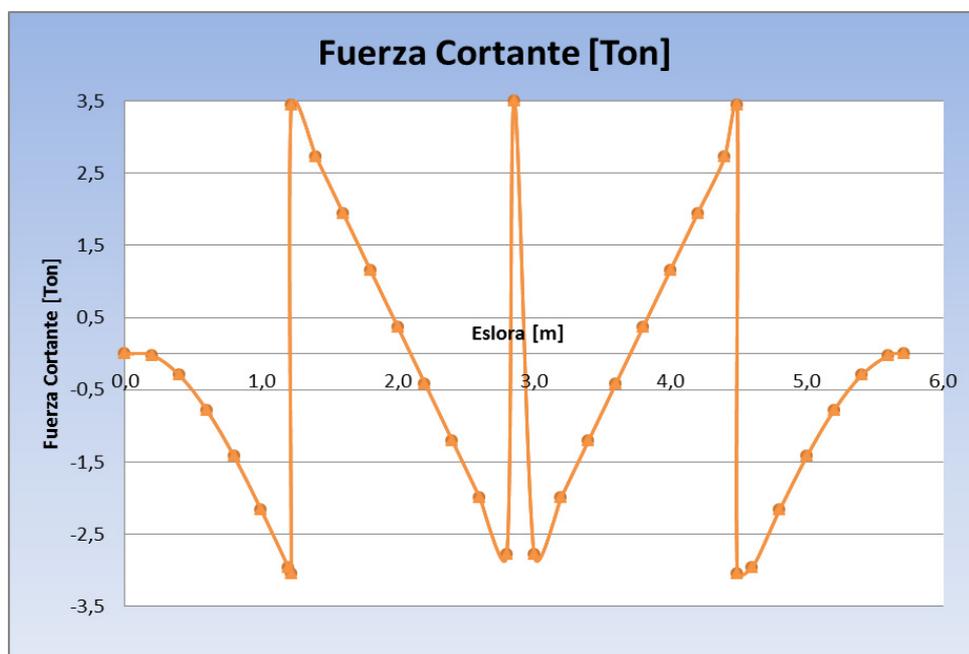


Figura 3.11.- Gráfica de la Fuerza cortante. [20].

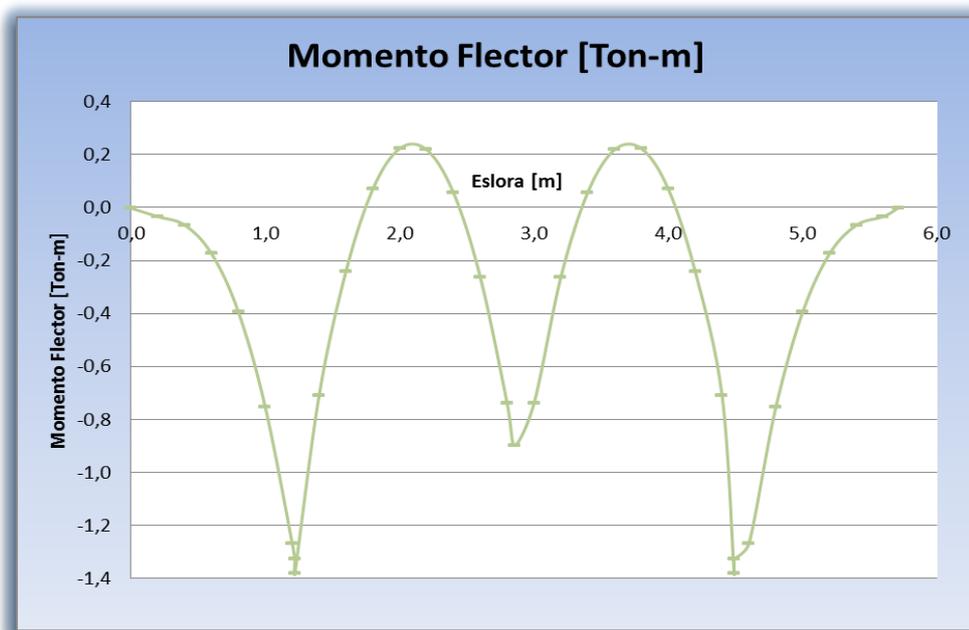


Figura 3.12.- Gráfica del Momento Flector. [20].

<b>X</b>	<b>Boyantez/L</b>	<b>Pcasco/L</b>	<b>Pacomod/L</b>	<b>Peso Total</b>	<b>Carga</b>	<b>Fuerza Cortante</b>	<b>Momento Flector</b>
<b>[m]</b>	<b>[ton/m]</b>	<b>[ton/m]</b>	<b>[ton/m]</b>	<b>[ton/m]</b>	<b>[ton/m]</b>	<b>[ton]</b>	<b>[ton-m]</b>
0,00	0,0000	0,6137	0,138	0,751	-0,751	0,000	-0,002
0,20	1,4074	0,6130	0,138	0,751	0,657	-0,021	-0,034
0,40	2,5635	0,6123	0,138	0,750	1,814	-0,299	-0,066
0,60	3,4683	0,6115	0,138	0,749	2,719	-0,782	-0,174
0,80	4,1218	0,6108	0,138	0,749	3,373	-1,422	-0,395
1,00	4,5239	0,6101	0,138	0,748	3,776	-2,166	-0,754
1,20	4,6747	0,6094	0,138	0,747	3,928	-2,966	-1,267
1,22	4,6759	0,6093	0,138	0,747	3,929	-3,047	-1,327
1,22	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	3,443	-1,381
1,40	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	2,734	-0,709
1,60	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	1,947	-0,241
1,80	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	1,160	0,069
2,00	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	0,373	0,223
2,20	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	-0,415	0,218
2,40	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	-1,202	0,057
2,60	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	-1,989	-0,262
2,80	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	-2,776	-0,739
2,855	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	3,497	-0,898
3,00	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	-2,776	-0,739
3,20	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	-1,989	-0,262
3,40	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	-1,202	0,057
3,60	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	-0,415	0,218
3,80	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	0,373	0,223
4,00	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	1,160	0,069
4,20	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	1,947	-0,241
4,40	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	2,734	-0,709
4,49	4,6759	0,6093	0,257	0,866	3,810	3,443	-1,381
4,49	4,6759	0,6093	0,138	0,747	3,929	-3,047	-1,327
4,60	4,6379	0,6094	0,138	0,747	3,891	-2,966	-1,267
4,80	4,3740	0,6101	0,138	0,748	3,626	-2,166	-0,754
5,00	3,8588	0,6108	0,138	0,749	3,110	-1,422	-0,395
5,20	3,0923	0,6115	0,138	0,749	2,343	-0,782	-0,174
5,40	2,0744	0,6123	0,138	0,750	1,324	-0,299	-0,066
5,60	0,8052	0,6130	0,138	0,751	0,055	-0,021	-0,034
5,71	0,0000	0,6137	0,138	0,751	-0,751	0,000	-0,002

Tabla V.- Implementación para el cálculo de Carga, Fuerza Cortante y Momento Flector. [20].

Ahora se muestra el cálculo hecho para la sección maestra, primeramente se usa estos escantillones para calcular el módulo seccional que luego es comparado con el módulo obtenido a través del método antes descrito. En la figura 3.13 se muestra la sección maestra del sumergible con todos sus escantillones.

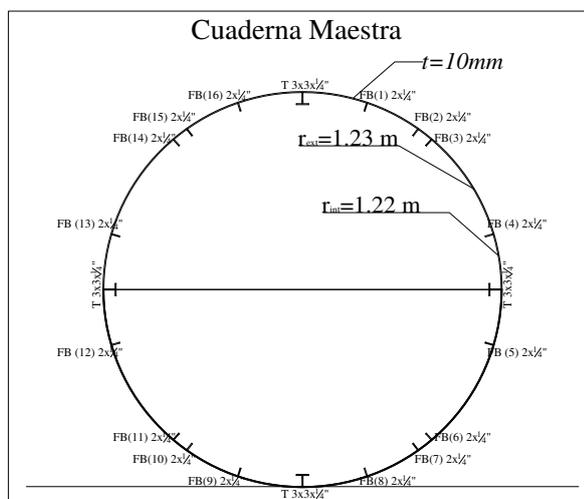


Figura 3.13.- Cuaderna maestra del sumergible. [20].

La tabla VI presenta un resumen de los cálculos de inercia y de módulo seccional de la sección media mostrada en la figura 3.13. Como se esperaba el módulo seccional calculado  $5.238\text{E}+04 \text{ cm}^3$ , es mucho mayor que el exigido en el cálculo analítico,  $1.29\text{E}+02 \text{ cm}^3$ , esto se debe a que en embarcaciones de pequeñas esloras, la flexión de la viga no es de importancia primaria, en este rango de eslora, los comportamientos secundario y terciario son más importantes [17].

ELEMENTO	z (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	A*z (cm <sup>3</sup> )	Ig (cm <sup>4</sup> )	IT (cm <sup>4</sup> )
Planchaje	122,00	769,69	93902,20	5775081,78	17231150,72
Perfil T en cruja	5,33	8,64	46,07	21,22	266,92
Perfil T en Bb	122,00	8,64	1054,08	21,22	128618,98
Perfil T en Eb	122,00	8,64	1054,08	21,22	128618,98
FB 1	8,98	3,00	26,94	5,66	247,67
FB 2	24,70	3,00	74,09	3,92	1833,71
FB 3	31,02	3,00	93,07	3,49	2890,60
FB 4	88,42	3,00	265,25	0,56	23453,68
FB 5	155,00	3,00	465,00	0,56	72075,56
FB 6	212,94	3,00	638,82	3,49	136033,82
FB 7	219,26	3,00	657,78	3,92	144228,76
FB 8	234,98	3,00	704,94	5,66	165652,46
FB 9	234,98	3,00	704,94	5,66	165652,46
FB 10	219,26	3,00	657,78	3,92	144228,76
FB 11	212,94	3,00	638,82	3,49	136033,82
FB 12	155,00	3,00	465,00	0,56	72075,56
FB 13	88,42	3,00	265,26	0,56	23454,85
FB 14	31,02	3,00	93,06	3,49	2890,21
FB 15	24,70	3,00	74,10	3,92	1834,19
FB 16	8,98	3,00	26,94	5,66	247,58
Perfil T en cruja	238,63	8,64	2061,76	21,22	492019,77
SUMATORIAS		852,25	103970,00	5775221,16	19073509,06
EJE NEUTRO		z=	121,99	cm	
		Ien=	6,39E+06	cm <sup>4</sup>	
CALCULADO		MS=	5,23E+04	cm <sup>3</sup>	

Tabla VI.- Cálculo de la Inercia y el Módulo Seccional. [20].

$\sigma_y$	7045,5	Kg/cm <sup>2</sup>
F.S =	1,5	
$\sigma_{trabajo}$ =	4697	Kg/cm <sup>2</sup>
Momento Max	1,381	Ton-m
MS requerido =	2,94E-05	m <sup>3</sup>
MS requerido =	2,94E+01	cm <sup>3</sup>
$\sigma_{prim}$ =	46,97	Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla VII.- Resumen de resultados. [20].

### Cálculo de los esfuerzos secundarios y terciarios.

Para el cálculo de los esfuerzos secundarios se usa el panel mostrado en la figura 3.14, donde además de la ubicación de los elementos se muestra la distancia entre elementos.

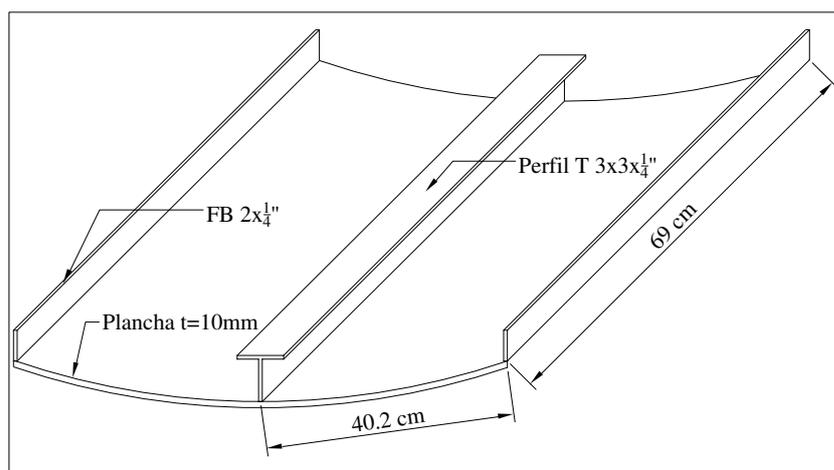


Figura 3.14.- Panel de plancha en el fondo. [20].

