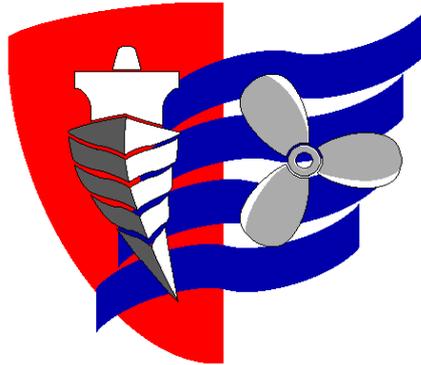


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE REDUCCIÓN
DE LA RESISTENCIA AL AVANCE
MEDIANTE LA VENTILACIÓN DE LA
OBRA VIVA SOBRE EL BUQUE LA
NAUMÓN**

**DESIGN OF A DRAG REDUCTION SYSTEM
BY MEANS OF THE VENTILATION OF THE
BOTTOM OF THE MV LA NAUMÓN**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Autor: Carlos Monsalve Sunyer
Director: Tomás O'Callaghan Díaz
Septiembre - 2021

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE
REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA
AL AVANCE MEDIANTE LA
VENTILACIÓN DE LA OBRA VIVA
SOBRE EL BUQUE LA NAUMÓN**

**DESIGN OF A DRAG REDUCTION
SYSTEM BY MEANS OF THE
VENTILATION OF THE BOTTOM OF
THE MV LA NAUMÓN**

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Septiembre – 2021

Índice

Índice.....	1
Índice de imágenes.....	4
Índice de tablas.....	5
Índice de ecuaciones	6
Resumen.....	8
Palabras Clave.....	8
Abstract.....	9
Key Words.....	9
Siglas y Acrónimos	10
Capítulo 1: Introducción	12
1.1. Objeto.....	12
Capítulo 2: La resistencia al avance.....	14
2.1. Qué es la resistencia al avance	14
Froude	14
Hughes.....	16
2.2. Métodos de cálculo de la resistencia al avance	17
2.3. Métodos de cálculo por ensayos con modelos.....	18
Método del ITTC-57	18
Método del ITTC-78	19
2.4. Métodos de cálculo obtenidos a partir de ensayos con modelos.....	20
Método de Holtrop	20
Método de Van Oortmerssen	20
2.4. Importancia de la reducción de la resistencia al avance.....	21
Importancia ambiental	21
Importancia económica	21
2.5. Descomposición de la resistencia al avance	22

Capítulo 3: La ventilación de la obra viva	23
3.1. Qué es la Ventilación de la obra viva	23
3.1.1. Obtención del aire	23
3.1.2. Inyección del aire	24
3.2. Ejemplos de ventilación de la obra viva	29
3.3. Ubicación de la salida de la ventilación de la obra viva	31
Capítulo 4: Buque “La Naumón”	32
4.1. Características técnicas	32
4.2. Elección del buque	36
4.3. Cálculos de resistencia de “La Naumón”	36
Capítulo 5: Elección del sistema de ventilación.....	43
Capítulo 6: Aplicación de un sistema de ventilación en el buque “La Naumón”	
.....	45
6.1. Cálculo de la resistencia de “La Naumón II”	46
6.2. Cálculo del sistema de generación de aire	52
6.2.1. Cálculo del caudal necesario.....	52
6.2.3. Grupo Generador del aire de ventilación	53
6.2.4. Plano del grupo generador	53
6.3. Diseño del sistema de ventilación	55
6.3.1. Ubicación del grupo generador de aire	55
6.3.2. Planos de la instalación	55
6.4. Cálculo del ahorro de energía.....	57
Capítulo 7: Presupuesto.....	59
7.1. Coste de la mano de obra.....	59
7.2. Coste de los materiales.....	60
7.3. Coste total de la instalación	60
Capítulo 8: Pliego de condiciones.....	61
8.1. Condiciones facultativas	61
8.1.1. Delimitación de funciones técnicas	61

8.1.2. Derechos y obligaciones del contratista.....	62
8.2. Condiciones de montaje.....	63
8.2.1. Montaje de tuberías.....	63
8.2.2 Corte.....	65
8.2.3. Montaje de equipos	65
8.2.4. Inspecciones y pruebas	65
Capítulo 9: Conclusiones	66
Capítulo 10: Bibliografía	67
ANEXO I.....	70
Aplicación de este trabajo en “La Naumón”	70
Aviso de responsabilidad UC	71

Índice de imágenes

Ilustración 1: División de las resistencias al avance de una embarcación	22
Ilustración 2: Sistema BDR.....	25
Ilustración 3: Sistema MALS	25
Ilustración 4: Sistema SAVER.....	26
Ilustración 5: Sistema Silverstream.....	26
Ilustración 6: Sistemas TALDR y ALDR	27
Ilustración 7: Sistema PCDR	28
Ilustración 8: Sistema ACES.....	28
Ilustración 9: Buques con sistema patentado de ventilación de la obra viva	29
Ilustración 10: Crucero “AIDAPrima” con sistema MALS en funcionamiento	30
Ilustración 11: Buque “MV Yamatai”.....	30
Ilustración 12: “La Naumón”, antes de ser renombrada, navegando	32
Ilustración 13: Plano de disposición general de "La Naumón"	34
Ilustración 14: Plano de formas de "La Naumón"	35
Ilustración 15: Resistencia de Fricción respecto a la velocidad.....	39
Ilustración 16: Resistencia Residual respecto a la velocidad.....	40
Ilustración 17: Resistencia Total respecto a la velocidad	40
Ilustración 18: Potencia Efectiva respecto a la velocidad	40
Ilustración 19: Porcentajes de R_F y R_R sobre R_T	41
Ilustración 20: Porcentajes de R_f y R_r sobre R_t	49
Ilustración 21: Resistencias de Fricción, con y sin ventilación, frente a la velocidad.	50
Ilustración 22: Resistencias Totales, con y sin ventilación, frente a la velocidad	51
Ilustración 23: Potencias Efectivas, con y sin ventilación, frente a la velocidad.....	51
Ilustración 24: Plano de las tuberías de ventilación	54
Ilustración 25: Disposición del equipo generador y tuberías de ventilación sobre el plano de Disposición General de "La Naumón".	56

Índice de tablas

Tabla 1: Características de "La Naumón"	33
Tabla 2: Valores para el uso del método de Van Oortmerssen	36
Tabla 3: Valores de los coeficientes de regresión	38
Tabla 4: Resultados método Van Oortmerssen	39
Tabla 5: Datos de "La Naumón" a la velocidad de proyecto	41
Tabla 6: Resultados de la resistencia de "La Naumón II"	48
Tabla 7: Datos de "La Naumón II" a la velocidad de proyecto	48
Tabla 8: Presupuesto de Operarios	59
Tabla 9: Presupuesto de Ingenieros.....	59
Tabla 10: Presupuesto de Materiales.....	60

Índice de ecuaciones

Eq. 1	14
Eq. 2	15
Eq. 3	15
Eq. 4	15
Eq. 5	15
Eq. 6	16
Eq. 7	16
Eq. 8	16
Eq. 9	16
Eq. 10	16
Eq. 11	17
Eq. 12	17
Eq. 13	18
Eq. 14	18
Eq. 15	19
Eq. 16	19
Eq. 17	19
Eq. 18	37
Eq. 19	37
Eq. 20	37
Eq. 21	38
Eq. 22	38
Eq. 23	38
Eq. 24	41
Eq. 25	41
Eq. 26	42
Eq. 27	46
Eq. 28	46
Eq. 29	47
Eq. 30	47
Eq. 31	47

Eq. 32	47
Eq. 33	52
Eq. 34	53
Eq. 35	57
Eq. 36	58

Resumen

En este proyecto, se quiere dar a conocer uno de los avances tecnológicos que se utilizan en la industria naval para reducir la resistencia al avance de un buque. Veremos los distintos tipos de resistencia que presenta una embarcación durante su navegación, así como las formas de calcularlas. A continuación, se detallarán los diferentes sistemas de ventilación de la obra viva y algunos ejemplos de buques que lo llevan implantado, y, por último, se estudiará la aplicación de uno de estos sistemas sobre el buque de carga general “*La Naumón*”.

Palabras Clave

Sistema de Ventilación, Obra Viva, Resistencia de Fricción, Resistencia Total, Microburbujas, Capa de Aire, ITTC, Cavidad Parcial.

Abstract

The aim of this research paper is to present one of the technological advances that are used in the naval industry to reduce the drag resistance of a ship.

We will see the different types of resistance that presents a vessel during its navigation, as well as the way to calculate them. Then, the different air lubrication systems will be detailed as well as some examples of ships that have it implanted. Finally, the application of the selected system from the available study range, will be integrated into MV *“La Naumón”*.

Key Words

Lubrication System, Hull, Friction Resistance, Total Resistance, Microbubbles, Air Layer, ITTC, Partial Cavity.

Siglas y Acrónimos

ALDR: Air Layer Drag Reduction (Reducción de la Resistencia mediante una capa de aire)

ALS: Air Lubrication System (Sistema de lubricación por aire)

BDR: Bubble Drag Reduction (Reducción de la Resistencia mediante burbujas)

IMO: International Maritime Organization (Organización Marítima Internacional)

ITTC-57: International Towing Tank Convention 1957 (Convención Internacional de Canales de Remolque 1957)

ITTC-78: International Towing Tank Convention 1978 (Convención Internacional de Canales de Remolque 1978)

MALS: Mitsubishi Air Lubrication System (Sistema de lubricación por aire de Mitsubishi)

MHI: Mitsubishi Heavy Industries (Industrias pesadas Mitsubishi)

PCDR: Partial Cavity Drag Reduction (Reducción de la resistencia mediante cavidad parcial)

SHI: Samsung Heavy Industries (Industrias pesadas Samsung)

TALDR: Transitional Air Layer Drag Reduction (Reducción de la Resistencia mediante una capa de aire transitoria)

L_{oa}: Length Over All (Eslora Total)

L_{wl}: Length Water Line (Eslora en la Línea de Flotación)

L_{pp}: Length Over Perpendiculars (Eslora entre Perpendiculares)

L_d: Length of Displacement (Eslora de Desplazamiento) ($L_D = (L_{PP} + L_{WL}) * 1/2$)

B: Beam (Manga)

T: Draft (Calado)

S: Superficie sumergida

C_p: Coeficiente Prismático Longitudinal

C_m: Coeficiente de la Maestra

C_b: Coeficiente de Bloque

V: velocidad

I_e: Semiángulo de Entrada en la Flotación

I_{cb}: Posición Longitudinal del Centro de Carena

TPM: Toneladas de Peso Muerto

F_n: Número de Froude
R_n: Número de Reynolds
R_F: Resistencia de Fricción
C_F: Coeficiente de Fricción
R_w: Resistencia por Formación de Olas
R_v: Resistencia Viscosa
C_v: Coeficiente Viscoso
R_R: Resistencia Residual
C_R: Coeficiente Residual
R_T: Resistencia Total
C_T: Coeficiente Total
P_E: Potencia Efectiva
ρ: Densidad
PVC: Policloruro de Vinilo

Capítulo 1: Introducción

El arte de la navegación es una de las actividades más antiguas que lleva a cabo el ser humano. Desde tiempos inmemoriales, el hombre ha surcado los mares para satisfacer sus necesidades comerciales, expandir sus territorios o por puro placer.

A lo largo de la historia, la navegación ha estado ligada a los avances tecnológicos de la época en que se encontraba la humanidad, así, se pasó de pequeñas embarcaciones hechas de paja o madera, a grandes buques de acero, de propulsar la embarcación a remo, a hacerlo mediante combustible y más modernamente mediante energías renovables.

Actualmente, con la concienciación sobre el medio ambiente, se intenta aplicar a la industria marítima avances tecnológicos que permitan reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera a la vez que se mantienen intactas las especificaciones de navegación tanto del buque como de la planta propulsora.

Uno de esos avances tecnológicos es la lubricación de la obra viva para así reducir la resistencia al avance del buque. Este sistema, como se verá más adelante, consiste en inyectar una pequeña capa de aire o burbujas entre el casco de la embarcación y el agua en que navega. De esta forma, el casco de la embarcación entrará en contacto con un fluido con viscosidad menor, lo que supondrá que la resistencia que ofrece dicho fluido al avance de la embarcación será menor.

Esta reducción de la resistencia puede suponer un ahorro tanto energético, como de combustible, lo que implica a su vez un ahorro económico. Debido a esto, grandes navieras e industrias marítimas están llevando a cabo investigaciones referentes a este sistema.

1.1. Objeto

El objeto de estudio es la posible implantación de un sistema de ventilación de la obra viva para reducir la resistencia al avance que se genera durante la navegación.

Capítulo 2: La resistencia al avance

2.1. Qué es la resistencia al avance

Antes de comenzar, debemos entender qué es la resistencia al avance de un buque.

Se trata de uno de los factores más importantes a tener en cuenta en la fase de diseño de un buque. De ella van a depender la velocidad máxima y de crucero, el consumo de combustible y la potencia de la planta propulsora, entre otras características de la embarcación.

La resistencia al avance de un buque se puede definir entonces como la fuerza necesaria para mover dicho buque a una velocidad determinada. Esta resistencia depende de las formas del buque y sus medidas.

A lo largo de la historia de la navegación se han realizado numerosos estudios para determinar y clasificar la resistencia al avance de un buque. La mayoría de ellos se basan principalmente en las divisiones de la Resistencia Total que realizaron Froude y Hughes.

Froude

William Froude (1810-1879), reflejó en su libro *“Experiments Upon the Resistance of Ships”* los resultados de sus estudios sobre la Resistencia, siendo el primero en utilizar un canal de ensayos hidrodinámicos para determinar las resistencias.

Tras numerosas experiencias y estudios, Froude separó la Resistencia Total (R_T) en dos componentes, la Resistencia por Fricción (R_F) y la Resistencia Residual (R_R), siendo la suma de ambas la Resistencia Total del buque.

$$R_T = R_F + R_R$$

Eq. 1

En sus ensayos, Froude dedujo que la Resistencia de Fricción dependía de la superficie del casco que se encuentra en contacto con el agua (Superficie Mojada). Por ello,

definió una placa plana equivalente a la superficie mojada y eslora del buque, sobre la que realizaba los ensayos hidrodinámicos.

Por otro lado, englobó en la Resistencia Residual todas aquellas resistencias que no fuesen por fricción de la placa plana.

