



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de Doctorado en Ingeniería Naval, Marina y Radioelectrónica
Naval

Efectos a largo plazo de la descarga de las aguas residuales procedentes de los Sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto sobre el nivel de acidez de las aguas del puerto de Barcelona.

Análisis de la situación actual, evolución y propuestas para combatir los efectos perjudiciales causados por la descarga de las aguas de lavado.

Tesis doctoral realizada por:

Nelson Gustavo Díaz Delgado

Dirigida por:

Francesc Xavier Martínez De Osés

Departamento: Ciencias e Ingeniería Náuticas

Barcelona, mayo 2023

“Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya”





A mi Mujer, a mi Familia y al tiempo que se nos ha brindado juntos.



AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se ha podido realizar gracias al apoyo incondicional de las personas y empresas que menciono a continuación.

A mi director de tesis Dr. Francesc Xavier Martínez De Osés, director del Departamento de Ciencia e Ingeniería Náutica de la Facultad de Náutica de Barcelona de la Universidad Politécnica de Catalunya, a quién agradezco su continuo apoyo y la confianza depositada durante toda la investigación. Esta investigación se ha concluido gracias a su continua dedicación e inestimable consejo.

Al Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques (CEN) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) por su colaboración cubriendo el coste de los análisis realizados por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua - CSIC (IDAEA).

A la Dra. Miren López de Alda, investigadora científica en el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua - CSIC (IDAEA) por su ayuda y asesoramiento durante todo el proceso de análisis de las muestras.

A todo el equipo analista del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua - CSIC (IDAEA) por su ayuda y dedicación. Su predisposición y amabilidad, así como la flexibilidad horaria en la recepción de las muestras tomadas ha permitido concluir con éxito la fase de toma y análisis de las muestras.

Al Capitán Marítimo del puerto de Barcelona Javier Valencia Alonso, por brindarme la oportunidad de participar en diversas áreas de inspección, investigación y formación en la Capitanía Marítima de Barcelona y entre las que se haya el uso de nuevas tecnologías a bordo de los buques.

A los Capitanes, Jefes de Máquinas y Oficiales de todos los buques que he visitado durante el desarrollo de esta investigación. Gracias al tiempo que me ofrecieron he podido adquirir su experiencia sobre la operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape.

A mis Padres Fernando y Ascensión, quién gracias a su continuo e inestimable apoyo, sus consejos, dedicación y amor he podido alcanzar todos mis objetivos.

A mi mujer Núria, por darme diariamente su amor y apoyo incondicional para seguir trabajando y luchar por nuevas metas.



RESUMEN

El objetivo de la presente investigación ha sido analizar el impacto que tienen las descargas de las aguas de limpieza de los gases de escape en los niveles de acidez de las aguas portuarias. Para ello se ha analizado el funcionamiento de los sistemas de limpieza de los gases de escape (EGCS, de sus siglas en inglés) de ciclo abierto. Asimismo, se ha estudiado el efecto que puede causar una disminución del nivel de acidez sobre los procesos de corrosión del casco de los buques, así como de las instalaciones portuarias.

Los EGCS, comúnmente conocidos como “scrubbers” surgieron en el mundo de la ingeniería naval como una de las principales soluciones con las que pueden contar los armadores de los buques para dar cumplimiento a la Norma de referencia en términos de prevención de la contaminación del medio marino causada por los buques, el Convenio MARPOL 73/78 [1], concretamente su Anexo VI [2], Reglas para prevenir la contaminación atmosférica causada por los buques.

Esta investigación se ha centrado en estudiar los efectos que pueden llegar a tener las descargas de las aguas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto sobre los niveles de acidez (pH) del agua del puerto de Barcelona y más concretamente de la dársena sur. Se ha decidido trabajar sobre este escenario, la dársena sur del puerto de Barcelona porque se trata de un área del puerto en el que atracan semanalmente varios buques del tipo “car-carriers” los cuales emplean durante sus escalas en Barcelona, los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto. Además, se trata de una de las zonas del puerto de Barcelona que menos expuesta se encuentra a corrientes que ayuden a la renovación de sus aguas.

Esta tesis está fundamentada en primer lugar en un análisis de la normativa internacional en relación con las emisiones de óxidos de azufre procedentes de los buques y sus limitaciones. Además de lo anterior, se hace un análisis de la importancia de regular estas emisiones y de la problemática asociada al crecimiento no controlado de las mismas.

A continuación, se realiza un análisis minucioso del funcionamiento de los sistemas de limpieza de los gases de escape, partiendo de una primera etapa en la que se aclaran los conceptos necesarios para comprender el funcionamiento de estos. A continuación, la investigación se centra en los sistemas de ciclo abierto, su composición, funcionamiento y la problemática asociada al uso de estos sistemas.

En el siguiente Capítulo, se expone con detalle la metodología seguida en esta tesis para analizar el efecto causado por las descargas de las aguas de lavado de los “scrubbers” de ciclo abierto en las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona. Se muestran los resultados obtenidos, la tendencia que actualmente tiene el nivel de acidez de estas aguas y perspectivas de futuro a corto y largo plazo.

A continuación se procede a evaluar la situación actual y se recogen las propuestas de innovación tanto para reducir los niveles de acidez de las descargas de las aguas de limpieza de los gases de escape de los buques y su implementación a bordo de los buques (método preventivo).

En el último Capítulo se redactan las conclusiones de la investigación.

Palabras clave: ciclo abierto, contaminación del agua, acidificación, óxidos de azufre, pH.

ABSTRACT

The goal of this investigation has been to analyse the effect of discharging wash water from exhaust gas cleaning systems over the acidity level of Barcelona port water. For this purpose, it has been analysed the operation of open-loop exhaust gas cleaning systems (EGCS). Furthermore, the effect of a pH decreasing over ship's hull and port facilities corrosion processes have been studied.

EGCS also known as “scrubbers” arised inside the naval engineering as one of the main solutions for ship's owners for following the reference Standard in terms of pollution prevention from ships, MARPOL Convention 73/78/97 [1], specifically on its Annex VI, Prevention of Air Pollution from Ships [2].

This investigation has been focused on studying the effects may have the wash water discharges from open-loop exhaust gas cleaning systems on the pH level of South Basin Barcelona port water. We have chosen to carry out our investigation into the Barcelona port South Basin, because is a port area where are berthing weekly several car carriers ships using during their calls in Barcelona port, the open-loop exhaust gas cleaning systems. Furthermore, the South Basin is a Barcelona port area with less exposure to the marine currents and les water Exchange between the South Basin port water and the open sea water.

This research is based on a first stage in the analysis of the regulatory framework regarding sulphur oxide emissions caps on board the ships. Furthermore, we analyse the importance of regulating these emissions and the problematic associated to this.

Then a deep analysis of exhaust gas cleaning systems is carried out, starting from a first stage where main and general concepts are clarified making easy the comprehension of operations of these systems. After this point, the research is going to be focused on the open-loop exhaust gas cleaning system, its composition, operation, and the problematic associated to the use of this system.

In the next Chapter, the methodology used on this thesis for analysing the effect caused over the Barcelona port South Basin water due to the wash water discharges from the open-loop exhaust gas cleaning system is exposed with detail. All results obtained and the trend of pH water in a short and long-term are showed.

Then current situation in Barcelona port South Basin is assessed in terms of water acidity and pH level and several measures are proposed for reducing the acidity level of wash water discharges from open-loop scrubbers and its implementation on board the ships (preventive method).

In last Chapter the research conclusions are written.

Key words: open-loop, water pollution, acidification, sulphur oxides, pH.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	9
CONTENIDO	11
LISTA DE FIGURAS.....	14
LISTA DE GRÁFICOS	17
LISTA DE TABLAS.....	18
LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	19
GLOSARIO	20
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS.	22
1.1. Introducción	22
1.1.1. Implantación de los Sistemas de Limpieza de los Gases de Escape (EGCS) a bordo de los buques	22
1.1.2. Proyecto de instalación de los EGCS e inversión.....	23
1.1.3. Problemática asociada al uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto	24
1.2. Motivación y objetivos	26
1.2.1. Motivación.....	26
1.2.2. Objetivos.....	27
1.3. Estructura de la Tesis.....	28
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE	30
2.1. Marco regulatorio	31
2.1.1. Introducción	31
2.1.2. Anexo VI. Reglas para prevenir la contaminación atmosférica causada por los buques.....	32
2.1.3. Resolución MEPC.340(77) “Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape”	34
2.2. Parámetros operativos de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto no regulados por la Resolución MEPC.340(77)	40
2.2.1. Concentración de materia particulada suspendida	40
2.3. Sistemas de limpieza de los gases de escape (EGCS)	43

2.3.1. Introducción	43
2.3.2. Coste de la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape.....	47
2.4. Sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo seco	52
2.5. Sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo	56
2.5.1. Introducción	56
2.5.2. Documentación técnica de los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo.....	58
2.5.3. Sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto.	66
2.5.4. Sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado.	78
2.5.5. Sistemas de limpieza de los gases de escape híbridos.	86
2.6. Análisis de la situación actual con relación al uso de los SLGE en el puerto de Barcelona.....	95
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	100
3.1. Introducción	100
3.2. Características de la dársena sur del puerto de Barcelona	103
3.3. Procedimiento para la toma de muestras.....	106
3.4. Resultados obtenidos	111
CAPÍTULO IV. SISTEMA DE TRATAMIENTO PROPUESTO	129
4.1. Introducción	129
4.2. Análisis causa raíz.....	130
4.3. Descripción del sistema de tratamiento y regulador de pH de las aguas residuales.....	132
4.4. Viabilidad del sistema propuesto en los buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape.....	141
4.5. Recepción y tratamiento de residuos.....	143
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	145
5.1. Conclusiones sobre la propuesta de investigación	145
5.2. Conclusiones de los resultados obtenidos y objetivos alcanzados	146
5.3. Conclusiones de la investigación	146
5.4. Reflexiones para futuras investigaciones	147
BIBLIOGRAFÍA	148
ANEXO I. Presupuesto análisis muestras IDAEA.....	152
ANEXO II. Informes IDAEA	154
ANEXO III. Informe final IDAEA.....	226
ANEXO IV. Modelo de acta de toma de muestras empleado	230



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vista de los residuos generados por un EGCS de tipo híbrido	25
Figura 2. Curva de valoración del agua de mar pura.....	39
Figura 3. Vista de la fórmula cálculo de pH de la sustancia que reacciona ante el reactivo	39
Figura 4. Vista de la columna de humo.....	41
Figura 5. Esquema del proceso de la formación de hollín.	42
Figura 6. Vista de la contaminación causada por un EGCS de ciclo abierto	43
Figura 7. Vista de la formación de fangos en el interior de un tanque de fuelóleo muy bajo en azufre	45
Figura 8. Vista de la evolución del precio por tonelada métrica del fuelóleo muy bajo en azufre.....	46
Figura 9. Vista de la evolución del precio por tonelada métrica del gasóleo marino (MGO).....	46
Figura 10. Vista del valor por tonelada métrica de fuelóleo	48
Figura 11. Vista del valor por tonelada métrica de fuelóleo alto en azufre.....	49
Figura 12. Vista de la derrota aproximada seguida por el buque del supuesto entre los puertos de Civitavecchia (Italia) y Sete (Francia).....	50
Figura 13. Vista del buque CIUDAD DE MAHÓN de la compañía TRASMED GLE.....	52
Figura 14. Vista esquemática de un sistema de limpieza de los gases de escape de tipo seco.....	55
Figura 15. Vista del modelo de informe del estado de cumplimiento del sistema	64
Figura 16. Vista de los parámetros registrados en el Libro de Registro del SLGE.....	66
Figura 17. Vista de las válvulas, bombas de aspiración y líneas de entrada de gua de mar del sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto	68
Figura 18. Vista del conjunto de sensores de monitorización de los parámetros de agua de mar a su entrada en el sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto.....	68
Figura 19. Vista de las líneas de conducción del agua de mar	69
Figura 20. Vista de un tramo de la torre de lavado	69
Figura 21. Vista de la base de la torre de lavado y conducto	70
Figura 22. Vista del sistema de muestreo y análisis.....	70
Figura 23. Vista del panel de alarmas del EGCS	71
Figura 24. Vista del panel de alarmas del EGCS (2).....	71
Figura 25. Vista del sistema de depuración del agua residual.....	72
Figura 26. Vista del conducto y válvula de descarga del agua residual	73
Figura 27. Vista de los valores de los parámetros del agua de lavado	73
Figura 28. Vista del esquema operativo de un EGCS de ciclo abierto.....	77
Figura 29. Vista del residuo seco de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado	79
Figura 30. Vista del tanque de recirculación	80
Figura 31. Vista de la entrada del agua residual de lavado a los tanques de recirculación	81
Figura 32. Vista del panel de control de un sistema de limpieza de los gases	82
Figura 33. Vista de uno de los sensores que compone el sistema de monitorización	83
Figura 34. Vista del esquema operativo de un EGCS de ciclo cerrado.....	85
Figura 35. Vista de las bombas de aspiración de agua de mar	87
Figura 36. Vista de las válvulas y líneas de conducción primarias del agua de mar.....	87
Figura 37. Vista de las líneas de conducción del agua de mar y su conexión.....	88
Figura 38. Vista de la línea de conducción del agua de lavado residual	89
Figura 39. Vista de la caja de conexiones de la planta de tratamiento	90

Figura 40. Vista del intercambiador de calor	90
Figura 41. Vista de la planta de tratamiento de las aguas residuales.....	91
Figura 42. Vista de las líneas de descarga al exterior.....	92
Figura 43. Vista de la línea de descarga de un SLGE de tipo híbrido.....	93
Figura 44. Vista del esquema operativo de un EGCS de ciclo híbrido	94
Figura 45. Vista comparativa de los resultados.....	98
Figura 46. Vista del proceso de calibración de un sensor de pH.....	99
Figura 47. Vista del equipo empleado por el IDAEA	101
Figura 48. Vista del aparejo diseñado para la toma de muestras.....	102
Figura 49. Vista del aparejo diseñado para la toma de muestras (2).....	102
Figura 50. Vista esquemática del procedimiento	103
Figura 51. Vista de la dársena sur del puerto de Barcelona	104
Figura 52. Vista de la obtención del área total	105
Figura 53. Vista del punto de muestreo en el muelle 30A	107
Figura 54. Vista del punto de muestreo en el muelle 30B.....	107
Figura 55. Vista del punto de muestreo en el muelle 30C.....	107
Figura 56. Vista del vertido de la muestra obtenida.....	107
Figura 57. Vista de la preparación de las muestras	108
Figura 58. Vista de las muestras obtenida precintadas.....	108
Figura 59. Vista del equipo adquirido durante la investigación.....	109
Figura 60. Vista de la obtención del nivel de acidez (pH) y potencial redox (ORP)	110
Figura 61. Vista del análisis de la salinidad y densidad.....	110
Figura 62. Vista del refractómetro empleado.....	110
Figura 63. Vista de una lectura a través del refractómetro.....	110
Figura 64. Vista del equipo adquirido durante la investigación (2)	115
Figura 65. Vista de la dársena sur y dársena interior	116
Figura 66. Vista del registro de las precipitaciones en Barcelona.....	127
Figura 67. Vista de la relación entre contenido en azufre y SO ₂ /CO ₂	131
Figura 68. Vista esquemática del sistema diseñado	134
Figura 69. Vista esquemática de la rejilla de filtrado del sistema diseñado.....	135
Figura 70. Vista del análisis de pH del agua de la dársena sur previo al ensayo	136
Figura 71. Vista del valor del pH obtenido del agua de la dársena sur	136
Figura 72. Vista del material empleado durante los ensayos	137
Figura 73. Vista de la preparación de la muestra con pH 3,01 unidades (1).....	137
Figura 74. Vista de la preparación de la muestra con pH 3,01 unidades (2).....	137
Figura 75. Vista de la preparación de la muestra con pH 3,01 unidades (3).....	137
Figura 76. Vista del pH de la muestra preparada para los ensayos	138
Figura 77. Vista del sistema diseñado para el tratamiento de las aguas (1)	138
Figura 78. Vista del sistema diseñado para el tratamiento de las aguas (2)	138
Figura 79. Vista de los filtros diseñados para el sistema.....	138
Figura 80. Vista del sistema propuesto filtrando.....	139
Figura 81. Vista del sistema propuesto tras filtrar.....	139
Figura 82. Vista del valor de pH obtenido	140

Figura 83. Vista de los filtros con restos de la materia particulada.....	140
Figura 84. Vista del análisis de pH del agua obtenida tras el proceso	140
Figura 85. Vista del área existente bajo la torre de lavado.....	142
Figura 86. Vista de un vertido de aguas de lavado con restos de hollín.....	142
Figura 87. Vista del proceso de recogida de residuos sólidos y líquidos	144

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Vista de los resultados obtenidos por el IDAEA tras analizar el pH de las muestras de agua de la dársena sur y línea de tendencia a tiempo real	116
Gráfico 2. Vista de los resultados obtenidos por el IDAEA tras analizar el pH de las muestras de agua de la dársena sur y línea de tendencia hasta 2026	117
Gráfico 3. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras analizar el pH de las muestras de agua de la dársena sur con equipo medidor y línea de tendencia a tiempo real	118
Gráfico 4. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras analizar el pH de las muestras de agua de la dársena sur con equipo medidor y línea de tendencia hasta 2026	118
Gráfico 5. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras analizar el potencial redox (ORP) de las muestras de agua de la dársena sur con equipo medidor y línea de tendencia a tiempo real	124
Gráfico 6. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras analizar el potencial redox (ORP) de las muestras de agua de la dársena sur con equipo medidor y línea de tendencia hasta 2026	124
Gráfico 7. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras medir la concentración salina de las muestras de agua de la dársena sur con refractómetro y línea de tendencia a tiempo real	125
Gráfico 8. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras medir la concentración salina de las muestras de agua de la dársena sur con refractómetro y línea de tendencia hasta 2026	125
Gráfico 9. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras medir la densidad de las muestras de agua de la dársena sur con refractómetro y línea de tendencia a tiempo real	126
Gráfico 10. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras medir la densidad de las muestras de agua de la dársena sur con refractómetro y línea de tendencia hasta 2026	126

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Límites del contenido de azufre del fueloil.....	36
Tabla 2. Costes totales del combustible consumido para el buque y trayecto.....	51
Tabla 3. Monitorización y registro de datos por el sistema EGCS.....	63
Tabla 4. Media de volúmenes descargados de agua de lavado	96
Tabla 5. Resultados obtenidos del análisis de acidez (pH).....	114
Tabla 6. Resultados obtenidos de los análisis de potencial redox, salinidad y densidad del agua de la dársena sur del puerto de Barcelona	123

LISTA DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

B.V.: Bureau Veritas

CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas

ECR: Engine Control Room

EGCS: Exhaust Gas Cleaning System

ETM-A /B: Exhaust Gas Cleaning System Technical Manual (A/B)

FNU: Formazin Nephelometric Unit

IDAEA: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua

IMO: International Maritime Organization

ISM: International Safety Management

LNG: Liquefied Natural Gas

LPG: Liquefied Petroleum Gas

MEPC: Marine Environment Protection Committee

MGO: Marine Gas Oil

NTU: Nephelometric Turbidity Unit

OMI: Organización Marítima Internacional

OMM: Onboard Monitoring Manual

ORP: Oxidation-Reduction Potential

PAH: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon

PAH_{phe}: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon - Phenanthrene

pH: potential Hydrogen

PSU: Practical Salinity Units

SECA (zona): Sulphur Emission Control Area

SECP: Sulphur Emission Compliance Plan

SLGE: Sistema de limpieza de los Gases de Escape

VLSFO: Very Low Sulphur Fuel Oil

GLOSARIO

A continuación, se definen los principales vocablos técnicos que han sido empleados durante el desarrollo de la presente tesis.