El máximo momento en este tipo de panel se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$M_{\text{máx}} = \frac{wl^2}{12} \text{ [ton-m]} \quad (3.18)$$

Donde:

w : Es la carga por unidad de longitud [ton/m].

l : Es la distancia entre cuaderna que es de l = 69 cm [m]

$$w = ps \quad \text{[ton/m]} \quad (3.19)$$

Donde:

$p$  : Presión de trabajo [ton/m<sup>2</sup>].

$s$  : Ancho del panel [m].

$$p = \gamma h \quad (3.20)$$

Donde:

$h$  : La profundidad de operación,  $h=50$  m.

La sección transversal de la viga que se está modelando es la que se muestra en la figura 3.15.

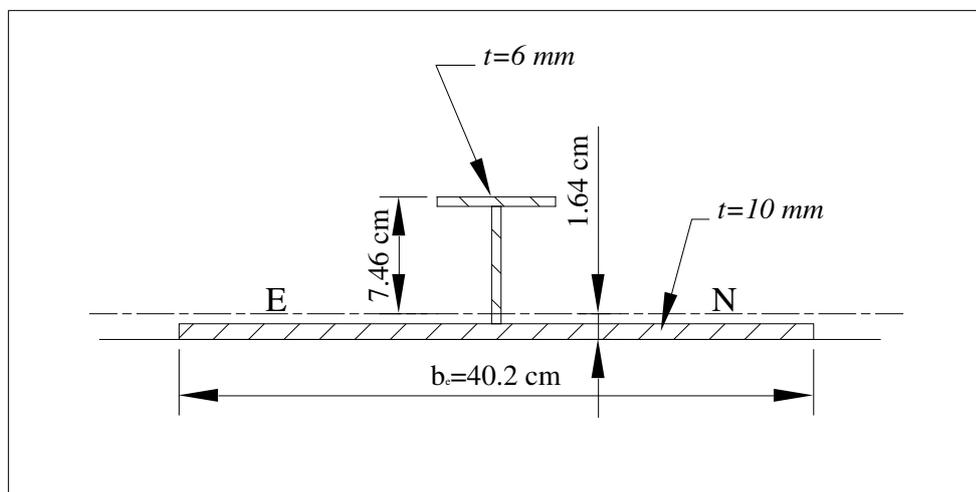


Figura 3.15. Modelo de la viga, panel transversal. [20].

Se observa que en la plancha del fondo se somete a tensión, por tanto, en el ala se tiene compresión y es por eso que el esfuerzo calculado se debe restar, cuando aún se está en el análisis de los secundarios.

En la tabla VIII se calcula la Inercia y la distancia del eje neutro a la fibra más alejada.

Elemento	Z [cm]	A [cm <sup>2</sup> ]	Az [cm <sup>3</sup> ]	Az <sup>2</sup> [cm <sup>4</sup> ]	Ig [cm <sup>4</sup> ]
Plancha	0,50	40,20	20,10	10,05	3,35
Alma	4,75	4,50	21,38	101,53	21,09
Ala	8,80	4,50	39,60	348,48	0,14
Suma		49,20	81,08	460,06	24,58
		Z	1,648	cm	
		I	351,039	cm <sup>4</sup>	

Tabla VIII.- Cálculo de la Inercia y la distancia del eje neutro a la fibra más alejada. [20].

Al implementar estas fórmulas en una hoja electrónica se tiene la siguiente tabla de resultados.

Cálculo de Esfuerzos Secundarios	
$\gamma$	1,025 ton/m <sup>3</sup>
h	50 m
s	0,402 m
l	0,690 m
p	51,250 ton/m <sup>2</sup>
w	20,603 ton/m
M	0,817 ton-m
z	0,0165 m
I	3,5104E-06 m <sup>4</sup>
$\sigma_{\text{fondo}}$	383,7 Kg/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{ala}}$	1735,2 Kg/cm <sup>2</sup>

Tabla IX.- Cálculo de Esfuerzos Secundarios. [20].

Como se puede observar los esfuerzos secundarios son de mayor magnitud por ende de mayor importancia que los primarios.

Ahora se analiza los esfuerzos terciarios, a través de la siguiente fórmula:

$$\sigma_{\text{terc}} = kp \left( \frac{b}{t} \right)^2 \quad [\text{ton/cm}^2] \quad (3.21)$$

En donde  $k$ , se obtiene de la tabla 4.39 de la referencia [13]. Y se muestra en la figura 3.16.

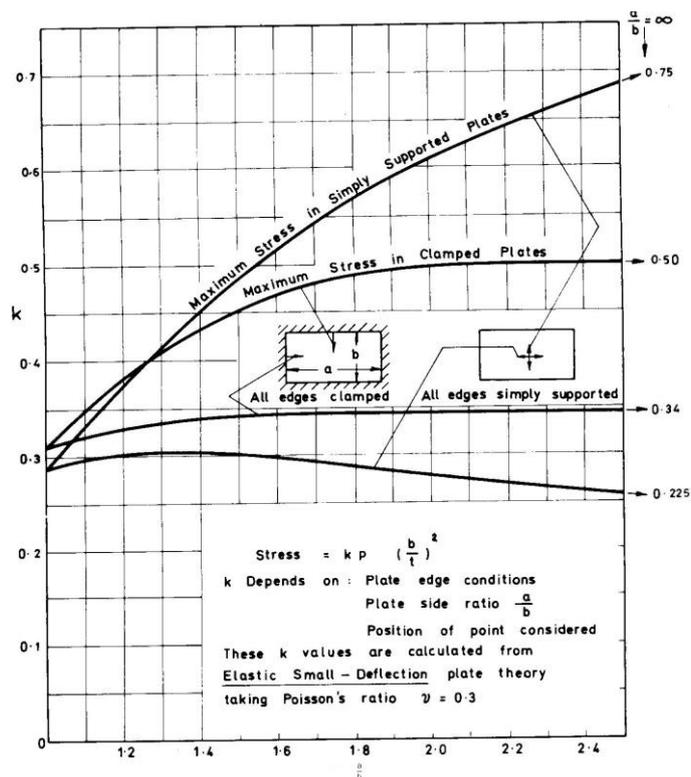


Figura 3.16.- Curva para el cálculo de  $k$  en función de  $a/b$ .

Se usa el mismo panel y sus dimensiones que el usado en los secundarios pero sin considerar los refuerzos, es decir solo plancha. Al implementar la fórmula 3.21 en una hoja electrónica, se tiene la tabla X.

Cálculo de esfuerzos terciarios		
a	0,69	m
b	0,4020	m
a/b	1,7164	
t	0,010	m
k	0,34	
p	51,250	ton/m2
$\sigma$	28159,5	ton/m2
$\sigma_{\text{fondo}}$	2815,9	Kg/cm2

Tabla X.- Cálculo de Esfuerzos Terciarios. [20].

Como se puede observar y comparar, el esfuerzo terciario es el de mayor importancia en este tipo de embarcación.

El máximo esfuerzo puede calcularse a través de la siguiente fórmula

Ahora, se deben analizar el efecto de los tres esfuerzos y encontrar un factor de seguridad.

$$\begin{aligned}
 FS_{\text{prim}} &= \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{prim}}} \\
 FS_{\text{sec}} &= \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{prim}} + \sigma_{\text{sec}}} \\
 FS_{\text{terc}} &= \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{prim}} + \sigma_{\text{sec}} + \sigma_{\text{terc}}}
 \end{aligned}
 \tag{3.22}$$

Al implementar estas ecuaciones en una hoja electrónica, se tiene los siguientes resultados:

$FS_{\text{prim}}$	150.00
$FS_{\text{sec}}$	5.04
$FS_{\text{terc}}$	2.46

Tabla XI.- Factores de seguridad para los esfuerzos. [20].

Como se puede observar en la tabla XI, se tienen los resultados evidenciando que los esfuerzos primarios son los que menos problemas pueden causar, los secundarios terminan con un factor de seguridad 5 que es un valor intermedio entre los obtenidos. Finalmente, los terciarios caen a un factor de seguridad de 1.87 que es el más bajo de los tres con lo que se puede concluir que uno de los problemas estructurales puede ser de origen de esfuerzo terciario.

### **Análisis de las ventanas.**

En el análisis de las ventanas se tomará como dimensiones principales 0.604 m de altura y 0.40 m de ancho. Estas dimensiones han sido tomadas en base a la acomodación hecha en la arquitectura del casco, y espaciamento. El espesor será de 1 cm. Como se ha visto en el análisis anterior el esfuerzo terciario es el más crítico, por tanto se hace un análisis de esfuerzos terciarios para las ventanas y luego se compara con el esfuerzo de fluencia

del acrílico, para conocer que tan segura puede ser la ventana, soportando esa presión.

A continuación se presentan algunas propiedades de material.

Propiedades Físico-químicas.

Los acrílicos pueden estar expuestos a la intemperie por largos períodos de tiempo y no demuestran cambios significativos en color o propiedades físicas. La transmisión de luz visible es del 92%, siendo igual a la del vidrio óptico.

Para uso general una resistencia de 0.2 a 0.5 Libra-pie/pulgada, aproximadamente 6 veces mayor a la del vidrio. Presenta un esfuerzo de fluencia de  $840 \text{ Kg/cm}^2$ . Es resistente al agua, álcalis, ácidos diluidos, ésteres simples, hidrocarburos alifáticos, pero no se recomienda para disolventes orgánicos, acetonas, hidrocarburos clorados y aromáticos. Tiene buenas propiedades aislantes y resistencia al paso de la corriente.



Figura 3.17.- Muestra de acrílico transparente. [28]

Una vez conocidas las propiedades del acrílico se proceden a realizar los cálculos, se asumen los costados empotrados. Y se usa también la tabla mostrada en la figura 3.16.

Como se conoce, el esfuerzo de fluencia es de  $840 \text{ Kg/cm}^2$ , se puede calcular el factor de seguridad. Que se muestra en la tabla XII con el resto de resultados.

<b>Resistencia de la ventana</b>		
a	0,6042	M
b	0,4	M
a/b	1,5105	
t	0,010	M
k	0,34	
p	0,340	ton/m <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{trab}}$	185,0	ton/m <sup>2</sup>
$\sigma_{\text{trab}}$	18,5	Kg/cm <sup>2</sup>
$\sigma_y$	840	Kg/cm <sup>2</sup>
FS	45,42	

Tabla XII.- Análisis de las ventanas. [20].

Cabe mencionar que los tanques de lastrado toman la misma configuración que la del sumergible, por tanto se asume que si coexisten problemas estructurales con el sumergible tampoco los puede haber con los tanques.

### **3.3. Estimación de la Resistencia al avance.**

Para realizar esta estimación se usará el método denominado: factor de forma de Gilmer and Jonson y el coeficiente de fricción ITTC, mostrado en [22]. En éste caso no se buscará una potencia en especial sino que se elaborará una curva que estará en función de la velocidad.

Esta curva, además de mostrarnos matemáticamente la función velocidad-resistencia, en la práctica nos permite conocer el valor del arrastre que produce el sumergible, concluyendo sobre el uso o no de toberas en la embarcación de superficie.

Primeramente se muestra el algoritmo y luego se procede a elaborar los cálculos para nuestro sumergible en una hoja electrónica.

#### **Datos de entrada.**

Los datos de entrada deben ser introducidos en unidades inglesas. Primeramente se deben de tomar en cuenta las constantes; como la

densidad  $\rho$  del agua salada. La velocidad dada en  $\frac{\text{pie}}{\text{seg}}$ , que se denominará  $V_{(i)}$ , luego debe ser convertida en nudos con un factor de 1.69, que será  $U_{(i)}$ .

Otros datos de entrada será la eslora total del sumergible LOA y la manga B en pies, el coeficiente de holgura  $C_A$ , que para nuestro caso, según la forma es de un valor  $C_A = 0.0004$  y el factor de margen propulsivo PMF que es de valor de  $\text{PMF} = 1.1$ , según la referencia [22].

### **Cálculo de la superficie mojada.**

Otro de los datos que se necesitará introducir al algoritmo es la superficie del sumergible, tanto la del sumergible como la de los tanques externos o de inmersión, este parámetro se denominará S.

Este parámetro se lo calcula de la siguiente manera: La forma del sumergible es esférica en los extremos y cilíndrica en el cuerpo medio, por tanto la superficie será calculado a través de las siguientes fórmulas:

$$S = S_{\text{SUM}} + S_{\text{TANQ}} \quad [\text{pies}^2] \quad (3.23)$$

En donde:

$S_{\text{SUM}}$ : Superficie del sumergible [ $\text{pies}^2$ ].