Si escribimos la ecuación de Froude en forma de coeficientes, obtenemos la siguiente expresión adimensional:

$$C_T = C_{F0} + C_R$$

Eq. 2

Siendo:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

Eq. 3

$$C_{F0} = \frac{R_{F0}}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

Eq. 4

$$C_R = \frac{R_R}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

Eq. 5

Donde:

ρ = densidad del agua en que se estudia (kg/m³)

S = superficie mojada de la embarcación (m²)

V = velocidad de la embarcación (m/s)

Hughes

Mucho más tarde, en 1950, G. Hughes propuso definir la Resistencia Total (R_T) como la suma de la Resistencia Viscosa (R_V) y la Resistencia por Formación de Olas (R_W)

$$R_T = R_V + R_W$$

Eq. 6

Nuevamente, podemos escribir la ecuación mediante coeficientes, obteniendo la siguiente:

$$C_T = C_V + C_W$$

Eq. 7

Siendo:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

Eq. 8

$$C_V = \frac{R_V}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

Eq. 9

$$C_W = \frac{R_W}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

Eq. 10

Donde:

ρ = densidad del agua en que se estudia (kg/m^3)

S = superficie mojada de la embarcación (m^2)

V = velocidad de la embarcación (m/s)

El Coeficiente Viscoso (C_V) depende tanto de las formas como del número de Reynolds (R_n), mientras que el Coeficiente de Olas (C_W) depende del número de Froude (F_n).

De esta forma, se separan las influencias de los números de Reynolds (R_n) y de Froude (F_n). Esta suposición es admitida debido a sus efectos prácticos, a pesar de ser dos fenómenos no lineales que en ningún caso se pueden contraponer entre sí.

En la conferencia ITTC-78, se decide modificar la ecuación del Coeficiente Viscoso, debido a que la Resistencia Viscosa depende de las formas del buque, y al estar éstas englobadas en un factor denominado “r” (Factor de Formas) a efectos de cálculo, se determina la siguiente ecuación para el Coeficiente Viscoso:

$$C_V = r * C_{FO}$$

Eq. 11

Siendo:

$$r = 1 + k$$

Eq. 12

Donde “k” es un coeficiente de formas característico de cada embarcación.

2.2. Métodos de cálculo de la resistencia al avance

La Resistencia Total (R_T) de un buque se puede obtener de diversas formas, tanto de analítica como práctica:

- Comparación con buques tipo.
- Ensayos con modelos.
- Series sistemáticas.
- Métodos tabulados.

En el desarrollo de este trabajo, utilizaremos las ecuaciones obtenidas a partir de los ensayos con modelos. A pesar de no tener acceso a un canal de ensayos hidrodinámicos, las ecuaciones obtenidas tras los ensayos de otros tipos de buques pueden aplicarse al caso que se estudiará en este trabajo.

2.3. Métodos de cálculo por ensayos con modelos

En este apartado se detallan dos de los métodos de cálculo por ensayos con modelos, ambos acordados en distintas Convenciones Internacionales de Canales de Ensayo (ITTC)

Método del ITTC-57

A partir del método de Froude, se plantea ensayar un modelo con un número de Froude igual al del buque, consiguiendo esto a partir de la velocidad del modelo. De este modo, primero obtenemos el Coeficiente Total del modelo, para a continuación obtener el Coeficiente Total del buque.

En este método varía la fórmula del coeficiente de fricción (C_F), para, de esta forma, tener en cuenta la curvatura de la carena:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log R_n - 2)^2}$$

Eq. 13

Para corregir pequeños errores que se hayan podido realizar, se añade un término corrector llamado coeficiente adicional o de correlación (C_A); como valor para este coeficiente, se ha utilizado $C_A=0,4*10^{-3}$

De esta forma, quedaría la ecuación de la siguiente manera:

$$C_T = C_F + C_R + C_A$$

Eq. 14

Método del ITTC-78

En la convención de 1978, se modificó el procedimiento de cálculo del ITTC-57, para poder tener en cuenta la influencia de las formas de la carena y de la presión viscosa (Siguiendo la clasificación de Hughes), en el cálculo de la Resistencia de Fricción, obteniendo la siguiente ecuación:

$$C_T = r * C_F + C_W$$

Eq. 15

Siendo:

$$r = 1 + k$$

Eq. 16

Nuevamente, para corregir los posibles errores, se debe sumar el correspondiente coeficiente de correlación (C_A), y si consideramos la resistencia aerodinámica, se aplicará un segundo coeficiente de correlación (C_{AA}), quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$C_T = r * C_F + C_W + C_A + C_{AA}$$

Eq. 17

2.4. Métodos de cálculo obtenidos a partir de ensayos con modelos

En este apartado, se detallan dos métodos matemáticos para el cálculo de la resistencia, que se han obtenido a partir de ensayos con modelos. La finalidad de estos métodos es evitar la realización de ensayos con modelos para el cálculo de la resistencia de distintos buques.

Método de Holtrop

Este método es uno de los que más se utilizan en buques mercantes, tras su publicación en el año 1984 y su posterior corrección del año 1988. Se aplica en buques de desplazamiento con una o dos líneas de ejes.

En este método, se divide la resistencia de acuerdo con la hipótesis de Hughes, añadiendo otras componentes:

- Resistencia de los apéndices (R_{APP})
- Resistencia de presión adicional por el bulbo cerca de la superficie libre (R_B)
- Resistencia de presión adicional por el espejo de popa (R_{TR})
- Resistencia por la correlación entre el buque y el modelo (R_A)

Método de Van Oortmerssen

La descomposición de la resistencia en este método se basa en la división de Froude, Resistencia de Fricción y Resistencia Residual, estimándose la primera a través de la expresión de la ITTC-57 y la segunda, aplicando la teoría de resistencia por formación de olas.

Este método se explicará detalladamente más adelante, ya que será el método que apliquemos para calcular las resistencias del buque “La Naumón”

2.4. Importancia de la reducción de la resistencia al avance

La reducción de la resistencia al avance se puede justificar de varias maneras, gracias a los beneficios que aporta.

Importancia ambiental

En primer lugar, vamos a centrarnos en el impacto sobre el medio ambiente de la contaminación del transporte marítimo. A medida que pasan los años, el ser humano es más consciente del impacto sobre el medioambiente que suponen las actividades marítimas, que mueven el 90% del comercio global. Las emisiones de CO₂ emitidas por el transporte marítimo global representan alrededor de un 3% de las emisiones totales, lo que podría equivaler a la media de las emisiones totales de un país desarrollado.

Es por ello que la Organización Marítima Internacional (OMI) desarrolla continuamente nuevos reglamentos con respecto a las emisiones con el objetivo de reducirlas. Actualmente y desde enero de 2020, el contenido de azufre de los combustibles marinos debe ser menor al 0,5%, un paso intermedio para reducir al mínimo posible las emisiones contaminantes.

Estas emisiones de CO₂, tienen un impacto directo sobre la salud de las personas, así como sobre el medio ambiente, por lo que es una obligación reducirlas, o incluso eliminarlas.

Importancia económica

Por otro lado, existen grandes intereses económicos en la reducción de la energía consumida en cada travesía marítima. Empezando por la idea mas básica, cuanto menos energía por travesía se consume, más travesías es capaz de realizar el armador, lo que significa mayor cantidad de mercancía transportada y un mayor beneficio económico.

Al depender el sector marítimo de los combustibles fósiles, es considerado un sector frágil, debido a las fluctuaciones en el precio de los mismos. Es por esto por lo que las innovaciones en materia de reducción del consumo de combustible son muy bien recibidas por la comunidad marítima.

2.5. Descomposición de la resistencia al avance

Para la realización de este trabajo, vamos a descomponer la Resistencia Total (R_T) de la embarcación en Resistencia de Formas (R_f), Resistencia por formación de Olas (R_w) y Resistencia de Fricción (R_F), siendo esta descomposición resultado de un desarrollo de las hipótesis de Froude y de Hughes.

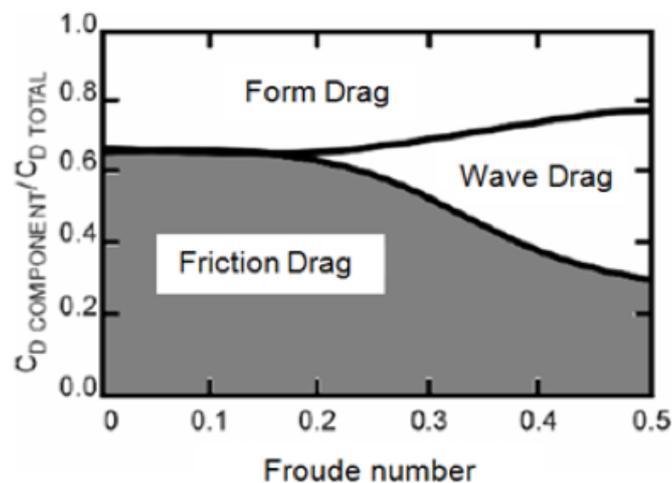


Ilustración 1: División de las resistencias al avance de una embarcación

Fuente: <https://www.semanticscholar.org>

Para buques con un número de Froude (F_n) igual o menor que 0.2, se requiere aproximadamente un 60% de la potencia del motor para superar esta resistencia, por lo que la ventilación de la obra viva estará centrada en reducir esta resistencia.

Capítulo 3: La ventilación de la obra viva

3.1. Qué es la Ventilación de la obra viva

La ventilación de la obra viva consiste en la inserción de aire entre el casco y el agua durante la navegación para, de esta forma, reducir la fricción del casco y por tanto reducir la resistencia total, con sus correspondientes beneficios.

Cuando nos referimos a la ventilación de la obra viva, debemos diferenciar dos puntos a la hora de clasificarlos:

- Obtención del aire
- Inyección del aire

La obtención del aire es la forma en que se obtiene o se genera el aire que más tarde va a ser inyectado entre el casco de la embarcación y el agua. Por otro lado, la inyección del aire se refiere a la forma en que se expulsa el aire que se va a utilizar para ventilar la obra viva.

3.1.1. Obtención del aire

Hay varias formas de agrupar los sistemas de ventilación de la obra viva. En este caso, la forma en la que me voy a basar para clasificarlos va a ser si necesitan de un sistema auxiliar para la generación de dicho aire o no.

[Con sistema auxiliar de generación de aire](#)

En este tipo de sistemas de ventilación de la obra viva, es necesario el uso de un sistema auxiliar para la generación del aire que se desea inyectar.

A la hora de instalar estas soluciones, se debe realizar un balance energético y un estudio económico para comprobar que el ahorro obtenido supere los costes de instalación y uso de la maquinaria auxiliar. Una de las ventajas de este sistema es que permite tener un mayor control sobre el flujo de aire que se desea inyectar y en qué momentos.

Sin sistema auxiliar de generación de aire

En este tipo sistemas de ventilación de la obra viva, se aprovecha el movimiento del buque para que mediante una serie de aperturas en el casco se capte el aire que será transmitido por tuberías al punto donde se desee inyectar el aire entre el casco y el agua.

En estos sistemas el único gasto es el de instalación, ya que no hay ningún consumo de energía.

Como desventaja, el control sobre el flujo de aire que se inyecta es mucho menor, pues depende de la velocidad del buque, o, de la apertura de los orificios, lo que implicaría un sistema de cierre por diafragma o similar.

3.1.2. Inyección del aire

Cuando nos referimos a la inyección del aire, se pueden destacar tres maneras principales de inyectarlo:

- Burbujas
- Capa de aire
- Cavidad parcial

Burbujas

En este primer caso, llamado Bubble Drag Reduction (BDR por sus siglas en inglés), el aire es inyectado mediante una ranura, a la capa límite.

La ranura por donde se expulsa el aire está diseñada de tal forma que se crean microburbujas de aire que se quedan atrapadas en su mayoría en la capa límite de la embarcación.

El objetivo de estas burbujas es reducir la densidad de la mezcla aire-agua, para así reducir la resistencia viscosa creada por el agua sobre el casco.

Estas burbujas suelen tener un diámetro menor de 0.1 mm, ya que, si tuviesen un diámetro mayor, no mantendrían la forma esférica y por tanto se deformarían en flujos turbulentos.

Sin embargo, este sistema de lubricación de la obra viva es bastante problemático, dado que las burbujas tienden a deslizarse fuera de la capa límite y de las zonas donde se quiere aplicar, por lo que se requiere de un gran número de puntos de inyección del aire para mantener una capa de burbujas estable.

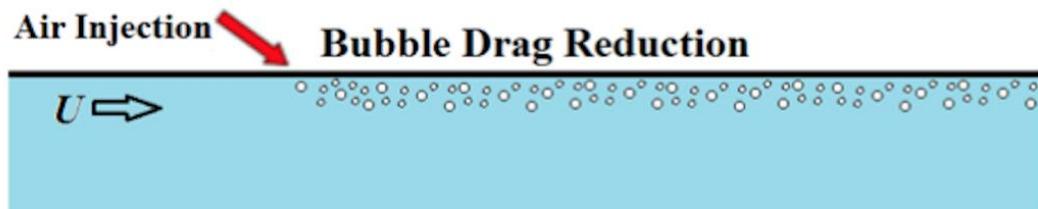


Ilustración 2: Sistema BDR

Fuente: <https://www.vesselfinder.com>

Como ejemplos de empresas que han investigado o aplicado este sistema BDR, podemos destacar los siguientes:

- Mitsubishi Air Lubrication (MALS): uno de los primeros sistemas comerciales de lubricación por aire, desarrollado por los astilleros japoneses Mitsubishi Heavy Industries (MHI), a partir de las investigaciones llevadas a cabo en Japón desde la década de 1980. Para la implantación de este sistema, Mitsubishi desarrolló sus propios turbo soplantes, Mitsubishi Turbo-blower. El sistema MALS es un sistema patentado que reduce la resistencia mediante microburbujas (sistema BDR).