1. **Agua de lavado:** agua resultante del proceso de depuración de los gases de escape que ha sido empleado por el sistema de limpieza de los gases de escape.
2. **Alcalinidad:** capacidad del agua para neutralizar ácidos. También conocida como la capacidad del agua para regular el pH cuando se le agrega una sustancia ácida.
3. **Aromaticidad:** propiedad de los hidrocarburos cíclicos conjugados que permite a los electrones de los enlaces dobles que circulan de forma libre entre los enlaces (dobles o simples), conceder a la molécula una estabilidad mayor que si los citados electrones se mantuvieran estáticos en el enlace doble. Los compuestos aromáticos más habituales derivan del benceno y se caracterizan principalmente por tener una alta estabilidad y por su estructura espacial plana.
4. **Base:** sustancia capaz de aceptar un protón (H^+) para formar un producto estable neutralizando un ácido en solución acuosa.
5. **Basicidad:** cualidad de una sustancia de ser una base.
6. **Carbonatos:** sales del ácido carbónico (H_2CO_3).
7. **Bunkering:** término anglosajón que hace referencia a las operaciones de toma (aprovisionamiento) de combustible por los buques durante sus escalas en puertos y/o fondeaderos.
8. **Buque tipo cochero (car-carrier):** buque diseñado para el transporte de carga rodada, principalmente vehículos menores (coches) que en ocasiones se combina con el transporte de vehículos pesados como los camiones, autobuses, grúas y otros tipos de carga rodada como los transportes especiales.
9. **Buque tipo ro-pax:** buque diseñado para el transporte combinado de carga rodada y pasaje.
10. **Cambio de combustible:** procedimiento empleado a bordo de los buques que utilizan diversos tipos de combustible según el contenido máximo de azufre requerido (alto/bajo) y que consta de diversas fases/secuencias para completar el cambio de combustible según se necesario en la máquina principal, motores auxiliares y/o calderas.
11. **Dióxido de azufre:** gas de fórmula SO_2 originado durante la combustión de carburantes fósiles en cuya composición se encuentra el azufre (S).
12. **Trióxido de azufre:** a $25^\circ C$ y a 1 atmósfera de presión es un gas de fórmula SO_3 que se genera dentro de la cámara de combustión de los motores. Es producido por medio de la segunda oxidación del dióxido de azufre (SO_2) generado durante la combustión y que tiene lugar gracias a la acción de un catalizador.
13. **Intercambiador de calor de placas (plate heat exchanger):** los intercambiadores de calor son sistemas diseñados para reducir/aumentar la temperatura de un fluido a otro. El intercambiador de calor de placas está compuesto por múltiples conjuntos de placas que se comprimen para formar en este caso, la unidad de enfriamiento.
14. **Saco tipo “big-bag”:** unidad de embalaje flexible fabricados generalmente con polipropileno muy utilizados entre otros para el almacenamiento y transporte de residuos industriales.
15. **Scrubber:** término anglosajón muy utilizado a bordo de los buques para hacer referencia a los sistemas de limpieza de los gases de escape.
16. **Ship’s outlet:** término anglosajón que hace referencia a la válvula de descarga del buque. Durante la presente tesis se ha utilizado este vocablo inglés para referirse principalmente al punto de

descarga a la mar, de las aguas de lavado procedentes del sistema de limpieza de los gases de escape.

- 17. Floculante:** sustancia que facilita la combinación/conglomeración de partículas sólidas suspendidas generalmente utilizada para procesos de depuración y filtrado de agua.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS.

El Capítulo I está integrado por la introducción a la situación actual de los sistemas de lavado de los gases de escape (EGCS) de ciclo abierto y la problemática que hay asociada al uso de estos. Asimismo, en el presente Capítulo se establecen los objetivos y magnitud de la investigación realizada, quedando además bien definida la estructura y composición de la tesis.

1.1. Introducción

Existe actualmente una creciente preocupación acerca del uso de los sistemas de lavado de los gases de escape (en adelante “EGCS”) de ciclo abierto a bordo de los buques, especialmente cuando son utilizados en el interior de bahías, puertos y/o estuarios. Un ejemplo de esto último se refleja en el número de países que han limitado o incluso prohibido su uso en aguas de su soberanía. De acuerdo con la Asociación de Protección e Indemnización “North of England” y a su informe de fecha 29/12/2021 relativo a los países que han prohibido o restringido la descarga de las aguas de lavado de los “scrubbers” de ciclo abierto, el número de países que están prohibiendo el uso de estos sistemas (ciclo abierto) no deja de aumentar día tras día. Según su base de datos, países como Bélgica, Croacia, Egipto (Canal de Suez), Panamá (Canal), Alemania, Malasia, Noruega, Qatar, Emiratos Árabes Unidos, Singapur, entre muchos otros han prohibido el uso de estos sistemas.

Hay que destacar que en el caso de España y a fecha de 29 de diciembre de 2021, ha prohibido su uso en los puertos de Algeciras, Valencia, Cartagena y Huelva. En el caso del puerto de Barcelona no se ha determinado aun su prohibición, aunque si se aconseja de forma reiterada a los consignatarios de todos los buques que hacen escala en el Puerto y que estén equipados con estos sistemas de ciclo abierto, el uso de los combustibles bajos en azufre en lugar del EGCS de ciclo abierto dado el potencial riesgo de contaminación que puede entrañar su uso.

Uno de los pilares que sustenta la presente investigación es el determinar de qué modo pueden llegar a modificar las descargas de las aguas de lavado residuales procedentes de los scrubbers de ciclo abierto, el nivel de acidez de las aguas del puerto de Barcelona.

1.1.1. Implantación de los Sistemas de Limpieza de los Gases de Escape (EGCS) a bordo de los buques

La técnica de depuración de los gases de escape procedentes de la combustión de combustibles fósiles no es, ni mucho menos, un método innovador ni en la industria terrestre ni en el sector marítimo. En el ámbito terrestre, principalmente en la industria de la fundición, acerías e industria del vidrio, así como en la industria química, se vienen utilizando los depuradores de gases desde principios del siglo XX. El funcionamiento de los depuradores de gases empleados en el ámbito terrestre es muy similar a los scrubbers instalados a bordo de los buques.

En el sector marítimo aparecieron los depuradores de los gases de escape con la implantación de la Regla 5.5 [3] del Capítulo II-2 [4] del Convenio SOLAS [5] relativa a los sistemas de gas inerte, así como con la entrada en vigor de la actual Regla 33 [6] del Anexo I [7] del Convenio MARPOL [1] que establece las prescripciones para el lavado con crudo. El principio básico de funcionamiento de los sistemas prescritos por las Reglas citadas anteriormente es el mismo que el aplicado en los sistemas de limpieza de los gases de escape (scrubbers) utilizados a bordo de los buques como método equivalente según Regla 4 [8] Anexo VI [2] Convenio MARPOL [1].

La aplicación de los depuradores de los gases de escape en el ámbito del Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1] surgió con la entrada en vigor del citado Anexo a través de la Resolución MEPC.176(58) [9] adoptada el 10 de octubre de 2008 “Enmiendas al Anexo del Protocolo de 1997 que enmienda el Convenio Internacional para prevenir la Contaminación por los Buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978. Estas Enmiendas incluían por primera vez la citada Regla 4 [8] definiendo los métodos equivalentes a bordo de los buques:

“La Administración de una Parte podrá autorizar la utilización a bordo de un buque de accesorios, materiales, dispositivos o aparatos u otros procedimientos, tipos de fueloil o métodos de cumplimiento como alternativa a los prescritos en el presente anexo, si tales accesorios, materiales, dispositivos o aparatos u otros procedimientos, tipos de fueloil o métodos de cumplimiento son por lo menos tan eficaces en cuanto a la reducción de las emisiones como los prescritos en el presente anexo, incluidos los niveles indicados en las reglas 13 y 14.”

Las enmiendas adoptadas a través de la Resolución MEPC.176(58) [9] entraron en vigor el 1 de julio de 2010.

1.1.2. Proyecto de instalación de los EGCS e inversión

Para hacer frente a los límites en el contenido máximo de azufre del fuelóleo empleado a bordo de los buques como combustible, instaurado por el Anexo VI [2] – Reglas para prevenir la contaminación atmosférica causada por los buques – del Convenio MARPOL [1], los armadores de buques y/o empresas navieras disponen de pocas opciones. Una de estas opciones es el uso de los combustibles alternativos, tales como el gas natural, el metanol, el gas licuado del petróleo (LPG), el amoníaco, el hidrógeno etc. Esta primera opción tiene entre otros el inconveniente relativo al espacio limitado que existe a bordo de los buques por ejemplo para la instalación de motores consumidores de gas, tanques de almacenamiento de gas, vaporizadores, unidades de combustión de gas, instalaciones de líneas (tuberías) de doble pared y/o encapsuladas, etc. Asimismo, se debe llevar un estricto control de todas las operaciones que se realicen a bordo del buque, teniendo en cuenta la zona donde se pretendan llevar a cabo (zonas peligrosas) seleccionando el equipo eléctrico adecuado para cada uno de estos espacios. Especial mención a la seguridad durante las operaciones de toma de combustible (bunkering) en estos buques, los cuales además de contar con procedimientos específicos para las citadas operaciones, éstas deben realizarse bajo un continuo y estricto control del Capitán del buque y/o Jefe de Máquinas de modo que no exista posibilidad de cometer cualquier error que comprometa la Seguridad del buque y/o en su caso, del pasaje.

Otra opción con la que cuentan los armadores para dar cumplimiento a lo estipulado en el Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1] es el uso de los combustibles bajos en azufre. Podemos afirmar que actualmente es la opción con mayor acogida por parte de las compañías navieras para sus buques. En este punto es necesario señalar que dependiendo del tamaño del buque y dado el elevado precio del fuelóleo muy bajo en azufre (conocido como VLSFO, de sus siglas en inglés), los buques mercantes de menor arqueo utilizan tanto en sus motores auxiliares como en la máquina principal gasóleo marino (conocido como MGO, de sus siglas en inglés). El uso de este combustible les permite a estos buques, además de cumplir sobradamente con la Regla 14 [10] del Anexo VI [2] relativa a los óxidos de azufre y materia particulada, dónde se establece entre otros el contenido máximo de azufre de los combustibles empleados a bordo de los buques, tener un mantenimiento de la maquinaria, tanto de los auxiliares como de la principal, menos complejo y más limpio.

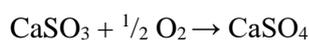
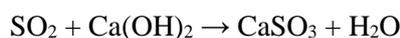
Finalmente quedaría mencionar la opción relativa a la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape. De acuerdo con una publicación de la Sociedad de Clasificación BUREAU VERITAS (B.V.) de fecha 30 de junio de 2020 [11], el coste medio de instalación de un EGCS a bordo de un buque es de 2 millones de dólares por “scrubber”. El valor final de la instalación dependerá en gran medida de varios factores tales como el tamaño del buque, la potencia de los motores donde se instalen los “scrubbers”, el tipo de buque y tipo de tráfico que efectúe, etc. Además de lo anterior, las compañías navieras deben tener en cuenta, cuando valoran la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de un buque, el período de Retorno de la Inversión (ROI, de sus siglas en inglés). El período de retorno de la inversión para la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de un buque es, de acuerdo con el artículo citado supra (B.V.) [11] y dependiendo de la evolución de los precios del combustible, de entre 1 y 4 años. No parece tener mucho sentido el plantear la instalación de scrubbers a bordo de un buque cuya vida útil está próxima a expirar.

1.1.3. Problemática asociada al uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto

Los sistemas de limpieza de los gases de escape (EGCS, de sus siglas en inglés) se clasifican principalmente en dos grandes grupos: los de tipo seco y los de tipo húmedo.

Los de tipo seco se caracterizan porque utilizan gránulos de cal hidratada, también conocida como hidróxido de calcio o dihidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para eliminar el azufre presente en forma de dióxido de azufre (SO_2) en los gases de escape procedentes de la combustión de los motores del buque. La reacción que se produce al mezclar el hidróxido de calcio con el dióxido de azufre tiene como resultado la formación de una sal en forma de sulfito de calcio (CaSO_3) y de agua. El sulfito de calcio sufre una oxidación con el aire formando finalmente sulfato de calcio (CaSO_4).

Las reacciones citadas anteriormente son las siguiente:



Los EGCS de tipo seco tienen un menor consumo de potencia en comparación con los de tipo húmedo, ya que no requieren de un sistema de bombas para conducir el agua hasta la torre de lavado de gases, como en el caso de los scrubbers de tipo húmedo.

Los sistemas de limpieza de gases de escape de tipo húmedo se caracterizan por utilizar un medio líquido (agua) para eliminar el azufre de los gases de escape de los motores. Los sistemas húmedos se clasifican a su vez en tres tipos: ciclo abierto, ciclo cerrado e híbrido.

Los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto tienen la particularidad que el agua residual utilizada durante el proceso de depuración de los gases de escape en la torre de lavado es descargada al exterior, sin recibir ningún tipo de tratamiento. Se ha observado que determinados sistemas EGCS de ciclo abierto, dependiendo del fabricante, incluyen una fase de mezclado del agua residual procedente de la torre de lavado con agua de mar utilizada por el buque en la refrigeración del motor, justo antes de su descarga, para reducir la concentración de residuos en el agua descargada de modo que los parámetros de esta se encuentren dentro de los límites establecidos por la Resolución MEPC.259(68) [12] – Directrices de 2015 para los sistemas de limpieza de los gases de escape y posteriormente sustituida por la Resolución MEPC.340(77) [13] – Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape. No obstante, este proceso no elimina ni retiene los residuos, simplemente los disuelve con más agua de mar.

Los residuos generados por los sistemas de limpieza de los gases de escape son de naturaleza contaminante. Entre estos residuos podemos destacar la existencia de metales pesados, hidrocarburos policíclicos aromáticos, diversas concentraciones de naftaleno, antraceno, fenantreno, cenizas, nitratos, nitritos, así como varios productos químicos utilizados durante el proceso de depuración de los gases de escape.

En la siguiente imagen podemos observar la apariencia de los residuos generados por un sistema de limpieza de los gases de escape de tipo híbrido. En este caso, cuando el sistema opera en ciclo cerrado, las aguas son continuamente depuradas en la planta de tratamiento correspondiente y los fangos obtenidos del tratamiento son enviados a una prensa de filtro donde el residuo sólido es separado de las aguas tratadas.



Figura 1. Vista de los residuos generados por un EGCS de tipo híbrido operando en ciclo cerrado. Fuente: el Autor.

1.2. Motivación y objetivos

1.2.1. Motivación

Las emisiones producidas por los buques están actualmente reguladas internacionalmente por Convenio MARPOL [1] a través de su Anexo VI [2], reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques. La regla 14 [10] del citado Anexo [2], establece particularmente el contenido máximo en azufre de los fueles empleados a bordo de los buques para la combustión. Para hacer frente a estas limitaciones, los buques tienen pocas alternativas y entre ellas se encuentra el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape (SLGE).

Como hemos mencionado anteriormente, los SLGE de ciclo abierto se caracterizan por verter las aguas residuales procedentes de la depuración de los gases de escape al mar, sin apenas recibir un tratamiento previo. La concentración de ciertos residuos en las aguas procedentes del proceso de depuración de los gases de escape, es alta en comparación a la concentración de los mismos residuos que tenía esta agua antes de ser utilizada por el sistema. Podemos afirmar claramente que con el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape que operan en ciclo abierto se está contribuyendo a la contaminación marina y al empeoramiento de la calidad de las aguas. No obstante, estos sistemas están considerados por la propia Organización Marítima Internacional (OMI), como medios equivalentes que pueden ser utilizados a bordo de los buques para dar cumplimiento a la regla 14 [10] del Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1].

Actualmente existen varios estudios relacionados con el impacto que tienen o que pueden llegar a tener las descargas de las aguas de limpieza de los gases de escape de los buques sobre las aguas abrigadas, estuarios y puertos. Todos los estudios consultados, tienen como referencia el análisis de la concentración de hidrocarburos policíclicos aromáticos, la turbidez y la concentración de determinados metales pesados como el mercurio (Hg), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), cobre (Cu), el níquel (Ni) o el vanadio (Va) entre otros. Estos estudios, como se analiza posteriormente, demuestran que la descarga de las aguas residuales procedentes de los SLGE tiene un impacto negativo sobre la calidad de las aguas. Pero además de lo anterior, debemos considerar las reacciones que se producen durante el proceso de depuración de los gases de escape mediante agua de mar y en qué condición está siendo esta descargada. Es en este punto donde surge mi preocupación y a su vez motivación, por demostrar que además de la carga contaminante que puedan llegar a tener las aguas residuales de los sistemas de limpieza de los gases de escape, hay que tener en cuenta la acidez y el efecto de ésta sobre las aguas circundantes. La presente tesis se fundamenta en el análisis del impacto que pueden llegar a tener las descargas de las aguas residuales procedentes de los SLGE sobre los niveles de pH de las aguas del puerto de Barcelona, concretamente en las aguas de la Dársena Sur del puerto de Barcelona.

Durante el desarrollo de la presente investigación se ha podido observar que efectivamente los valores del pH del agua de descarga procedente de los sistemas de limpieza de los gases de escape que operan en ciclo abierto son realmente bajos en comparación con su nivel de acidez cuando el agua de mar fue captada por el sistema para su utilización. La diferencia entre los niveles de acidez es directamente proporcional con la carga de trabajo de los motores, es decir, a mayor carga de trabajo, mayor generación de gases de escape con alto contenido en óxidos de azufre y por ende mayor generación de aguas residuales ácidas durante el proceso de depuración de los gases de escape mediante el uso de agua de mar.

A la vista de lo anterior debemos considerar tres situaciones en las que los niveles de pH del agua de descarga procedentes de los EGCS difieren significativamente. La primera de ellas es cuando el buque arriba a puerto, con los motores principales y auxiliares operando habitualmente a una carga de trabajo

elevada (60-70%)¹. La segunda es cuando el buque se encuentra atracado en puerto, llevando a cabo las operaciones de carga y/o descarga y empleando durante este tiempo de 1 a 2 motores auxiliares, dependiendo de la demanda eléctrica que tenga el buque durante las operaciones en puerto. Finalmente tenemos la tercera situación en la que el buque va a iniciar en breve la maniobra de salida y arranca los motores principales y auxiliares. En esta tercera situación debemos considerar que los motores, habitualmente los principales, se encuentran fríos y sus emisiones son considerables hasta que no alcanzan el punto óptimo de combustión.

Durante las situaciones mencionadas anteriormente, los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto se encuentran operando a diferentes regímenes. Aquí debemos mencionar de forma introductoria que los SLGE, dependiendo del fabricante, del tamaño del buque y sobre todo de la potencia y carga de trabajo de los motores, tienen un caudal de descarga de aguas residuales distinto. De forma aproximada podemos establecer que el caudal medio de descarga para un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto estaría alrededor de los 600-800 metros cúbicos por hora¹. Si tenemos en cuenta que la duración media de la escala de un buque en la dársena sur del puerto de Barcelona es de 11h, estaríamos hablando de un volumen de descarga de aguas residuales aproximado superior a los 8.100 metros cúbicos durante cada escala con un nivel de acidez claramente inferior, teniendo en cuenta que los regímenes de descarga varían dependiendo de si el buque está en maniobra o si está operando únicamente con los motores auxiliares.

El escenario indicado anteriormente es el punto de partida de esta investigación y de donde nace mi preocupación por determinar si estas descargas de forma continuada en el tiempo pueden llegar a modificar drásticamente los niveles de acidez de las aguas de la Dársena Sur en un inicio y del puerto de Barcelona posteriormente y qué efectos podría llegar a tener esta situación.

1.2.2. Objetivos

El objetivo principal de la presente tesis es determinar en qué medida puede verse afectado el nivel de acidez (pH) de las aguas de la Dársena Sur del puerto de Barcelona con las descargas de las aguas de lavado de los sistemas de limpieza de los gases de escape de los buques que operan en ciclo abierto y su impacto sobre el proceso corrosivo en los cascos de los buques y las infraestructuras portuarias. Asimismo, forma parte del objetivo principal desarrollar un sistema que evite la descarga de aguas ácidas originadas durante el proceso de depuración de los gases de escape a través de los scrubbers que operen en ciclo abierto.

El objetivo principal está sujeto a la consecución de los siguientes objetivos secundarios:

- Análisis de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado, ciclo abierto e híbridos.
- Estudio de las reacciones que tienen lugar en el proceso de depuración de los gases de escape mediante EGCS de tipo húmedo.
- Análisis de la evolución del nivel de pH del agua de la Dársena Sur del puerto de Barcelona con la aportación continuada de las aguas residuales procedentes de los sistemas de limpieza de los gases de escape que operan en ciclo abierto.
- Análisis de la tecnología actual empleada en los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto para controlar el pH de las aguas de descarga.

¹ Datos obtenidos del buque tipo 1 que ha sido analizado durante la investigación

- Estudio y propuesta de medidas para implementar un sistema mejorado que ayude a controlar el nivel de acidez de las aguas de descarga procedentes de la depuración de los gases de escape, evitando el vertido de aguas ácidas.

1.3. Estructura de la Tesis

La presente investigación se ha centrado en investigar los efectos causados por las descargas de aguas residuales de los sistemas de limpieza de los gases de escape que operen en modo ciclo abierto sobre el nivel de acidez de las aguas portuarias de la dársena sur del puerto de Barcelona.

Para el desarrollo de esta tesis ha resultado primordial efectuar una profunda investigación sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape, analizando tanto su composición y funcionamiento como la situación actual de estos frente a la problemática asociada a su uso. Todo lo anterior ha sido minuciosamente estudiado y analizado durante el Capítulo II de esta tesis que comprende el Estado del Arte.

En el Capítulo III se expone la metodología que se ha seguido durante toda la investigación para la toma y análisis de muestras y que han permitido determinar el actual nivel de acidez de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona. En el Capítulo IV se presenta el sistema de tratamiento propuesto para prevenir la descarga de aguas ácidas resultantes de la desulfuración de los gases de escape. Finalmente, en el Capítulo V se exponen las conclusiones alcanzadas.