$S_{\text{TANQ}}$ : Superficie de los tanques de lastre [pies<sup>2</sup>].

Para calcular la superficie del sumergible se usa la siguiente fórmula:

$$S_{\text{SUM}} = S_{\text{SUMEXT}} + S_{\text{SUMMED}} \quad [\text{pies}^2] \quad (3.24)$$

En donde:

$S_{\text{SUMEXT}}$ : Superficie de los extremos del sumergible y la fórmula es

$$S_{\text{SUMEXT}} = 4\pi \left(\frac{B}{2}\right)^2 \quad [\text{pies}^2] \quad (3.25)$$

$$S_{\text{SUMEXT}} = 4\pi \left(\frac{8}{2}\right)^2 \text{ pie}^2 = 201.056 \text{ pie}^2$$

$S_{\text{SUMMED}}$ : Superficie del cuerpo medio del sumergible, y se lo calcula así:

$$S_{\text{SUMMED}} = 2\pi \left(\frac{B}{2}\right) L \quad [\text{pies}^2] \quad (3.26)$$

$$S_{\text{SUMMED}} = 2\pi \left(\frac{8}{2}\right) 10.72 \text{ pie}^2 = 269.42 \text{ pie}^2$$

Entonces ya se puede aplicar la fórmula 3.7.

$$S_{\text{SUM}} = (201.056 + 269.42) \text{ pie}^2 = 470.48 \text{ pie}^2$$

Si se aplica el mismo procedimiento para los tanques de lastre se tiene la siguiente superficie:

$$S_{\text{TANQ}} = 324.97 \text{ pie}^2$$

Lo que hace un total de superficie mojada:

$$S = (470.48 + 324.97) \text{ pie}^2 = 795.44 \text{ pie}^2$$

Al final ésta será la superficie que hay que introducir como dato en el algoritmo.

### Algoritmo

Se comienza por el cálculo del factor de forma de Gilmer and Johnson a través de la siguiente fórmula:

$$\text{formfac} = 1 + 0.5 * \frac{B}{LOA} + 3 * \left( \frac{B}{LOA} \right)^3 \quad (3.27)$$

Luego se calcula la resistencia de correlación y holgura a través de la siguiente fórmula:

$$R_A = \frac{1}{2} * \rho * C_A * U_{(i)}^2 * S \quad [\text{lb}] \quad (3.28)$$

Después tenemos que calcular la resistencia viscosa, a través de la siguiente fórmula:

$$R_V = \frac{1}{2} * \rho * S * CF * \text{formfac} * U_{(i)}^2 \quad [\text{lb}] \quad (3.29)$$

En donde se tiene que calcular también el Número de Reynold que se lo calcula con la siguiente fórmula:

$$RN = \frac{LOA * U_{(i)}}{1.2817e^{-5}} \quad (3.30)$$

Además de requerir el coeficiente de fricción CF, ITTC, que se lo calcula con la siguiente fórmula:

$$CF = \frac{0.075}{(\log_{10}(RN) - 2)^2} \quad (3.31)$$

Con todos estos parámetros calculados se procede a realizar la suma final de la resistencia.

$$R_T = R_A + R_V \quad [lb] \quad (3.32)$$

Luego se calcula la potencia que requiere el sumergible para moverse en función de la velocidad, esto nos permite conocer la potencia que la embarcación de superficie está invirtiendo en remolcar el sumergible. Primero se calcula la potencia del casco desnudo, PEBH. Mediante la siguiente fórmula:

$$PEBH = R_T * U_{(i)} * 0.001818 [HP] \quad (3.33)$$

Luego se calcula la potencia con resistencia por apéndices, PEAPP, que será calculada mediante la siguiente fórmula:

$$PEAPP = 0.30 * PEBH \quad [HP] \quad (3.34)$$

Ahora, se tiene el cálculo de la potencia de casco desnudo PET, con la siguiente fórmula:

$$PET = PEBH + PEAPP \quad [HP] \quad (3.35)$$

Finalmente, se tiene la potencia efectiva EHP , que se la calcula con la siguiente fórmula:

$$EHP = PET * PMF \quad [HP] \quad (3.36)$$

A partir de esta potencia se puede calcular la potencia al eje SHP , pero no será necesario ya que el sumergible no lleva propulsión propia.

Una vez implementado esta formulación en una hoja electrónica, y se presentan los resultados a continuación.

V(i) [nudos]	U(i) [pie/s]	RA [lb]	RN	CF	RV [lb]	RT [lb]	RT [ton]
0,00	0,00	0,000	0,000E+00		0,00	0,00	0,000
0,25	0,42	0,288	6,178E+05	0,005219	2,79	3,08	0,001
0,50	0,85	0,576	1,236E+06	0,004479	9,59	10,16	0,005
0,75	1,27	0,863	1,853E+06	0,004117	19,83	20,69	0,009
1,00	1,69	1,151	2,471E+06	0,003886	33,27	34,42	0,015
1,25	2,11	1,439	3,089E+06	0,003721	49,76	51,20	0,023
1,50	2,54	1,727	3,707E+06	0,003593	69,20	70,92	0,032
1,75	2,96	2,014	4,325E+06	0,003490	91,48	93,50	0,042
2,00	3,38	2,302	4,942E+06	0,003404	116,56	118,86	0,053
2,25	3,80	2,590	5,560E+06	0,003331	144,35	146,94	0,066
2,50	4,23	2,878	6,178E+06	0,003268	174,82	177,70	0,079
2,75	4,65	3,166	6,796E+06	0,003212	207,93	211,09	0,094
3,00	5,07	3,453	7,413E+06	0,003162	243,63	247,08	0,110
3,25	5,49	3,741	8,031E+06	0,003118	281,89	285,63	0,128
3,50	5,92	4,029	8,649E+06	0,003077	322,67	326,70	0,146
3,75	6,34	4,317	9,267E+06	0,003040	365,96	370,27	0,165
4,00	6,76	4,605	9,885E+06	0,003006	411,72	416,32	0,186
4,25	7,18	4,892	1,050E+07	0,002975	459,93	464,82	0,208
4,50	7,61	5,180	1,112E+07	0,002945	510,57	515,75	0,230
4,75	8,03	5,468	1,174E+07	0,002918	563,62	569,09	0,254
5,00	8,45	5,756	1,236E+07	0,002893	619,06	624,81	0,279
5,25	8,87	6,043	1,297E+07	0,002869	676,86	682,91	0,305
5,50	9,30	6,331	1,359E+07	0,002846	737,03	743,36	0,332
5,75	9,72	6,619	1,421E+07	0,002825	799,53	806,15	0,360
6,00	10,14	6,907	1,483E+07	0,002805	864,35	871,26	0,389

Tabla XIII.- Tabla de resultados de resistencia al avance del vehículo sumergible. [20].

Y los resultados se grafican a continuación:

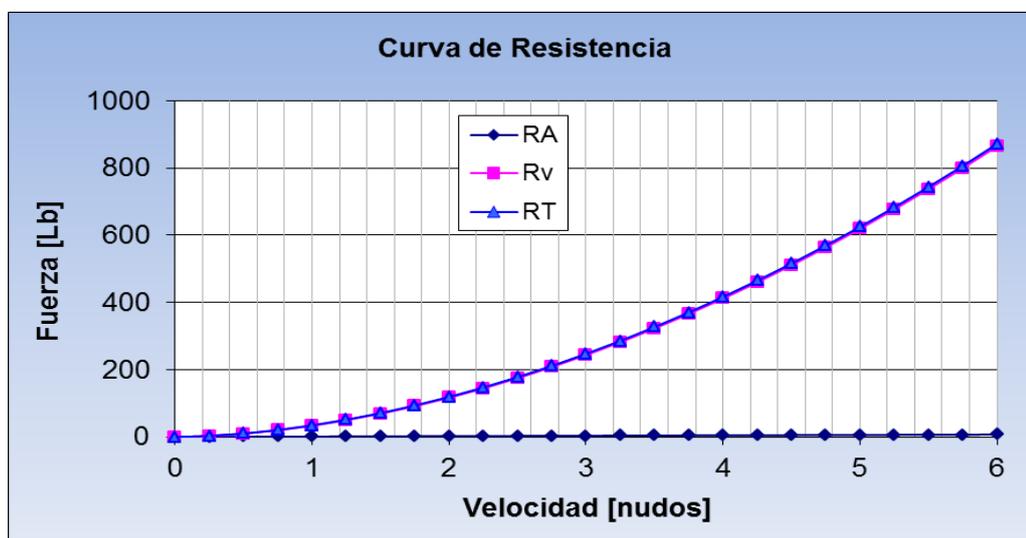


Figura 3.18.- Gráfica de las componentes de las fuerzas de Resistencia. [20].

Como se observa en la Tabla XVIII y en la Figura 3.18, la Resistencia de correlación y holgura se considera despreciable comparada con la Resistencia viscosa y al sumarla aumenta muy poco el nivel de la resistencia total.

En la gráfica 3.19 se observa la resistencia total en función de la velocidad. La velocidad de operación del sumergible será entre uno y dos nudos con lo que genera una resistencia de entre 0.015 y 0.05 ton respectivamente, es decir también despreciable comparado con el arrastre que genera una embarcación de superficie requerida para este trabajo.

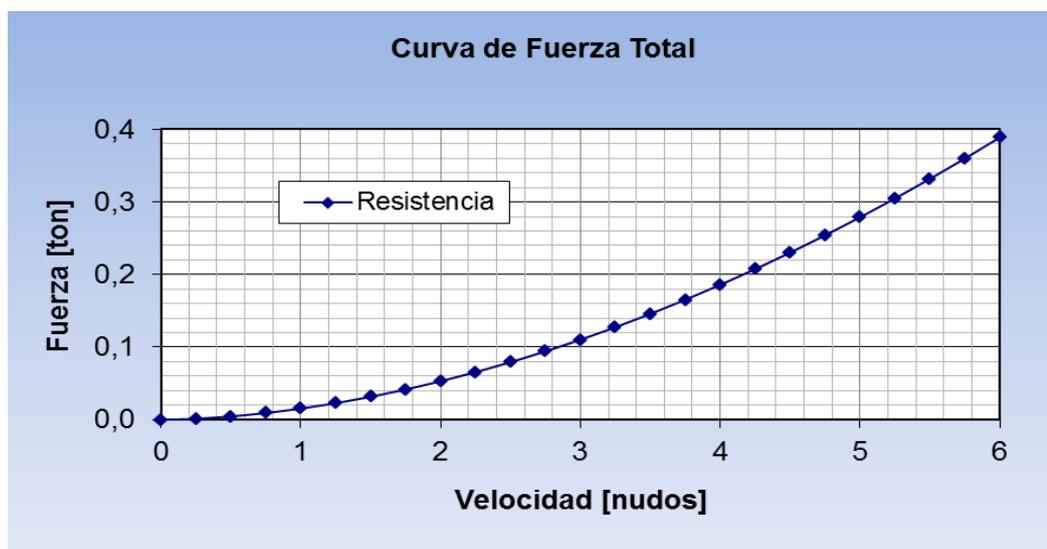


Figura 3.19.- Gráfico de la resistencia total. [20].

Ahora se muestran las gráficas de la implementación para obtener la potencia.

En la tabla XIV se observa la implementación para el cálculo de potencia, en donde se aprecia que para los dos nudos de operación máxima la potencia que el sumergible tomará de la embarcación de superficie es de 1.04 HP, es decir una potencia despreciable para esta velocidad. Esta potencia puede incrementar a medida que la velocidad de arrastre aumente.

V(i) [nudos]	U(i) [pie/s]	PEBH [HP]	PEAPP [HP]	PET [HP]	EHP [HP]
0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
0,25	0,42	0,00	0,001	0,003	0,003
0,50	0,85	0,02	0,00	0,02	0,02
0,75	1,27	0,05	0,01	0,06	0,07
1,00	1,69	0,11	0,03	0,14	0,15
1,25	2,11	0,20	0,06	0,26	0,28
1,50	2,54	0,33	0,10	0,42	0,47
1,75	2,96	0,50	0,15	0,65	0,72
2,00	3,38	0,73	0,22	0,95	1,04
2,25	3,80	1,02	0,30	1,32	1,45
2,50	4,23	1,36	0,41	1,77	1,95
2,75	4,65	1,78	0,54	2,32	2,55
3,00	5,07	2,28	0,68	2,96	3,26
3,25	5,49	2,85	0,86	3,71	4,08
3,50	5,92	3,51	1,05	4,57	5,02
3,75	6,34	4,27	1,28	5,55	6,10
4,00	6,76	5,12	1,53	6,65	7,32
4,25	7,18	6,07	1,82	7,89	8,68
4,50	7,61	7,13	2,14	9,27	10,20
4,75	8,03	8,31	2,49	10,80	11,88
5,00	8,45	9,60	2,88	12,48	13,73
5,25	8,87	11,02	3,30	14,32	15,75
5,50	9,30	12,56	3,77	16,33	17,96
5,75	9,72	14,24	4,27	18,51	20,37
6,00	10,14	16,06	4,82	20,88	22,97

Tabla XIV.- Implementación del cálculo de potencia. [20].