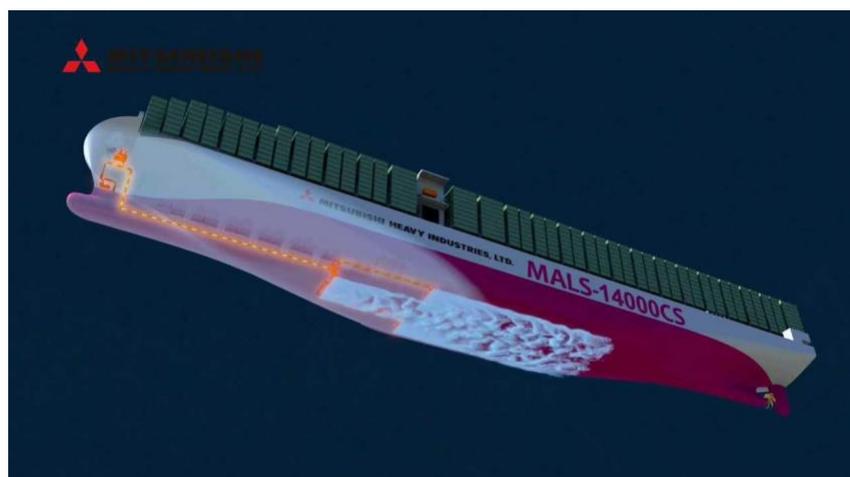


Ilustración 3: Sistema MALS

Fuente: <https://www.mhi.com>

- Samsung Heavy Industries SAVER System (SAVER Air): Samsung Heavy Industries (SHI) desarrolló un sistema de lubricación por aire conocido como SAVER que utiliza una serie de dispensadores de aire en el fondo del casco que mediante un flujo de burbujas de aire consigue reducir la resistencia por fricción de la embarcación.

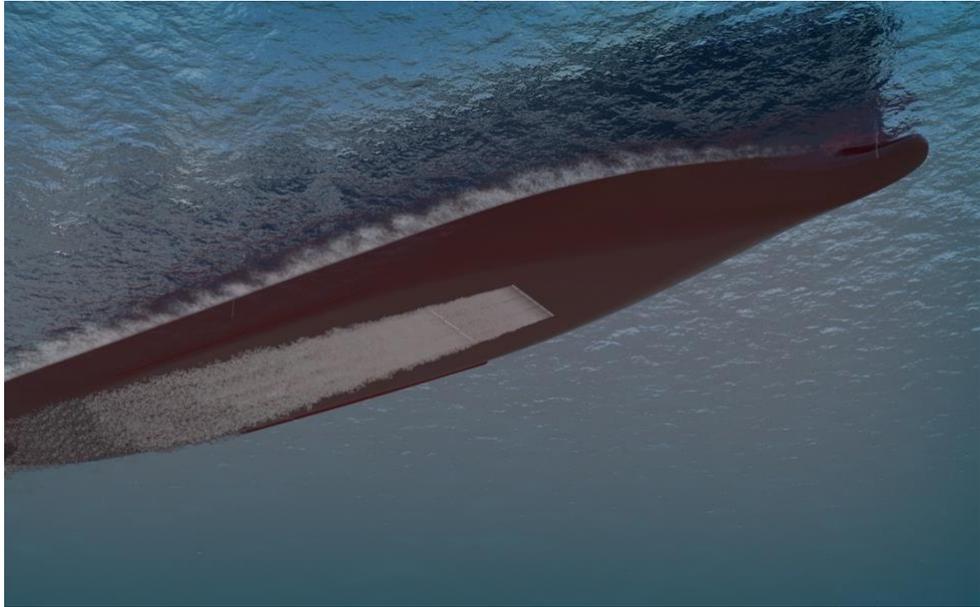


Ilustración 4: Sistema SAVER

Fuente: <http://es.marinelink.com>

- Silverstream System: Desarrollado a partir de las investigaciones de DK Group, utiliza una serie de orificios en el fondo del caso que inyectan el aire



para crear una capa de microburbujas bajo el fondo del casco

Ilustración 5: Sistema Silverstream

Fuente: <https://www.offshore-energy.biz>

Capa de aire

Llamado ALDR por sus siglas en inglés (Air Layer Drag Reduction), es una evolución del sistema anterior, BDR, al cual se llegó tras varios años de estudiar el sistema de inyección de burbujas.

Se concluyó que, si se inyectaba suficiente aire en la capa límite, el aire se concentraría creando una capa de aire, que cubriría una superficie mayor de área mojada del casco, y por tanto una mayor reducción de la resistencia viscosa.

Esta capa de aire puede ser continua, o interrumpirse en algunas zonas con burbujas, dependiendo de la cantidad de aire que se inyecte, siendo de esta forma una capa transitoria de aire (Transitional Air Layer Drag Reduction)

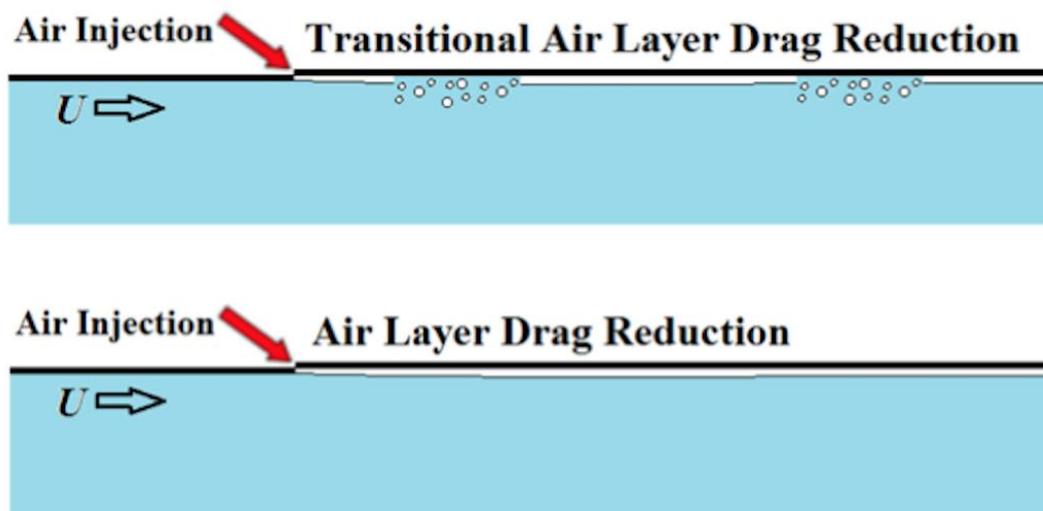


Ilustración 6: Sistemas TALDR y ALDR

Fuente: <https://www.sciencedirect.com>

Cavidad parcial

En este tercer modelo de sistema de lubricación, llamado en inglés Partial Cavity Drag Reduction (PCDR por sus siglas en inglés), se crea una pequeña cavidad en el fondo del casco, donde se inyecta el aire por un pequeño escalón que se va estrechando hasta volver a la altura del casco, consiguiendo así atrapar el aire y mantenerlo pegado al casco.

El aire se inyecta de manera continua, puesto que parte del gas se pierde debido al efecto de arrastre provocado por la cavidad. Sin embargo, con un diseño óptimo de la cavidad, estas pérdidas se reducen considerablemente.

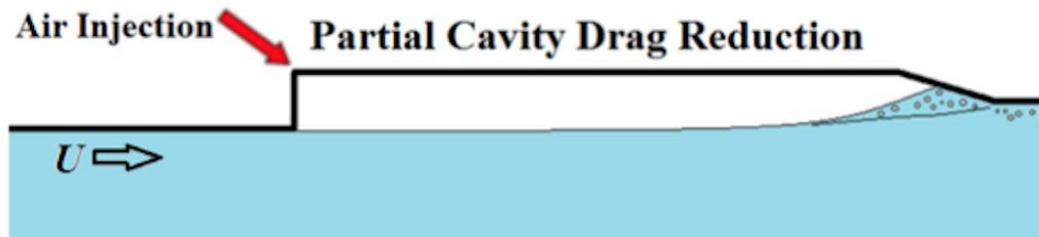


Ilustración 7: Sistema PCDR

Fuente: <https://www.sciencedirect.com>

Destaca el sistema ACES de Damen (Air Chamber Energy Saving), consistente en una lubricación de la obra viva mediante una cavidad en el fondo del casco. Este proyecto se inició en el marco del PELS 2 (Project Energy-saving air-Lubricated Ships)

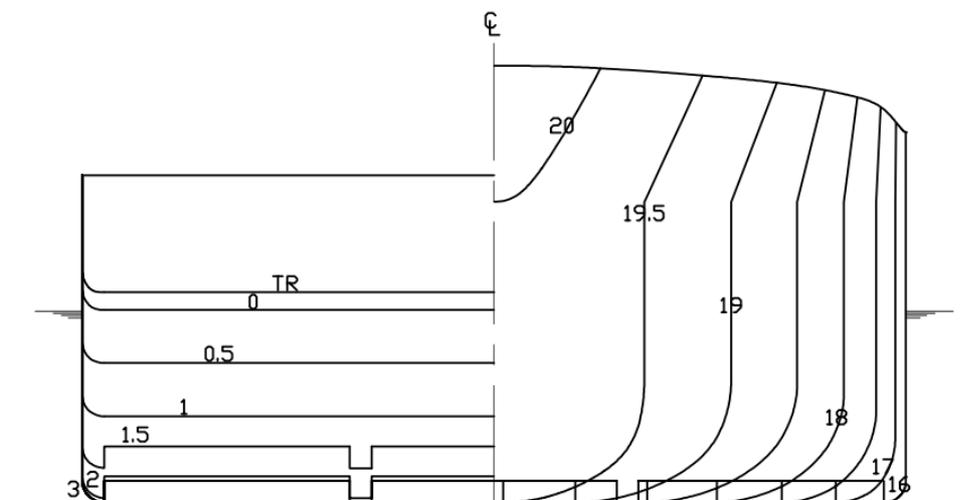


Ilustración 8: Sistema ACES

Fuente: <https://www.semanticscholar.org>

3.2. Ejemplos de ventilación de la obra viva

Actualmente, podemos encontrar sistemas de ventilación de la obra viva para reducir la resistencia al avance en un número considerable de embarcaciones.

Según la American Bureau of Shipping (ABS), hasta el año 2018 se podían identificar 23 embarcaciones con un sistema patentado de ventilación de la obra viva. Las embarcaciones que lo instalan son de todo tipo, desde buques contenedores hasta barcasas de río.

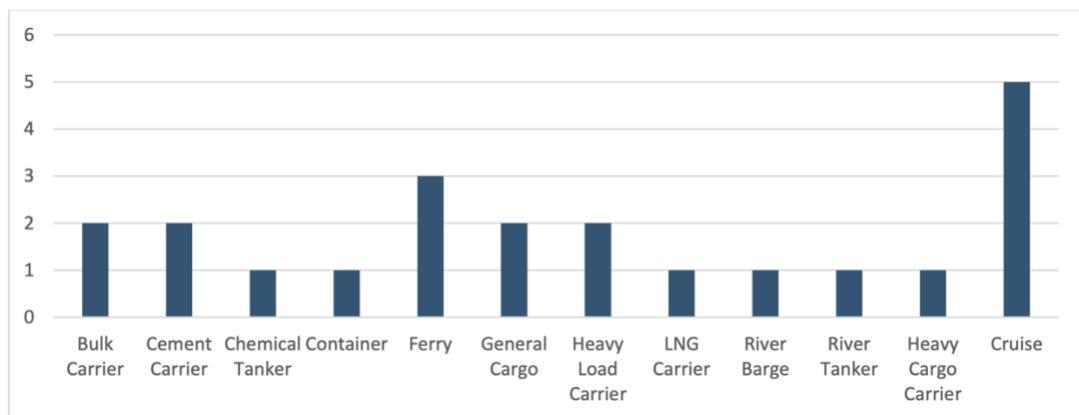


Ilustración 9: Buques con sistema patentado de ventilación de la obra viva

Fuente: <https://ww2.eagle.org>

Los más abundantes son los cruceros, debido a que sus armadores suelen tener un margen mayor de beneficio, que les permite introducir mejoras tecnológicas. En otros tipos de buques, los armadores cuentan con un margen menor y no son tan propensos a innovar tecnológicamente en sus embarcaciones con sistemas que no están desarrollados por completo.

El crucero “AIDAPrima”, de la naviera AIDA Cruisers y botado por MHI en el año 2016, incorpora un sistema MALS para reducir la resistencia al avance. Está previsto que este sistema favorezca una reducción de un 7% en el combustible.

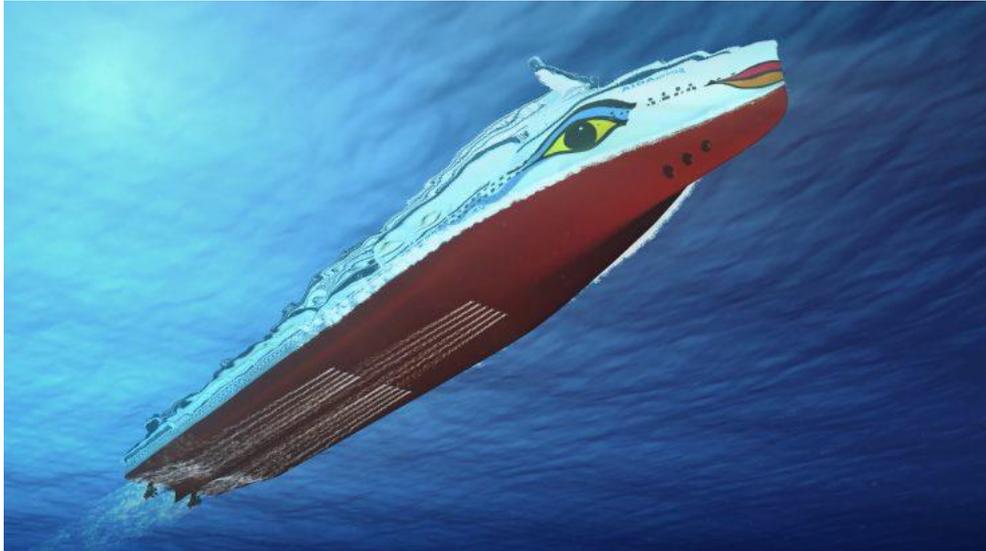


Ilustración 10: Crucero “AIDAPrima” con sistema MALS en funcionamiento

Fuente: <https://cruceator.com>

Otro buque notable, de carga pesada, que incorpora un sistema de ventilación de la obra viva, es el “MV Yamatai”, el cual, según algunos expertos ha llegado a desarrollar una capa continua de aire durante sus trayectos, siendo así un buque con sistema ALDR.



Ilustración 11: Buque “MV Yamatai”

Fuente: <https://www.vesselfinder.com>

3.3. Ubicación de la salida de la ventilación de la obra viva

Según la embarcación con que se vaya a trabajar, la salida del aire para la ventilación de la obra viva se podrá realizar por el fondo del casco o por los costados.

En el caso de embarcaciones con un coeficiente de bloque pequeño, lo que significa unas líneas más afiladas y con cuadernas con forma más parecida a una “V”, generalmente embarcaciones rápidas, la salida del aire se realizará en los costados del buque.