La estructura de esta investigación quedaría definida como sigue:

Capítulo I. Introducción, objetivos y estructura de la tesis

En este Capítulo se analiza en primera instancia los orígenes de los sistemas de depuración de los gases de escape en la industria terrestre y en el sector marítimo realizando al mismo tiempo una breve introducción del principal marco regulatorio. Asimismo, se realiza un primer análisis de los principales costes derivados de la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de un buque y de la principal problemática asociada al uso de estos sistemas cuando operan en modo ciclo abierto. En este primer Capítulo también se expone la motivación del Autor para llevar a cabo la presente investigación, los objetivos propuestos y la estructura de la tesis.

Capítulo II. Estado del Arte

En el Capítulo II se expone en primer lugar el actual marco regulatorio sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape con especial mención de la Resolución MEPC.340(77) Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape, que regula específicamente la aprobación, inspección y operativa de estos sistemas, entre otros. Seguidamente se realiza un estudio de los parámetros no regulados por la citada Resolución y que han servido de base para el desarrollo del sistema propuesto en el Capítulo IV de esta tesis.

Seguidamente se realiza el análisis del coste económico y rentabilidad de la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de un buque tipo “*car carrier*” para una línea regular en el mediterráneo.

A continuación, este Capítulo se centra en el análisis de los sistemas de limpieza de los gases de escape con los que actualmente los buques pueden estar equipados. El desarrollo de este Capítulo ha sido el resultado de una ardua investigación en la composición, funcionamiento y operativa de estos sistemas.

Finalmente se realiza un análisis de la situación actual con relación a los sistemas de limpieza de los gases de escape que se encuentran instalados a bordo de los buques que realizan escala en el puerto de Barcelona.

Capítulo III. Metodología

En este Capítulo se expone de forma detallada el procedimiento que se ha seguido para el desarrollo de esta investigación tomando en consideración que ha sido imprescindible la toma de muestras de agua de la dársena sur del puerto de Barcelona y su inmediato análisis de acidez en el laboratorio del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Se describe tanto el material adquirido y el artilugio diseñado por el Autor para la obtención de muestras como el estudio efectuado sobre los puntos de muestreo necesarios para la obtención de una muestra lo más representativa posible.

Como resultado de los análisis citados supra, en este Capítulo se relacionan los valores de pH obtenidos de las muestras analizadas tanto por el IDAEA como por el Autor con el equipo adquirido durante la investigación.

Capítulo IV. Sistema de tratamiento propuesto

En el Capítulo IV y como resultado de la investigación realizada y del análisis de la situación actual con relación a las aguas residuales de los sistemas de limpieza de los gases de escape y su acidez, se describe el sistema de tratamiento propuesto. Tras realizar un breve análisis del origen de la acidez de las aguas residuales procedentes de estos sistemas, se presenta el sistema propuesto, los principales elementos que lo componen, los ensayos realizados por el Autor que demuestran su funcionamiento y la viabilidad de poder instalarlo a bordo de un buque equipado con un sistema de limpieza de los gases de escape. Finalmente se realiza un análisis del procedimiento de recepción y gestión de los residuos generados.

Capítulo V. Conclusiones

En este Capítulo se exponen las conclusiones alcanzadas poniendo de relieve la consecución de todos los objetivos propuestos. Finalmente, se dedica un breve apartado para proponer futuras investigaciones en el ámbito de la mejora y optimización de los sistemas de limpieza de los gases de escape instalados a bordo de los buques.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

En el presente Capítulo se va a desarrollar el Estado del Arte de los sistemas de limpieza de los gases de escape y el tratamiento que reciben las aguas residuales procedentes de la depuración de los gases de escape.

En primera instancia se va a analizar el marco regulatorio donde se encuentran integrados los sistemas de limpieza de los gases de escape. En este apartado se clarifica la normativa que se aplica en los EGCS, tanto a nivel internacional como a nivel nacional.

A continuación, se analiza el origen de los sistemas de limpieza de los gases escape y su empleo a bordo de los buques.

En tercer lugar, se desarrolla un riguroso análisis de los EGCS, estudiando sus modalidades, composición y funcionamiento. En este apartado se van a clarificar previamente conceptos que son esenciales para comprender la operativa básica de los EGCS en cualquiera de sus modalidades.

A continuación, se analiza el estado actual de los sistemas de limpieza de los gases de escape, su operativa y el impacto que pueden tener sobre el medio marino desde el punto de vista de la acidificación.

Posteriormente se analiza la tecnología empleada actualmente en los sistemas de limpieza de los gases de escape para prevenir la descarga al mar de aguas ácidas originadas durante el proceso de depuración de los gases de escape, así como sus componentes e idoneidad.

2.1. Marco regulatorio

2.1.1. Introducción

El principal instrumento de la Organización Marítima Internacional para la prevención de la contaminación causada por los buques es el Convenio MARPOL 73/78 [1]. Este Convenio fue adoptado en Londres en 1973 y no entró en vigor hasta el 2 de octubre de 1983. Con carácter previo a su entrada en vigor y debido al gran número de accidentes acaecidos en buques tanque entre los años 1976 y 1977, se adoptó el Protocolo de 1978, siendo este último la principal motivación que facilitó la entrada en vigor del Convenio en 1983.

El Convenio MARPOL ha sido objeto de constantes enmiendas como por ejemplo las contenidas en el Protocolo de 1997 a través del cual se adoptó el Anexo VI [2] del Convenio MARPOL.

Actualmente el Convenio está formado por seis Anexos:

- Anexo I. Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos (en vigor desde el 02 de octubre de 1983) [14].
- Anexo II. Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel (en vigor desde el 02 de octubre de 1983) [15].
- Anexo III. Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos (en vigor desde el 01 de julio de 1992) [16].
- Anexo IV. Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques (en vigor desde el 27 de septiembre de 2003) [17].
- Anexo V. Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por las basuras de los buques (en vigor desde el 31 de diciembre de 1988) [18].
- Anexo VI. Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques (en vigor desde el 19 de mayo de 2005) [2].

Como veremos a continuación, el Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1] es el que contempla y regula específicamente el uso de los “sistemas equivalentes” donde se encuentran integrados los sistemas de limpieza de los gases de escape.

Además del Anexo VI. Reglas para prevenir la contaminación atmosférica causada por los buques [2], los sistemas de limpieza de los gases de escape se encuentran regulados en las Directrices de 2021 sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape, adoptada el 26 de noviembre de 2021 por el Comité de Protección de Medio Marino a través de la Resolución MEPC.340(77) [13]. En el apartado 2.1.3 se profundiza en el alcance de las citadas Directrices.

También se analiza el resto de normativa internacional asociada a los sistemas de limpieza de los gases de escape que, sin regular directamente el uso de los scrubbers, establece determinados requisitos para los buques que hagan uso de éstos.

2.1.2. Anexo VI. Reglas para prevenir la contaminación atmosférica causada por los buques.

El Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1] fue adoptado a través del protocolo de 1997 [19] y entró en vigor el 19 de mayo de 2005. El protocolo de 1997 [19] está compuesto por 9 artículos y un anexo que incorporaba el nuevo Anexo VI [2] del Convenio [1], “Reglas para prevenir la contaminación atmosférica causada por los buques”.

En esta primera versión del Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1] ya se introdujo el concepto de equivalentes (medios) a través de la Regla 4 [8] del Anexo [2]:

“La Administración podrá permitir que se instale en un buque cualquier accesorio, material o aparato como alternativa a los prescritos en este Anexo si dicho accesorio, material o aparato es por lo menos tan eficaz como el prescrito en este Anexo.”

Actualmente y en su versión revisada a través de la Resolución MEPC.176(58) [9] adoptada el 10 de octubre de 2008 “Enmiendas al Anexo del Protocolo de 1997 que enmienda el Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978”, se establece el concepto de equivalente como:

“La Administración de una Parte podrá autorizar la utilización a bordo de un buque de accesorios, materiales, dispositivos o aparatos u otros procedimientos, tipos de fueloil o métodos de cumplimiento como alternativa a los prescritos en el presente anexo, si tales accesorios, materiales, dispositivos o aparatos u otros procedimientos, tipos de fueloil o métodos de cumplimiento son por lo menos tan eficaces en cuanto a la reducción de las emisiones como los prescritos en el presente anexo, incluidos los niveles indicados en las Reglas 13 y 14”.

Como se puede observar el concepto de “equivalente” recoge actualmente un abanico más amplio de medios para dar cumplimiento al Anexo VI [2]. Asimismo, en la versión revisada del Convenio [1], la Regla 4 [8] hace referencia a su vez a la Regla 13 “Óxidos de nitrógeno (NO_x)” [20] y a la Regla 14 “Óxidos de azufre (SO_x) y materia particulada” [10].

Efectivamente, los sistemas de limpieza de los gases de escape, comúnmente conocidos como “scrubbers” son considerados medios equivalentes en tanto estos sistemas son tan eficaces en la reducción de las emisiones, en este caso de óxidos de azufre (SO_2), como lo prescrito en el Anexo VI, incluyendo los límites establecidos por la Regla 14. De este modo, la Organización Marítima Internacional, estableció a través de la Resolución MEPC.184(59) [21], adoptada el 17 de julio de 2009, las “Directrices sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape, 2009”. La citada Resolución fue derogada a través de la Resolución MEPC.259(68), adoptada el 15 de mayo de 2015 - “Directrices de 2015 sobre los sistemas de limpieza de escape” [12]. Posteriormente se publicó la Resolución 340(77) - “Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape” [13] que también derogaría la anterior Resolución 259(68) [12]. Las anteriores Directrices, hacen referencia a la regla 4 del Anexo VI mencionando el concepto de “método alternativo de cumplimiento aprobado por la Administración” y estableciendo que un sistema de limpieza de los gases de escape (scrubbers) puede ser aprobado siempre y cuando se realicen las verificaciones periódicas de las emisiones (gases de escape) y los parámetros o de que el sistema pueda ir provisto de un dispositivo de vigilancia continua de las emisiones (apartado 2.1.2 Resolución MEPC.340(77)) [13].

2.1.2.1. Regla 14. Óxidos de azufre (SO_x) y materia particulada.

La Regla 14 [10] del Anexo VI [2] de Convenio MARPOL [1] es la base sobre la cual se sustenta todo el marco normativo desarrollado en relación con los sistemas de limpieza de los gases de escape. Regula directamente el contenido máximo en azufre de los combustibles empleados a bordo de los buques y estableció un calendario para su implantación de forma progresiva:

- 4,5 % masa/masa antes del 1 de enero de 2012.
- 3,5 % masa/masa el 1 de enero de 2012 y posteriormente.
- 0,5 % masa/masa el 1 de enero de 2020 y posteriormente.

Del mismo modo regula el contenido máximo en azufre de los combustibles empleados por los buques que navegan dentro de las denominadas zonas de control de emisiones:

- 1,5 % masa/masa antes del 1 de julio de 2010.
- 1,00 % masa/masa el 1 de julio de 2010 y posteriormente.
- 0,1 % masa/masa el 1 de enero de 2015 y posteriormente.

Actualmente nos encontramos en la fase más restrictiva en cuanto al contenido de azufre de los combustibles empleados por los buques. Esto significa que todos los buques están obligados a consumir un combustible cuyo contenido máximo en azufre no supere el 0,5 % masa/masa o el 0,1% masa/masa si se encuentran dentro de una zona de control de emisiones (SECA).

Es importante destacar que la propia Regla 14 [10] establece las áreas que son consideradas zonas de control de emisiones y las define como “*cualquier zona marítima, incluidas las portuarias, designada por la Organización de conformidad con los criterios y procedimientos indicados en el apéndice III del Anexo*”. Las zonas de control de emisiones que define la Regla 14 [10] engloba:

- *La zona del mar Báltico, entendiéndose este mar propiamente dicho, con los golfos de Botnia y de Finlandia y la entrada al Báltico hasta el paralelo que pasa por Skagen, en el Skagerrak, a 57° 44,8' N;*
- *La zona del mar del Norte, entendiéndose este mar propiamente dicho, con sus mares interiores, dentro de los límites siguientes:*
 - *el mar del Norte, al sur del paralelo 62° N y al este del meridiano 4° W;*
 - *el Skagerrak, cuyo límite meridional queda determinado al este de Skagen por el paralelo 57°44,8' N; y*
 - *el canal de la Mancha y sus accesos al este del meridiano 5° W y al norte del paralelo 48°30' N.*
- la zona de control de las emisiones de Norteamérica (definidas en el apéndice VII del Anexo VI).
- la zona de control de las emisiones del mar Caribe de los Estados Unidos (definidas en el apéndice VII del Anexo VI).

Cabe señalar que la Regla 14 [10], en su párrafo sexto regula la situación de buques que utilicen diferentes tipos de combustibles para dar cumplimiento al contenido máximo de azufre según naveguen dentro o fuera de zonas de control de las emisiones. Para estos casos, se indica que es obligatorio que todos estos buques lleven a cabo un cambio de combustible con la suficiente antelación de modo que se garantice que en ningún momento el contenido máximo en azufre establecido en la Regla 14.4 no va a ser superado (0,1 % masa/masa). A este efecto obliga también a los buques dentro del ámbito de aplicación, a disponer de un procedimiento escrito para llevar a cabo el cambio de combustible.

Los buques suelen llevar una copia del procedimiento de cambio de combustible en la Sala de Control de Máquinas (ECR) y en él figura la metodología a seguir para llevar a cabo el cambio de combustible de alto azufre a bajo azufre y viceversa tanto para el motor principal como para los motores auxiliares y calderas.

El cambio de combustible debe realizarse teniendo siempre en cuenta las recomendaciones del fabricante del motor y debe quedar debidamente registrado en el diario de máquinas. Asimismo, es necesario tener en cuenta que el procedimiento de cambio de combustible conlleva entre otros, llevar a cabo un estricto control de temperaturas de los tanques y líneas de combustible que intervienen en el cambio, así como control de las válvulas de control de presión que deberán ser debidamente identificadas, precintadas y registradas.

El proceso de cambio de combustible y dependiendo del tipo de buque y sus consumos, puede suponer un tiempo mínimo de 6 horas para completarlo, aunque en ocasiones este periodo puede verse incrementado hasta alcanzar las 8 horas.

2.1.3. Resolución MEPC.340(77) “Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape”

El 17 de julio de 2009 se adoptaron las “Directrices de 2009 sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape” a través de la Resolución MEPC.184(59) [21]. Estas Directrices, fueron sustituidas posteriormente por las Directrices de 2015 sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape que fueron adoptadas el 15 de mayo de 2015 a través de la Resolución MEPC.259(68) [12]. El 26 de noviembre de 2021 se adoptó la Resolución MEPC.340(77) “Directrices de 2021 sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape” [13] que vienen a sustituir a las antiguas Directrices de 2015 matizando determinados aspectos que fueron verificados con la experiencia en el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape.

Esta última Resolución establece los criterios básicos de aprobación, funcionamiento, reconocimiento y certificación de los sistemas de limpieza de los gases de escape. Asimismo, define con claridad la documentación técnica que debe existir a bordo de todo buque equipado con éstos.

La Resolución MEPC.340(77) [13] ha aportado nuevos cambios a su antecesora, introduciendo entre otros y por primera vez el concepto de “**curva normalizada de valoración del agua de mar**”. Este dato relaciona el dióxido de azufre (SO_2) absorbido en mm/kg de agua de mar y el pH de ésta. En el apartado 2.1.3.3 se analiza este nuevo concepto dentro del ámbito de los sistemas de limpieza de los gases de escape.

En el apartado 2.2 se plantea el vacío regulatorio con relación a la formación de hollín durante el proceso de combustión y su posterior descarga a través de las aguas de lavado de los gases de escape.

2.1.3.1. Criterios de aprobación, reconocimiento y certificación

La Resolución MEPC.340(77) [13] establece una primera distinción entre los equipos según su Esquema o Plan de aprobación sea A o B.

El Plan de aprobación A para los sistemas de limpieza de los gases de escape ofrece tres métodos distintos para certificar un equipo EGCS, que son los siguientes:

- Aprobación de la unidad
- Unidades fabricadas en serie
- Aprobación de la gama de productos

En el primer caso, con la aprobación de la unidad se pretende establecer un criterio homogéneo para certificar un equipo en particular en el que se deba demostrar el valor límite establecido por el fabricante del sistema relativo a las emisiones de óxido de azufre haciendo uso de un combustible con un contenido máximo de azufre también especificado por el fabricante. Todo ello tiene que permitir concluir que el equipo da cumplimiento a los criterios establecidos en la regla 14 [10] del Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1].

El caso de las unidades fabricadas en serie se basa en el principio de obtener, por parte del fabricante, la conformidad de producción otorgado por la Administración para todos aquellos equipos que sean nominalmente análogos, con los mismos caudales máxicos que el equipo o unidad certificada de acuerdo con la primera opción “aprobación de la unidad”. Lo anterior permite al fabricante no tener que someter cada uno de los equipos a ensayos para su aprobación. No obstante lo anterior, cada una de las unidades fabricadas en serie estará sujeta a los reconocimientos que la Administración considere necesarios de modo que se garantice que el valor de las emisiones de cada EGCS no superan el valor certificado.

La aprobación de la gama de productos permite obtener al fabricante y para sistemas de limpieza de gases de escape de proyecto idéntico, pero con distintas capacidades de caudal máxico máximo de los gases de escape, la aprobación de la Administración. Para ello y con objeto de evitar los ensayos de cada uno de los equipos idénticos en función de su caudal máxico máximo, se permite que el fabricante presente para ensayo tres EGCS de capacidades distintas y que cada uno de ellos definan el caudal máximo, el mínimo y el intermedio. De este modo, el resto de los equipos de distinto caudal máxico quedan dentro de los límites obtenidos con los ensayos anteriores.

Los buques equipados con sistemas de limpieza de los gases de escape certificados según el Plan A y de acuerdo con lo establecido por la Resolución MEPC.340(77) [13] deberán disponer a bordo de la siguiente documentación relativa a los EGCS:

- Plan de Cumplimiento de las Emisiones de Óxidos de Azufre (SECP)
- Certificado de Cumplimiento de las Emisiones de Óxidos de Azufre (SECP)
- Manual Técnico para el Plan A del EGCS (ETM-A)
- Manual de vigilancia a bordo (OMM)
- Libro de registro de los parámetros de funcionamiento a bordo, ajustes de los componentes y mantenimiento

La emisión y aprobación de los documentos citados anteriormente, termina certificando el equipo instalado a bordo de un buque, tras verificar que el EGCS se ajusta a lo establecido por el fabricante.

Con relación a los reconocimientos y al procedimiento para demostrar el cumplimiento del EGCS instalado a bordo para los equipos aprobados bajo el Plan A, la propia Resolución MEPC.340(77) [13] prevé que en el Manual Técnico del EGCS debe existir un procedimiento que permita verificar el correcto funcionamiento del sistema. El procedimiento implementado en el Manual para verificar el funcionamiento del EGCS no debería requerir ningún tipo de elemento/equipo auxiliar y en su caso, éste deberá estar disponible a bordo y en buenas condiciones de mantenimiento por parte del buque.

El esquema de aprobación, reconocimiento y certificación de los sistemas de limpieza de los gases de escape según Plan B se basa en la monitorización continua de las emisiones de óxidos de azufre (SO_x), garantizando que el límite de óxidos de azufre en los gases de escape del buque donde se encuentre instalado el EGCS no va a superar el límite consignado en el Plan de Cumplimiento de las Emisiones de Óxidos de Azufre (SECP) que a su vez da cumplimiento a lo establecido en la Regla 14 [10] del Anexo VI [2]. Asimismo, el sistema será objeto de reconocimientos anuales, intermedios y de renovación por parte de la Administración.

Los datos relativos a las emisiones que el sistema monitoriza de forma continua deben ser procesados y almacenados en un sistema capaz de registrar como mínimo los parámetros relativos a las concentraciones de SO_2 (ppm) y CO_2 , la presión y caudal del agua de lavado, la presión de los gases de escape, caídas de presión dentro del sistema, la carga de trabajo de los equipos de combustión asociados al sistema EGCS y la temperatura de los gases de escape a la entrada y salida del sistema. Asimismo, el sistema deberá registrar continuamente los parámetros del agua de lavado de los gases de escape, pH, PAH y la turbidez.

De acuerdo con la Resolución MEPC.340(77) [13], el cumplimiento (basado principalmente en la monitorización continua) debería demostrarse de conformidad con los valores obtenidos de la relación SO_2 (ppm) / CO_2 (% v/v).