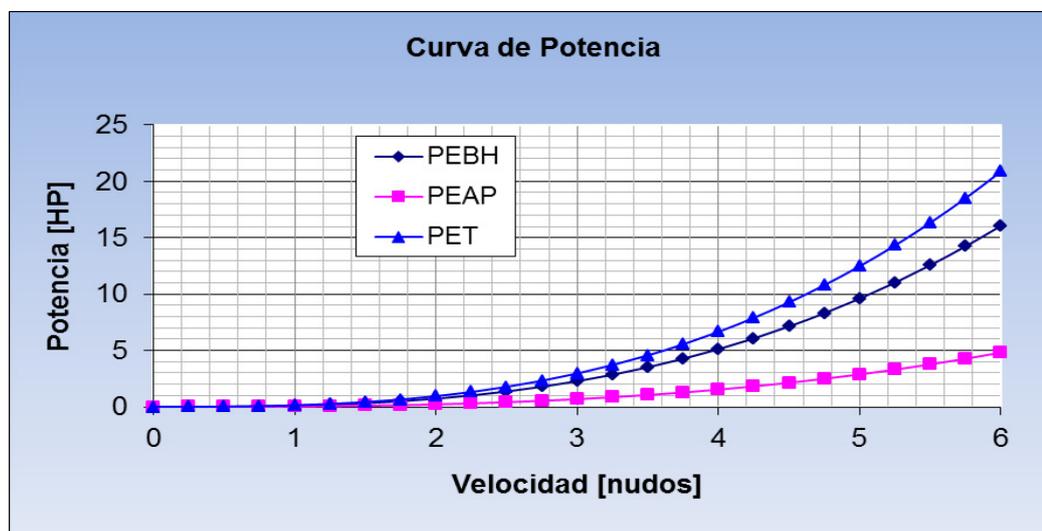


Figura 3.20.- Gráfico de las componentes de la potencia. [20].

En la figura 3.20 se aprecia el comportamiento de las componentes de la potencia, en donde la curva de PET, que es la potencia de casco desnudo total, además es la suma de las otras dos componentes que son las siguientes. PEBH es la potencia estimada para el casco desnudo, y, PEAP es la potencia por apéndices, que es un 30% de la potencia estimada para casco desnudo. En el casco desnudo también se consideran los tanques de lastrado.

En la figura 3.21 se puede observar solo la curva resultante, cabe comentar que este sistema no ofrece mayor consumo de potencia por su baja velocidad de operación, y se recomienda mejor el uso de la tabla que la gráfica.

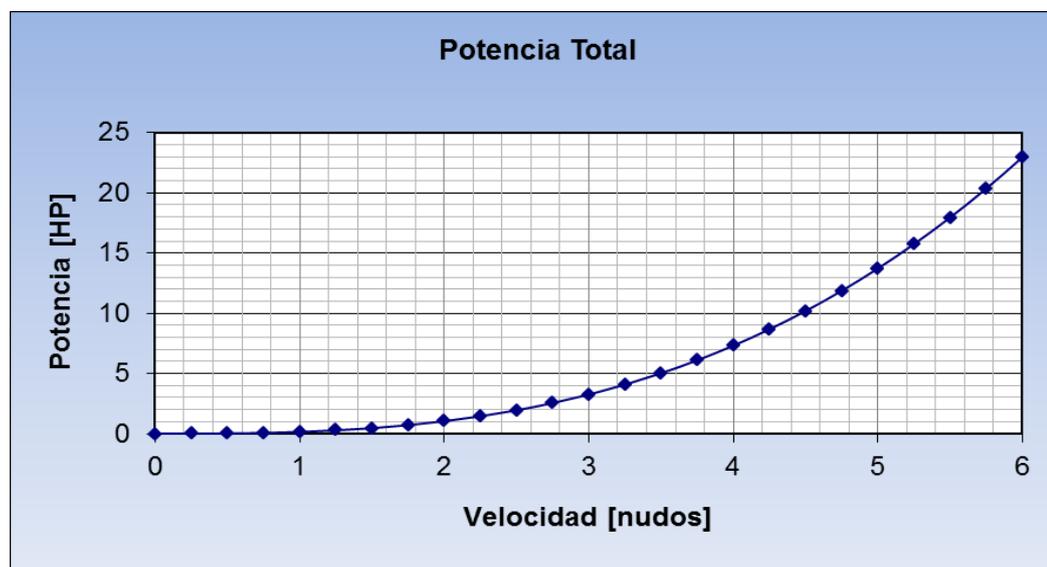


Figura 3.21.- Curva de la potencia total, PET. [20].

### Sistema de acceso.

En este caso se presenta el estudio del acceso. Se puede observar en la figura 3.7 que el acceso está en la parte superior del sumergible, con un diámetro de 70 cm, lo suficiente como para el acceso de pasajeros.

Se puede ver en la figura 3.22, donde se presenta una escotilla de acceso típica, directamente instalada al casco. Entre las características más importantes de este tipo de dispositivo se pueden anotar:

- Fácil manejo
- Completo aislamiento sin permitir acceso de agua.

- Pequeña altura, lo que permite reemplazarlo por una torreta de acceso mayor, y además contribuye muy poco a la resistencia al avance.

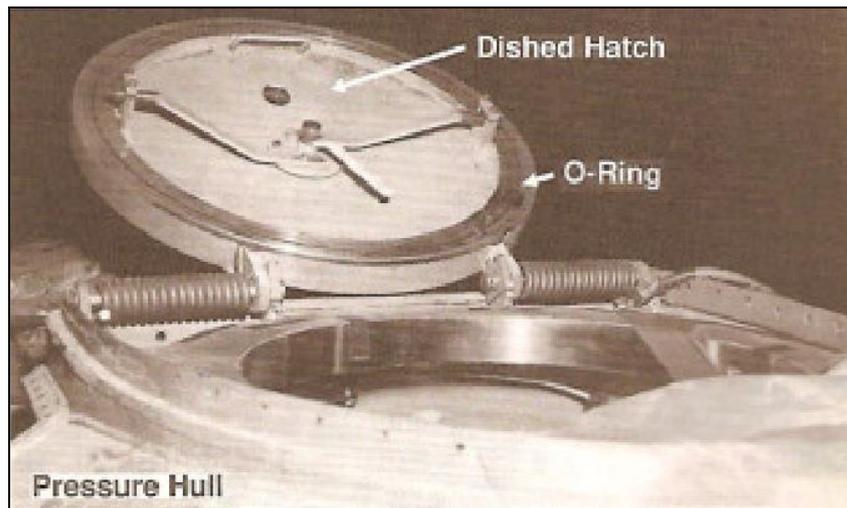


Figura 3.22.- Escotilla de acceso para sumergible. [2].

#### **3.4. Diseño del Sistema de Inmersión.**

Este sistema se compone de dos tipos de elementos que son: los tanques de inmersión y las bombas de lastrado. Se había mencionado antes el dimensionamiento y ubicación de los tanques de inmersión pero no se había mostrado el justificativo de dichas medidas y ubicación.

##### **Tanques de lastrado.**

El submarino necesita de un sistema de tanques para poder sumergirse (y volver a emerger). Efectivamente, poseen los llamados "tanques de

inmersión", generalmente ubicados a ambos lados del casco que, una vez inundados, le dan al submarino el peso necesario para poder descender.

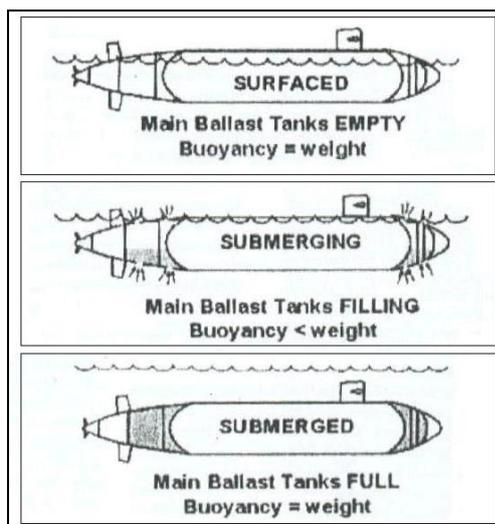


Figura 3.23.- Funcionamiento de un submarino. [4].

El funcionamiento de un sumergible está descrito de la siguiente manera:

- Cuando los tanques de inmersión están vacíos, la boyantez es igual al peso o desplazamiento del sumergible, la flotabilidad es neutra. Por tanto la nave está flotando en la superficie del agua.
- Cuando los tanques de inmersión están en proceso de llenado, la boyantez es menor que el peso o desplazamiento del sumergible, la flotabilidad es negativa. Por tanto la nave se está sumergiendo.
- Cuando los tanques de inmersión están completamente llenos, la flotabilidad es negativa. Por tanto la nave estará sumergida.

Además se muestra un circuito de ubicación de tanques y de la bomba de inmersión que son las que lastran y deslastran los tanques de inmersión.

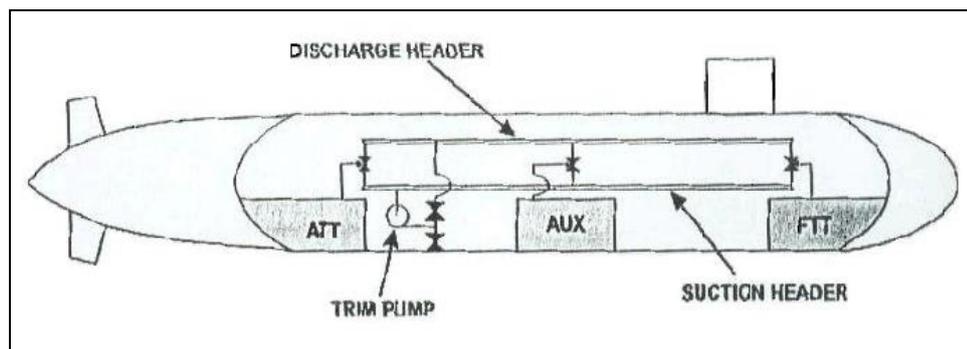


Figura 3.24.- Circuito de lastrado y deslastrado de un submarino. [4].

El dimensionamiento de estos tanques se describe así; Se requiere sumergir  $22.85 \text{ m}^3$ , que es volumen del sumergible. Por tanto, el volumen de los tanques de inmersión debe ser de  $22.85 \text{ m}^3$ . Como se han ubicado dos tanques bajo el sumergible, cada uno debe tener  $11.424 \text{ m}^3$ .

Otra restricción, la longitud de los tanques no debe exceder la eslora del sumergible, para no perder la maniobrabilidad sobre cubierta. Además de que los extremos del casco deben ser esféricos como el sumergible para poder vencer la resistencia al avance de mejor manera. Finalmente el parámetro que queda por definir es el radio de los tanques, que luego de

implementar todas las restricciones en una hoja electrónica, se tiene la tabla XV.

<b>Cálculo de Tanques de Inmersión.</b>	
Radio de cada tanque	0.840 M
Volumen en los extremos	2.485 m <sup>3</sup>
Volumen del cuerpo medio	8.939 m <sup>3</sup>
Longitud del cuerpo medio	4.030 M
Eslora total de los tanques	5.710 M
Volumen total de cada tanque de lastre	11.424 m <sup>3</sup>
Peso total de cada tanque	11.710 Ton
Peso total de los dos tanques	23.419 Ton

Tabla XV.- Resultados de la implementación del cálculo de tanques de inmersión. [20].

### **Bomba de Lastrado**

En este caso se considera la condición extrema de operación, cuando el sumergible se encuentra operando a 45 m de profundidad, que es la profundidad de diseño. La bomba debe tener la capacidad para desalojar el agua contenida en los tanques de inmersión a esa presión es decir a 452,025 Pa (4.46 atm), o lo que es lo mismo 50 m (164 pies) de profundidad de agua.