Por otro lado, aquellas embarcaciones que tienen un coeficiente de bloque alto, con líneas menos afiladas, fondo plano y cuadernas con forma más parecida a una “U”, la salida del aire se realizará por el fondo del casco.

Capítulo 4: Buque “La Naumón”

4.1. Características técnicas

“La Naumón” es un buque de carga general de construcción holandesa en 1977.



Ilustración 12: “La Naumón”, antes de ser renombrada, navegando

Fuente: <https://www.vesselfinder.com>.

Tras toda una vida de travesías como buque de carga general, a su jubilación, fue adquirido por una unión de armadores, en la que destacan La Fura del Baus, Bound 4 Blue y una Sociedad de Inversión. Su intención es continuar con el proyecto iniciado con su buque previo y homónimo, “Naumón”, como escenario itinerante, laboratorio y banco de pruebas de avances tecnológicos, tales como el especificado en este trabajo.

A continuación, se presentan las características principales, así como los planos de disposición general y plano de formas.

Eslora total	Loa	62,3	m
Eslora de flotación	Lwl	59,95	m
Eslora entre perpendiculares	Lpp	59,95	m
Eslora de desplazamiento	Ld	61,125	m
Manga	B	9,4	m
Calado	T	3,26	m
Superficie Mojada	S	868,05	m ²
Coefficiente Prismático Longitudinal	Cp	0,84	-
Coefficiente de la Maestra	Cm	0,996	-
Volumen de Carena	∇_c	1549	m ³
Velocidad (Nudos)	V(KN)	9,5	KN
Velocidad (metros/segundo)	V(m/s)	4,89	m/s
Semiángulo de entrada en la flotación	Ie	30	°
Posición Longitudinal del Centro de Carena	lcb	2,124	%
Peso Muerto	TPM	1164	T
Desplazamiento	Δ	1616	T

Tabla 1: Características de "La Naumón"

Elaboración: Propia

A continuación, se presenta el plano de formas del buque realizado en AutoCAD:

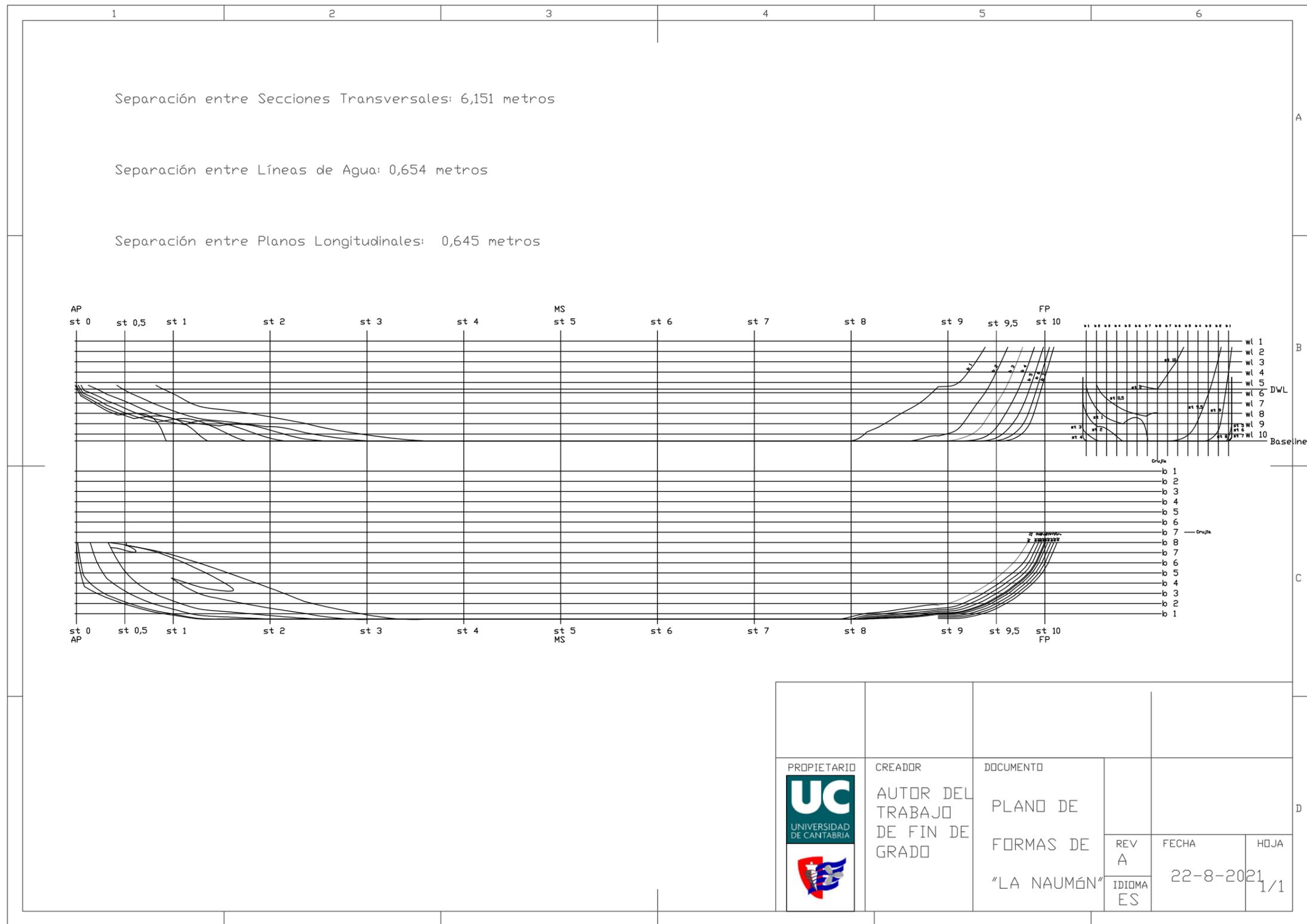


Ilustración 14: Plano de formas de "La Naumón"

Elaboración: Propia

4.2. Elección del buque

La elección de esta embarcación en concreto se debe al compromiso con el medio ambiente de sus actuales armadores, siempre dispuestos a implementar sistemas que ayuden a reducir las emisiones contaminantes a la atmósfera por parte de la embarcación.

4.3. Cálculos de resistencia de “La Naumón”

A continuación, se va a proceder a calcular las resistencias ofrecidas por el buque “*La Naumón*” durante su navegación en aguas saladas, en las condiciones actuales, es decir, sin ningún sistema incorporado de reducción de la resistencia.

Como se ha dicho anteriormente, se va a aplicar el método de Van Oortmerssen para calcular la resistencia al avance del buque “*La Naumón*”.

Este método se desarrolló a partir de 93 modelos de arrastreros y remolcadores, obteniendo 970 datos de resistencia, estando comprendidas las características de dichas embarcaciones entre los siguientes valores:

		Van Oort.	Naumón	
Número de Froude	Fn	0,05-0,5	0,201	-
Eslora de desplazamiento	Ld	8,00-80,0	61,125	m
Superficie Mojada	S	0-3500	868,05	m ²
Volumen de Carena	∇_c	0-2000	1549	m ³
Coefficiente de la Maestra	Cm	0,70-0,97	0,96	-
Semiángulo de entrada en la flotación	Ie	10,00-46,00	30,00	°
Posición Longitudinal del Centro de Carena	lcb	-7 – 2,8	2,124	%
Coefficiente Prismático Longitudinal	Cp	0,50-0,73	0,84	-
Relación Manga-Calado	B/T	1,90-4,00	2,19	-
Relación Eslora-Manga	Ld/B	3,00-6,20	6,5	-

Tabla 2: Valores para el uso del método de Van Oortmerssen

Elaboración: Propia

Para que el cálculo de la Resistencia siguiendo el método de Van Oortmerssen sea válido, los valores de “La Naumón” deben estar comprendidos entre los valores de la tabla anterior.

Se observa que todos los valores de nuestra embarcación están entre los límites de los ensayos, con la excepción del Coeficiente Prismático Longitudinal, (C_p de “La Naumón” 0,84) y la relación Eslora-Manga (Ld/B “La Naumón” 6,41).

Vamos a utilizar este método igualmente, asumiendo el posible error cometido por estos dos datos que no están comprendidos en los valores de los ensayos de Van Oortmerssen.

Según este método, la resistencia total presentada como la suma de la resistencia de fricción y resistencia por residual queda de la siguiente manera:

$$\frac{R_T}{\Delta} = \left[C_1 e^{-\left(\frac{1}{9}\right) * m * F_n^{-2}} + C_2 e^{-m * F_n^{-2}} + C_3 e^{-m * F_n^{-2}} * \sin(F_n^{-2}) + C_4 e^{-m * F_n^{-2}} * \cos(F_n^{-2}) \right] + \left[\frac{0,075 * \rho * S * V^2}{2 * (\log_{10}(R_n) - 2)^2 * \Delta} \right]$$

Eq. 18

Donde:

$$10^3 * C_i = d_{i,0} + d_{i,1} * LCB + d_{i,2} * LCB^2 + d_{i,3} * C_p + d_{i,4} * C_p^2 + d_{i,5} * \left(\frac{L_{WL}}{B}\right) + d_{i,6} * \left(\frac{L_{WL}}{B}\right)^2 + d_{i,7} * C_{WL} * d_{i,8} * (C_{WL})^2 + d_{i,9} * \left(\frac{B}{T}\right)^2 + d_{i,11} + C_m$$

Eq. 19

Utilizando la siguiente ecuación para calcular “m”:

$$m = 0,14347 - C_p^{-2,1976}$$

Eq. 20

“ C_{WL} ” es un parámetro para el ángulo de entrada en la flotación que se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{WL} = i_e * \left(\frac{L_{WL}}{B} \right)$$

Eq. 21

En la ecuación para calcular la Resistencia Total, podemos separar el cálculo de la Resistencia por Formación de Olas:

$$R_W = \left[C_1 e^{-\left(\frac{1}{9}\right)^{m * F_n^{-2}}} + C_2 e^{-m * F_n^{-2}} + C_3 e^{-m * F_n^{-2}} * \sin(F_n^{-2}) + C_4 e^{-m * F_n^{-2}} * \cos(F_n^{-2}) \right]$$

Eq. 22

Y el cálculo de la Resistencia de Fricción:

$$R_F = \left[\frac{0,075 * \rho * S * V^2}{2 * (\log_{10}(R_n) - 2)^2 * \Delta} \right]$$

Eq. 23

Los valores de los coeficientes de regresión se presentan en la siguiente tabla

i	1	2	3	4
di,0	79,32134	6714,88397	-908,44371	3012,14549
di,1	-0,09287	19,83	2,52704	2,71437
di,2	-0,00209	2,66997	-0,35794	0,25521
di,3	-246,45896	-19662,024	755,1866	-9198,8084
di,4	187,13664	14099,904	-48,93952	6886,60416
di,5	-1,42983	137,33613	9,86873	-159,92694
di,6	0,11898	-13,36938	-0,77652	16,23621
di,7	0,15727	-4,49852	3,7902	-0,82014
di,8	-0,00064	0,021	-0,01879	0,00225
di,9	-2,52862	216,44923	-9,24399	236,3797
di,10	0,50619	-35,07602	1,28571	-44,1782
di,11	1,62851	-128,72535	250,6491	207,2558

Tabla 3: Valores de los coeficientes de regresión

Elaboración: Propia

A continuación, se muestran los resultados de los cálculos de la resistencia:

KN	m/s				kN	kN	kN	kW
V		Fn	Rn	CF	RF	RR	RT	Pefectiva
3	1,543	0,063	7,83E+07	2,16E-03	2,828	0,23	3,057	4,72
4	2,058	0,085	1,04E+08	2,07E-03	4,860	2,91	7,767	15,98
5	2,572	0,106	1,31E+08	2,01E-03	7,402	9,42	16,827	43,28
6	3,086	0,127	1,57E+08	1,95E-03	10,444	17,88	28,324	87,42
7	3,601	0,148	1,83E+08	1,91E-03	13,975	26,89	40,862	147,14
7,5	3,858	0,159	1,96E+08	1,89E-03	15,922	32,00	47,922	184,88
8	4,115	0,169	2,09E+08	1,88E-03	17,990	37,82	55,812	229,68
8,5	4,372	0,180	2,22E+08	1,86E-03	20,177	56,54	76,712	335,42
9	4,630	0,190	2,35E+08	1,85E-03	22,482	60,76	83,238	385,36
9,5	4,887	0,201	2,48E+08	1,83E-03	24,906	115,23	140,133	684,80
10	5,144	0,212	2,61E+08	1,82E-03	27,447	103,27	130,719	672,42
10,5	5,401	0,222	2,74E+08	1,81E-03	30,104	191,78	221,881	1198,42
11	5,658	0,233	2,87E+08	1,80E-03	32,879	321,88	354,755	2007,34
11,5	5,916	0,243	3,00E+08	1,79E-03	35,769	295,19	330,957	1957,81
12	6,173	0,254	3,13E+08	1,78E-03	38,775	289,14	327,916	2024,16
13	6,687	0,275	3,39E+08	1,76E-03	45,131	840,98	886,107	5925,57

Tabla 4: Resultados método Van Oortmerssen

Elaboración: Propia

Para facilitar la comprensión de los valores, se presentan a continuación gráficamente las variaciones de las Resistencias de Fricción, Residual y Total con respecto a la velocidad, así como la variación de la Potencia Efectiva con respecto a la velocidad.