Contenido de azufre de fuelóleo (% m/m)	Relación de emisiones SO_2 (ppm) / CO_2 (% v/v)
0,5	21,7
0,1	4,3

Tabla 1. Límites del contenido de azufre del fueloil según Regla 14 del Anexo VI del Convenio MARPOL y valores de emisión correspondientes (basados en la relación SO_2 (ppm) / CO_2 (% v/v)). Fuente: Resolución MEPC.259(68)

Durante el desarrollo de la presente investigación y tras verificar la documentación relativa a los sistemas de limpieza de los gases de escape de numerosos buques, se ha podido concluir que gran parte de los fabricantes de los sistemas de limpieza de los gases de escape han optado por el modelo de aprobación, reconocimiento y certificación según el Plan B².

Los buques que tengan instalados a bordo un sistema de limpieza de los gases de escape que sigan el Esquema de aprobación B, deben disponer de la siguiente documentación:

- Plan de Cumplimiento de las Emisiones de Óxidos de Azufre (SECP)
- Manual Técnico para el Plan B del EGCS (ETM-B)
- Manual de vigilancia a bordo (OMM)

² Tras consultar una amplia variedad de manuales técnicos de diversos tipos de sistemas de limpieza de los gases de escape y de diversos fabricantes, se ha podido alcanzar esta conclusión.

- Libro de registro de los parámetros de funcionamiento a bordo, ajustes de los componentes y mantenimiento

2.1.3.2. Parámetros de descarga del agua de lavado

Cuando el sistema de limpieza de los gases sea utilizado en puertos o estuarios, éste debe ser capaz de registrar y monitorizar de forma continua los parámetros del agua de lavado descargada relativos a la acidez/alcalinidad (pH), a los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's), la turbidez y la temperatura.

La Resolución MEPC.340(77) [13] limita los parámetros del agua de descarga citados supra, con excepción de la temperatura. de la siguiente manera:

Acidez/alcalinidad (pH)

El agua de lavado descargada de todo sistema de limpieza de los gases de escape deberá cumplir una de las siguientes prescripciones relacionadas con el nivel de acidez/alcalinidad del agua de descarga:

- 1) El pH del agua de lavado a la descarga no deberá ser inferior a 6,5 unidades salvo en las situaciones de maniobras y en tránsito en cuyo caso se permite una diferencia máxima de 2 unidades en el pH medido a la entrada y el medido a la salida.
- 2) El pH del agua de lavado descargada no será inferior al valor predeterminado mediante medición directa o mediante metodología basada en el cálculo computacional y del que resulte un pH mínimo de 6,5 unidades medido a 4 metros de distancia desde el punto de descarga. Es decir, en este caso el valor mínimo de la acidez/alcalinidad del agua descargada será tal que, al medirlo a 4 metros de distancia contados desde la descarga del buque, no debe ser inferior a 6,5. El dato obtenido mediante cálculo computacional vendrá consignado en el Manual Técnico del EGCS según sea Plan A o Plan B.

Tras analizar los Manuales Técnicos de los principales fabricantes de sistemas de limpieza de los gases de escape, podemos afirmar que prácticamente la totalidad de los EGCS de ciclo abierto emplean el método de cálculo computacional para determinar el valor mínimo de pH del agua de lavado medido a la descarga. Como analizaremos más adelante en el apartado “Acidez de las aguas de lavado – Situación actual”, los propios fabricantes de EGCS han implementado determinados sistemas para poder aumentar la alcalinidad de las aguas de lavado de forma previa a su descarga para de alguna forma garantizar el cumplimiento de lo establecido en la Resolución MEPC.340(77) [13].

Además de lo anterior, la Resolución establece los siguientes requisitos para demostrar el cumplimiento de los límites relativos al pH:

- Que todos los EGCS conectados a las mismas salidas operen a plena carga y con el fuelóleo de contenido máximo en azufre para el que estén certificados según sea su Plan de aprobación (A o B).
- En el caso de que se utilice un combustible con un contenido de azufre menor y/o una carga de ensayo inferior a la máxima para el que está proyectado, los valores serán los suficientemente altos para demostrar el comportamiento de la pluma del agua de lavado estableciendo una razón de mezcla de la pluma basada en la curva de valoración del agua de mar.
- Que se tengan en cuenta las variaciones del caudal del agua de lavado causadas por las variaciones en el caudal de los gases de escape.

- Que se utilice como referencia una alcalinidad de agua de mar de 2.200 $\mu\text{mol/litro}$ y un pH de 8,2.
- En el caso de que se utilice la metodología basada en el cálculo computacional, deberán facilitarse los datos y pormenores necesarios que permitan verificar a bordo los resultados obtenidos y su cumplimiento.

Hydrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's)

La Resolución MEPC.340(77) [13] establece que la concentración máxima continua de hidrocarburos policíclicos aromáticos en el agua resultante del proceso de depuración de los gases de escape no debería ser superior a 50 $\mu\text{g/l}$ de fenantreno equivalente (PAH_{phe}) por encima de la concentración de PAH del agua de entrada. Asimismo, se indica que la concentración de hidrocarburos policíclicos aromáticos en el agua de lavado debería medirse en el sentido de la corriente del equipo de tratamiento del agua, pero a contracorriente de la dilución del agua de lavado.

El límite de concentración de fenantreno equivalente (PAH_{phe}) definido en la Resolución, está directamente relacionado con el valor del caudal de agua de lavado expresado en tonelada por megavatio y hora (t/MWh). La propia Resolución facilita un cuadro en el que se relacionan distintos caudales y su correspondiente límite de concentración de fenantreno equivalente (PAH_{phe}) expresado en $\mu\text{g/l}$, haciendo asimismo mención de la tecnología que debe emplearse para su medición (luz ultravioleta/fluorescencia).

La Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape permiten que el límite de concentración de fenantreno equivalente sea superado en un 100% para intervalos no superiores a 15 minutos en un periodo cualquiera de 12 horas.

Turbidez/partículas en suspensión

El valor de la turbidez del agua de lavado no debería superar en más de 25 unidades nefelométricas de formacina (FNU) o en 25 unidades nefelométricas de turbidez (NTU) u otras unidades que sean equivalentes al valor de la turbidez del agua de admisión.

De forma similar a lo prescrito para el límite de concentración de PAH's en el agua de lavado, la Resolución permite que para un intervalo de 15 minutos en un periodo cualquiera de 12h, se pueda superar el límite de turbidez continua de la descarga en un 20%.

2.1.3.3. Curva normalizada de valoración del agua de mar

Como se indica al inicio del presente apartado (2.1.3), la Resolución MEPC.340(77) [13] introduce por primera vez en el ámbito de los sistemas de limpieza de los gases de escape, el concepto de curva de valoración del agua de mar.

Una curva de valoración y en términos generales, no es más que una representación gráfica de los datos obtenidos tras analizar el proceso de reacción entre una sustancia y un reactivo. En el caso de la curva de valoración del agua de mar objeto de este subapartado, la sustancia que se hace reaccionar es el agua de mar y para ello se consideran los siguientes datos de esta:

- Alcalinidad: 2,2 mmol/l
- pH: 8,2
- Temperatura: 32° C
- Oxidación: 10%
- Salinidad: 35 psu

El reactivo que se utiliza para hacer reaccionar al agua de mar es el dióxido de azufre (SO₂). Finalmente, la relación viene expresada entre el valor del pH del agua de mar y la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en mmol/kg (molalidad).

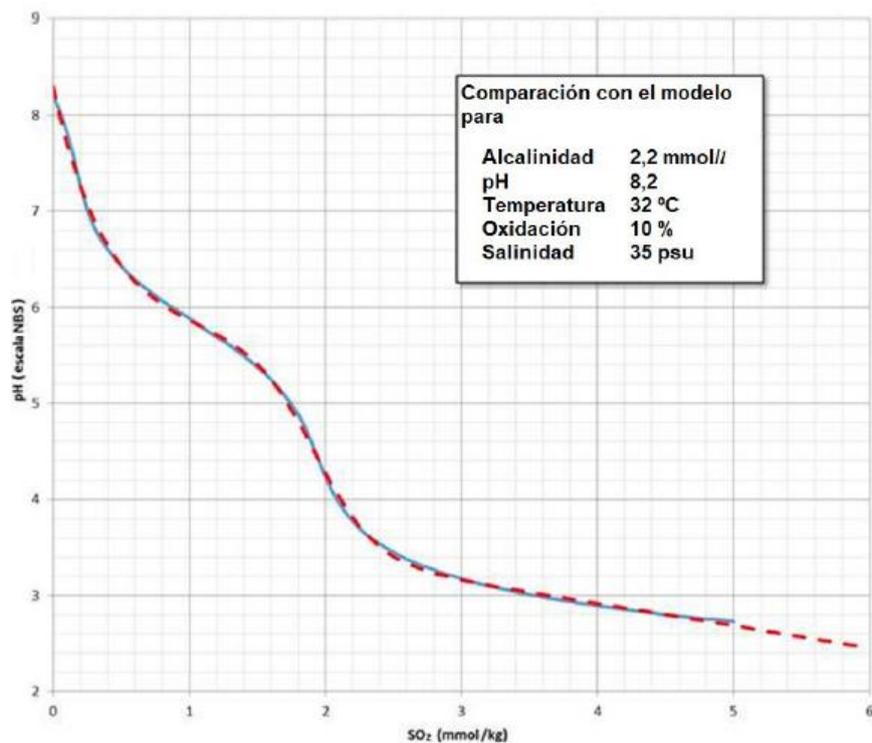


Figura 2. Curva de valoración del agua de mar pura. Fuente: Resolución MEPC.340(77).

Para calcular el valor de pH de la sustancia (agua de mar) que reacciona ante el reactivo (SO₂), se utiliza la fórmula que se muestra a continuación y que es facilitada en la propia Resolución:

$$\text{pH} = (3,84 - 0,2308) * \text{SO}_2 + \frac{1,403}{(0,0403 + \exp(2,966 * (\text{SO}_2 - 0,189)))} + \frac{9,947}{(4,605 + \exp(4,554 * (\text{SO}_2 - 1,588)))}$$

Figura 3. Vista de la fórmula empleada para el cálculo de pH de la sustancia que reacciona ante el reactivo. Fuente: Resolución MEPC.340(77).

2.2. Parámetros operativos de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto no regulados por la Resolución MEPC.340(77)

2.2.1. Concentración de materia particulada suspendida

2.2.1.1. Introducción

Durante el desarrollo de la presente investigación y tras un exhaustivo análisis del funcionamiento y operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto que emplean algunos buques durante sus escalas en el puerto de Barcelona, tanto en la Dársena Sur como en otras áreas/muelles del Puerto, se ha detectado que en ocasiones las aguas de lavado descargadas por estos sistemas presentan cierta decoloración. Este fenómeno es debido a la presencia de materia particulada mezclada en las aguas de descarga, confiriendo a éstas una tonalidad oscura casi negra. Esta materia particulada está compuesta en su mayoría por hollín que se ha formado durante el proceso de combustión del combustible, en este caso fueloil con alto contenido en azufre.

2.2.1.2. Generación de hollines

El hollín se forma en el interior de la cámara de combustión de un motor tras la combustión incompleta de los combustibles. Para el caso de los buques que no disponen de un sistema de limpieza de los gases de escape instalado a bordo, estaríamos hablando en el peor de los casos, de la combustión incompleta de fueloil muy bajo en azufre o también conocido como VLSFO, de sus siglas en inglés “Very Low Sulphur Fueloil”. Este tipo de fueloil es utilizado por los buques que no disponen de un sistema equivalente tal como se define en la Regla 4 [8] del Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1], para cumplir con el límite de azufre de los combustibles utilizados por los buques tal y como se establece en la Regla 14 [10] del citado Anexo [2]. No obstante, también debemos considerar que, para el caso de buques de menor porte, potencia y con un tráfico mayormente de cabotaje, éstos utilizan tanto para la máquina principal como para los motores auxiliares, gasoil con un contenido en azufre inferior al 0,1% m/m.

Para el caso de los buques anteriores, la formación de hollín durante la combustión incompleta de VLSFO y/o gasoil, viene reflejada en la formación de una densa y negra columna de humo que está formada en su mayoría por partículas de carbono.



Figura 4. Vista de la columna de humo causada por un buque durante las operaciones de salida del atraque. Fuente: el Autor.

En el caso de los buques equipados con un sistema equivalente como ocurre con los buques que cuentan con un sistema de limpieza de los gases de escape, la formación de hollín no se ve traducida en la emisión de una columna densa de gases de escape de color negro. No obstante, el origen de la formación del hollín es el mismo, la combustión incompleta del combustible. Lo anterior es principalmente causado entre otros, por el exceso de combustible y/o la falta de oxígeno en la reacción, el tipo de combustible ya que existen diversos combustibles que son más propensos a la generación de hollines dependiendo de la proporción carbono/hidrógeno y/o carbono/oxígeno que tenga el combustible que se esté utilizando y finalmente también es causado por la temperatura (alta) a la que el motor lleva a cabo la combustión del combustible.

La formación de hollín en un buque comprende varias fases, desde la etapa de formación de partículas con la combustión del fueloil a altas temperaturas y en condiciones muy ricas en combustible, creando cadenas de hidrocarburos que posteriormente se fragmentan y forman parte de las moléculas que originan el hollín. Estos pequeños fragmentos se unen y forman cadenas de Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's). Posteriormente estas cadenas de PAH's crecen y se nuclean, produciendo la formación de pequeñas partículas de carbono que tienen prácticamente un aspecto líquido al inicio y conforme se van carbonizando mediante la adición de especies de hidrocarburos pequeños van evolucionando, adquiriendo una forma sólida. Estas primeras partículas sólidas van liberando hidrógeno al mismo tiempo que siguen solidificándose y adhiriéndose entre sí las partículas creando los denominados agregados de hollín (aglomerado).

En la siguiente figura se puede observar el proceso anteriormente mencionado con relación a la formación de hollín.

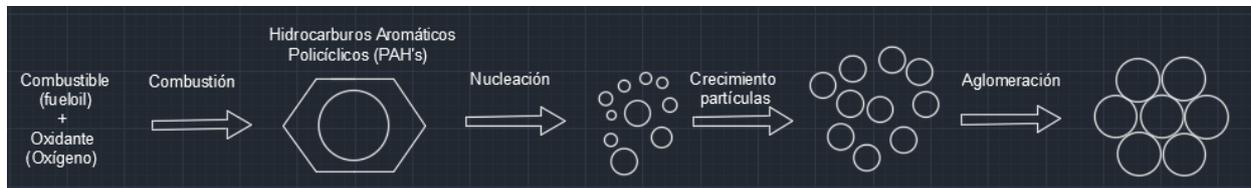


Figura 5. Esquema del proceso de la formación de hollín. Fuente: el Autor.

2.2.1.3. Formación de materia particulada en buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto

Como se indica en el apartado anterior, existen varios motivos que causan la formación de hollín en el interior de la cámara de combustión y estas partículas carbonizadas en pleno proceso de solidificación, viajan en su mayoría con los gases de escape de la combustión a altas temperaturas, donde continúan reaccionando entre sí, formando partículas mayores (crecimiento y aglomeración).

El problema, desde la perspectiva en la que se enfoca la presente investigación, radica en el momento en el que estos gases de escape son conducidos hasta la torre de lavado del sistema de limpieza de los gases de escape. En esta fase, los gases de escape producidos durante el proceso de combustión son rociados con agua de mar con el objeto de extraer los óxidos de azufre de estos. No obstante, durante este proceso también se consigue eliminar por completo la materia particulada formada que viaja con los gases de escape, viéndose esta arrastrada por el agua de lavado, siendo conducida a través del sistema de líneas y bombas para finalmente ser descargada al mar junto con las aguas residuales procedentes del proceso de depuración de los gases de escape. Esta situación es desarrollada en profundidad en el apartado relativo a los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto.

La problemática asociada a la formación de hollín en un buque equipado con un sistema de limpieza de los gases de escape no viene regulada en la nueva Resolución MEPC.340(77) [13] y tampoco lo hacían sus predecesoras. Es decir, la descarga de materia particulada con las aguas residuales del sistema de limpieza de los gases de escape no está limitada en modo alguno por las citadas Guías. Esta situación ha provocado que existan varios casos de contaminación provocados por buques que están haciendo uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape durante su escala en el puerto de Barcelona.

En las siguientes imágenes se puede observar un caso de contaminación por aguas de lavado con mezcla de hollines procedentes de un buque portacontenedores equipado con un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto atracado en el puerto de Barcelona.

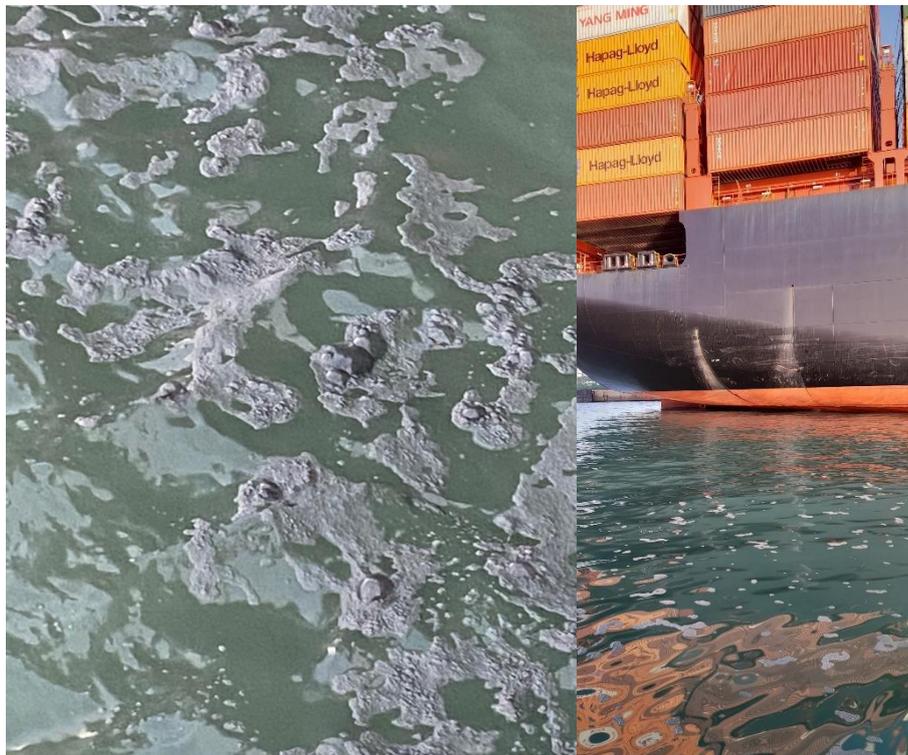


Figura 6. Vista de la contaminación causada por un buque portacontenedores a través del sistema EGCS de ciclo abierto. Fuente: Autoridad Portuaria de Barcelona (APB)

Como se menciona en el apartado anterior 2.2.1.1, durante el desarrollo de la presente investigación se detectaron estos episodios de contaminación en las aguas portuarias del puerto de Barcelona causados por buques equipados con sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto. La descarga de aguas contaminadas con hollines junto con la problemática asociada a la descarga de aguas residuales con un fuerte componente ácido, ponen de manifiesto que el funcionamiento de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto debe ser mejorado. Este es el objeto de la presente investigación.

2.3. Sistemas de limpieza de los gases de escape (EGCS)

2.3.1. Introducción

La industria marina se encuentra constantemente en desarrollo con el fin de adaptarse a los nuevos requerimientos que establece la normativa internacional, en este caso en el ámbito de la prevención de la contaminación por los buques. La Regla 14 [10], óxidos de azufre y materia particulada, del Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1], ha supuesto un gran impacto en el negocio marítimo ya que todas las compañías navieras se han visto obligadas a realizar un esfuerzo para permitir a sus buques operar en cumplimiento de los límites de azufre establecidos por la citada Regla [10].

Actualmente las compañías navieras disponen de varias opciones para dar cumplimiento a las restricciones establecidos por la Regla 14 [10]. Entre estas opciones podemos destacar el uso de combustibles alternativos como es el caso del gas natural, el metanol, el amonio o el hidrógeno, entre otros. Actualmente se está invirtiendo en el estudio del uso de combustibles renovables (biocombustibles) como por ejemplo el bioetanol y en el desarrollo de combustibles sintéticos (electrólisis). De acuerdo con *Hellenic Shipping News* [22], durante el primer trimestre de 2022 el 74,5 por ciento del tonelaje contratado para nuevas

construcciones, han sido buques capaces de operar con combustibles alternativos. Este 73 % quedaría desglosado como sigue:

- 57 % son buques que consumirán gas natural (LNG)
- 12 % son buques preparados para consumir amoníaco como combustible
- 3,4 % buques que emplean metanol como combustible
- 0,6 % buques que consumen etanol
- 1,4 % son buques equipados con motores duales que permiten consumir gas natural
- 0,1 % de los buques estarán preparados para consumir hidrógeno.

La opción relacionada con el uso de combustibles alternativos está teniendo cada vez una mayor acogida a nivel mundial llegando incluso a superar a nivel porcentual los buques que actualmente están equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape. Según la citada publicación [22] la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de un buque ha ido disminuyendo desde marzo de 2020 con 120 instalaciones por mes a nivel mundial hasta marzo de 2022 con tan solo 20 instalaciones por mes.