Se usa el proceso de diseño usado en la referencia [14] para el cálculo de bombas. Teniendo los siguientes datos como iniciales:

$$p_1 v_1 + gz_1 + \frac{v_1^2}{2} = p_2 v_2 + gz_2 + \frac{v_2^2}{2} + \delta_{p(\text{tub}+\text{acc})} \quad (3.37)$$

En donde se conoce la siguiente información:

$$v_1 = 0$$

$$z_1 = 0$$

$$p_2 = 0$$

$$z_2 = 164 \text{ pie}$$

$$\gamma = 62.3 \text{ lb/pie}^3$$

$$\nu[80^\circ\text{F}] = 9.684\text{E} - 06 \text{ pie}^2/\text{seg}$$

$$D = 2.5 \text{ pulg} = 0.208 \text{ pie}$$

El sistema se lo describe de la siguiente manera. La bomba debe vencer la presión a que está sometida es decir a una columna de agua de 165 pies. La presión en el lugar donde se ubica la bomba es la atmosférica. Basado en estas condiciones se procede a la implementación en una hoja electrónica para la elección de la velocidad de salida de la bomba.

En la tabla XVI se muestra la implementación de estas condiciones para el cálculo del cabezal de la bomba, en donde se obtuvo como resultado una velocidad de salida de 14.10 pie/s, que para una tubería de 2.5" se tiene un flujo de 246.33 GPM.

Con estos valores se procede a realizar el cálculo de la potencia de la bomba. Que se muestra en la siguiente fórmula.

$$P_b = Qh_{cab}g \quad [\text{Lb-pie/seg}] \quad (3-38)$$

Donde:

$P_b$ : Potencia hidráulica de la bomba.

$Q$ : Flujo volumétrico de la bomba, en  $\text{pie}^3/\text{seg}$ .

$h_{\text{cab}}$ : Altura de cabezal de la bomba.

Se implemente el cálculo y se tiene lo siguiente:

$$P_h = 0.314 \frac{\text{pie}^3}{\text{s}} * 164 \text{pie} * 62.3 \frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3}$$

$$P_h = 3208.2 \frac{\text{Lb} - \text{pie}}{\text{s}}$$

Esta potencia llevada a HP, se tiene 5.83 HP. O sea si se instala una bomba de 6HP, será suficiente. Este tipo de bomba se lo puede conseguir en el mercado.

Los tanques de inmersión almacenan 6,035.8 galones de y el flujo de la bomba es de 246.33GPM por tanto el tiempo es el cociente de ambos factores.

$$t = \frac{6,035.8 \text{gal}}{246.3 \frac{\text{gal}}{\text{min}}} = 24.5 \text{ min} .$$

V	Flujo	Re [vD/v]	$\epsilon/D$	f	$\delta p$	gz2	$\delta p + gz2$	$\delta p2$	p1γ1
[pie/s]	[GPM]		□		[pie2/s2]	[pie2/s2]	[pie2/s2]	[pie2/s2]	[pie2/s2]
1	0,255	2,15E+04	0,0007	0,0652	4,02	5313	5317,02	5317,02	6354,978
2	0,510	4,30E+04	0,0007	0,0652	16,09	5313	5329,09	5329,09	6354,978
3	0,765	6,45E+04	0,0007	0,064	36,19	5313	5349,19	5349,19	6354,978
4	1,020	8,61E+04	0,0007	0,064	64,34	5313	5377,34	5377,34	6354,978
5	1,275	1,08E+05	0,0007	0,064	100,54	5313	5413,54	5413,54	6354,978
6	1,530	1,29E+05	0,0007	0,055	144,78	5313	5457,78	5457,78	6354,978
7	1,785	1,51E+05	0,0007	0,0542	197,06	5313	5510,06	5510,06	6354,978
8	2,040	1,72E+05	0,0007	0,0542	257,38	5313	5570,38	5570,38	6354,978
9	2,295	1,94E+05	0,0007	0,0542	325,74	5313	5638,74	5638,74	6354,978
10	2,550	2,15E+05	0,0007	0,0542	402,15	5313	5715,15	5715,15	6354,978
11	2,805	2,37E+05	0,0007	0,0422	486,61	5313	5799,61	5799,61	6354,978
12	3,060	2,58E+05	0,0007	0,0422	579,10	5313	5892,10	5892,10	6354,978
13	3,315	2,80E+05	0,0007	0,0422	679,64	5313	5992,64	5992,64	6354,978
14	3,570	3,01E+05	0,0007	0,0422	788,22	5313	6101,22	6101,22	6354,978
15	3,825	3,23E+05	0,0007	0,0385	904,85	5313	6217,85	6217,85	6354,978
16	4,080	3,44E+05	0,0007	0,038	1029,51	5313	6342,51	6342,51	6354,978
17	4,335	3,66E+05	0,0007	0,037	1162,22	5313	6475,22	6475,22	6354,978
18	4,590	3,87E+05	0,0007	0,036	1302,98	5313	6615,98	6615,98	6354,978
19	4,845	4,09E+05	0,0007	0,036	1451,77	5313	6764,77	6764,77	6354,978
20	5,100	4,30E+05	0,0007	0,036	1608,61	5313	6921,61	6921,61	6354,978

Tabla XVI.- Implementación de los cálculos para la caída de presión. [20].

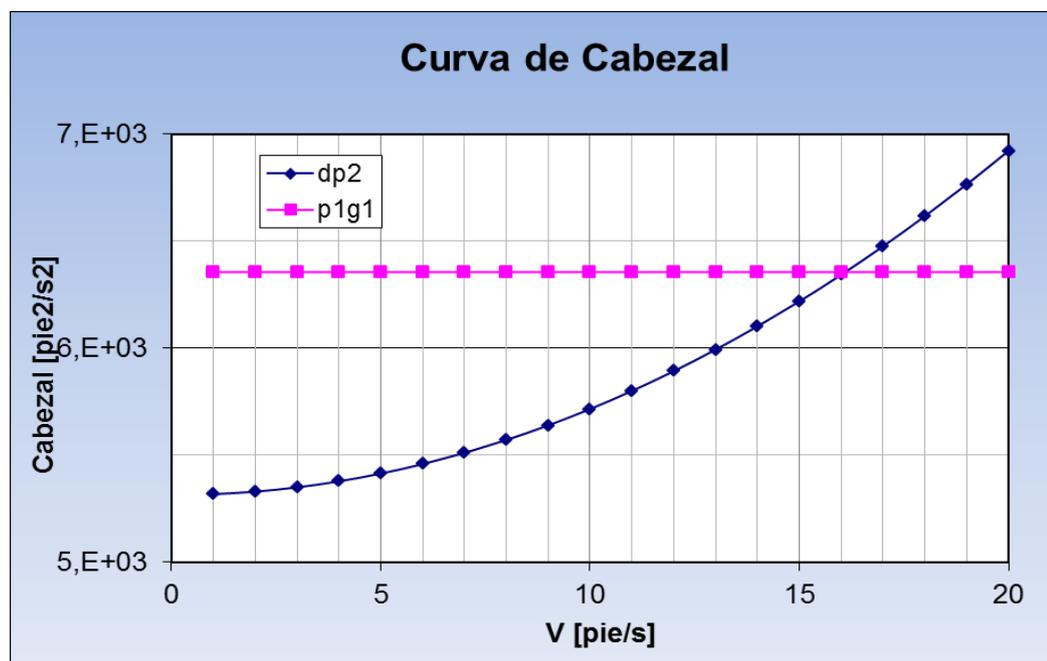


Figura 3.25.- Solución gráfica de la ecuación de la conservación de la energía. [20].

Entonces en el mercado se pueden encontrar este tipo de bombas, para hacer operar el sistema de inmersión del sumergible.

### 3.5. Suministro de Aire y Sistema de Seguridad.

En el suministro de aire se requiere de un compresor, un cable y una sonda, que es la que transporta el aire hasta el sumergible en la profundidad.

<i>Item</i>		<i>Quantity</i>	<i>Units</i>
Oxygen Consumption		0.083	lbs. per hour at 1 atm
Drinking Water		6	lbs. per day
Food, Dry		1.4	lbs. per day
Respiration Quotient		0.72	Weight ratio of oxygen consumed to carbon dioxide produced
CO <sub>2</sub> Produced		0.115	lbs. per hour at 1 atm
Water Vapor Produced		4	lbs. per day
Urine		4	lbs. per day
Feces		0.4	lbs. per day
Flatus		0.1	cu. ft. per day
Heat Output	Sensible	250	BTU per hour
	Latent	220	BTU per hour

Tabla XVII.- Requerimientos para la supervivencia en un sumergible. [1]

El requerimiento de oxígeno según la referencia [1] debe ser de 0.083 Lb/hora por persona a una atmósfera de presión, por tanto el total de oxígeno que se necesita llevar al sumergible es de  $14 \times 0.083 = 1.162$  Lb/hora a una atmósfera.

La presión de trabajo no presenta mayor problema, ya que, a través de la sonda se mantiene la presión atmosférica (1 atm), el consumo es el que se ha calculado anteriormente.

Una vez introducido el aire se debe conocer cuanto CO<sub>2</sub>, se debe eliminar. Ahora, en la misma tabla se muestra la razón de respiración que indica 0.72,

es decir, solo el 28% de oxígeno que ingresa al sumergible es consumido, el 72% se convierte en  $\text{CO}_2$ . Este  $\text{CO}_2$  debe ser eliminado del sumergible. Se lo realizará usando la diferencia de densidades, es decir el Oxígeno introducido tiene una densidad de  $\rho_{\text{oxi}} = 1.429 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ , y el  $\text{CO}_2$ , tiene una densidad de  $\rho_{\text{CO}_2} = 1.98 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ , por tanto el  $\text{CO}_2$  tiende a ir hacia el piso.

Entonces, se deben instalar en el sumergible acceso de aire en la parte superior del sumergible, y en la parte inferior debe instalarse extractores que eliminen el  $\text{CO}_2$ . a una razón de  $1.162 * 0.72 = 0.836 \text{ Lb/h}$ .

En la figura 3.26 se muestra el esquema que se aconseja implementar en el uso de la introducción de aire y extracción de  $\text{CO}_2$  del sumergible.

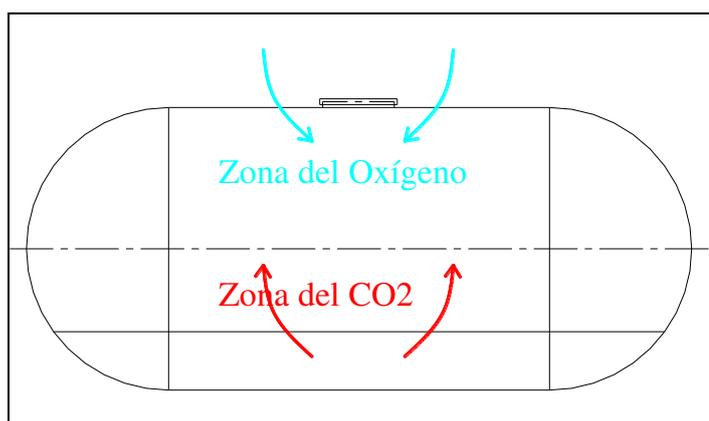


Figura 3.26.- Esquema de introducción de oxígeno y eliminación de  $\text{CO}_2$ .

[20].

Pero la sonda debe estar conectada correctamente al casco de tal manera que no permita el acceso de agua ni se escape el oxígeno proveniente del compresor en la superficie. Por tanto se aconseja usar el dispositivo mostrado en la figura 3.27.

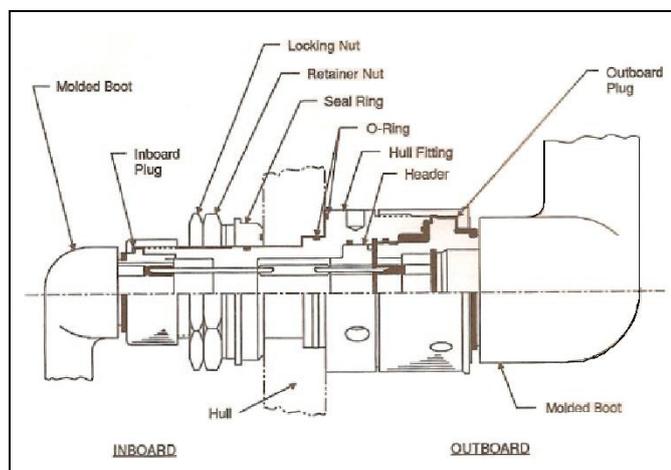


Figura 3.27.- Dispositivo para paso de casco. [2].

Por este dispositivo se puede pasar cables y tubos. En nuestro caso se requiere pasar cables y además la sonda de abastecimiento de aire al sumergible. La referencia menciona que se pueden encontrar en varios diámetros.