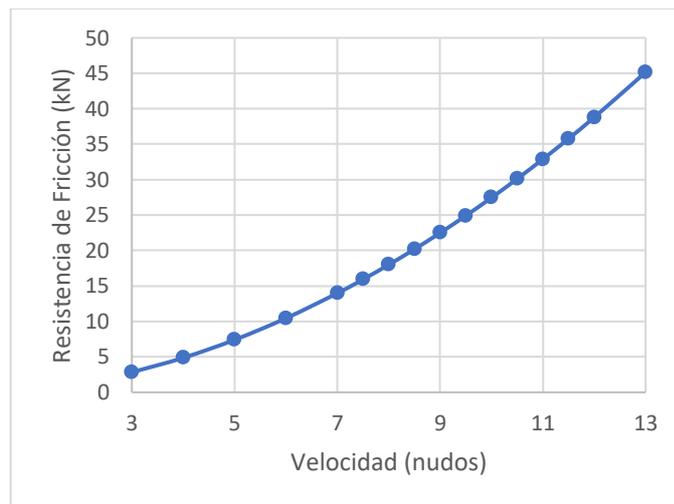


Ilustración 15: Resistencia de Fricción respecto a la velocidad

Elaboración: Propia

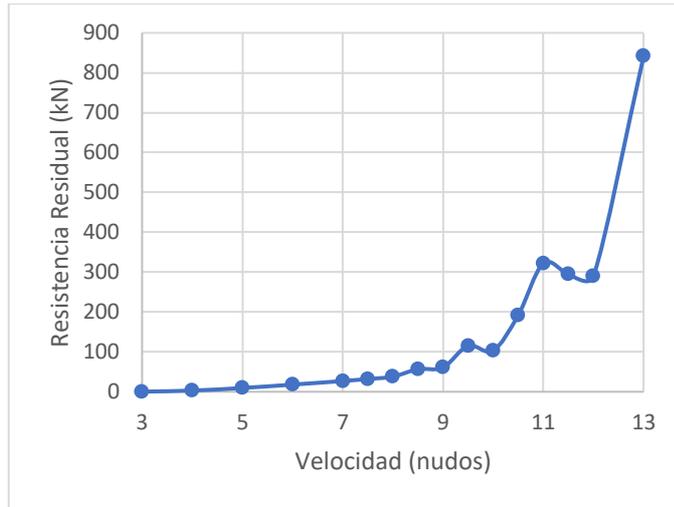


Ilustración 16: Resistencia Residual respecto a la velocidad

Elaboración: Propia

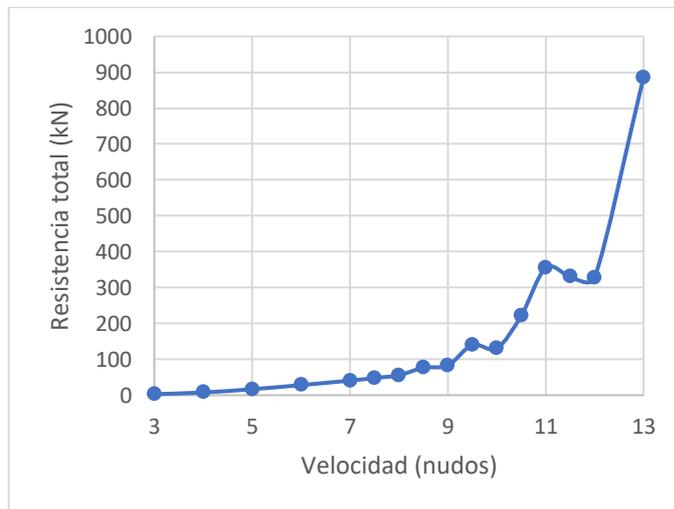


Ilustración 17: Resistencia Total respecto a la velocidad

Elaboración: Propia

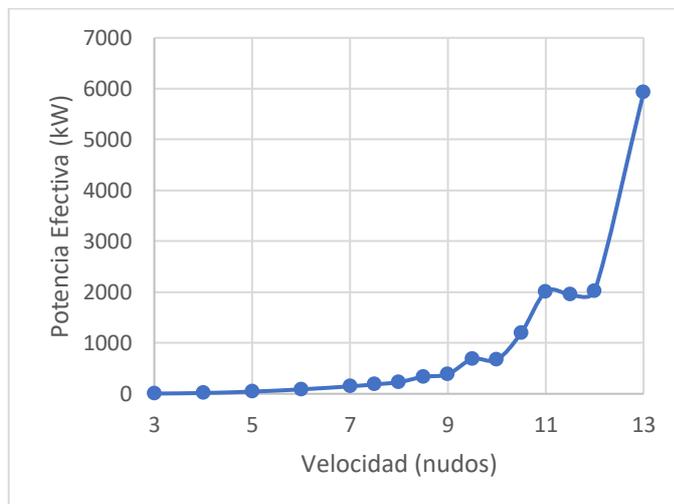


Ilustración 18: Potencia Efectiva respecto a la velocidad

Elaboración: Propia

La velocidad de proyecto de “La Naumón” es de 9,5 KN, por lo que nos quedaremos con la siguiente fila de resultados:

KN	m/s				kN	kN	kN	kW
V		Fn	Rn	CF	RF	RR	RT	Pefectiva
9,5	4,887	0,201	2,48E+08	1,83E-03	24,906	115,23	140,133	684,80

Tabla 5: Datos de "La Naumón" a la velocidad de proyecto

Elaboración: Propia

Para visualizar de forma gráfica el porcentaje que supone la Resistencia de Fricción y la Resistencia Residual sobre la Total, a la velocidad de proyecto, se presenta el siguiente gráfico de sectores:

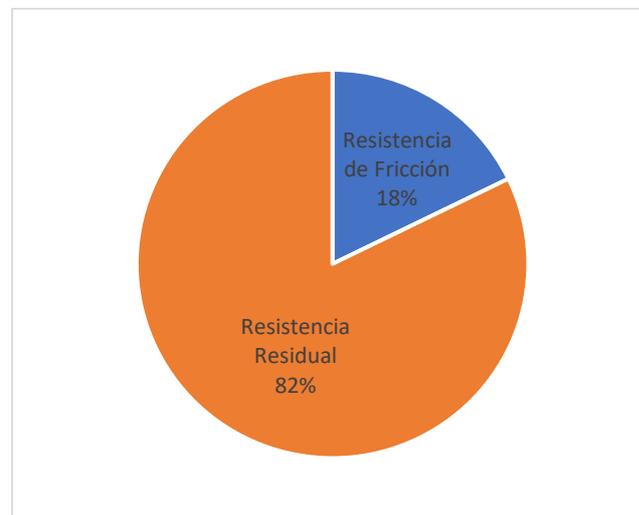


Ilustración 19: Porcentajes de R_F y R_R sobre R_T

Elaboración: Propia

En este gráfico, se puede observar que la Resistencia de Fricción supone un 18% de la Resistencia Total cuando la embarcación navega a 9,5 Nudos.

A continuación, debemos calcular la Resistencia Viscosa a la velocidad de 9,5 KN. Para ello, utilizamos la siguiente ecuación:

$$R_V = r * R_F$$

Eq. 24

Siendo “r” el factor de formas, resultado de sumar el coeficiente de formas “k” más 1:

$$r = 1 + k$$

Eq. 25

Para obtener el valor de “k”, nos basamos en el procedimiento descrito por Granville, donde define la siguiente ecuación:

$$k = 18,7 * \left(C_B * \frac{B}{L} \right)^2$$

Eq. 26

Obteniendo un coeficiente de formas $k = 0,28$ y por tanto un factor de formas $r = 1,28$.

Aplicando los valores de “r” (1,28) y de R_F (24.905 N), obtenemos una Resistencia Viscosa de $R_V = 31.879,147$ N.

Se ha decidido aplicar el Factor de Formas para el cálculo de la Resistencia Viscosa a pesar de que el método original de Van Oortmerssen no lo contempla.

Los valores que debemos destacar, para su posterior comparación una vez instalado el sistema de ventilación de la obra viva son los siguientes:

$$R_F = 24.905,58 \text{ N}$$

$$R_V = 31.879,147 \text{ N}$$

$$R_T = 143.958,67 \text{ N}$$

$$P_{\text{Efectiva}} = 703,5 \text{ KW}$$

Capítulo 5: Elección del sistema de ventilación

Llegados a este punto, toca decidir el sistema que se quiere aplicar sobre nuestro buque.

Debemos elegir tanto el sistema de obtención del aire, como el sistema de inyección del aire.

Así, se nos presentan dos opciones para obtener el aire:

- Con sistema auxiliar de generación de aire:
- Sin sistema auxiliar de generación de aire:

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada sistema, anteriormente explicados, nos decantaremos por un sistema de ventilación de la obra viva con sistema auxiliar de generación de aire, debido a que la embarcación objeto de estudio en este trabajo está previsto que pase por astillero para realizar las modificaciones necesarias para su funcionamiento como teatro flotante, así como para la instalación de una vela rígida que le ayudará en la navegación. De esta forma, una vez en astillero, se podrán llevar a cabo las modificaciones necesarias para instalar el sistema de ventilación.

La elección de este tipo de sistema se debe a que con ella se podrá conseguir el flujo adecuado para la creación de la capa de aire bajo el casco de la embarcación con independencia de la velocidad a la que navegue.

En lo que respecta a la inyección del aire, como hemos visto anteriormente, tenemos varias opciones:

- Sistema BDR
- Sistema ALDR
- Sistema PCDR

Para evitar modificar el casco de la embarcación más de lo necesario, descartaremos el sistema PCDR, ya que requiere crear unas cavidades en el fondo del casco, que siendo "*La Naumón*" un buque ya construido, significaría una obra de modificación casi completa del casco, lo que supondría un costo excesivo.

Los otros dos sistemas, se diferencian uno de otro del tipo de capa de aire que inyectan, el BDR inyecta una capa de burbujas, mientras que el ALDR inyecta una capa continua de aire. Entre medias de los dos sistemas se encuentra el TALDR, que intercala capa continua de aire con capa de burbujas.

Al instalar un sistema con maquinaria auxiliar para la generación del aire, obtendremos una capa continua de aire con independencia de la velocidad de la embarcación, ajustando el flujo a la velocidad a la que se navegue en cada momento.

Por último, en lo que se refiere a la situación de los orificios de salida del aire, al ser "*La Naumón*" un buque con fondo plano, no hay ninguna duda de que se ubicarán en el fondo del casco, para así crear la capa bajo el casco de la embarcación.

Capítulo 6: Aplicación de un sistema de ventilación en el buque “*La Naumón*”

En este capítulo, se va a proceder a estudiar la aplicación del sistema anteriormente seleccionado en el buque elegido. De esta forma, tenemos el buque de carga general “*La Naumón*”, y un sistema de ventilación de la obra viva con sistema auxiliar de generación del aire, que inyecte una capa de aire continuo bajo el casco.

Para facilitar la comprensión de lo que se va a realizar de aquí adelante, se procederá a llamar “*La Naumón II*” al buque “*La Naumón*”, una vez instalado el sistema de ventilación de la obra viva.

6.1. Cálculo de la resistencia de “La Naumón II”

Para calcular la resistencia de una embarcación con ventilación de la obra viva, se utiliza un nuevo coeficiente “f” que hace referencia al porcentaje de la obra viva que está cubierta por aire. Se toman como valores límite 20 (f=0,2) y 60 (f=0,6).

Por otro lado, la resistencia de fricción se calculará como la suma de las resistencias de fricción del agua y del aire, quedando la siguiente fórmula para calcularla:

$$R_F = \frac{1}{2} * v^2 * (\rho_{Agua} * S_{Agua} * C_{F.as} + \rho_{Aire} * S_{Aire} * C_{F.ar})$$

Eq. 27

Siendo:

ρ_{Agua} = Densidad del agua salada

S_{Agua} = Superficie del casco en contacto con el agua

$C_{F.as}$ = Coeficiente de fricción de la parte del casco en contacto con el agua

ρ_{Aire} = Densidad del aire

S_{Aire} = Superficie del casco en contacto con el aire

$C_{F.ar}$ = Coeficiente de fricción de la parte del casco en contacto con el aire

Esta fórmula ha sido obtenida a partir de ensayos con modelos en distintos estudios universitarios.

Se puede calcular un Coeficiente de Fricción Mixto con la siguiente ecuación:

$$C_{F.Mix} = \frac{R_{F.Mix}}{\frac{1}{2} * \rho_{Agua} * v^2 * S_{Total}}$$

Eq. 28

Denotando los ratios aire-agua en la superficie mojada y densidades de la siguiente manera:

$$f = \frac{S_{Aire}}{S_{Agua}}$$

Eq. 29

$$d = \frac{\rho_{Aire}}{\rho_{Agua}}$$

Eq. 30

Sustituyendo en la ecuación anterior, obtendríamos la siguiente ecuación:

$$C_{F.Mix} = \frac{C_{F.Agua} + d * f * C_{F.Aire}}{1 + f}$$

Eq. 31

Calculando los coeficientes de fricción tanto del aire como del agua con las viscosidades cinemáticas del aire y del agua respectivamente.

Al depender principalmente del ratio de superficies, el valor del factor f se debe imponer, ya que solamente se puede obtener mediante observación directa, como se concluye en la tesis “*Investigation of the Air-Lubrication Effect on Friction Resistance*”, escrita por Antonio Gallardo Martínez y dirigida por el Dr. José Enrique Gutiérrez Romero y el Dr. Stefan Kyulevcheliiev.

De este modo, para calcular el valor de f suponemos unos valores comprendidos entre 0,2 (20%) y 0,53 (53%). Para calcular la variación de estos valores, dependientes de la velocidad, he desarrollado la siguiente ecuación para definir la variación lineal del factor f:

$$f = 0,044v + 0,0402$$

Eq. 32

Siendo:

f = porcentaje de área cubierto por aire

v = velocidad de la embarcación (KN)

Tras realizar los cálculos pertinentes, se han obtenido los siguientes resultados:

-	KN	-	-	-	kN	kN	kN	kW
f	v	CFas	CFar	CFmix	RFmix	Rr	Rt	Pef
0,2	3	2,15E-03	3,07E-03	1,79E-03	1,90	0,22905	2,13	3,28
0,23	4	2,06E-03	2,92E-03	1,68E-03	3,16	2,90722	6,07	12,48
0,26	5	2,00E-03	2,81E-03	1,58E-03	4,67	9,42463	14,09	36,25
0,29	6	1,95E-03	2,72E-03	1,51E-03	6,40	17,88301	24,28	74,94
0,32	7	1,90E-03	2,66E-03	1,44E-03	8,33	26,75427	35,09	126,34
0,35	7,5	1,89E-03	2,63E-03	1,40E-03	9,26	31,58996	40,85	157,61
0,38	8	1,87E-03	2,60E-03	1,36E-03	10,22	38,28021	48,50	199,59
0,41	8,5	1,85E-03	2,57E-03	1,32E-03	11,20	57,8802	69,08	302,04
0,44	9	1,84E-03	2,55E-03	1,28E-03	12,20	57,04471	69,24	320,57
0,47	9,5	1,83E-03	2,53E-03	1,24E-03	13,22	119,05309	132,27	646,38
0,5	10	1,81E-03	2,51E-03	1,21E-03	14,25	109,60405	123,86	637,12
0,53	10,5	1,80E-03	2,49E-03	1,18E-03	15,31	164,41603	179,72	970,71

Tabla 6: Resultados de la resistencia de "La Naumón II"

Elaboración: Propia

La superficie ventilada, a la velocidad de proyecto de 9,5 KN es de un 47% de la superficie total sumergida de nuestra embarcación. Nos quedaremos por tanto con los siguientes resultados:

-	KN	-	-	-	kN	kN	kN	kW
f	v	CFas	CFar	CFmix	RFmix	Rr	Rt	Pef
0,47	9,5	1,83E-03	2,53E-03	1,24E-03	13,22	119,05309	132,27	646,38

Tabla 7: Datos de "La Naumón II" a la velocidad de proyecto

Elaboración: Propia

Se presenta a continuación en forma de gráfico de sectores el porcentaje de la Resistencia Total que pertenece a la Resistencia de Fricción y a la Resistencia Residual:

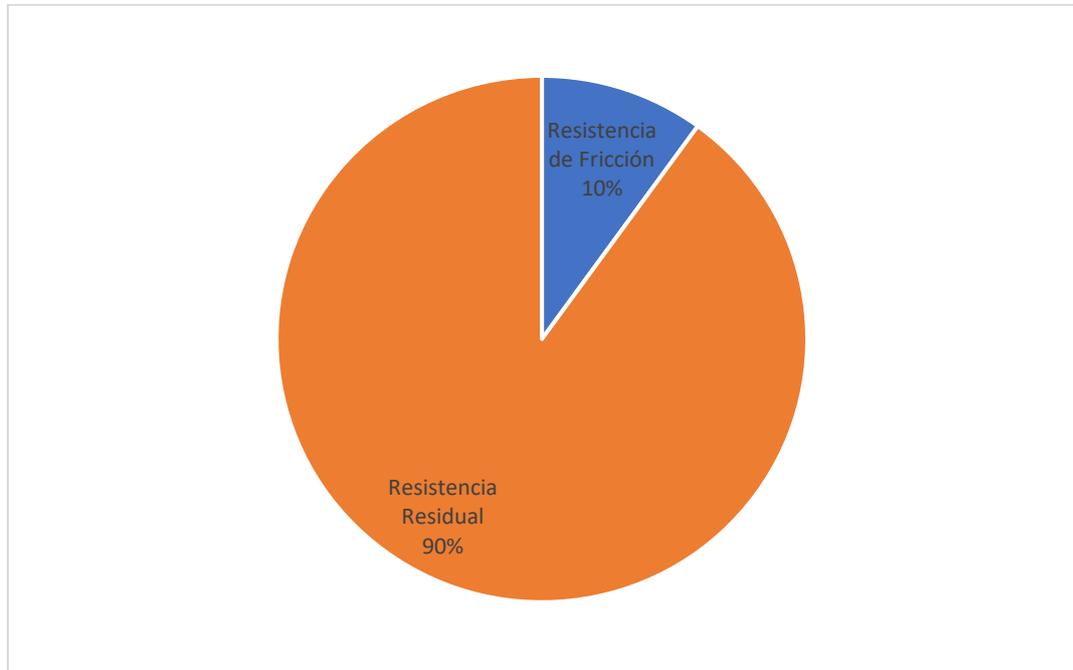


Ilustración 20: Porcentajes de Rf y Rr sobre Rt

Elaboración: Propia

Nuevamente, debemos calcular la Resistencia Viscosa por el siguiendo los pasos descritos en el apartado 4.3. Cálculos de Resistencia de “La Naumón”, obteniendo el una Resistencia Viscosa de $R_v = 20.672,46 \text{ N}$.

Para el cálculo del Coeficiente de Fricción mixto, hemos utilizado una viscosidad del aire a 1.3 bares de presión de $1,087 \text{ m}^2/\text{s}$, obteniendo un número de Reynolds $R_n = 2,8 \cdot 10^7$.

Por tanto, obtenemos los siguientes datos:

“La Naumón II”

$R_F = 13.217,20 \text{ N}$

$R_V = 16.918,02 \text{ N}$

$R_T = 132.270,29 \text{ N}$

$P_{\text{Efectiva}} = 646,38 \text{ KW}$

“La Naumón”

$R_F = 24.905,58 \text{ N}$

$R_V = 31.879,147 \text{ N}$

$R_T = 143.958,67 \text{ N}$

$P_{\text{Efectiva}} = 703,5 \text{ KW}$

Comparando ambos, observamos una reducción de un 2.8% de la potencia efectiva, tras la consiguiente reducción tanto de la resistencia de fricción como de la resistencia total.

Para visualizar más fácilmente los resultados, se presentan a continuación una serie de gráficos comparando las Resistencias de Fricción, las Resistencias Totales y las Potencias efectivas, tanto con ventilación de la obra viva como sin ella, frente a las distintas velocidades de *“La Naumón”*.

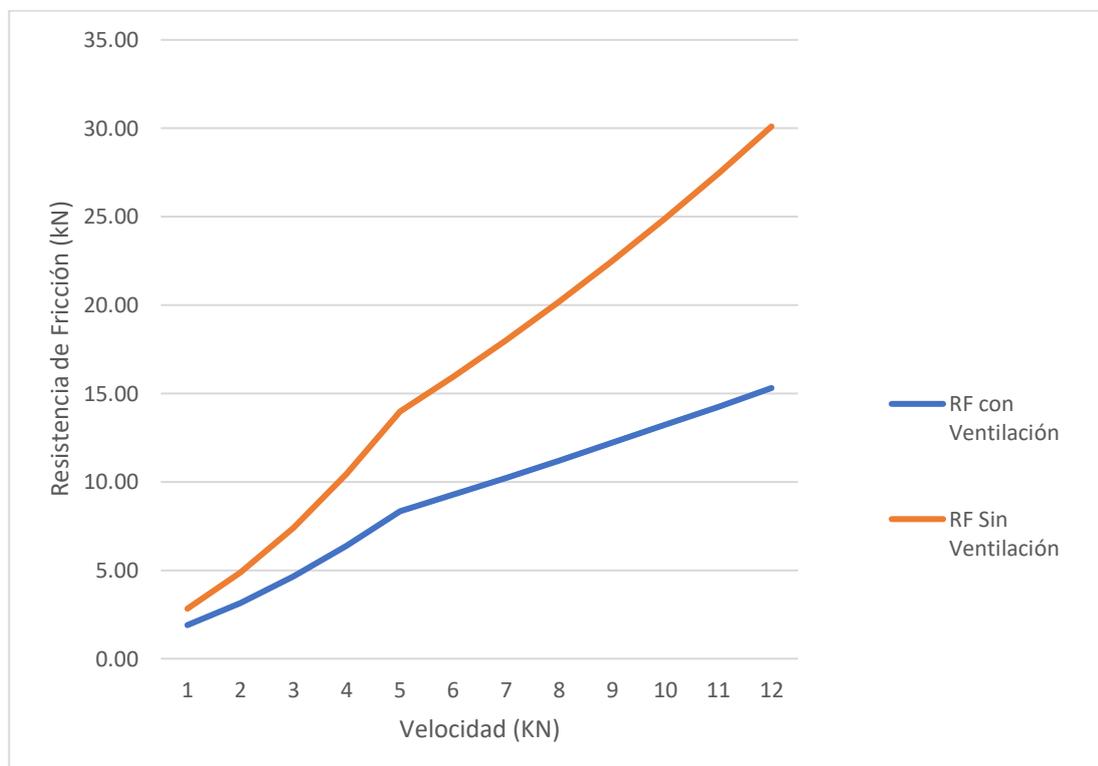


Ilustración 21: Resistencias de Fricción, con y sin ventilación, frente a la velocidad.

Elaboración: Propia

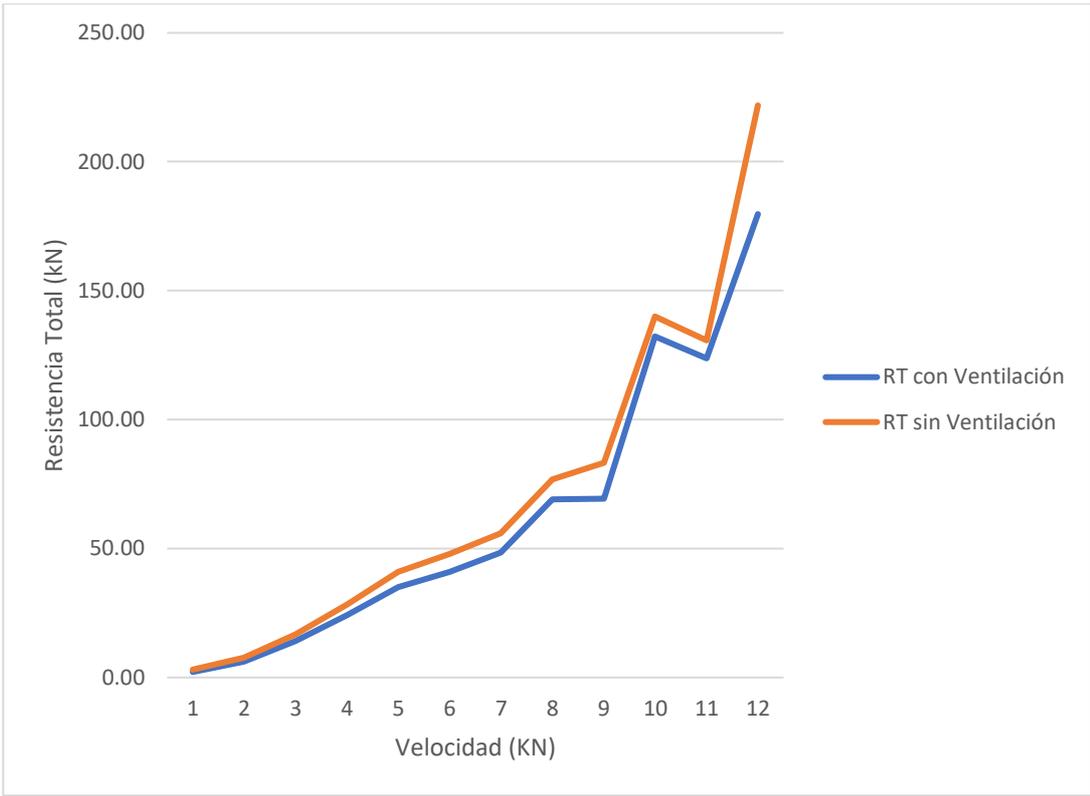


Ilustración 22: Resistencias Totales, con y sin ventilación, frente a la velocidad

Elaboración: Propia

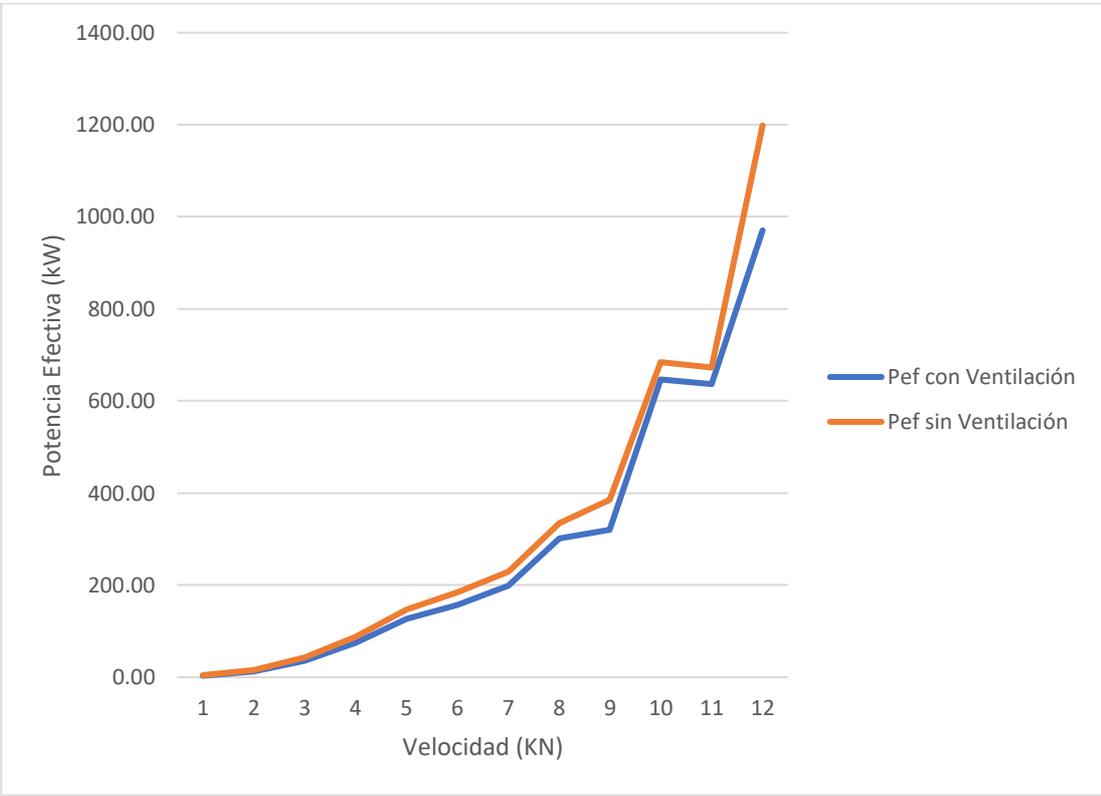


Ilustración 23: Potencias Efectivas, con y sin ventilación, frente a la velocidad.

Elaboración: Propia

6.2. Cálculo del sistema de generación de aire

En este apartado, se van a dimensionar los elementos necesarios del sistema de generación de aire para ventilar el casco del buque “La Naumón II”

6.2.1. Cálculo del caudal necesario

Para calcular el caudal necesario que se debe inyectar bajo el fondo de la embarcación, primero se debe determinar el grosor de la capa de aire que se desea inyectar bajo el casco. En nuestro caso, se ha decidido inyectar una capa de 3 mm de espesor.

Para calcular el caudal de aire, utilizamos la siguiente fórmula:

$$t_b = \frac{Q}{U * W}$$

Eq. 33

Donde:

Q = flujo volumétrico de aire requerido (m³/s)

W = ancho del área que se desea ventilar (m)

U = velocidad del fluido libre (m/s)

t_b = espesor de la capa de burbujas (m)

Esta ecuación ha sido obtenida de la tesis “*Investigation of the Air-Lubrication Effect on Friction Resistance*”, escrita por Antonio Gallardo Martínez y dirigida por el Dr. José Enrique Gutiérrez Romero y el Dr. Stefan Kyulevcheliiev.

Los datos que vamos a utilizar para este cálculo serán los siguientes:

W = 8,4 m (La manga máxima es de 9,4 m)

U = 4,9 m/s (La velocidad de proyecto es de 9,5 KN)

t_b = 0,003 m

Quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$0,003 = \frac{Q}{4,9 * 8,4}$$

Eq. 34

Y obteniendo un resultado $Q = 0,1389 \text{ m}^3/\text{s}$.