En segundo lugar, los armadores tienen la opción de utilizar combustibles compatibles con los límites de contenido en azufre establecidos por la Regla 14 [10] del Anexo VI [2] del Convenio MARPOL [1]. Principalmente estamos hablando del fueloil muy bajo en azufre (VLSFO) con un contenido máximo en azufre del 0,5 % m/m y del gasóleo marino con un contenido de 0,1 % m/m. El uso de combustibles bajos en azufre presenta varios problemas para los armadores, entre los que podemos destacar la escasez de estos combustibles dependiendo de la región por la que navegue el buque, especialmente en aquellos puertos en los que se dispone de un desarrollo industrial más limitado (servicios de suministro insuficientes, tanques de almacenamiento de producto no apropiados para el volumen de tráfico marítimo demandante, etc.).

El proceso utilizado para la obtención del fueloil muy bajo en azufre (VLSFO) repercute en la calidad del producto final. Existen diversas técnicas para producir este en las refinerías, entre las que se puede destacar la mezcla de fuelóleos altos en azufre con productos desulfuradores (sulphur cutters). Otro método para producir VLSFO es mezclando residuos muy bajos en azufre procedentes del procesamiento de crudos muy bajos en azufre en las refinerías, lo que supone un problema dada la escasez de este tipo de crudos. Otro sistema empleado en la producción de fuelóleo muy bajo en azufre es la desulfuración atmosférica y al vacío. Una de las características principales de este sistema de desulfuración está relacionada con la reducción de la aromaticidad del producto final. El problema radica en que, si el producto con baja aromaticidad se mezcla con otro producto, en este caso con aromaticidad alta, se puede llegar a producir el craqueo del producto final, causando la formación de fangos. Actualmente se han dado diversos casos de craqueo del VLSFO en el interior de tanques de combustibles, tras tomar éste y mezclarlo dentro de tanque con un producto de aromaticidad distinta al recibido. El resultado de esta reacción es la formación de fangos en el interior del tanque de combustible del buque. Esta formación residual en el interior del tanque puede ocasionar de forma inmediata y al arrancar los motores principales del buque, el taponamiento de las líneas de combustible, el posterior bloqueo de filtros donde se limitaría el suministro de combustible y finalmente se produciría el paro del motor.



Figura 7. Vista de la formació de fangs en el interior de un tanque de fuelóleo muy bajo en azufre. Fuente: <http://www.ameydemarine.com>

El principal problema que actualmente supone el uso de combustibles de cumplimiento (0,5% - 0,1% m/m) es el precio de estos. En los últimos meses y antes de que tuviera lugar la invasión rusa en Ucrania, el precio de los combustibles mostraba una ligera tendencia al alza con determinadas etapas de estabilidad [23]. No obstante y desde que se iniciara el conflicto armado, los precios de los combustibles han mostrado hasta finales de 2022 un tendencia creciente sin precedentes.

Actualmente el precio por tonelada métrica del fuelóleo muy bajo en azufre (VLSFO) y del gasóleo marino (MGO) en un puerto de referencia a nivel europeo como es el de Rotterdam, ha experimentado una reducción significativa suponiendo asimismo un coste ciertamente elevado como podemos ver a continuación:



Figura 8. Vista de la evolució del preu per tonelada mètrica del fuelóleo muy bajo en azufre (VLSFO). Fuente: <http://www.shipandbunker.com>

De igual forma ha ocurrido con el precio por tonelada métrica del gasóleo marino (MGO):

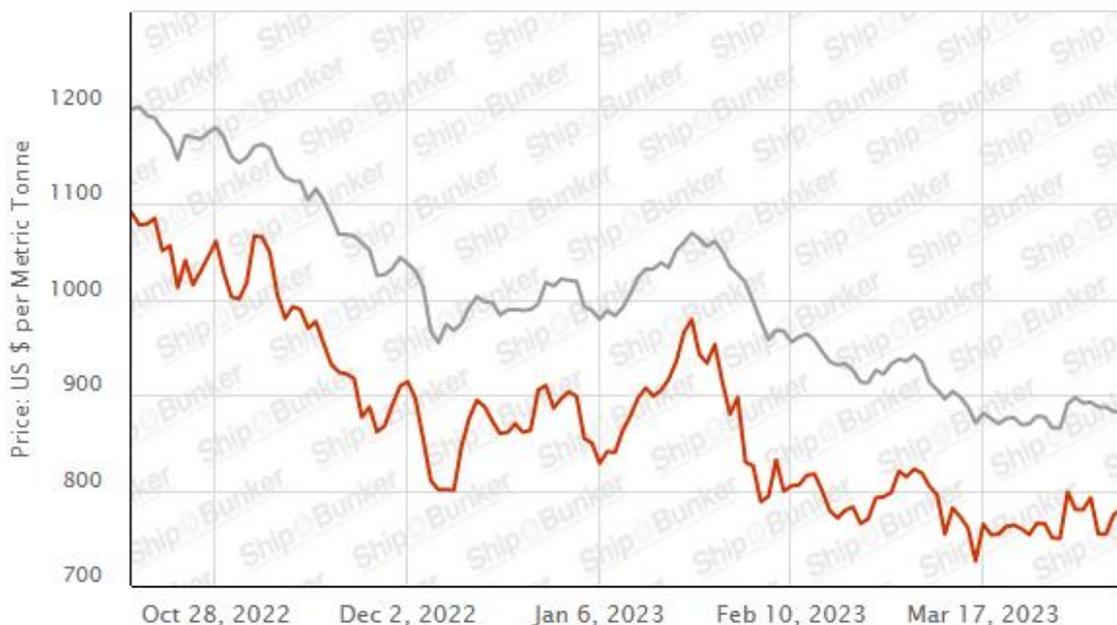


Figura 9. Vista de la evolució del preu per tonelada mètrica del gasóleo marino (MGO). Fuente: <http://www.shipandbunker.com>

Finalmente, entre las opciones de las que disponen las compañías navieras para hacer frente a las restricciones implantadas por el Anexo VI [2] del Convenio [1] se encuentra la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape (EGCS). El uso de depuradoras de los gases escape para reducir la concentración de óxidos de azufre y materia particulada no se trata en absoluto de un mecanismo innovador pues se ha ido utilizando en la industria química terrestre desde aproximadamente 1930. En la década de los 60 [24] se implantó esta tecnología por primera vez en el sector marítimo siendo utilizada para la generación de gas inerte, aprovechando los gases de escape procedentes de las calderas de los buques petroleros. En 1991, se realizó la primera instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de un buque con el fin de reducir las emisiones contaminantes del motor principal y de los auxiliares. No fue hasta 1998 cuando se llevó a cabo la primera monitorización completa de un sistema de limpieza de los gases de escape instalado a bordo de un buque (EPA-2011). En concreto se trató del buque rompehielos “*Louis S. St-Laurent*” de bandera de Canadá, cuyas pruebas con el scrubber se extendieron durante 22 días. Al mismo tiempo, se realizaban pruebas con otro tipo de scrubbers instalado a bordo del buque canadiense “*Leif Ericson*”. En este buque de clase ro-pax, se realizó la primera instalación de una planta completa para el tratamiento de los gases de escape y el tratamiento de las aguas de lavado. El principal objetivo de las citadas pruebas fue entre otros, analizar la calidad de las aguas de descarga tras circular por la planta de tratamiento y en su caso, mejorar los procesos de tratamiento en la citada planta.

De lo anteriormente citado se desprende que la instalación y el uso de un sistema de limpieza de los gases de escape para reducir las emisiones a bordo de un buque no es en ningún caso un sistema innovador. No obstante, el uso de esta tecnología se ha mantenido en ciertos tipos de buques como por ejemplo en el caso de los buques tanque, para los que resulta un sistema ciertamente útil para la generación de gas inerte a bordo.

La instalación de este sistema para hacer frente a las restricciones establecidas con relación a los límites de contenido en azufre de los fuelóleos empleados a bordo de los buques como combustible, supuso para las compañías navieras, una considerable inversión como se analiza en el siguiente apartado.

2.3.2. Coste de la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape

La instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de un buque supone una considerable inversión para toda compañía naviera. El análisis de la rentabilidad de los EGCS a bordo de un buque es ciertamente difícil, principalmente por la gran fluctuación que experimentan actualmente los precios de los distintos combustibles como el fuelóleo muy bajo en azufre (VLSFO), el gasóleo marino (MGO) y el fuelóleo alto en azufre (HFO). Es necesario tener en cuenta que en el coste final de instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape se debe incluir como mínimo el valor del equipo EGCS; el coste de adaptar desde el punto de vista de la ingeniería el sistema EGCS en el buque con el mínimo impacto posible en los espacios de carga/acomodación, optimizando al máximo su operativa; el coste de instalación (incluyendo el coste que supone tener el buque sin operar) y la puesta en marcha del sistema; los costes de formación y mantenimiento de los equipos. Asimismo, se deberán incluir los costes derivados de la certificación, pruebas y emisión de los documentos correspondientes como por ejemplo el Manual Técnico para el Plan A/B (ETM-B/A), el Manual de Vigilancia de a Bordo (OMM) o el Plan de Cumplimiento de las Emisiones de Óxidos de Azufre (SECP), entre otros.

De acuerdo con un estudio de “*FreightWaves*” [25] el coste mínimo de instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de un buque oscila entre los 2 y 3 millones de dólares. Según afirma Hempel en su publicación [26] el coste medio, de acuerdo los datos facilitados por diversos fabricantes, oscila entre los 2 y los 8 millones de dólares por buque. A la vista de la magnitud de las cifras que determina el coste de instalación de un EGCS a bordo de un buque, no hay lugar a dudas de que dicha decisión debe ser ampliamente analizada considerando diversos factores como la edad del buque, tipo de tráfico y el coste de los combustibles, entre otros.

Como se menciona supra, existe actualmente una gran fluctuación en los precios de los combustibles en general. Este factor y el análisis de su evolución a corto y medio plazo suelen ser decisivos para que los armadores y navieras determinen si es adecuada o no la inversión en la instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de sus buques en lugar de utilizar los combustibles bajos en azufre.

El precio del fuelóleo muy bajo en azufre o VLFSO, a fecha 12 de abril de 2023 y en un puerto europeo de referencia como el de Rotterdam es de 596 \$/mt [23]. Para el caso del fuelóleo alto en azufre o HFO (IFO380) el precio actual para el mismo puerto y fecha es de 484.50 \$/mt [23].



Figura 10. Vista del valor por tonelada métrica de fuelóleo muy bajo en azufre (VLSFO) y su evolución en el puerto de Rotterdam. Fuente: <http://www.shipandbunker.com>

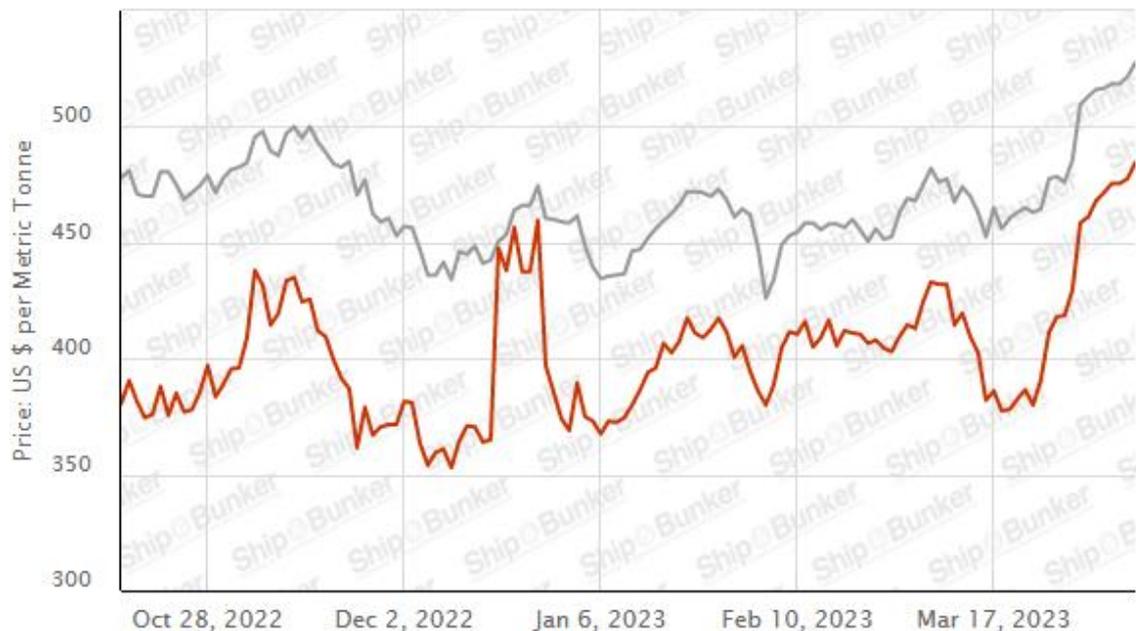


Figura 11. Vista del valor por tonelada métrica de fuelóleo alto en azufre (IFO380) y su evolución en el puerto de Rotterdam. Fuente: <http://www.shipandbunker.com>

A simple vista ya podemos observar que actualmente existe una diferencia considerable de precio por tonelada métrica entre el fuelóleo muy bajo en azufre (596 \$/mt) [23] y el alto en azufre (484.50 \$/mt) [23] y esta es de 111.5 \$/mt [23].

El consumo diario de combustible de un buque depende de varios factores, entre los que debemos destacar el tipo de buque (dimensiones), la potencia del motor/es principal/es, su velocidad, la condición de carga del buque, su calado y desplazamiento, las condiciones meteorológicas bajo las que navegue (viento, corrientes, altura de ola), así como el estado de mantenimiento del casco y hélices.

Si analizamos el caso particular de la Dársena Sur del puerto de Barcelona (terminal de vehículos), podemos observar que diariamente arriban buques tipo cochero (car carrier) con las siguientes características³:

Eslora – 169,59 m

Manga – 28,02 m

Puntal – 30,56 m

Calado verano – 8,717 m

Potencia MMPP – 11.620 kW

Velocidad máxima de servicio – 19,4 kn

Velocidad económica – 9,5 kn

Consumo de combustible a la velocidad máxima de servicio – 48,95 tm/día []

³ Datos obtenidos del buque tipo 1 que ha sido analizado durante la investigación.

Consumo de combustible a la velocidad económica – 16,2 tm/día []

Estos buques se encuentran operando en el área del mediterráneo entre distintos puertos de Grecia, Italia, Eslovenia, Francia y España, entre otros.

Si analizamos el caso particular del viaje entre el puerto de Civitavecchia (Italia) y el puerto de Sete (Francia) podemos determinar que la distancia entre ambos puertos es de aproximadamente 406 millas náuticas.

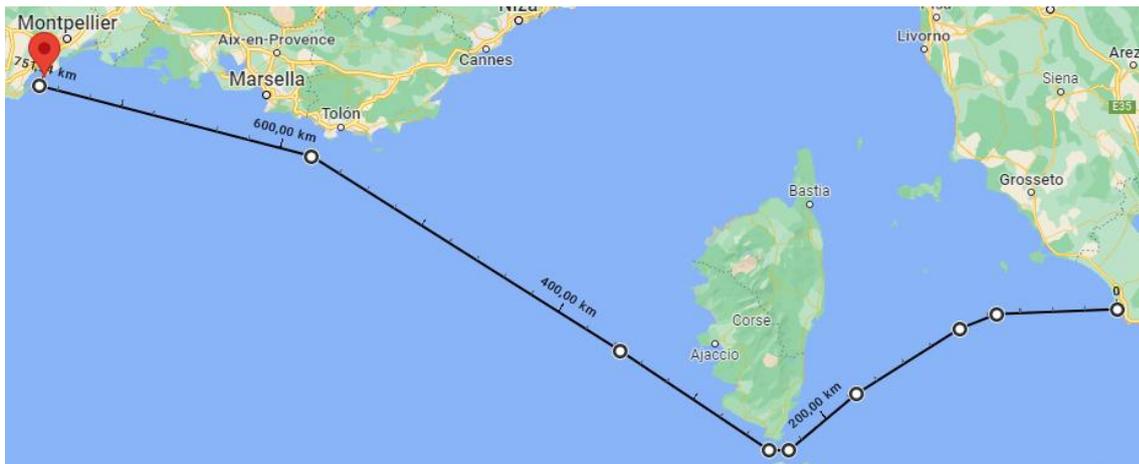


Figura 12. Vista de la derrota aproximada seguida por el buque del supuesto entre los puertos de Civitavecchia (Italia) y Sete (Francia). Fuente: el Autor.

Si efectuamos ambos supuestos y calculamos el consumo de combustible para este tipo de buque y el citado viaje, a la velocidad económica y a la velocidad máxima de servicio del buque, obtenemos:

Velocidad económica

Distancia: 406 millas

Vb: 9,5 kn

Tiempo invertido: 1,78 días

Consumo de combustible a velocidad económica: 16,2 tm/día

Consumo: 28,836 tm de combustible

Coste del combustible consumido a la velocidad económica:

HFO (IFO380): 13.971,042 \$

VLSFO: 17.186,256 \$

Diferencia: 3.215,214 S

Velocidad máxima de servicio

Distancia: 406 millas

Vb: 19,4 kn

Tiempo invertido: 0,872 días

Consumo: 42,684 tm de combustible

Coste del combustible consumido a la velocidad máxima de servicio:

HFO (IFO380): 20.680,398 \$

VLSFO: 25.439,664 \$

Diferencia: 4.759,266 \$

Por lo tanto, para el viaje supuesto entre Civitavecchia y Sete, con una distancia de navegación de 406 millas náuticas y a la vista de los cálculos efectuados previamente tanto para la velocidad económica como para la velocidad máxima de servicio, se desprende que existe una considerable diferencia en términos de coste directo entre consumir fuelóleo alto en azufre y fuelóleo muy bajo en azufre. En la siguiente tabla se resumen de forma concisa los resultados obtenidos:

Coste combustible velocidad económica (\$)		Coste combustible velocidad máxima (\$)	
HFO	VLSFO	HFO	VLSFO
13.971,042	17.186,256	20.680,398	25.439,664

Tabla 2. Vista de los costes totales del combustible consumido para el buque y trayecto del supuesto. Fuente: el Autor.

Adicionalmente y tal como se cita anteriormente, el factor edad del buque es también un parámetro de gran importancia a tener en cuenta puesto que el coste de instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape no se amortiza de forma inmediata. No tendría ningún sentido hacer una inversión de esta magnitud a bordo de un buque cuya vida útil restante está muy próxima a su fin. No obstante y si tenemos en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, podemos observar que el coste de la instalación de un EGCS a bordo de un buque y calculando de media unos 275 días de navegación al año, quedaría amortizado entre el cuarto y el quinto año en el caso de que el buque navegue a la velocidad máxima de servicio y entre el quinto y sexto año si el buque navega exclusivamente a velocidad económica.

A la vista de lo anteriormente citado se alcanza a comprender el motivo por el que varias compañías han decidido equipar sus buques, algunos de ellos con una edad superior a los 15 años, con sistemas de limpieza de los gases de escape. Algunos ejemplos de esto último los podemos observar en los buques de diversas navieras que operan en el puerto de Barcelona y donde algunos de sus buques (tipo ro-pax) que efectúan líneas regulares con las islas baleares han sido equipados en los últimos 3 años con un EGCS.



Figura 13. Vista del buque CIUDAD DE MAHÓN de la compañía TRASMED GLE. Fuente: el Autor.

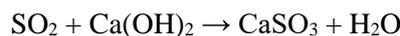
2.4. Sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo seco

Como se indica en el apartado introductorio 2.3.1, el uso de un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo de un buque no representa un avance o progreso en el tratamiento de los gases de exhaustación de los motores del buque. No obstante, estos sistemas se han ido perfeccionando con el tiempo, utilizando en su construcción materiales más adecuados que le confieren al conjunto una mayor resistencia a la fuerte corrosión que tienen que soportar de forma continuada. Asimismo, diversos fabricantes han implementado en sus sistemas de limpieza de los gases de escape ciertos mecanismos que les permiten, como veremos durante el desarrollo del presente apartado, ofrecer un tratamiento más adecuado a las aguas residuales utilizadas durante el proceso de depuración de gases.

Los EGCS que se instalan actualmente en los buques y dependiendo del principio operativo en el que se basen se clasifican en dos grandes grupos, los sistemas de tipo húmedo y los de tipo seco.

Los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo seco se caracterizan principalmente por utilizar un compuesto sólido como la cal sólida hidratada (hidróxido de calcio) para extraer los óxidos de azufre de los gases de escape procedentes de la máquina principal y/o motores auxiliares entre otros. El hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tiene una apariencia cristalina, granulada, es incoloro y se obtiene a través del tratamiento del óxido de calcio (CaO) con agua mediante un proceso conocido como hidratación o apagado de la cal.