### **Sistema de Seguridad.**

Como sistema de Seguridad a nivel general se debe mencionar:

- Obligatoriamente en el manejo de personas, en todo tipo de embarcaciones se requiere de altos estándares de seguridad. Por tanto, se debe llevar un cable y sonda adicional, esto con el fin de que en caso de falla del cable principal, exista otro adicional que permita maniobrar y recuperar el sumergible con los pasajeros a salvo.
- Bajo la estiba o lo que se ha llamado pañol, donde va ubicada la bomba, se requiere tanques de oxígeno que llevan válvulas y tuberías pequeñas distribuidas a través de todo el sumergible.

En cuanto a la seguridad por pasajero se debe mencionar:

- El pasajero inmediatamente después de abordar la embarcación debe tener puesto el chaleco salvavidas, y más aun cuando aborde el sumergible.
- Se recomienda que los pasajeros no estén cerca del sumergible cuando se inicia o termina la maniobra de izado del sumergible.
- Se recomienda no llevar ni pasajeros, ni tripulantes a bordo del sumergible cuando éste está en maniobra de izado.
- El abordaje se lo recomienda hacer cuando el sumergible esté correctamente ubicado en el agua y tenga correctamente sujeta los equipos de acceso. Tales como escala, asegurada la escotilla.

Como seguridad para las ventanas se puede mencionar lo que recomienda ABS para un correcto y seguro funcionamiento de las ventanas.

- La temperatura de operación debe estar entre 18° C y 66° C.
- La razón de presurización y despresurización debe ser menor de 10 atm/s (145 psi/s).
- El fluido contenido (externo o interno) debe ser agua dulce, agua salada o cualquier líquido respirable.
- El número, o el total de duración, de ciclos de presión durante la vida operacional de las ventanas no debe exceder 10,000 ciclos o 40,000 horas respectivamente.
- La máxima presión de operación no debe exceder 1,380 bar (20,000 psi).
- La exposición a radiación nuclear no debe exceder los 4 megarads.
- El diseño de las ventanas debe estar de acuerdo con lo siguiente:
  - No exceder los 20 años para ventanas que están sometidas a esfuerzo compresivo.
  - No exceder los 10 años para ventanas sujetas a esfuerzo de tensión.

## **Capítulo 4**

### **Análisis de Costos del Proyecto.**

En este capítulo se comienza realizando una estimación de materiales y equipos que se requieren para el funcionamiento del sistema, para luego estimar sus costos. Se estimará los costos de mano de obra de construcción del sistema incluyendo la clasificación de planos y supervisión de la construcción por parte de alguna clasificadora, basado en costos locales. Finalmente, se podrá conocer el costo total de construcción del sistema diseñado.

#### 4.1. Estimación de materiales y sus costos.

En este sub-capítulo se cuantifican los equipos que serán usados en la instalación y funcionamiento del sistema. Se recuerda que solo se estiman los equipos y material que se usa en la construcción del sistema, es decir equipos para maniobras y seguridad y los materiales que se usan para la construcción del sumergible.

Para mejor cuantificación se divide en dos partes los materiales; usados en maniobra y operación del sistema como un grupo. Y como otro grupo, los materiales que se usan en la construcción del sumergible.

#### Equipos usados en la maniobra y seguridad del sumergible.

A continuación se hace una lista de los elementos que se usan en la maniobra y seguridad de la embarcación.

<b>Equipos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
Winche	1	\$ 1.200,00	\$ 1.200,00
Grúa	1	\$ 45.000,00	\$ 45.000,00
Cable	1	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
Sonda	2	\$ 1.500,00	\$ 3.000,00
Extractor (blower)	2	\$ 450,00	\$ 900,00
Pescante	1	\$ 1.400,00	\$ 1.400,00
Chalecos Salvavidas	18	\$ 60,00	\$ 1.080,00
Guía de Cables	4	\$ 220,00	\$ 880,00
Bomba de inmersión.	1	\$ 450,00	\$ 450,00
Radios Motorola	3	\$ 400,00	\$ 1.200,00
<b>Total</b>			<b>\$ 65.110,00</b>

Tabla XVIII.- Costos de equipos usados en la maniobra. [20].

Ahora después de hacer una estimación de los materiales usados en la construcción tanto del sumergible como de los tanques de inmersión, se tiene la tabla XIX, en donde se muestra una lista de materiales para la construcción.

Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Total
1	Plancha Acero HY-100 de 10 mm	114,45	m2	\$ 140,53	\$ 16.083,55
2	Perfiles T 3x3x1/4", HY-100	71,21	m	\$ 12,20	\$ 868,44
3	Platinas 2x1/4"	99,62	m	\$ 5,25	\$ 522,99
4	Soldadura 6011	600,94	Lb	\$ 0,65	\$ 387,61
5	Soldadura 7018	1402,19	Lb	\$ 0,78	\$ 1.093,71
6	Gas Oxígeno	10,00	m3	\$ 2,96	\$ 29,55
7	Gas Acetileno	50,00	Kg	\$ 12,56	\$ 627,75
8	Plancha de Acrílico 8mm	3,08	m2	\$ 187,50	\$ 577,50
9	Plancha corrugada de 4 mm	10,95	m2	\$ 75,00	\$ 821,10
10	Tubos de 2 1/2" SHC 40	14,00	m	\$ 9,75	\$ 136,50
11	Pasos de mamparos	6,00		\$ 250,00	\$ 1.500,00
14	Plan de Pintura.	1			\$ 2.275,95
15					\$ 0,00
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 24.924,64</b>

Tabla XIX.- Lista y costo de materiales para la construcción del sumergible y los tanques de inmersión. [20].

El metal a usarse en la construcción del sumergible es el Steel HY-100, que es un metal más resistente que el acero naval común. Pero a su vez tiene un mayor costo, y es aproximadamente un 40% superior al acero naval común [20].

Para la soldadura se recomienda usar la misma usada en la construcción naval de embarcaciones de superficie, pero se recomienda usar radiación para medir el grado de porosidad que pueda tener este tipo de soldadura.

#### **4.2. Estimación de costos de Construcción y operación del sistema embarcación sumergible.**

Se analiza primero solo el costo de la construcción del sumergible y luego se analiza los costos de operación del sistema en nuestro medio.

##### **Costos de Construcción.**

Para hacer una fácil y buena estimación sobre los costos de construcción del sumergible se describe el siguiente procedimiento.

Se tiene como dato de la lista de materiales que el peso en metal es de 9742.5 Kg. Este peso se lo multiplica por el índice de producción, que en nuestro medio es de aproximadamente 250HH/ton, por tanto el número de HH se calcula de la siguiente manera:

$$9,742.5\text{Kg} * \frac{1 \text{ ton}}{1,000 \text{ Kg}} * 250 \frac{\text{HH}}{\text{ton}} = 2,435.6 \text{ HH}$$

Finalmente se considera un costo promedio de \$5/HH, con lo que finalmente se tiene lo siguiente.

$$2,435.6 \text{ HH} * \frac{\$5}{\text{HH}} = \$ 12,178.11$$

Que será finalmente el costo de la construcción del sumergible y los tanques de inmersión.

#### **4.3. Costos de Clasificación de Diseño, Supervisión y Construcción del sumergible.**

Según la referencia [3], el costo de una clasificación se divide en dos partes, la primera es la clasificación del diseño, en donde se revisan los planos y detalles constructivos además de los planos de soldadura. La segunda parte es la supervisión de la construcción donde se debe realizar lo indicado en los diseños ya clasificados y además de periódicamente certificar que los soldadores apliquen procedimientos recomendados por la propia clasificadora.

En los costos de Clasificación del diseño se obtuvo una cotización para el sumergible y los tanques de inmersión un costo de \$ 1,800 por tonelada.

Entonces, como el diseño del sumergible tiene entre sumergible y tanques un total de 46.83 ton, considerando ya sumergido el sumergible, es decir en operación. Se tiene que el costo de clasificación es de:

$$\text{Costo Clasificación} = 1,800 \frac{\$}{\text{ton}} * 46.83\text{ton} = \$84,294.00$$

Ahora el costo de supervisión por parte de la Sociedad Clasificadora es de \$8000 por mes. Se estima que la construcción del sumergible y los tanques no puede tomar más de dos meses, entonces el costo de la supervisión será de \$ 16 000. Con visitas frecuentes de tres veces por semana.

#### **4.4. Costo total de la Construcción del sistema.**

En esta parte se analiza (obtiene) el costo total de la construcción del sistema. Además, se hace un breve análisis de mercado que debe ser considerado en caso de querer realizar el proyecto. No se realiza análisis de factibilidad del proyecto ya que no se conocen las condiciones de operación del inversionista.

#### **Breve Análisis de Mercado.**

La actividad turística en Galápagos constituye un ingreso económico muy importante para el país y las Islas. Se estima que en el año 2000 alrededor de 210 millones de dólares ingresaron al Ecuador por concepto de Turismo en Galápagos.

El creciente aumento anual de la afluencia turística al Archipiélago ha demandado la proliferación de nuevos negocios y servicios para los turistas, siendo cada vez mayor el número de operadores e involucrados directa o

indirectamente en actividades, producto de las visitas turísticas. En el año 2001, se registró la entrada de un total de 81,249 turistas, 59,746 extranjeros y 21,503 nacionales, lo que representa un aumento del 13.5% en relación con el año anterior de esta cifra el 42.3% realiza actividades netamente turística.

El desarrollo del turismo marino aumenta progresivamente, viéndose un incremento no sólo en los beneficios económicos derivados de esta actividad, sino también en las oportunidades de trabajo, infraestructura hotelera y transportación en mar.

Con el fin de conocer el número de visitantes que ingresaron a las Islas anualmente y comparar el porcentaje de incremento de visitas a la RMG en los últimos años (1999 - 2001), se investigó en los registros del SPNG e informes de viaje que entregan los guías de turismo a las oficinas del SPNG. Se recopiló información de tres operadores locales de buceo (Nautidiving, Scuba Iguana y Subaqua) y de cinco embarcaciones que realizan tours de bahía, con la finalidad de conocer cuales son las temporadas alta y baja en este tipo de turismo en las Islas. Obteniéndose como resultado, en el caso específico de buceo se registraron 20,466 visitas durante el 2001 y 5,468 turistas que no tuvieron contabilizados en los registros de SPNG. Y los

meses de mayor afluencia fueron, febrero, julio, agosto y diciembre. Y los meses de temporada baja corresponden a enero, marzo, abril, septiembre y octubre.

Ahora se debe creer que la actividad continúa en crecimiento, pero no es así, según [8], se debió controlar el desmedido crecimiento de esta actividad y aun existen grupos que presentan y realizan este tipo de actividad sin el respectivo control ni conocimiento de alguna autoridad. Además de asegurar que la actividad ha ido en tal crecimiento, que los paquetes turísticos para esta actividad para este año ya han sido vendidos en su totalidad con varios meses de anticipación.

Por tanto, se puede anticipar que esta actividad sea aceptable, desde el punto de vista de innovación, ya que en el uso de este sistema no existen limitaciones físicas en su práctica.

La evaluación de la rentabilidad económica del proyecto viene a ser la base principal para la toma de decisión de implantarlo o no. Entre los diferentes indicadores de rentabilidad económica que pueden utilizarse se encuentran. Ahora se presenta el resumen de los costos fijos de del proyecto donde se detalla el costo de cada rubro.

<b>Costos fijos del proyecto</b>	
Equipos de Maniobras	\$ 65.110,00
Materiales	\$ 24.924,64
Clasificación de diseño.	\$ 84.294,00
Supervisión de la Construcción.	\$ 16.000,00
Costo de la construcción	\$ 12.178,11
Total	\$ 202.506,76

Tabla XX.- Costos fijos del proyecto. [20].

Se observa el costo total del proyecto, no se consideran el cálculo de indicadores económicos tales como VAN, TIR, PRC, etc. Debido a que los costos y condiciones de operación dependerán del inversionista, que será quien las coloque mismas basado en sus limitaciones y/o atributos de inversión.

## **Conclusiones y Recomendaciones**

Luego de realizar el diseño preliminar de un sumergible no propulsado para turismo en las Islas Galápagos, a través del estudio de los requerimientos para operación del sumergible, análisis de operación del sistema embarcación-sumergible, diseño preliminar del sumergible y análisis de factibilidad económica del proyecto se tiene lo siguiente.