Debido a que en las fichas técnicas de los compresores, el flujo de aire se presenta en litros partidos de minutos (l/min), pasamos el resultado obtenido a estas unidades, obteniendo $Q = 8.334 \text{ l/min}$.

6.2.3. Grupo Generador del aire de ventilación

Para poder mantener constante el volumen de aire que se necesita proveer para ventilar el fondo de la obra viva, se han seleccionado una serie de elementos que cumplan las características requeridas.

Elementos de la Instalación

- Secador (2 unidades SITASA AMD43 de 4.300 l/min cada una)
- Filtro aire aspirado (2 unidades SITASA FTS55 de 5.500 l/min cada una)
- Válvula antirretorno (3 unidades)
- Compresor (2 unidades SITASA Vega 4010 de 4.300 l/min cada una)
- Acumulador de aire (1 unidad FICAL FIC-30000/8 de 30.000 L a 8 bares)
- Filtro (1 unidad SITASA FTS080 de 8.100 l/min)
- Regulador (1 unidad)
- Manómetro (2 unidades)
- Purgador manual (1 unidad)
- Tuberías de PVC

Se ha elegido instalar las tuberías de PVC, debido a su gran resistencia química a ácidos y alcalinos, así como a hidrocarburos. También destaca en este material la resistencia a la humedad, al contrario que las tuberías metálicas.

6.2.4. Plano del grupo generador

A continuación, se presenta el plano del grupo generador de aire:

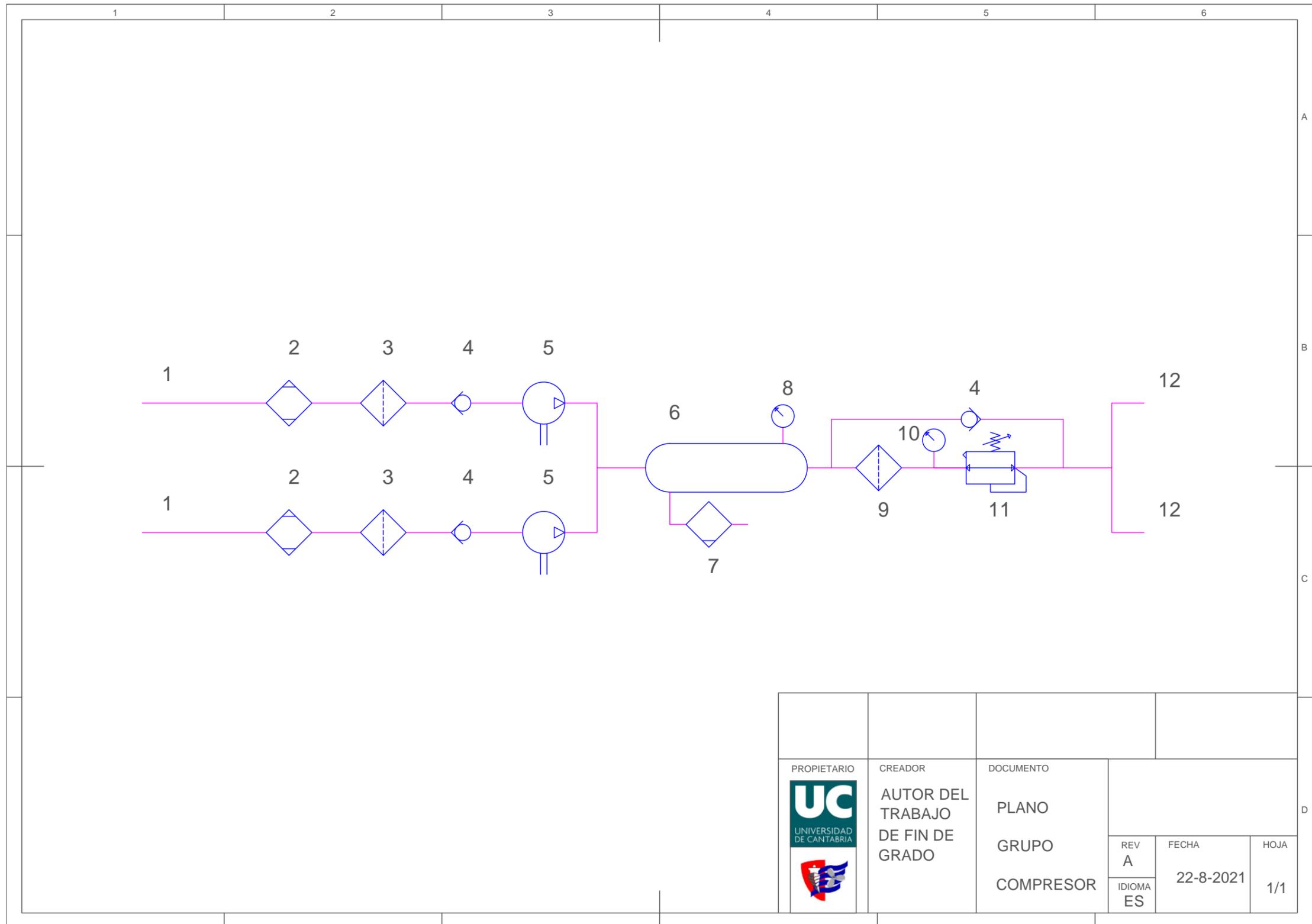


Ilustración 24: Plano de las tuberías de ventilación

Elaboración: Propia

6.3. Diseño del sistema de ventilación

En este apartado se va a diseñar la ubicación del sistema de ventilación sobre los planos de “La Naumón”

6.3.1. Ubicación del grupo generador de aire

Para la ubicación del grupo generador de aire, se ha decidido instalar los componentes de manera separada.

Por una parte, los dos compresores de aire se instalarán en la sala de máquinas, junto con los secadores, para aprovechar la insonorización de dicha sala y colocando las tomas de aire sobre el puente de mando de la embarcación. De esta forma, se asegura que el aire que se aspira está libre de impurezas y sin contaminar por los gases de escape del motor. Se instalará un grupo compresor-secador a cada lado de la crujía para evitar comprometer la estabilidad lateral de la embarcación

El depósito acumulador, se situará en la bodega, junto al mamparo más a popa, centrado en crujía para evitar desequilibrios laterales en la estabilidad lateral de la embarcación.

Se ubicarán dos conjuntos de salidas de ventilación paralelos, a 1,53 metros de la línea de crujía cada uno, y con salidas en las cuadernas 35 y 55. Estas tuberías de ventilación, así como los demás componentes del grupo generador (filtro, purgador, manómetro y regulador de presión), se ubicarán en los tanques de lastre situados en el fondo del casco.

6.3.2. Planos de la instalación

Los planos de la instalación del grupo generador de aire y de las tuberías de ventilación se presentan a continuación, presentados sobre el plano original de Disposición General de “La Naumón”.

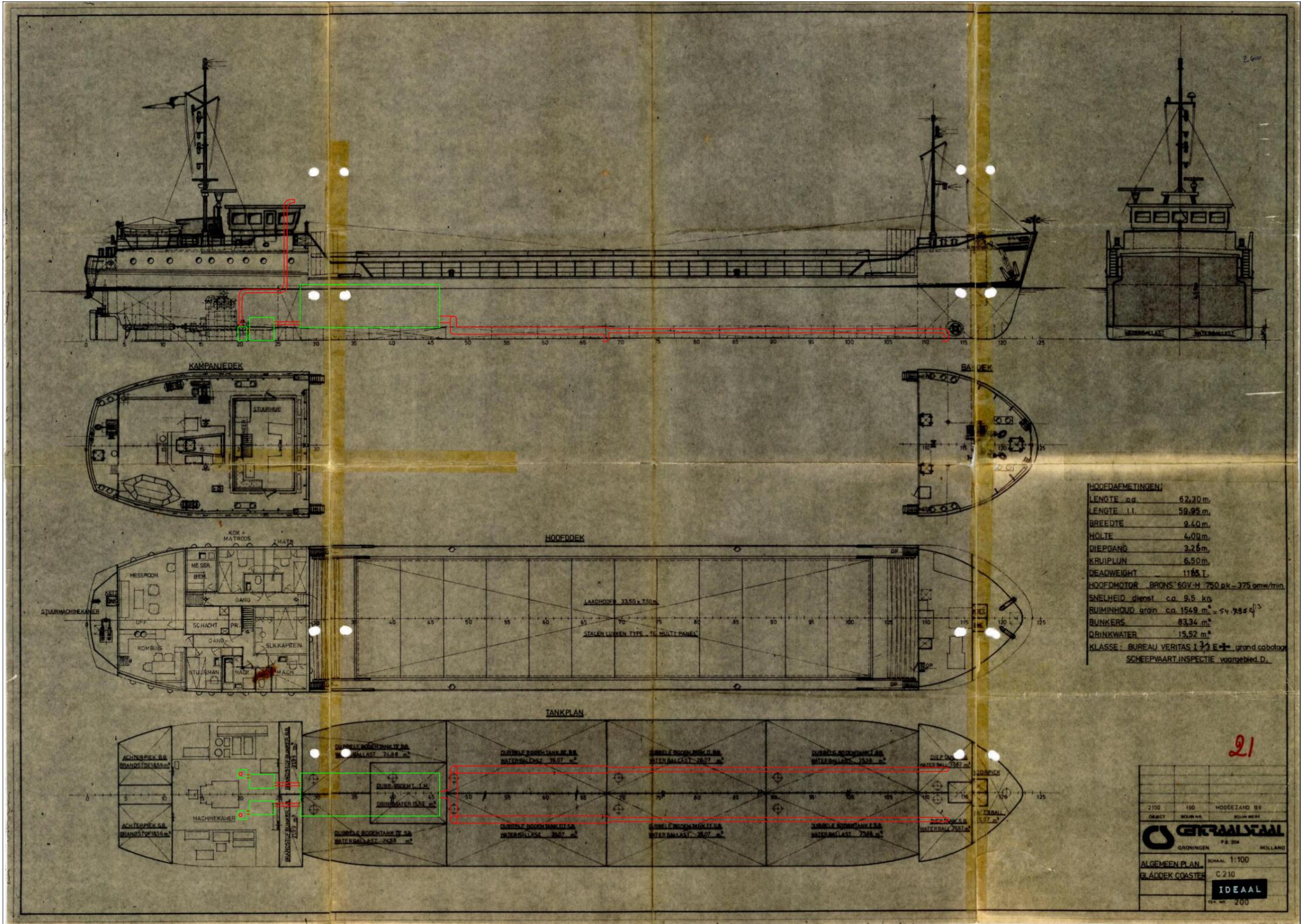


Ilustración 25: Disposición del equipo generador y tuberías de ventilación sobre el plano de Disposición General de "La Naumón".

Elaboración: Propia

6.4. Cálculo del ahorro de energía

Para decidir sobre la instalación de este sistema, debemos comparar la energía que consume con la energía que ahorra el sistema de ventilación de la obra viva.

Vamos a utilizar la ecuación obtenida en el estudio “*Air Lubrication Drag reduction on Great Lakes Ships*” por los autores Steven L. Ceccio y Simo A. Mäkiharju:

$$P_{Saved} = \frac{P_D * f_{FD}}{\eta_{Prop}} * \frac{A_{ac}}{A_w} * \left(\frac{\%D_r}{100} \right) - \frac{P_{Comp}}{\eta_{elect.}}$$

Eq. 35

Siendo:

P_{Saved} = potencia ahorrada (kW)

P_D = Potencia necesaria para superar la resistencia al avance (kW)

f_{FD} = Fracción de la resistencia de fricción sobre el total (adimensional)

η_{Prop} = Rendimiento de la hélice (adimensional)

A_{ac} = Área ventilada por el aire (m²)

A_w = Superficie mojada (m²)

$\%D_r$ = Porcentaje de reducción de la resistencia tras la ventilación (adimensional)

P_{Comp} = Potencia del compresor (kW)

$\eta_{elect.}$ = Eficiencia para la producción de la energía necesaria para activar el compresor con respecto a la eficiencia para producir potencia para el eje (adimensional)

En nuestro caso, utilizaremos lo siguientes datos:

$$P_D = 703,5 \text{ kW}$$

$f_{FD} = 0,173$ (Resultante de dividir la Resistencia de Fricción de “*La Naumón*” a 9,5KN entre la Resistencia Total)

$$\eta_{Prop} = 0,7 \text{ (Suponemos un 70\%)}$$

Sustituimos A_{ac}/A_w por 0,47, como calculamos en el apartado 6.1. Cálculo de la Resistencia de “*La Naumón II*”

$\%D_r = 92 \%$ (Resultante de dividir la Resistencia Total antes y después de la ventilación de la obra viva)

$P_{Comp} = 90 \text{ kW}$ (2 compresores de 30 kW cada uno y dos secadores de 15 kW cada uno)

$$\eta_{elect.} = 0,8 \text{ (suponemos un 80\%)}$$

Sustituyendo en la ecuación, obtenemos el siguiente resultado:

$$P_{Saved} = -37,32 \text{ kW}$$

Utilizando la ecuación para calcular el porcentaje de ahorro obtenido en el mismo estudio anteriormente mencionado:

$$\frac{\%E_{Saved}}{100} = \frac{P_{Saved}}{\frac{P_D}{\eta_{Prop}}}$$

Eq. 36

El ahorro de energía obtenido en la anterior ecuación es:

$$E_{saved} = -3,71 \%$$

Obteniendo en ambas ecuaciones un resultado negativo, llegamos a la conclusión de que el sistema de generación de aire consume más energía de la que ahorra, lo que implica una inviabilidad del proyecto de instalación.

Capítulo 7: Presupuesto

A continuación, se presenta el presupuesto de instalación del sistema de ventilación, incluyendo el grupo generador y las modificaciones que se deban realizar sobre el casco o la superestructura de la embarcación, así como el coste de la mano de obra.

7.1. Coste de la mano de obra

Se ha tenido en cuenta un coste de 30€ /h para los operarios y 45€ /h para los ingenieros.

Para la instalación de todo el sistema, se ha considerado una duración de 30 días laborables, divididos en 2 turnos diarios de 8 horas cada uno, con 5 operarios trabajando en cada turno.

Nº Operarios	Tiempo (Días)	Tiempo (Horas)	Cote Horario	Coste Total
5	30	240	30,00 €	36.000,00 €

Tabla 8: Presupuesto de Operarios

Elaboración: Propia

Por otro lado, se ha considerado una duración de 20 días laborables, divididos en 2 turnos diarios de 8 horas cada uno para el trabajo de ingeniería necesaria para la correcta instalación, a cargo de 2 ingenieros.