Como se indica en el apartado 1.1.3 de la presente investigación, la reacción que se produce entre el hidróxido de calcio y el dióxido de azufre tiene como resultado la formación de una sal en forma de sulfito de calcio (CaSO_3) y de agua. El sulfito de calcio sufre una oxidación con el aire formando finalmente sulfato de calcio (CaSO_4).



La reacción entre el hidróxido de calcio y el trióxido de azufre tiene como resultado la formación de sulfato de calcio (CaSO_4):

$\text{SO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$ es la siguiente:

Estos sistemas también emplean otros compuestos sólidos como el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) aunque el más común es el indicado supra, el hidróxido de calcio.

El principio operativo de los scrubbers de tipo seco se basa en la inyección del compuesto sólido como el hidróxido de calcio o bicarbonato de sodio en la cámara por donde se recirculan los gases de escape de los motores principales/auxiliares del buque. Para el caso de los sistemas que utilizan el hidróxido de calcio, el granulado de calcio que conforma el compuesto $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reacciona con los gases de escape del buque concretamente con los óxidos de azufre, para formar sulfito de calcio (CaSO_3) y agua. Finalmente se produce la formación de sulfato de calcio (CaSO_4) tras la oxidación del sulfito de calcio con el aire.

En comparación con los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo, los scrubbers de tipo seco son actualmente los menos empleados a bordo de los buques. Si analizamos estos sistemas podemos observar que estos también requieren de un espacio considerable a bordo del buque para en primer lugar almacenar en silos el compuesto reactivo y los residuos generados por el propio sistema tras el proceso de depuración de los gases de escape. Estos residuos y dependiendo del sistema y fabricante, se suelen almacenar también en sacas tipo “big bag”. Además del espacio ocupado por los mencionados silos se debe tener en cuenta el espacio dedicado a la cámara por donde se circulan los gases de escape del buque durante el proceso de depuración, al mecanismo que gestiona los residuos y los transporta hasta la zona de almacenaje (silo/s), al conjunto de líneas, compresores, ventiladores y enfriadores, entre otros. Uno de los principales objetivos de toda empresa naviera es el transporte de mercancía a bordo de sus buques y para ello es imprescindible optimizar el espacio existente a bordo de estos. Otro factor que juega en contra de los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo seco es el coste y la disponibilidad de los compuestos empleados como el hidróxido de calcio o el bicarbonato de sodio. Asimismo, el coste de la entrega de los residuos generados y los problemas asociados con la operativa de estos sistemas ocasionados por el carácter abrasivo de los compuestos empleados provocando por ejemplo la erosión de las boquillas de inyección, suponen todos estos una gran desventaja frente a los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo.

No obstante, cabe destacar que el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo seco ofrece las siguientes ventajas frente a los de tipo húmedo:

- La inversión inicial para la instalación de estos sistemas y el coste operativo de estos es inferior.
- Existe un bajo consumo de agua.
- Baja demanda de potencial eléctrico. No se requiere del sistema de bombeo como en el caso de los scrubbers de tipo húmedo.
- No se requiere descargar al mar ningún tipo de residuo (sólido ni líquido).
- Menor acción corrosiva sobre determinados componentes del sistema. Este último factor representa una gran ventaja frente a los sistemas de tipo húmedo ya que esto limita en gran medida la operativa de los scrubbers de ciclo abierto, cerrado e híbridos.

Actualmente los buques que cuentan con un sistema de limpieza de los gases de escape de tipo seco a bordo son mucho menores que los que tienen instalado los sistemas de tipo húmedo en cualquiera de sus variantes (abierto, cerrado o húmedo). Para poner un ejemplo práctico y situado en el escenario de esta investigación, sobre el total de buques que atracan en el Puerto de Barcelona que están equipados con un sistema de

limpieza de los gases de escape, tan solo el 1,2 % de estos utilizan un sistema de tipo seco y el 98,8% son de tipo húmedo⁴.

Los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo seco están compuestos principalmente por un equipo impulsor de aire (soplante), uno o varios silos con el compuesto sólido empleado (hidróxido de calcio, bicarbonato de sodio, entre otros), un enfriador de gases, la cámara de filtrado de gases, un sistema de compresión de aire y un silo de almacenamiento de residuos. Inicialmente se impulsan los gases de escape generados durante la combustión hasta el enfriador de gases y de aquí son conducidos mediante un conjunto de líneas hasta la cámara de filtrado. Durante su camino hasta la cámara de filtrado el sistema inyecta el compuesto sólido correspondiente almacenado en el silo mediante la acción del soplante. Es en este momento cuando el hidróxido de calcio, por ejemplo, convierte el trióxido de azufre presente en la mezcla de gases de la combustión en sulfato de calcio (sólido). Este residuo seco (sulfato de calcio) es transportado a través del sistema de compresión hasta el silo de almacenamiento de residuos.

En la siguiente imagen se muestra los principales componentes de un sistema de limpieza de los gases de escape de tipo seco y su interrelación en la operativa de depuración de los gases de escape.

⁴ Resultados obtenidos de la base de datos relativa a buques que escalan en el puerto de Barcelona y que están equipados con un EGCS.

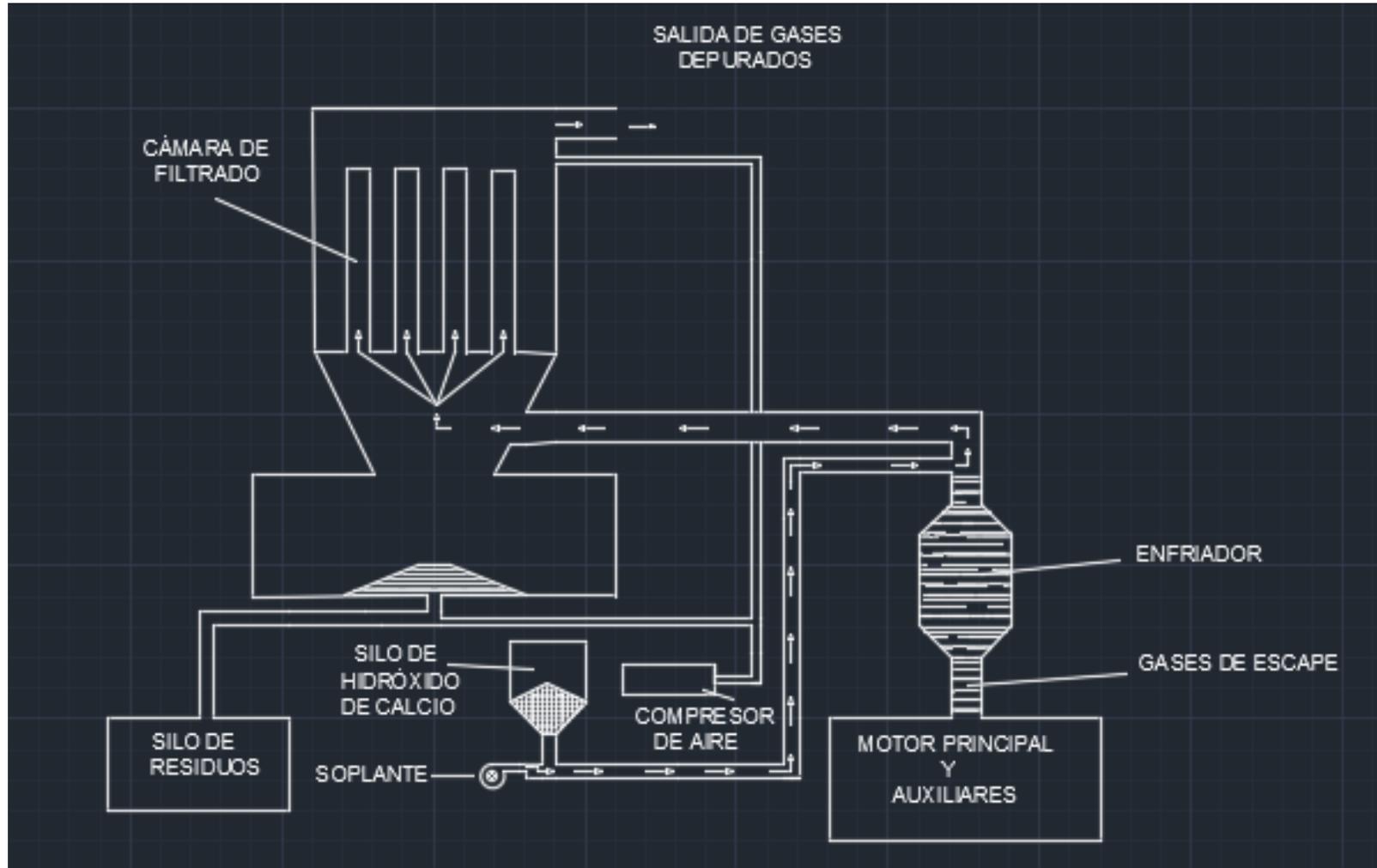


Figura 14. Vista esquemática de un sistema de limpieza de los gases de escape de tipo seco. Fuente: el Autor

2.5. Sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo

2.5.1. Introducción

La presente investigación se centra en el estudio y análisis de la operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo, concretamente los de ciclo abierto y su impacto sobre el nivel de acidez de las aguas del puerto de Barcelona. Por el motivo anterior el análisis que se lleva a cabo en esta tesis de los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo y el desarrollo de los correspondientes apartados es mucho más extensa que para el caso de los sistemas de tipo seco.

Los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo son aquellos que emplean las propiedades de un medio líquido para extraer los óxidos de azufre (SO_x) presentes en los gases de escape generados por los motores de un buque (principales, auxiliares, calderas, etc.). El medio líquido más empleado generalmente en los sistemas húmedos es el agua de mar sin tratar y en otros casos el agua dulce tratada químicamente para aumentar su alcalinidad.

Los sistemas de tipo húmedo, como veremos en los siguientes apartados se clasifican a su vez en tres tipos: los sistemas de **ciclo abierto**, los de **ciclo cerrado** y los de **ciclo híbrido**. Los sistemas de ciclo abierto emplean como medio para extraer los óxidos de azufre de los gases de escape, agua de mar sin tratar. Una de las propiedades por las que se caracteriza el agua de mar es por tener una alta **alcalinidad** y ésta le confiere como se analiza posteriormente, la capacidad de neutralizar ácidos, propiedad también conocida como **basicidad**. Los sistemas de ciclo cerrado en lugar de utilizar como medio líquido para eliminar los SO_x agua de mar, emplean agua dulce. Estos sistemas requieren de la adición de determinados aditivos químicos para aumentar de forma constante la alcalinidad del agua dulce empleada durante el proceso de depuración de gases. Además, existe una tercera variante dentro de los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo que es el denominado sistema híbrido. Este último tiene la capacidad de emplear tanto agua dulce como agua de mar como medio líquido para eliminar los óxidos de azufre.

No obstante lo anteriormente citado, es necesario destacar que la principal diferencia entre los sistemas de ciclo abierto y los de ciclo cerrado, es que los primeros están diseñados para descargar continuamente el agua de lavado empleada durante el proceso de depuración de los gases de escape. Determinar los efectos de esta agua de lavado vertida al exterior sobre las aguas portuarias del puerto de Barcelona es uno de los principales objetivos de esta investigación. Los sistemas de ciclo cerrado, a diferencia de los de ciclo abierto, no requieren descargar las aguas de lavado de forma continuada, salvo pequeñas descargas de tipo purgado que el sistema realiza de forma periódica para evitar daños en el propio sistema. Los sistemas de ciclo híbrido tienen la capacidad de operar tanto en ciclo abierto con las correspondientes descargas de las aguas de lavado como en ciclo cerrado. Como se analiza en el siguiente apartado relativo a los sistemas de ciclo abierto, el uso de estos sistemas se está viendo cada vez más limitado quedando actualmente prohibido en determinados puertos y/o regiones costeras. Por esto último los sistemas de ciclo híbrido, como veremos más adelante, se han convertido en la opción más viable para determinados tipos de buques, especialmente para aquellos cuyo tráfico habitual es entre puertos o regiones costeras en los que está prohibido el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto.

Los sistemas de tipo húmedo y en comparación con los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo seco que se han tratado en el apartado anterior, presentan las siguientes desventajas:

- Determinados componentes del sistema sufren una alta acción corrosiva.

- Tienen una alta demanda de energía eléctrica para alimentar el conjunto de bombas de agua y plantas/sistemas de tratamiento.
- Dependiendo del tipo de sistema (abierto, cerrado o híbrido) requiere de la instalación de plantas de tratamiento del agua de lavado para ser reutilizada en el sistema o bien para ser descargada (tanque de mezclado) en cumplimiento de los límites establecidos por la Resolución MEPC.340(77) Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape [13].
- En el caso de los sistemas de ciclo cerrado o híbrido operando en ciclo cerrado también requieren de tanques de retención de residuos procedentes del tratamiento de las aguas de lavado.
- Especialmente en climas fríos, el sistema de ciclo abierto requiere de una amplia protección contra la congelación en toda su extensión. Esto se traduce en un mayor coste económico tanto para su instalación como para la operativa del sistema durante los meses de invierno.
- Desde el punto de vista estético y especialmente para los buques de pasaje tipo cruceros o tipo ro-pax, los sistemas de limpieza de gases de escape de tipo húmedo generan una densa columna de humo blanco que puede llegar a causar una mala imagen para el pasaje.
- Los sistemas de tipo húmedo tienen un alto consumo de agua para operar de forma eficiente con relación a la eliminación efectiva de los óxidos de azufre.

No obstante lo anterior y frente a los de tipo seco, los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo son, como se indica en el apartado anterior, los que cuentan con una mayor preferencia para ser instalados a bordo de los buques y esto se debe principalmente a los siguientes factores:

- El uso de agentes químicos/reactivos suele ser menor que en el caso de los sistemas de tipo seco.
- Los sistemas de tipo húmedo pueden depurar los gases a altas temperaturas sin necesidad de utilizar enfriadores (tipo seco).
- Alto rendimiento en la eliminación de los óxidos de azufre (SO_x).
- Gran capacidad para capturar hasta la materia particulada de menor tamaño que se encuentra suspendida en los gases de escape.
- Generalmente el mantenimiento requerido por el sistema suele ser menor que para el caso de los sistemas de tipo seco y este factor reduce el coste operativo de los sistemas de tipo húmedo.
- La instalación de un sistema de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo requiere menos espacio a bordo de un buque que para el caso de un sistema de tipo seco.
- Desde el punto de vista de operativo ofrecen una mayor seguridad frente a los de tipo seco, al reducir en gran medida los riesgos derivados de un incendio provocado por una mezcla de gases inflamables y materia particulada. Los componentes de los gases de escape y las partículas en suspensión se mantienen continuamente humedecidas en el interior de la torre de lavado del sistema.

2.5.2. Documentación técnica de los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo

Como se menciona en el apartado 2.1.3.1 de la presente tesis “Criterios de aprobación, reconocimiento y certificación”, los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo se certifican de acuerdo con su Plan de aprobación (Plan A, Plan B). La Resolución del Comité de Protección del Medio Marino MEPC.340(77) “Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape” [13] establece con claridad la documentación técnica que debe acompañar a estos sistemas en función de su Esquema o Plan de Aprobación.

Como se indica en el apartado citado supra, la gran mayoría de los fabricantes de sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo húmedo han optado por el esquema de aprobación B basado en la monitorización continua de los óxidos de azufre (SO_x). Por este motivo a continuación se lleva a cabo el análisis de la documentación técnica requerida por la Resolución MEPC.340(77) [13] para los sistemas basados en el Plan de aprobación B.

Según se indica en esta Resolución [13] los buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape certificados bajo el esquema de aprobación B, deberán disponer de la siguiente documentación:

Manual Técnico para el Plan B del SLGE (ETM-B)

Este documento técnico deberá ser facilitado por el fabricante del sistema y estará aprobado por la Administración (Bandera del buque u Organización Reconocida en su lugar). La propia Resolución establece el contenido mínimo que debe tener el Manual Técnico. No obstante, se ha estimado oportuno analizar los Manuales Técnicos de diversos fabricantes de SLGE instalados a bordo de varios buques para comprobar el contenido real de estos documentos y que en definitiva representan para sus operadores, generalmente Jefe y Oficiales de Máquinas, junto al resto de documentación técnica, las directrices para operar el sistema con eficiencia y seguridad.

Si analizamos el contenido de un Manual Técnico observamos que inicialmente figura en la portada el nombre del fabricante del sistema, el nombre y número IMO del buque, el nombre de la compañía naviera y el refrendo de la Bandera del buque de la Sociedad de Clasificación en su lugar con la aprobación del documento. Este último detalle es ciertamente importante porque representa la conformidad del documento y a su vez del sistema para que pueda ser reconocido a bordo del buque como un sistema equivalente autorizado para su uso.

A continuación y de forma análoga a lo indicado en la Resolución, aparecen los datos relativos al buque (nombre, número IMO), datos fabricante (nombre y dirección), los datos pertinentes al modelo de EGCS como el número de serie y de proyecto, los motores para los que se ha equipado un sistema de limpieza de los gases de escape identificando a estos con el número de serie, potencia, fabricante, localización a bordo del motor, potencia (kW) y revoluciones por minuto. En todos los manuales consultados se ha encontrado inicialmente una parte introductoria donde se identifica al sistema indicando su tipo (ciclo abierto, cerrado o híbrido), propiedades básicas del sistema y de su funcionamiento.

Existe en todos los casos un apartado específico en el que se detallan todos los elementos que componen el sistema EGCS. Asimismo, el Manual Técnico contiene siempre otro apartado de

gran importancia en el que se indican los denominados límites operacionales del sistema. En estos límites operacionales encontramos siempre los siguientes datos:

- Máximo contenido en azufre del combustible (fuelóleo) empleado por el buque. En todos los manuales consultados el contenido máximo en azufre admisible para que el sistema opere de forma eficiente es del 3,5 % m/m. Generalmente y a la vista de las notas de entrega de combustible consultadas a bordo de varios buques equipados con SLGE, el contenido en azufre del fuelóleo que emplean no suele superar el 3,2% m/m. Se debe considerar también que cuanto mayor sea el contenido en azufre del combustible que emplea el buque, mayor será la concentración de óxidos de azufre en los gases de escape y por consiguiente mayor será el régimen de trabajo del SLGE para depurar los gases de escape eficientemente y esto acaba resultando en un consumo de agua más alto por el sistema y por lo tanto en un mayor consumo energético.
- Caudal másico de los gases de escape expresado en quilogramos por hora (kg/h) y para un régimen de carga del motor habitualmente superior al 85%. Como es lógico el caudal másico de los gases de escape va en función de la potencia de los motores y para un buque equipado por ejemplo con cuatro motores principales de 13.500 kW cada uno, el caudal másico máximo de los gases de escape es de aproximadamente 79.900 kg/h⁵.
- Alcalinidad mínima del agua de entrada. Este dato es de gran importancia porque determina cual debe ser la alcalinidad mínima del agua de mar que se emplea en el proceso de lavado de los gases de escape para que la eliminación de los óxidos de azufre sea efectiva y se obtengan así los límites establecidos por la Resolución (relación SO₂/CO₂). Como se recoge en el Glosario de la presente tesis, la alcalinidad se define como la capacidad de una sustancia, en este caso del agua de mar, para neutralizar los ácidos o de resistir un cambio en el pH cuando se le agrega un ácido. También se le conoce con el nombre de basicidad. La alcalinidad viene determinada generalmente por la concentración de carbonatos (CO₃²⁻), bicarbonatos (HCO₃⁻) e hidróxidos (OH⁻) en el agua. La alcalinidad del mar y de los océanos es habitualmente alta y suele ser constante, entre 2.200 y 2.500 μmol kg⁻¹ [27].
- Caudal de agua de lavado a la descarga expresado en metros cúbicos por hora (m³/h). Este valor va a depender en gran medida del número y potencia de los motores y de la carga de trabajo de estos. Para un SLGE montado en el buque del ejemplo anterior (cuatro motores principales de 13.500 kW cada uno), el caudal de agua oscila entre 450 y 850 metros cúbicos por hora aproximadamente. No obstante, se dispone de registros de otro tipo de buques cuyo caudal del agua de lavado a la descarga alcanza los 4000 metros cúbicos por hora⁴.