### **Conclusiones.**

1. Las zonas de operación, por el diseño y la selección hecha deben ser las denominadas en el capítulo 1 como 1 y 2. Por su cercanía a los puertos de Puerto Ayora y Puerto Villamil.
2. El no usar propulsión para este tipo de vehículos se convierte en un atractivo adicional hacia los turistas que gustan de turismo

ambientalista. Como se ha mencionado anteriormente, este sistema de exploración submarina no emite ruido ni contaminación de manera considerable, por tanto se puede decir que se trata de un sumergible de tipo ecológico.

3. La selección realizada en cuanto al sistema de remolque, es decir la embarcación de superficie, ha sido la más conveniente desde el punto de vista de costos y seguridad. Se concluye que de los tres sistemas mencionados el escogido ha sido el uso de una sola embarcación con un tangón.
4. Estructuralmente se puede concluir que los esfuerzos primarios son de muy baja importancia en embarcaciones de este tamaño, en donde se tiene mayores esfuerzos en los secundarios y terciarios. Esto es debido a que la embarcación si se la considera como viga, al sumergirla los esfuerzos por arrufo y quebranto no son considerados. Solo se considera como si estuviese en aguas tranquilas. Pero al presentarse altas presiones el análisis presenta mayor importancia en los secundarios y terciarios.
5. Luego del hacer el cálculo de resistencia por el método que recomienda el ITTC, se concluye que: La resistencia es

directamente proporcional a la velocidad al cuadrado. Además de comprobarse que para la velocidad de operación de este sumergible la resistencia puede considerarse como despreciable. Por tanto el gasto de potencia para mover este vehículo a esta velocidad es muy baja.

6. El buceo turístico resulta una actividad que a pesar de presentar ciertos riesgos y limitaciones en sus practicantes, ha ido en crecimiento de tal manera que ahora existe un especial control, la cual se puede decir que es muy rentable. En este caso se está atrayendo otro tipo de turistas que a pesar de tener limitaciones para la práctica de buceo común, en el sistema presentado en este trabajo no requiere de ninguna fortaleza física ni limitación, lo que hace que el sistema pueda ser abordado por cualquier persona.

### **Recomendaciones.**

7. En el diseño se menciona que el sumergible ha sido diseñado para soportar presiones producidas por una columna de agua de hasta 50 metros. A pesar de que las profundidades de operación se encuentran en un rango de entre 37 y 45 metros. Se recomienda

no operar el sumergible hasta la profundidad de 50 metros ya que se operaría en condiciones extrema a las cuales ha respondido bien en el diseño.

8. La grúa que se recomienda usar en el diseño tiene una capacidad de 10,900 Kg. Se muestra en los anexos. El peso a izarse es de 9,742 Kg. Por tanto se aconseja a no llevar peso adicional durante la maniobra de izado en el sumergible ya que se está manejando un factor de seguridad de 1.11 que resulta muy bajo para el caso de manejo e izado de equipos sobre la cubierta de una embarcación.
9. En el diseño de la arquitectura del casco se recomienda usar un casco simétrico con respecto a la eslora, para mejorar el aprovechamiento de espacio y mejorar su capacidad si que el confort de la embarcación sin que se vea afectada la seguridad de los pasajeros.
10. El mejor material para la construcción de submarinos es el Steel HY-100 debido a su alta resistencia a la fluencia y comportamiento en el análisis de refuerzos terciarios, por tanto es recomendable

no intentar utilizar acero naval común en este tipo de construcción ya que los esfuerzos se van al límite y presentan bajos factores de seguridad.

11. Se recomienda que en las ventanas se coloque por fuera del casco una especie de parrilla para la protección de las ventanas, ya que un golpe durante la maniobra las puede romper y se tendría que parar las visitas.

# Bibliografía

1. **ABS**, Rules for Building and Classing, Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities. Houston, TX, USA. 2002.
2. **ALLMENDINGER**, E., Submersible Vehicle Systems Design, Published by SNAME. The SNAME Publication, Jersey City, N.J. 1990.
3. **ANDRADE**, E., Lloyd Register, Suveyor, Malasia, 2007.
4. **ARENTZEN & EVANS**, Submergible Vehicles, Ship Design and Construction, 1975. PNA (Principles of Naval Architecture) Publication.
5. **BURCHER and RYDILL**, Concepts in Submarine Design, Cambridge University. Published by the Press Syndicate of the University of Cambridge, London, UK. 1994.
6. **DANULAT & GRAHAM**, Reserva Marina de Galápagos, Línea Base de Biodiversidad, Editada por el IGM, 2002.

7. **DOMINGUEZ**, M., Cálculo de Estructuras de Buques, Escuela Técnica, Superior de Ingenieros Navales, Sección de Publicaciones, Madrid, España, 1969.
8. **GÁLVES**, P., Subsecretaria de Turismo, Guayaquil, Ecuador, 2007.
9. **GARCIA ASCASO**., Una Oportunidad para la Ingeniería Naval, el Turismo Náutico, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2005.
10. **INOCAR**, Carta de navegación 203, IGM, Latacunga, Ecuador, 1995.
11. **JARA**, W., Ing., Montaje e Instalación a Bordo, Notas de Clases, ESPOL, FIMCM, Guayaquil, Ecuador, 2004.
12. **MACAS**, F., Ing., Sigma Coatings, Ecuánobel S.A., Supervisor Técnico, Guayaquil, Ecuador, 2007.
13. **MARÍN**, J., Notas de Clase, Estructuras Navales II, ESPOL, FICM, Guayaquil, Ecuador, 2006.
14. **MARÍN**, J. Notas de Clase, Maquinaria Naval II, ESPOL, FIMCM, Guayaquil, Ecuador, 2001.

15. **MARISCAL**, C., Preparación y Evaluación de Proyectos, ESPOL, FIMCM, Guayaquil, Ecuador, 2005.
16. **MINISTERIO DE TURISMO DEL ECUADOR**, Ecuador, La vida en estado puro, Mapa Turístico, IGM, 2005.
17. **MORENO**, J., Ing. Naval, Tesis de Grado, ESPOL, FIMCM, Guayaquil, Ecuador, 2000.
18. **NAVAL SHORE**, Fotos realizadas durante el evento NAVAL SHORE, Rio de Janeiro, Brasil, Mayo 2005.
19. **NICKELL**, E., Weight Considerations for Deep Submersibles, Published by MARINE TECHNOLOGY, Lockheed Palo Alto Research Laboratory, CA, USA, 1970.
20. **RENDON**, C., Cálculos y diseños CAD, ESPOL, FIMCM, Guayaquil, Ecuador, 2006.
21. **TOWNSEND**, P., Ing. Naval, Tesis de Grado, ESPOL, FIMCM, Guayaquil, Ecuador, 1993.

22. **VIRGINIA TECH**, Aerospace & Ocean Engineering, Design Report Littoral Warfare Submarine (SSLW), VT Total Ship Systems Engineering, VI, USA, 2005.

Páginas web.

23. <http://perso.wanadoo.es/pfcurto/>, El Arma Submarina Española, Página web no oficial de los submarinos españoles, 2000.

24. <http://www.cancunvista.com/spanish/travel/atlantis.htm>, Web site de publicidad de paquetes turísticos. Zatará, Cancun, LLC, México, 2003.

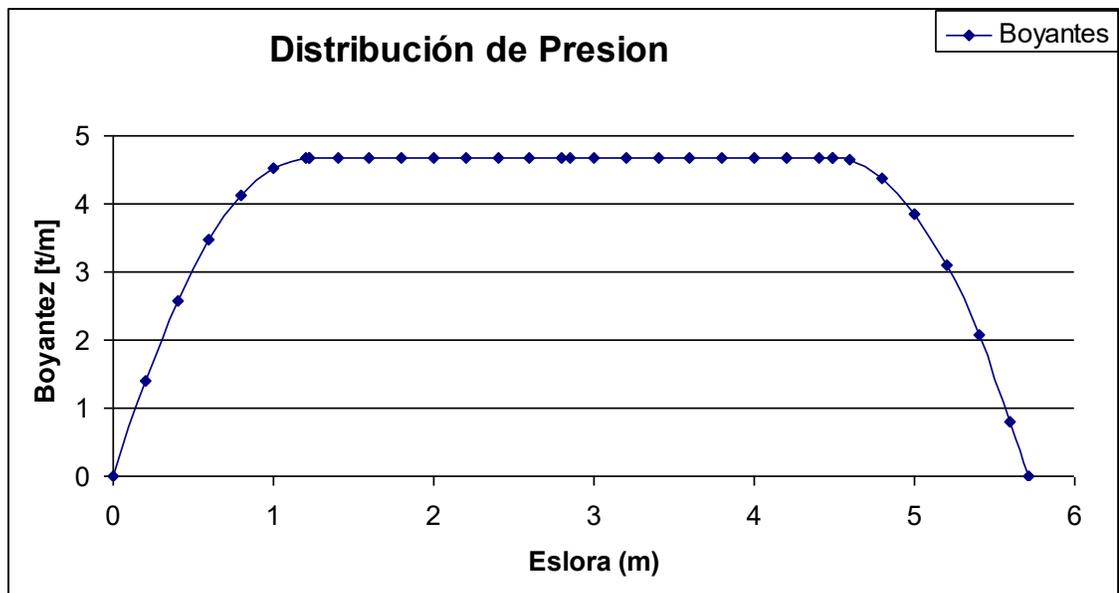
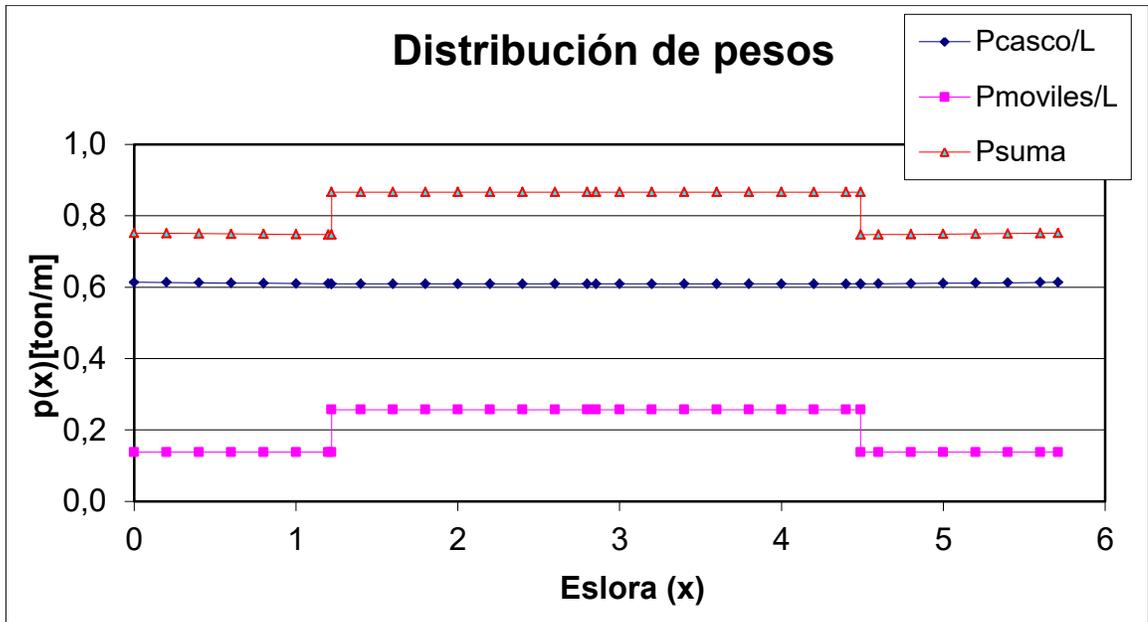
25. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/dsv.htm>, Site con información sobre acero para construcción de submarinos de aplicación militar, Military Analysis Network, US Navy Ships, San Diego, CA, USA, 1999.