Nº Ingenieros	Tiempo (Días)	Tiempo (Horas)	Cote Horario	Coste Total
5	10	80	45,00 €	18.000,00 €

Tabla 9: Presupuesto de Ingenieros

Elaboración: Propia

Por tanto, el coste total de la mano de obra es de:

54.000,00 €

7.2. Coste de los materiales

Para el presupuesto de los materiales y elementos del grupo de generación de aire, se han consultado diversos catálogos de proveedores para ajustarse al precio más actual de mercado.

Materiales	Unidades	Precio/Ud.	Precio total
Compresor	2	10.000,00 €	20.000,00 €
Secador	2	5.000,00 €	10.000,00 €
Filtro aspiración	2	200,00 €	400,00 €
Filtro	1	150,00 €	150,00 €
Válvula antirretorno	3	200,00 €	600,00 €
Acumulador de aire	1	10.000,00 €	10.000,00 €
Regulador	1	2.000,00 €	2.000,00 €
Manómetro	2	120,00 €	240,00 €
Purgador manual	1	100,00 €	100,00 €
Tuberías PVC (metros)	150	5,00 €	750,00 €

Tabla 10: Presupuesto de Materiales

Elaboración: Propia

Por tanto, el coste total de los materiales de la instalación es de:

44.240,00 €

7.3. Coste total de la instalación

Sumando el coste de la mano de obra con el coste de los materiales, obtenemos un coste de:

98.240,00 €

Sobre esta cantidad, vamos a suponer un margen del 7% para imprevistos y un 12% de margen de beneficio, resultando un coste total de:

117.730,82 €

Capítulo 8: Pliego de condiciones

8.1. Condiciones facultativas

Tiene por finalidad regular la ejecución de las obras fijando los niveles técnicos y de calidad exigibles, precisando las intervenciones que corresponden, según el contrato y con arreglo a la legislación aplicable, al contratista, sus técnicos y encargados, a la Propiedad, al Ingeniero, así como las relaciones entre todos ellos y sus correspondientes obligaciones en orden al cumplimiento del contrato de obra.

8.1.1. Delimitación de funciones técnicas

Corresponde al ingeniero director:

- Redactar las modificaciones, adiciones o rectificaciones del proyecto
- Coordinar, junto al Contratista, el programa de desarrollo y de calidad de la obra
- Dirigir la obra coordinándola con el proyecto de ejecución
- Expedir el certificado final de la obra
- Coordinar la intervención de otros técnicos
- Dar conformidad a las certificaciones
- Consignar las instrucciones e incidencias que se estimen convenientes
- Preparar la documentación gráfica y escrita del proyecto con el Contratista
- Comprobar la adecuación de lo proyectado antes de dar inicio a las obras

Corresponde al contratista:

- Organizar los trabajos de ejecución
- Ordenar y dirigir la ejecución del material con arreglo al proyecto y a las normas técnicas
- Asegurar la idoneidad de todos y cada uno de los materiales y elementos que se utilicen

- Concertar los seguros de accidentes de trabajo y de daño a terceros durante la obra

8.1.2. Derechos y obligaciones del contratista

Antes de dar comienzo a las obras, el Contratista consignará por escrito que la documentación aportada le resulta suficiente, de lo contrario, solicitará las aclaraciones necesarias.

El Contratista, teniendo el Estudio Básico de Seguridad y Salud, presentará el Plan de Seguridad y Salud de la obra a la aprobación de la dirección facultativa.

El Contratista tendrá en la obra una oficina habilitada con una mesa que permita la extensión y consulta de planos, en ella el Contratista tendrá siempre a disposición de la Dirección Facultativa: La licencia de obras o autorización administrativa; el libro de órdenes y asistencia; el plan de seguridad y salud, junto con el registro de incidencias; el programa de control de calidad; la documentación referente a los seguros requeridos.

El Contratista está obligado a poner en conocimiento de las personas responsables a la persona designada como delegado suyo en la obra, que tendrá el carácter de jefe de obra, con facultades para representarle y adoptar en todo momento cuantas decisiones competan a la contrata.

El jefe de obra tendrá la obligación de estar durante la jornada laboral y acompañar al ingeniero en las visitas, teniendo que estar a su disposición para llevar a cabo los reconocimientos que fuesen necesarios, y aportar la información necesaria para la comprobación del correcto avance de la obra.

El Contratista podrá solicitar al Ingeniero las instrucciones o aclaraciones necesarias para la correcta interpretación y ejecución del proyecto.

8.2. Condiciones de montaje

8.2.1. Montaje de tuberías

Suministro, Transporte, Carga y Descarga

El conjunto de tuberías y accesorios deberán ser inspeccionados durante la recepción de estos para asegurar que son los correspondientes a los indicados en el plano.

Para las operaciones de carga, descarga y transporte, solo se permitirá la utilización de equipos o soportes que aseguren una correcta manipulación, evitando así cualquier riesgo de daño del material. No estará permitido el arrastre o rodadura de las tuberías, así como la manipulación con brusquedad de estas, pudiendo llegar a producir impactos que puedan dañar gravemente la integridad del material.

Si las tuberías tienen una protección exterior, como por ejemplo un revestimiento plástico, no podrán ser manipuladas con elementos metálicos sin proteger, que pudiesen llegar a dañar esta protección.

Todos los materiales a su recepción serán descargados con medios adecuados, y depositados encima de maderas, que protejan del contacto con el suelo. Tras haber llevado a cabo esta operación se procederá a la inspección por parte del departamento de calidad de los materiales recibidos, con su posterior separación de los que hayan superado favorablemente la inspección de los que no, para así proceder a la devolución de los que no cumplan los requisitos exigidos.

Almacenamiento

Se separarán los diferentes materiales teniendo en cuenta las diferentes calidades, evitando así una posible contaminación.

Para los accesorios de pequeño tamaño se pondrán a disposición estanterías y cajoneras, para llevar a cabo una buena organización, y en el caso de elementos estandarizados, se organizarán en grupos, según sus características principales.

Las tuberías que posean revestimiento protector exterior no se podrán depositar directamente en el suelo.

Los soportes de almacenamiento de las tuberías deberán evitar cualquier tipo de daño, ya sea en la tubería, en el revestimiento, o evitar cualquier tipo de deformación.

Cualquier material que pueda verse afectado por condiciones adversas como la temperatura, la humedad o la radiación solar deberán ser debidamente protegidos.

Condiciones generales de Montaje

Se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Antes del montaje se inspeccionará tanto el interior como el exterior de la tubería para confirmar un correcto estado.
- Se deberá estar en posesión de la suficiente información para el correcto trazado y mecanizado de las tuberías.
- Tener las herramientas, materiales y elementos de seguridad necesarios para poder llevar a cabo el trabajo de acuerdo con los estándares de calidad y seguridad.
- Las juntas de las tuberías deberán estar debidamente protegidas de cualquier elemento que pueda llegar a dañar o ensuciar la superficie.
- En cuanto la tubería esté colocada en su posición se llevará a cabo una comprobación de la alineación y de las medidas.
- No se podrán golpear las tuberías para realizar correcciones una vez realizado el montaje.

8.2.2 Corte

Al adquirirse la tubería en largo comercial, debe ser cortada a las medidas adecuadas, tanto de longitud como de ángulo. Se deberá fijar la pieza en la base de una máquina de corte en caso de realizarse mediante un proceso automático, o si es un proceso manual, se deberá fijar en caballetes o en un banco de trabajo para llevar de manera adecuada el proceso de corte.

Tras el proceso de corte se realizará una inspección visual y eliminación de las rebabas resultantes del corte.

8.2.3. Montaje de equipos

Manipulación, transporte y almacenamiento

Todo movimiento que se deba realizar del material se realizará con los medios necesarios para mantener lo equipos protegidos en todo el transcurso de la acción. Todas las bocas de las tuberías deberán ser protegidas para evitar la entrada de suciedad que pueda provocar un problema en el futuro. En ningún momento podrán entrar en contacto los materiales con el suelo.

8.2.4. Inspecciones y pruebas

Inspección visual

- **Inspección de la documentación técnica:** se deberá examinar la documentación para comprobar tanto el alcance como la definición, debiéndose notificar al técnico responsable en caso de encontrar alguna anomalía.
- **Inspección de los materiales:** se deberá revisar todos los materiales en busca de defectos que se hayan producido en cualquiera de las etapas previas a la recepción en astillero, teniéndose que notificar al técnico responsable en caso de ser necesario.
- **Inspección de los trabajos realizados:** se deberá examinar que haya sido realizado de forma adecuada y se ha obtenido un buen resultado, comunicándose al técnico responsable en caso contrario.
- **Inspección de los certificados:** se basa en la revisión de la información contenida y confirmar que se adecúe a lo establecido.

Capítulo 9: Conclusiones

A lo largo de este trabajo, se han detallado, explicado y comparado distintos sistemas de ventilación de la obra viva, escogiendo uno de ellos para su instalación sobre el buque “*La Naumón*”. Se han explicado también los diferentes métodos para calcular la resistencia al avance de una embarcación, aplicando el más adecuado para las características de la embarcación sobre la que estamos trabajando.

Tras los cálculos pertinentes y la comparación de resultados, se ha llegado a la conclusión de que la instalación de un sistema de ventilación de la obra viva supone una mejora del 3 % en la potencia efectiva, pero un aumento en el consumo de energía del 4 %.

Con estos resultados, se puede llegar a una serie de conclusiones.

En primer lugar, hemos confirmado que la ventilación de la obra viva supone una reducción de la resistencia al avance, como muestra la mejora de la potencia efectiva. Esta es la idea de la que partíamos al principio de este trabajo.

En segundo lugar, para buques de pequeña o mediana eslora, con motorización antigua y no muy potente, como es el caso de “*La Naumón*”, los sistemas estudiados no son adecuados, ya que la energía necesaria para que funcionen es mayor que la energía que ayudan a ahorrar, uno de los requisitos para la instalación de este sistema.

Por último, la mejora de la eficiencia energética de los buques a través de la aplicación de nuevos sistemas tecnológicos se ve frenada en el caso de embarcaciones con diseños y motorizaciones antiguos. Se recomienda aplicar en embarcaciones de construcción más reciente y, por tanto, tecnológicamente más avanzadas.

Capítulo 10: Bibliografía

1. American Bureau of Shipping. (2019). *Air Lubrication Technology*. 1–15.
Bonilla de la corte, A. (1979). *Teoría del Buque*.
2. Ceccio, S. L., & Mäkiharju, S. A. (2012). Air Lubrication Drag reduction on Great Lakes Ships, Great Lakes Maritime Research Institute. *Great Lakes Maritime Resarch Institute*, (PP32)-(PP32).
3. Chawla, H. M., Delhi, I. I. T., & Saxena, R. (2012). *A Numerical Investigation of Air Lubrication Effect on Ship Resistance*. 4(3), 7625.
4. Edwad V. Lewis, Ed. (1988). *Principles Of Naval Architecture, Secound Revision, Vol.II - Stability and Strength, the Society of Naval Architects and Marine Enginners (SNAME)*.
5. Elbing, B. R., Winkel, E. S., Lay, K. A., Ceccio, S. L., Dowling, D. R., & Perlin, M. (2008). Bubble-induced skin-friction drag reduction and the abrupt transition to air-layer drag reduction. *Journal of Fluid Mechanics*, 612(May 2014), 201–236. <https://doi.org/10.1017/S0022112008003029>
6. Gallardo, A. (2016). *Master Thesis INVESTIGATION OF THE AIR – LUBRICATION EFFECT ON FRICTION RESISTANCE*. December.
7. Giernalczyk, M., & Kaminski, P. (2021). Assessment of the propulsion system operation of the ships equipped with the air lubrication system. *Sensors (Switzerland)*, 21(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/s21041357>
8. Helmore, P. J. (2008). Update on van Oortmerssen’s resistance prediction. *Royal Institution of Naval Architects - International Maritime Conference, Pacific 2008*, 437–448.

9. Jang, J., Choi, S. H., Ahn, S. M., Kim, B., & Seo, J. S. (2014). Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(2), 363–379. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0185>
10. Lay, K. A., Yakushiji, R., Mäkiharju, S., Perlin, M., & Ceccio, S. L. (2010). Partial cavity drag reduction at high reynolds numbers. *Journal of Ship Research*, 54(2), 109–119. <https://doi.org/10.5957/jsr.2010.54.2.109>
11. Macpherson, D. M. (1996). *The Ten Commandments of Reliable Speed Prediction*. May, 1–7.
12. Mäkiharju, S. A., Perlin, M., & Ceccio, S. L. (2012). On the energy economics of air lubrication drag reduction. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(4), 412–422. <https://doi.org/10.2478/ijnaoe-2013-0107>
13. Resistencia, R. (1957). *07.11 Método de Van Oortmerssen*. 111–113.
14. Silberschmidt, N., Tasker, D., Pappas, T., & Johannesson, J. (2016). Silverstream® System – Air Lubrication Performance Verification and Design Development. *10th Symposium on High-Performance Marine Vehicles*, 236–246.
15. Tsai, J.-F., & Chen, C.-C. (2011). Boundary Layer Mixture Model for a Microbubble Drag Reduction Technique. *ISRN Mechanical Engineering*, 2011, 1–9. <https://doi.org/10.5402/2011/405701>
16. Tupper, E. C. (2013). Introduction to Naval Architecture. *Introduction to Naval Architecture*. ISBN: 9780080982373 <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07775-X>
17. van Oortmerssen, G. (1971). A Power Prediction Method and its Application. *International Shipbuilding Progress*, 18(207), 397–415.

18. Vega, L. (2019). *Propulsores*.

19. Yehia, W., Moustafa, M. M., Tawfik, A. A., & Nasef, A. (2019). *Shipboard Fuel Consumption Reduction by Air Lubrication and Trim Optimization*. January, 1–9.

ANEXO I

Aplicación de este trabajo en “La Naumón”

Para la realización de este trabajo no se ha tenido en cuenta el efecto del aire sobre la hélice, dado que el proyecto ha resultado ser desfavorable.

En caso de que se realice la instalación de este sistema de reducción de la resistencia al avance, o de un sistema similar, se debe contemplar el efecto del aire comprimido sobre la hélice de la embarcación, para evitar problemas que puedan afectar tanto al rendimiento de la propulsión, como estructuralmente a la hélice.

Aviso de responsabilidad UC

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros,

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.”