Asimismo, y dependiendo del fabricante de los sistemas de limpieza de los gases de escape, también se suelen incluir en el apartado de límites operacionales los valores máximos de determinados parámetros del agua de lavado, regulados en este caso por la Resolución citada supra [13]. En ocasiones podemos encontrar también estos valores en un apartado específico del Manual Técnico del SLGE, “Parámetros del agua de lavado”. En este caso se facilitan los valores máximos que pueden llegar a alcanzar los parámetros del agua de lavado relativos a los **hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH’s)**, la **turbidez** y el **pH** (acidez). Es interesante recordar, tal y como se menciona en el 2.1.3.2. “Parámetros de descarga del agua de lavado” de

⁵ Datos obtenidos del buque tipo 1 que ha sido analizado durante la investigación.

esta tesis, que la práctica totalidad de los Manuales consultados hasta el momento utilizan como medio para determinar el valor del pH límite a la descarga, el método computacional definido en la Resolución MEPC.340(77) [13]. Este método establece que el valor calculado para el pH a la descarga será aquél que, al medirlo a 4 metros de distancia contados desde la descarga del buque, no será inferior a 6,5 unidades. En muchos casos nos encontramos que existen sistemas de limpieza de los gases de escape cuyo Manual Técnico establece en 2,9 unidades el valor límite del pH del agua de lavado medido a la descarga.

Los Manuales Técnicos también dedican un apartado a los casos de incumplimiento por parte del sistema y como resolverlos. Suelen generalmente abordar las situaciones en las que uno o varios parámetros del agua de lavado (PAH, pH, turbidez o concentración de nitratos en su caso) se encuentre fuera de los límites establecidos en el propio Manual que a su vez se encontrarían incumpliendo los establecidos por la Resolución [13]. Asimismo, trata también los casos en los que se supere por ejemplo el valor límite relativo a la relación SO_2/CO_2 . Para todas estas situaciones los Manuales facilitan una serie de acciones correctivas que pueden implementar directamente los operadores del sistema a bordo (Jefe y Oficiales de Máquinas) y que suelen consistir en diversas comprobaciones entre las que podemos destacar la revisión de los sensores del parámetro que se trate y en su caso limpiarlo y/o sustituirlo, verificar el estado de limpieza de los filtros por donde se captura el agua, comprobar que el flujo de agua sea el adecuado, etc.

Finalmente se ha verificado que en la mayoría de los manuales consultados incluyen un apartado relativo al procedimiento para tomar una muestra del agua de lavado para que posteriormente se puedan analizar los parámetros del agua de lavado citados anteriormente incluyendo además los relativos a la presencia de determinados metales pesados como el plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni), zinc (Zn), arsénico (As), cromo (Cr) o el vanadio (V), entre otros.

Manual de Vigilancia a bordo (OMM)

Con el mismo proceder que para el caso del Manual Técnico, se han consultado los Manuales de Vigilancia a bordo de los sistemas de limpieza de los gases de escape de diversos fabricantes para obtener una visión amplia del contenido y objeto de este manual. La Resolución MEPC.340(77) [13] establece como en el caso del Manual Técnico, el contenido mínimo que debe figurar en el Manual de Vigilancia a bordo (OMM). Este Manual deberá contar con la aprobación del estado de pabellón del buque o de la sociedad de clasificación que actúe en su nombre. Dicha aprobación se verá reflejada mediante el correspondiente refrendo en la portada del Manual, aunque habitualmente se encuentra también en todas las hojas de este.

El contenido de los OMM consultados hasta el momento, además de disponer de la correspondiente portada con los detalles del nombre del buque, número IMO, nombre de la compañía naviera, fabricante y aprobación correspondiente, cuentan con un primer apartado en el que se detallan las características principales del sistema de limpieza de los gases de escape, sus componentes y las características principales de los motores en los que se encuentra instalado éste.

A continuación, se indican los parámetros operativos para cada uno de los motores equipados con el sistema. Estos parámetros vienen relacionados con el identificativo específico empleado en la monitorización continua de datos relativos a la presión de agua, caudal, presión de los gases de escape y temperaturas de éstos, entre otros. Asimismo, se incluye un apartado específico en el que se facilita una descripción del sistema de muestreo automático de los gases de escape.

Generalmente se trata de un equipo formado por una pequeña bomba que va proporcionando un flujo continuo con una muestra de los gases de escape tras el proceso de depuración. Estos gases son conducidos hasta el local del analizador donde se obtienen los valores relativos al dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de carbono (CO₂). Del mismo modo se establece también un procedimiento para la actuación manual del sistema de muestreo.

También se incluye en todos los manuales consultados una sección con los procedimientos de calibración y mantenimiento de todos los sensores y equipos analizadores de los gases de escape. A continuación, los manuales de vigilancia a bordo de los sistemas de limpieza de los gases de escape suelen tener un apartado diferenciado para la monitorización del agua de lavado. Como cabe imaginar, para los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto, este apartado es todavía más extenso y específico. Este apartado está compuesto por una descripción específica del equipo y conjunto de sensores que forman parte del sistema de monitorización de los parámetros del agua de lavado relativos a la medición de los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), acidez (pH) y turbidez.

Seguidamente se incluyen en todos los casos un apartado con la descripción del sistema de registro y monitorización continua de datos relativos a los gases de escape y a los parámetros del agua de lavado regulados por la Resolución [13]. Es necesario destacar que el sistema de registro y monitorización continua de datos y de acuerdo con lo establecido en la Resolución [13] debe ser capaz de registrar los siguientes parámetros:

- Presión del agua de lavado y su caudal en la entrada al sistema.
- Presión de los gases de escape antes de entrar en la unidad y la caída de presión dentro de ella.
- Carga de los motores equipados con el sistema de limpieza de los gases de escape.
- Temperatura de los gases de escape antes y después del proceso de depuración.
- Concentraciones de dióxido de azufre (ppm) y de dióxido de carbono (%) y el valor relativo a la correspondiente relación entre ambos.
- Nivel de acidez (pH), concentración de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH), turbidez y temperatura de las aguas de lavado empleadas en el proceso de depuración de los gases de escape.

Además, estos datos deben poder ser descargados de forma inmediata desde el panel del operador para el período de tiempo que se precise mientras el sistema haya estado operando. Los sistemas de limpieza de los gases de escape deben ser capaces de generar, además de la hoja de datos con el registro correspondiente, un informe de cumplimiento al respecto. A continuación, se incluye un ejemplo con el extracto de datos para un buque equipado con un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto.

Timestamp	Latitude °	Latitude '	Longitude °	Longitude '	Wash water flow m3/h	Ratio SO2/CO2	SO2 ppm	CO2 %	Main engine load %
05-23-2020									
06:32:33 AM	N036	22,11	W002	40,7	541,88	0,02	0,1	4,51	39,67
05-23-2020									
06:36:33 AM	N036	21,96	W002	41,83	540,94	0,02	0,1	4,54	41,7
05-23-2020									
06:40:33 AM	N036	21,82	W002	42,95	541,56	0,02	0,1	4,48	38,65
05-23-2020									
06:44:33 AM	N036	21,68	W002	44,07	540,94	0,02	0,1	4,51	41,7
05-23-2020									
06:48:33 AM	N036	21,55	W002	45,21	541,56	0,02	0,1	4,49	37,64
05-23-2020									
06:52:33 AM	N036	21,41	W002	46,35	540,63	0,02	0,1	4,5	38,65
05-23-2020									
06:56:33 AM	N036	21,29	W002	47,47	541,25	0,02	0,1	4,44	38,65
05-23-2020									
07:00:33 AM	N036	21,18	W002	48,62	541,56	0,02	0,1	4,61	41,7
05-23-2020									
07:04:33 AM	N036	21,07	W002	49,75	541,88	0,02	0,1	4,47	38,65
05-23-2020									
07:08:33 AM	N036	20,96	W002	50,87	541,25	0,02	0,1	4,46	37,64
05-23-2020									
07:12:33 AM	N036	20,84	W002	52,02	540,94	0,02	0,1	4,54	39,67
05-23-2020									
07:16:33 AM	N036	20,71	W002	53,17	540,94	0,02	0,1	4,5	37,64

Timestamp	Lat. °	Lat. '	Long. °	Long. '	Wash water Pressure PT2.1 [bar]	Wash water flow FT2.1 [m3/h]	Inlet water pH	Inlet water turbidity NTU	Outlet water pH	Outlet water Turbidity NTU	Outlet water PAH	Main engine load %	Outlet water temp.
05-23-2020													
06:33:42 AM	N036	22,07	W002	41,04	0,95	541,25	8,12	0,2	5,57	2,05	17,84	40,69	26,75
05-23-2020													
06:37:42 AM	N036	21,92	W002	42,16	0,95	540,94	8,11	0,2	5,59	1,76	17,8	38,65	26,54
05-23-2020													
06:41:42 AM	N036	21,78	W002	43,26	0,95	541,88	8,12	0	5,57	2,15	17,91	42,72	26,62
05-23-2020													
06:45:42 AM	N036	21,64	W002	44,41	0,95	540,94	8,12	0,2	5,6	1,66	17,7	38,65	26,68
05-23-2020													
06:49:42 AM	N036	21,51	W002	45,55	0,95	541,25	8,11	0	5,58	1,37	17,65	39,67	26,47
05-23-2020													
06:53:42 AM	N036	21,38	W002	46,67	0,95	541,25	8,12	0,1	5,57	2,15	17,86	37,64	26,75
05-23-2020													
06:57:42 AM	N036	21,25	W002	47,81	0,96	541,25	8,12	0,1	5,59	2,15	17,51	38,65	27,08
05-23-2020													
07:01:42 AM	N036	21,15	W002	48,94	0,94	541,25	8,11	0	5,58	1,47	17,67	39,67	26,68
05-23-2020													
07:05:42 AM	N036	21,04	W002	50,06	0,95	540,94	8,11	0	5,58	1,17	17,7	42,72	26,75
05-23-2020													
07:09:42 AM	N036	20,93	W002	51,21	0,95	541,25	8,11	0	5,58	2,15	17,7	39,67	26,88
05-23-2020													
07:13:42 AM	N036	20,8	W002	52,35	0,95	540,94	8,11	0	5,58	2,05	17,65	39,67	26,82

Tabla 3. Vista de la monitorización y registro de datos por el sistema EGCS relativos a los parámetros del agua de lavado. Fuente: el Autor.

Time		GPS Position		Status			Open Loop Wash Water			Closed Loop Effluent Water			
Time - UTC	Latitude	Longitude	Scrubber status	Water treatment status	SO2/CO2	pH	PAH (Diff)	Turbidity (Diff)	pH	PAH	Turbidity	Effluent discharge mode	
					4.3	2.6	37 ug/l	25 FNU	2.6	400 ug/l	25 FNU		
Time	Latitude	Longitude	Scrubber status	Water treatment status	SO2/CO2	pH	PAH (Diff)	Turbidity (Diff)	pH	PAH	Turbidity	Effluent water discharge mode	
27.03.2019 11:00:00	35 53.4188 N	014 30.5850 E	Scrubber running in compliance	Closed loop	1.8	3.6	12	2	3.6	16	2	Zero discharge	
28.03.2019 11:00:00	38 36.4931 N	008 05.6419 E	Scrubber running in compliance	Open loop	2.3	3.2	14	3	3.2	15	3	Overboard	

Time		GPS Position		Scrubber	Engine			
Time - UTC	Latitude	Longitude	Scrubber status	Engine 1		Engine 2		
				Inlet status	Running status	Inlet status	Running status	
Time	Latitude	Longitude	Scrubber status	Inlet 1 status	Engine 1 status	Inlet 2 status	Engine 2 status	
27.03.2019 11:00:00	35 53.4188 N	014 30.5850 E	Scrubber running in compliance	Open	Running	Closed	Stopped	
28.03.2019 11:00:00	38 36.4931 N	008 05.6419 E	Scrubber running in compliance	Closed	Stopped	Open	Running	

Tag	Average	Maximum	Minimum
SO2/CO2 ratio	1.85	2.40	0.00
Open loop pH	3.59	6.50	3.10
Open loop PAH (diff)	12.06	15.30	5.10
Open loop turbidity (diff)	2.51	35.80	0.00
Closed loop PAH	16.16	19.50	13.00
Closed loop turbidity	2.47	44.40	0.50
Engine load 1	58.23	83.00	0.00
Engine load 2	61.48	84.00	0.00

Figura 15. Vista del modelo de informe del estado de cumplimiento del sistema. Fuente: el Autor.

Plan de Cumplimiento de las Emisiones de Óxidos de Azufre (SECP)

Del mismo modo que para el Manual Técnico (ETM-B) y el Manual de Vigilancia a bordo (OMM), el Plan de Cumplimiento de las Emisiones de Óxidos de Azufre (SECP) está compuesto por una parte introductoria con una breve descripción del sistema de limpieza de los gases de escape y con los detalles principales de los motores del buque (principales, auxiliares) y calderas que se encuentran equipados con el SLGE.

El Plan de Cumplimiento tiene principalmente por objeto facilitar los datos correspondientes a las unidades equipadas con el SLGE de tal modo que se demuestre el cumplimiento de los límites y restricciones aplicables al sistema. El SECP incluye una descripción del modo en el que se demuestra el cumplimiento del sistema a través del panel de control principal, comprobando los valores relativos a las emisiones de los gases de escape (dióxido de azufre y dióxido de carbono) y los relativos a los parámetros del agua de lavado regulados por la Resolución MEPC.340(77) [13] (acidez (pH), concentración de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's), turbidez y temperatura).

El Plan de Cumplimiento deberá estar aprobado por la Administración o por una Organización Reconocida actuando en su nombre (Sociedad de Clasificación).

El SECP hace alusión en todo momento al resto de Manuales (Manual Técnico y Manual de Vigilancia a Bordo) para determinadas secciones como la descripción del sistema, monitorización, registro, mantenimiento y calibración de equipos, entre otros.

Libro de registro de los parámetros de funcionamiento a bordo, ajustes de los componentes y mantenimiento

El libro de registro del SLGE deberá estar aprobado por la Administración o por una Sociedad de Clasificación que actúe en su nombre. En el libro de registro se anotarán las comprobaciones aleatorias realizadas diariamente de la presión del agua de lavado y su caudal a la entrada, la presión de los gases de escape antes de la entrada a la torre de lavado y la caída de presión experimentada a su entrada, la carga de los motores, temperatura de los gases de escape, las operaciones de mantenimiento, inspección, servicio y calibración según corresponda, así como la generación, almacenamiento y entrega de residuos procedentes del sistema de limpieza de los gases de escape. También se registrará de forma aleatoria las comprobaciones diarias de los valores relativos a la relación dióxido de azufre y dióxido de carbono (SO_2/CO_2) y las relativas a los siguientes parámetros del agua de lavado: pH, PAH, turbidez y temperatura.

Tag	PE-306	PE-305	FE-303	FE-304	PE-103	PE-104			TE-104	TE-105		
Unit	bar	bar	m ³ /h	m ³ /h	mbar	mbar	MW	MW	C ^o	C ^o		
Date	Scrubbing water pressure, Upper circuit		Scrubbing water pressure, Lower circuit		Scrubbing water flow, Upper circuit		Scrubbing water flow, Lower circuit		Exhaust gas pressure, scrubber inlet		Exhaust gas pressure differential	
Time	Scrubbing water pressure, Lower circuit		Scrubbing water flow, Upper circuit		Scrubbing water flow, Lower circuit		Exhaust gas pressure, scrubber inlet		Exhaust gas pressure differential		Signature	
22/12/19	1,9	1,9	375	387	-27,2	-16,3	11,1	-	301	26		
28/12/19	1,9	1,9	376	386	-27,2	-16,3	11,4	-	301	26		
28/12/19	1,9	1,9	376	386	-27,2	-16,3	11,4	-	301	26		
28/12/19	1,9	1,9	377	386	-27,2	-16,3	11,5	-	301	26		
10/3/19	1,9	1,9	375	386	-27,2	-14,7	-	6,1	272	24		
17/3/19	2,0	1,9	377	440	-27,7	-15,6	-	7,4	257	24		
29/2/19	1,9	1,9	378	444	-27,7	-15,3	-	7,5	232	23		

Figura 16. Vista de los parámetros registrados en el Libro de Registro del SLGE relativos a la presión, caudal del agua de lavado, presión y temperatura los gases de escape y régimen de carga de los motores. Fuente: el Autor.

2.5.3. Sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto.

2.5.3.1. Introducción

Los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto se caracterizan entre otros, por emplear agua de mar como medio para eliminar los óxidos de azufre de los gases de escape generados durante la combustión. El volumen de agua de mar que se emplea durante el proceso de depuración (desulfuración) de los gases de escape depende de la potencia del motor y de la carga de trabajo de este.

No obstante, la principal característica de los SLGE de ciclo abierto y a su vez la más problemática es que el agua residual resultante del proceso de desulfuración de los gases de escape es directamente vertida al mar de forma continua. En ocasiones y dependiendo del fabricante, los sistemas de ciclo abierto integran un proceso de dilución del agua residual con agua de mar limpia previo su descarga para cumplir con los límites establecidos por la Resolución MEPC.340(77) [13] con relación a los parámetros del agua de lavado (**hidrocarburos policíclicos aromáticos** (PAH's), la **turbidez** y el **pH** (acidez)). Estos sistemas como veremos más adelante no tratan ni depuran las aguas residuales, simplemente las mezclan con agua de mar limpia previo a su descarga para garantizar unos valores que sean acordes con la citada Resolución [13].

2.5.3.2. Componentes de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto

Generalmente y tras analizar el funcionamiento de diversos tipos de sistemas que integran el grupo de los SLGE de tipo húmedo se ha observado que estos, independientemente de si se trata de sistemas de ciclo abierto, cerrado o híbrido, utilizan una serie de elementos comunes en todos ellos. De esta manera encontraremos en todo sistema de limpieza de los gases de escape y desde un punto de vista genérico, los siguientes elementos:

- Conjunto de bombas de impulsión de agua (salada/dulce), líneas de conducción y sistema de válvulas (entrada, conducción, recuperación y/o salida).
- Boquillas de rociado/aspersión de agua.
- Torre de lavado y eliminador de rocío.
- Líneas de conducción y sistemas de impulsión de los gases de escape.
- Líneas de conducción agua residual.
- Conjunto de sensores para la monitorización de los gases de escape.
- Conjunto de sensores para la monitorización de los parámetros del agua de lavado.
- Panel de control del sistema

Es en este momento cuando dependiendo del ciclo del SLGE (abierto, cerrado o híbrido), la configuración del sistema es distinta dado que se integran otros equipos/dispositivos de control y tratamiento.

Se puede afirmar que los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto son actualmente desde el punto de vista de los equipos y sistemas que los componen, los más sencillos y económicos. De hecho, estos sistemas están compuestos básicamente con los elementos anteriormente citados y dependiendo del fabricante en ocasiones se encuentran de forma adicional un sistema de tratamiento/dilución del agua residual procedente del proceso de depuración/desulfuración de los gases de escape.

A continuación, se analiza de forma pormenorizada el funcionamiento de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto. Como se indica previamente estos sistemas utilizan como medio para extraer los óxidos de azufre (SO_x) de los gases de escape, agua marina. Esta agua es captada del mar directamente a través de la rejilla de aspiración mediante la acción de varias bombas. Tras esta rejilla se encuentran una serie de sensores que tienen por objeto analizar los siguientes parámetros del agua de mar:

- Concentración de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's)
- Turbidez
- Nitratos

A continuación, se muestran las válvulas de entrada y bombas que proporcionan al sistema de limpieza de los gases de escape, el agua de mar necesaria durante el proceso de desulfuración y el conjunto de sensores que monitorizan continuamente los parámetros del agua de mar a su entrada en el SLGE instalado a bordo de un buque tipo ro-pax.



Figura 17. Vista de las válvulas, bombas de aspiración y líneas de entrada de agua de mar del sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto instalado a bordo de un buque tipo ropax. Fuente: el Autor.



Figura 18. Vista del conjunto de sensores de monitorización de los parámetros de agua de mar a su entrada en el sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto instalado a bordo de un buque tipo ropax. Fuente: el Autor.

2.5.3.3. Operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto

Como se ha citado previamente, el sistema de limpieza de los gases de escape captura el agua de mar necesaria para el proceso de depuración de los gases de escape a través de una serie de válvulas y rejillas donde mediante la acción de unas bombas de aspiración es conducida a la torre de lavado. En el momento de su entrada, se analizan los parámetros del agua de mar relativos a la turbidez, los nitratos y la concentración de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's). Las Directrices de 2021 sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape [13] (Resolución MEPC.340(77)) establecen en su apartado 10 "Agua de descarga", los límites de descarga de los parámetros relativos a la turbidez, los nitratos y los PAH's basados en la diferencia entre la concentración de estos a la entrada al sistema y a su salida. Este diferencial no debe superar los límites establecidos por la citada Resolución.

Una vez el agua de mar ha sido analizada, ésta es bombeada a la torre de lavado donde es continuamente rociada sobre los gases de escape procedentes de la combustión de los motores principales y otros consumidores de combustible que se encuentren equipados con el SLGE. El agua de lavado es rociada desde varias alturas a través de las boquillas de aspersión, de este modo se consigue un rociado uniforme de agua en toda la columna de los gases de escape en su ascensión por la torre de lavado.



Figura 19. Vista de las líneas de conducción del agua de mar hasta la torre de lavado. Fuente: el Autor.