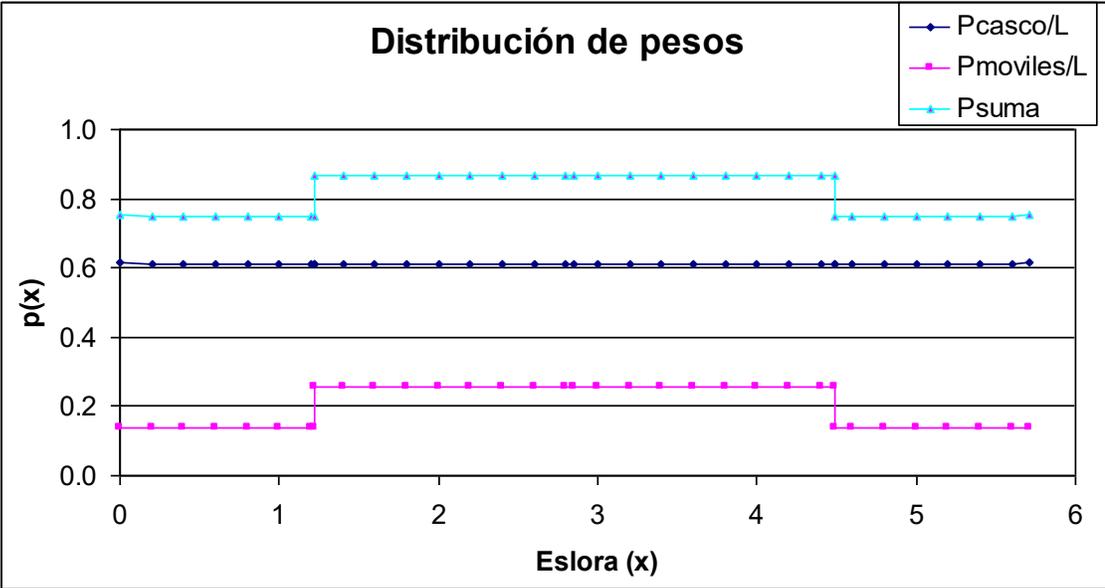
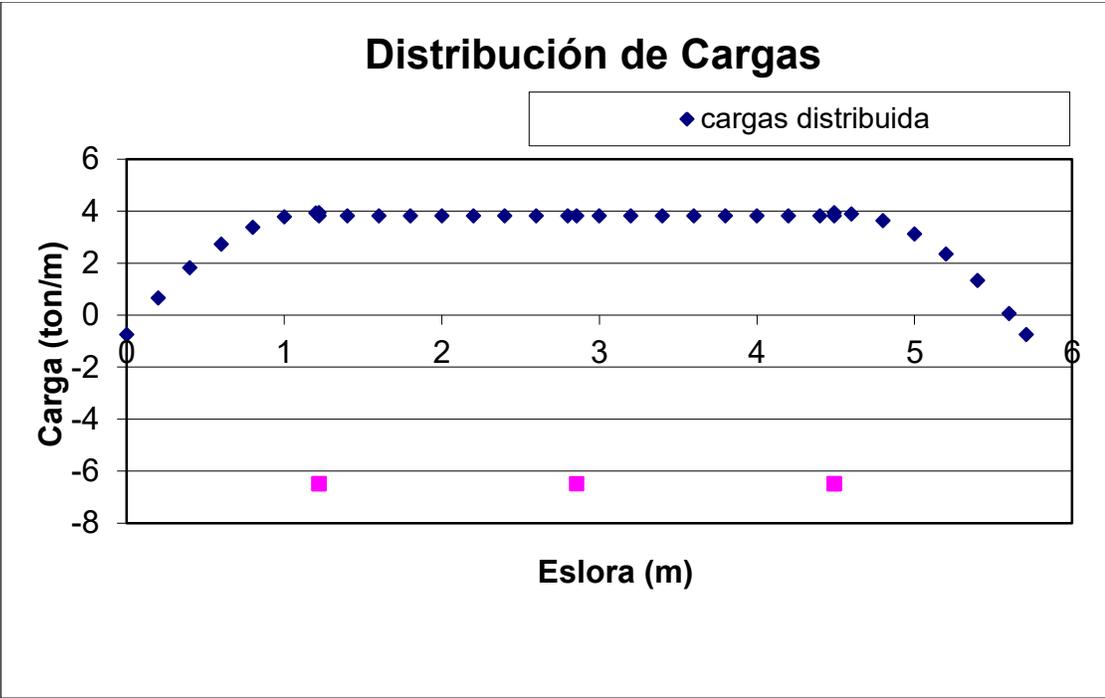
26. [www.galapaguide.com](http://www.galapaguide.com), Galapagos Islands Tours, Cruises, Hotels, Travel, Diving, Vacations, Holidays & Trips, 2005.

27. [www.gouldspump.com](http://www.gouldspump.com), Site con información sobre bombas mecánica, 2005.

28. [www.midsa.com.mx/prod\\_acrilico.php](http://www.midsa.com.mx/prod_acrilico.php), Site de empresa proveedora de materiales compuestos y de alta resistencia, Mar Industrial Distribuidora S.A., MDSA, Monterrey, México, 2007.

# Anexos





ECUANOBEL S. A.  
 REPRESENTACIONES & ASESORIA TECNICA



MARINE & INDUSTRIAL

OBRA VIVA

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL PLAN DE PINTURAS SIGMA

FECHA : FEBRERO 02 DE 2007 SISTEMA EPÓXICO / DIQUE: ESPOL AREA: AREA m2  
 CLIENTE : CLEMENTE SERAPIO RENDÓN PAREDES AUTOPULIMENTANTE TBT FREE  
 SUBMARINO : VIRUS I

PRODUCTO	% PERDIDA	HUMEDO SECO	TEORICO	PRACTICO	B	R	P	TAMAÑO	PRESION	INTERVALOS DE REPINTADO	
										TEMP °C MIN	MAX
F/C SIGMACOVER 280 GREENISH YELLOW	30	175,44	100	5,7	3,99	X	X	17-21	2100 PSI	30 6H	2 MESES
F/C SIGMACOVER 510 BLACK	30	230,77	150	4,3	3,01	X	X	19-23	2130 PSI	30 4H	3 DIAS
F/C SIGMA ECOFLEET 290 BROWN	30	181,82	100	5,5	3,85	X	X	21-27	2130 PSI	30 4H	INDEFINIDO
F/C SIGMA ECOFLEET 290 BLACK	30	181,82	100	5,5	3,85	X	X	21-27	2130 PSI	30 -	-

F/C: CAPA COMPLETA

INFORMACION DEL PRODUCTO ( 20°C )

PRODUCTO	SOLIDOS	AGENTE RELACION MEZCLA	VIDA DE MEZCLA	TIEMPO DE PUNTO	DILUYENTE	OBSERVACIONES
	VOLUMEN	CURADO POR VOLUMEN		SEC. TACTO INFLAMAC		
F/C SIGMACOVER 280 GREENISH YELLOW	57 COMP.	B 80:20	5H	1H	25C	91-92
F/C SIGMACOVER 510 BLACK	65 COMP.	B 89:11	4H	8H	30C	91-79
F/C SIGMA ECOFLEET 290 BROWN	55 N/A	N/A	N/A	1H	26C	21-06
F/C SIGMA ECOFLEET 290 BLACK	55 N/A	N/A	N/A	1H	26C	21-06

COMENTARIOS: ANTES DE APLICAR PINTURA SE DEBE VERIFICAR QUE LA SUPERFICIE ESTE LIBRE DE POLVO  
 ACEITES O ALGUNA CONTAMINACION, ADEMÁS LA HUMEDAD RELATIVA DEBE SER MENOR A 85%.  
 LA TEMPERATURA DE LA PLANCHA DEBE ESTAR MÍNIMO 3°C POR ARRIBA DEL PUNTO DE ROCIO  
 Y NO DEBE SER MAYOR A 45°C. UNA VEZ APLICADA LA ÚLTIMA CAPA DE ANTIFOULING SE DEBE  
 ESPERAR MÍNIMO 8 HORAS PARA LA BOTADURA.

ING. FRANCISCO MACAS CAMACHO  
 SUPERVISOR TECNICO SIGMA

**ECUANOBEL S. A.**  
**REPRESENTACIONES & ASESORIA TECNICA**

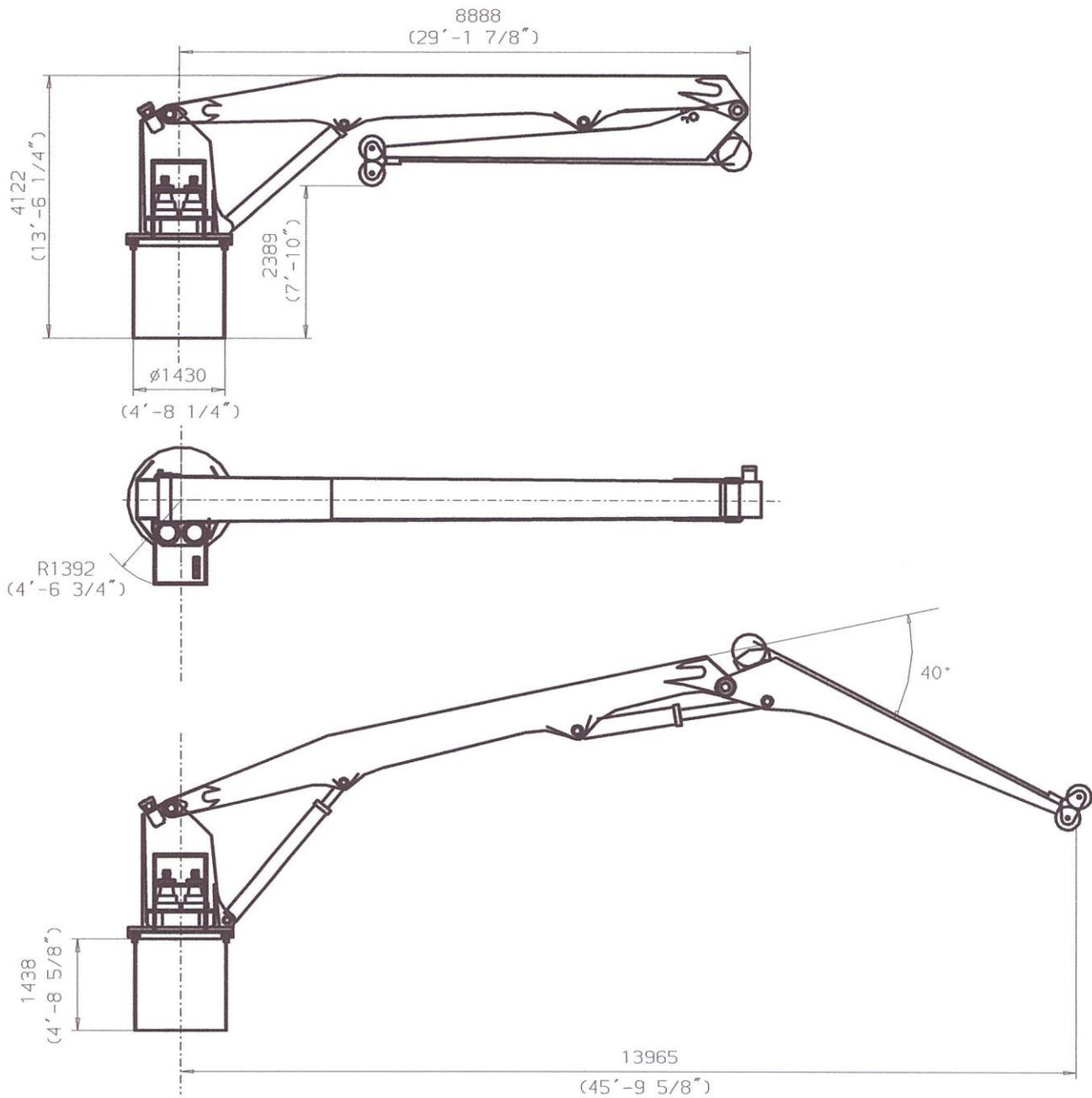


**MARINE & INDUSTRIAL**

<b>AREA</b>	<b>111</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
-------------	------------	----------------------

DESCRIPCIÓN	REND. TEOR. m <sup>2</sup> /litros	F.P. %	REND. PRÁCTICO m <sup>2</sup> /litros	CANTIDAD litros	CANTIDAD A USAR litros	COSTO/LITRO dólares (\$)	COSTO TOTAL dólares (\$)
SigmaCover 280 (100u) greenish yellow	5,7	30	3,99	27,82	28,00	8	224,00
SigmaCover 510 (150u) black	4,3	30	3,01	36,88	37,00	8,5	314,50
Sigma Ecofleet 290 (100u) brown	5,5	30	3,85	28,83	29,00	25	725,00
Sigma Ecofleet 290 (100u) black	5,5	30	3,85	28,83	29,00	25	725,00
Thinner 91-92				2,78	3,00	5	15,00
Thinner 91-79				3,69	4,00	4,8	19,20
Thinner 21-06				1,73	2,00	4,7	9,40
							<b>2032,10</b>
						Iva (12%)	243,85
						<b>TOTAL</b>	<b>2275,95</b>

F. P., Factor de pérdidas por aplicación



SWL 5.0t/14m

Max. heel 15° with full load

Max. operating pressure 200bar/2900psi

Weight of standard crane 10900kg/24035lbs