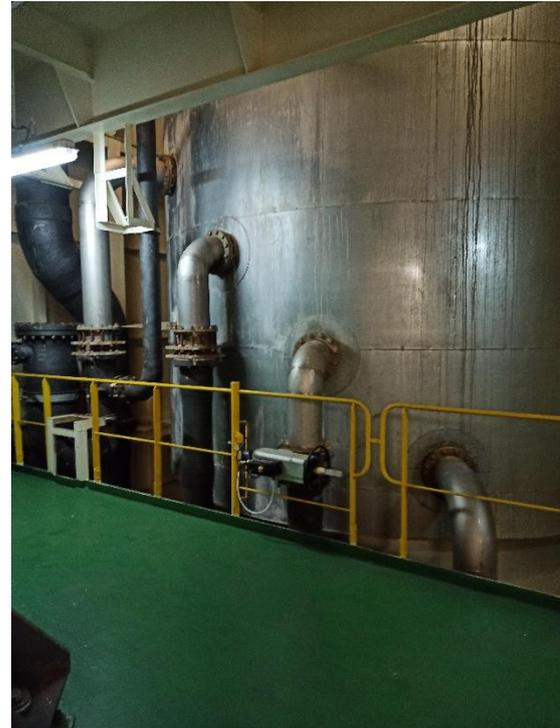


Figura 20. Vista de un tramo de la torre de lavado con la inserción de las líneas que conducen el agua de mar, a varias alturas. Fuente: el Autor.

El agua resultante es conducida por gravedad a la base de la torre de lavado y bombeada hasta la válvula de salida (ship's outlet) donde es descargada al mar. Previo a su descarga el agua es analizada de forma continua (Esquema/Plan B) para determinar el cumplimiento de los parámetros del agua de descarga establecidos por las Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape [13]. En el caso de que alguno de los parámetros del agua de lavado que son monitorizados de forma continua y para los que se ha definido un límite, supere el valor máximo establecido por la Resolución [13], el sistema se detendrá automáticamente provocando una alarma visual y auditiva (panel de control y Sala de Máquinas del buque). Cabe señalar que para los casos de la turbidez y de la concentración de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's), la propia Resolución establece un período específico de 15 minutos por cada período rotatorio cualquiera de 12 horas en los que admite que se supere el límite de concentración continua de PAH_{phe} (fenantreno equivalente)⁶ y el límite de turbidez continua de la descarga en un 20 %.



Figura 21. Vista de la base de la torre de lavado y conducto del agua residual de un EGCS instalado a bordo de un buque tipo ropax. Fuente: el Autor.



Figura 22. Vista del sistema de muestreo y análisis por los sensores de los parámetros del agua de lavado de un EGCS instalado a bordo de un buque tipo ropax. Fuente: el Autor.

⁶ PAH_{phe} (fenantreno equivalente) corresponde con la señal producida por un monitor de HAP con longitudes de onda de excitación entre 244 nm y 264 nm (254±10 nm) y longitudes de onda de detección entre 310 nm y 410 nm (360±50 nm) que se calibran atendiendo a una serie reconocida de concentraciones de fenantreno dentro de la gama de mediciones prevista cuando existe exposición al agua de descarga del SLGE con contenido de una gama de distintas especies de HAP. Resolución MEPC.340(77) – Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape (IMO) [13].

DATE	TRIGGER	DESCRIPTION	ACK	RECOVERY
22/05/16	10:12	RCP001-DATA LOGGER USB STORAGE IS FULL (OR NO USB ON HMI)	10:22	10:16
22/05/16	07:45	WMS002FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	07:58	07:45
22/05/15	21:00	P003-NO.3 SEAWATER SUPPLY PUMP STANDBY START	21:00	21:00
22/05/15	18:55	FMO01-SEAWATER SUPPLY FLOW LOW ALARM	18:56	18:56
22/05/15	01:55	WMS002FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	02:02	01:55
22/05/15	01:54	WMS002FA-WM SAMPLE FLOW ALARM	02:02	01:54
22/05/15	01:53	WMS001FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	02:02	01:53
22/05/14	06:24	WMS002FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	06:34	06:24
22/05/12	12:55	WMS002FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	15:12	12:55
22/05/12	12:49	WMS002FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	15:12	12:49
22/05/12	12:47	WMS002FA-WM SAMPLE FLOW ALARM	15:12	12:48
22/05/12	12:47	WMS002FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	15:12	12:47
22/05/12	12:46	WMS002FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	15:12	12:47
22/05/12	12:46	WMS002FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	15:12	12:46
22/05/12	12:45	WMS002FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	15:12	12:45
22/05/12	06:18	CEMS-COMMUNICATION FAULT	06:49	06:27
22/05/11	10:58	WMS001FWA-WM SAMPLE FLOW WARNING	11:08	11:00
22/05/11	09:40	WMS001/002 TURBIDITY DIFFERENTIAL HIGH ALARM	09:45	09:43
22/05/11	09:37	P003-NO.3 SEAWATER SUPPLY PUMP STANDBY START	09:45	09:38
22/05/09	21:06	P001-NO.1 SEAWATER SUPPLY PUMP COMMUNICATION FAULT	21:12	21:30
22/05/09	21:05	P002-NO.2 SEAWATER SUPPLY PUMP STANDBY START	21:12	21:06
22/05/09	21:05	P001-NO.1 SEAWATER SUPPLY PUMP FAULT	21:12	21:30
22/05/09	18:28	CEMS-COMMUNICATION FAULT	18:31	18:37
22/05/08	18:50	CEMS001XA02-MAINTENANCE REQUEST	05:42	18:50
22/05/07	10:45	FMO01-SEAWATER SUPPLY FLOW LOW ALARM	10:53	10:45
22/05/07	01:16	P002-NO.2 SEAWATER SUPPLY PUMP STANDBY START	01:51	01:16

Figura 23. Vista del panel de alarmas del EGCS instalado a bordo de un buque tipo portacontenedores con detalle resaltado de la alarma correspondiente a un alto nivel en el diferencial de la turbidez del agua de lavado. Fuente: el Autor.

INDEX	ME1	ME2	CUIDADO	
Tuesday, February 22, 2022 9:00:21 PM				
No.	Time	Date	Stat...	ALARM HISTORY Text
3001	5:25:53...	2/22/2022	E	COM - MPI 21 THERMIC FAULT: ME1 Cooling p...
9057	5:25:53...	2/22/2022	EU	COM - OVB_Rack4 CLOSED
2043	5:25:44...	2/22/2022	EU	ME2 - SYSTEM STOPPED
2023	5:25:44...	2/22/2022	EU	ME2 - UNEXPECTED SHUT-DOWN
1043	5:25:44...	2/22/2022	EU	ME1 - SYSTEM STOPPED
1023	5:25:44...	2/22/2022	EU	ME1 - UNEXPECTED SHUT-DOWN
2045	5:25:33...	2/22/2022	EU	ME2 - HIGH delta PAH
1045	5:25:33...	2/22/2022	EU	ME1 - HIGH delta PAH
2045	5:25:30...	2/22/2022	E	ME2 - HIGH delta PAH
2043	5:25:30...	2/22/2022	E	ME2 - SYSTEM STOPPED
2023	5:25:30...	2/22/2022	E	ME2 - UNEXPECTED SHUT-DOWN
1045	5:25:30...	2/22/2022	E	ME1 - HIGH delta PAH
1043	5:25:30...	2/22/2022	E	ME1 - SYSTEM STOPPED

Figura 24. Vista del panel de alarmas del EGCS instalado a bordo de un buque tipo ropax con detalle resaltado de las alarmas correspondientes a un alto nivel en el diferencial de los PAH's del agua de lavado y la posterior detención automática del sistema. Fuente: el Autor.

Como se ha indicado previamente con respecto al diseño de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto, determinados fabricantes están apostando por la instalación de un componente adicional a bordo de los buques equipados con estos. Este componente se sitúa muy próximo al punto de descarga del agua de lavado residual y tiene por objeto “depurar” el agua de lavado previo a su descarga de modo que todos los parámetros de ésta, se encuentren dentro de

los límites establecidos por la Resolución MEPC.340(77) [13] en su apartado 10 “Agua de descarga”.

El método que utilizan determinados fabricantes para depurar el agua de lavado previo a su descarga al mar está basado en un sencillo proceso de dilución con agua de mar en estado natural. Esta técnica emplea un tanque específico de pequeñas dimensiones donde el agua de lavado residual procedente del proceso de desulfuración es mezclada con agua de mar que no ha sido alterada más allá de su temperatura. Esta agua se obtiene directamente del sistema de refrigeración de los motores principales y una vez ha sido empleada con este objeto es conducida hasta el mencionado tanque de dilución. En este tanque de dilución es mezclada continuamente con el agua de lavado residual, obteniendo un agua de lavado de descarga con unos parámetros mucho más apropiados, especialmente a lo que el nivel de acidez se refiere (pH) y en cumplimiento de la Resolución [13]. Este sistema como se indica está formado por el tanque de mezclado, una tubería de entrada al tanque por donde es conducida el agua residual procedente de la torre de lavado, una segunda tubería de entrada por donde el agua de refrigeración de los motores es introducida en el mencionado tanque y una última tubería, en este caso de salida del tanque que conduce el agua residual mezclada hasta su punto de descarga del buque al mar (ship’s outlet).

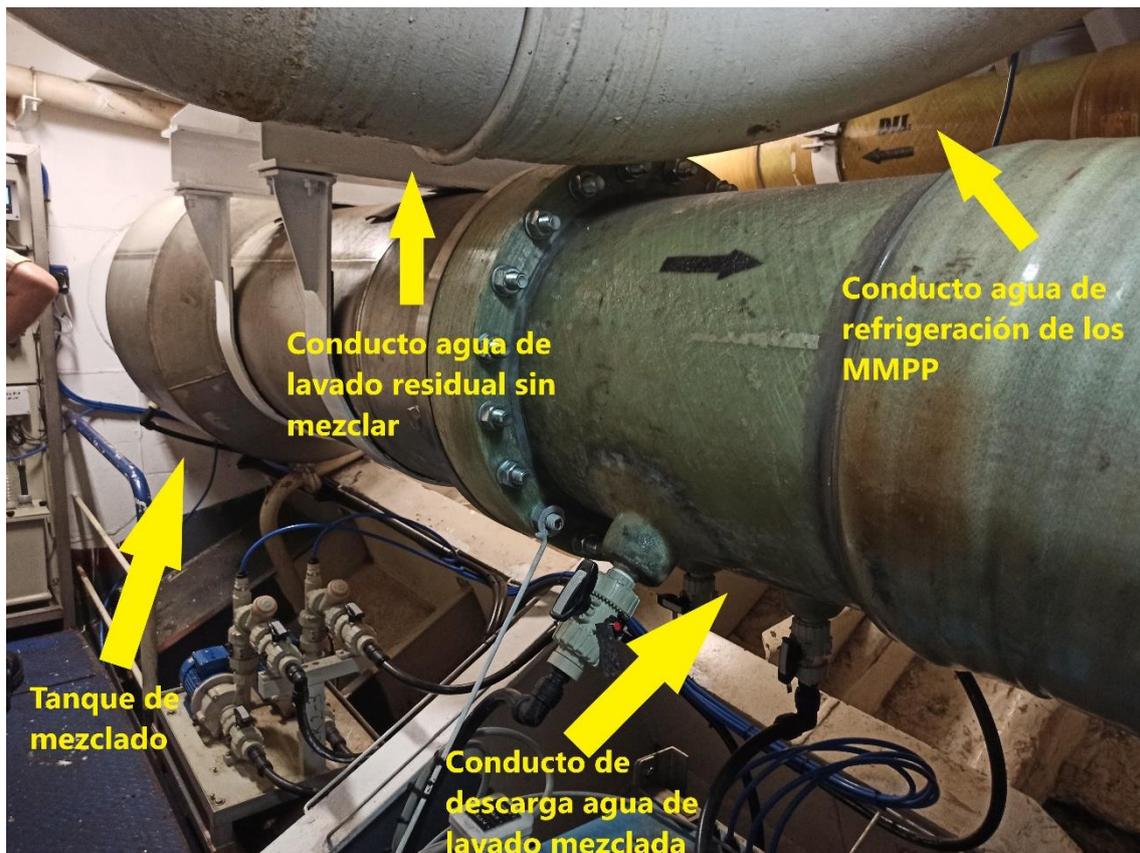


Figura 25. Vista del sistema de depuración del agua residual de proceso de desulfuración de los gases de escape. Fuente: el Autor.



Figura 26. Vista del conducto y válvula de descarga del agua residual de un EGCS instalado a bordo de un buque tipo ropax. Fuente: el Autor.



Figura 27. Vista de los valores de los parámetros del agua de lavado previo a su descarga en un EGCS instalado a bordo de un buque tipo ropax. Fuente: el Autor.

2.5.3.4. Análisis de la situación actual frente a la problemática asociada al uso de los SLGE de ciclo abierto

Como se ha analizado en el apartado anterior, la principal característica de los SLGE de ciclo abierto desde el punto de vista operativo es que el agua residual de lavado es continuamente descargada al exterior sin haber recibido previamente ningún tipo de tratamiento. Dependiendo del fabricante y como se señala en el apartado anterior, en ocasiones se incorpora al sistema un pequeño tanque de mezclado donde el agua residual es mezclada con agua de mar cuyas propiedades no han sido alteradas más allá de la temperatura.

Pero la mayor parte de fabricantes de sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto que han sido objeto de estudio y análisis durante la presente investigación, no incorporan ninguna clase de tratamiento al agua residual procedente del proceso de desulfuración de gases y es directamente descargada al mar. La única premisa que necesitan cumplir es no sobrepasar los límites de los parámetros del agua de lavado establecidos por la Resolución MEPC.340(77) [13]. Sin embargo, los límites establecidos por el apartado 10 “AGUA DE DESCARGA” y el subapartado 10.1 “Criterios de calidad del agua de descarga” de la citada Resolución abarcan únicamente 4 parámetros del agua que son la concentración de **hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH’s)**, el nivel de acidez (pH), la turbidez/partículas en suspensión y la **concentración de nitratos**. Asimismo, si el sistema de limpieza emplea algún tipo de aditivo o

sustancia química en concreto, durante el proceso de desulfuración de los gases de escape, la propia Resolución [13] ya establece que se podrá requerir una evaluación adicional del agua de descarga con objeto de analizar la conveniencia de aplicar otros criterios para determinar la calidad del agua de descarga.

Para el caso particular del nivel de acidez (pH) y como se ha analizado en el apartado 2.1.3.2 de esta tesis “Parámetros de descarga del agua de lavado”, el agua de lavado descargada de todo sistema de limpieza de los gases de escape deberá cumplir una de las siguientes prescripciones relacionadas con el nivel de acidez/alcalinidad del agua de descarga:

- 1) El pH del agua de lavado a la descarga no deberá ser inferior a 6,5 unidades salvo en las situaciones de maniobras y en tránsito en cuyo caso se permite una diferencia máxima de 2 unidades en el pH medido a la entrada y el medido a la salida.
- 2) El pH del agua de lavado descargada no será inferior al valor predeterminado mediante medición directa o mediante metodología basada en el cálculo computacional y del que resulte un pH mínimo de 6,5 unidades medido a 4 metros de distancia desde el punto de descarga con el buque estacionario. Es decir, en este caso el valor mínimo de la acidez/alcalinidad del agua descargada será tal que, al medirlo a 4 metros de distancia contados desde la descarga del buque, no debe ser inferior a 6,5. El dato obtenido mediante cálculo computacional vendrá consignado en el Manual Técnico del EGCS según sea Plan A o Plan B.

Ya se ha mencionado que la gran mayoría de fabricantes de sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto emplean la segunda prescripción (cálculo computacional). Durante el progreso de esta investigación se han analizado los manuales técnicos (ETM-B), manuales de vigilancia a bordo (OMM) y los planes de cumplimiento de las emisiones SO_x de diversos fabricantes. Durante la consulta de esta documentación, se ha podido observar que para el caso del nivel de acidez (pH) del agua de descarga se han aprobado/autorizado valores considerablemente bajos. Tanto es así que es habitual encontrar que, para un SLGE de ciclo abierto, el valor mínimo del pH medido en el punto de descarga no será inferior a 2,9 unidades. Es interesante destacar en este apartado que, el agua de mar tiene por naturaleza un pH alcalino (>7), incluso se ha observado que el pH medio de los océanos atlántico, índico y pacífico es actualmente de 8.06 unidades [28].

Visto lo anterior, es necesario señalar que durante la presente investigación se ha observado que los buques que disponen de un sistema de limpieza de los gases de escape que a su vez cuentan con el dispositivo/tanque adicional de mezclado que se ha citado en el apartado anterior, el valor del nivel de acidez (pH) del agua resultante y que es descargado al exterior se encuentra de media entre 3,3 y 3,5 unidades. Entonces no cabe duda de la alta acidez del agua de lavado resultante del proceso de depuración/desulfuración, que aun siendo mezclada con agua de mar con un pH de 8,1 de media aproximadamente, el producto resultante es un agua residual con un pH medio de 3,4 unidades. Además, es necesario tener en cuenta que el caudal medio de descarga para un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto se encuentra alrededor de los 600-800 metros cúbicos por hora. Si consideramos que la duración media de la escala de un buque de los que actualmente atracan en la Dársena Sur del puerto de Barcelona y que están equipados con un SLGE de ciclo abierto, es de unas 10-12 horas aproximadamente y realizamos el cálculo del volumen de agua de lavado que descarga este buque durante su escala en el puerto, obtendremos

que el buque habrá descargado de media unos 7.700 metros cúbicos de agua, en este caso con un nivel de acidez aproximado de 3,4 unidades.

El alto nivel de acidez se debe a las reacciones que tienen lugar entre los óxidos de azufre y el agua durante el proceso de limpieza de gases.

Examinando la Ficha Internacional de Seguridad Química (ILO-ICSCs) para el fuelóleo pesado [29] se ha observado que este combustible está generalmente formado por varios compuestos aromáticos, asfaltenos, moléculas compuestas de azufre, hidrocarburos saturados, metales, compuestos organometálicos (vanadio, aluminio y níquel), oxígeno y nitrógeno, entre otros. Durante el proceso de combustión del fuelóleo, se produce una rápida oxidación de todos sus componentes. A través de la citada oxidación se produce el dióxido de azufre (SO₂) y el pentóxido de vanadio (V₂O₅) [30] como sigue:



Tras producirse las anteriores reacciones y debido a la alta temperatura de los gases de escape ($\approx 350^\circ \text{C}$) dentro de la cámara de combustión tiene lugar una segunda oxidación del dióxido de azufre generando esta vez, trióxido de azufre (SO₃) [30]. Esta última reacción tiene lugar gracias a la acción del pentóxido de vanadio (V₂O₅) que actúa como catalizador de la reacción [30].

El trióxido de azufre es conducido con el resto de los gases de escape generados en la cámara de combustión hasta la torre de lavado y es en este momento cuando al entrar en contacto con el agua de lavado que es continuamente rociada, el trióxido de azufre (SO₃) reacciona de la siguiente forma:



El dióxido de azufre que no ha reaccionado previamente durante la segunda oxidación, también al entrar en contacto con el agua de lavado, reacciona de la siguiente forma:



La capacidad de neutralizar ácidos que tiene el agua de mar es muy alta en comparación con el agua dulce. Esta capacidad de neutralizar ácidos o de resistir cambios en su pH es lo que se conoce como alcalinidad. Como se ha mencionado anteriormente la principal fuente de alcalinidad en el agua de mar es la concentración de carbonatos (CO₃²⁻) y bicarbonatos (HCO₃⁻).

Visto lo anterior es comprensible que el agua de lavado que se está descargando al exterior a través de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto tenga esa acidez tan elevada. Y por ello algunos de los fabricantes de los SLGE de ciclo abierto han apostado por intentar reducir la acidez del agua descargada mediante el uso de los tanques de mezclado que

han sido tratados en el apartado anterior. Pero estos tanques no representan en absoluto una solución definitiva al problema de la acidez del agua descargada puesto que, si observamos su operativa y analizamos su funcionamiento, lo único que están aportando es un “vaso de reacción” a bordo del buque. Es decir, en lugar de que la reacción entre el agua de lavado residual (ácida) y el mar tenga lugar en mar abierto, ésta se produce igualmente entre los mismos reactivos, pero a bordo del buque dentro de un tanque de mezclado y el resultado es descargado igualmente al mar.

El propósito de esta investigación fue en un primer momento analizar el impacto de las descargas del agua de lavado de los SLGE de ciclo abierto sobre el nivel de acidez de las aguas del puerto de Barcelona. No obstante y a la vista de la situación actual, de la operativa de estos sistemas y tras detectar que existe la necesidad de mejorar su operativa, especialmente en lo que el tratamiento del agua de lavado se refiere, esta investigación se ha enfocado a buscar una solución operativa y realista al problema asociado con la acidez de las aguas de lavado.

A continuación, se muestra el esquema operativo básico de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto equipado con el tanque adicional de mezclado.

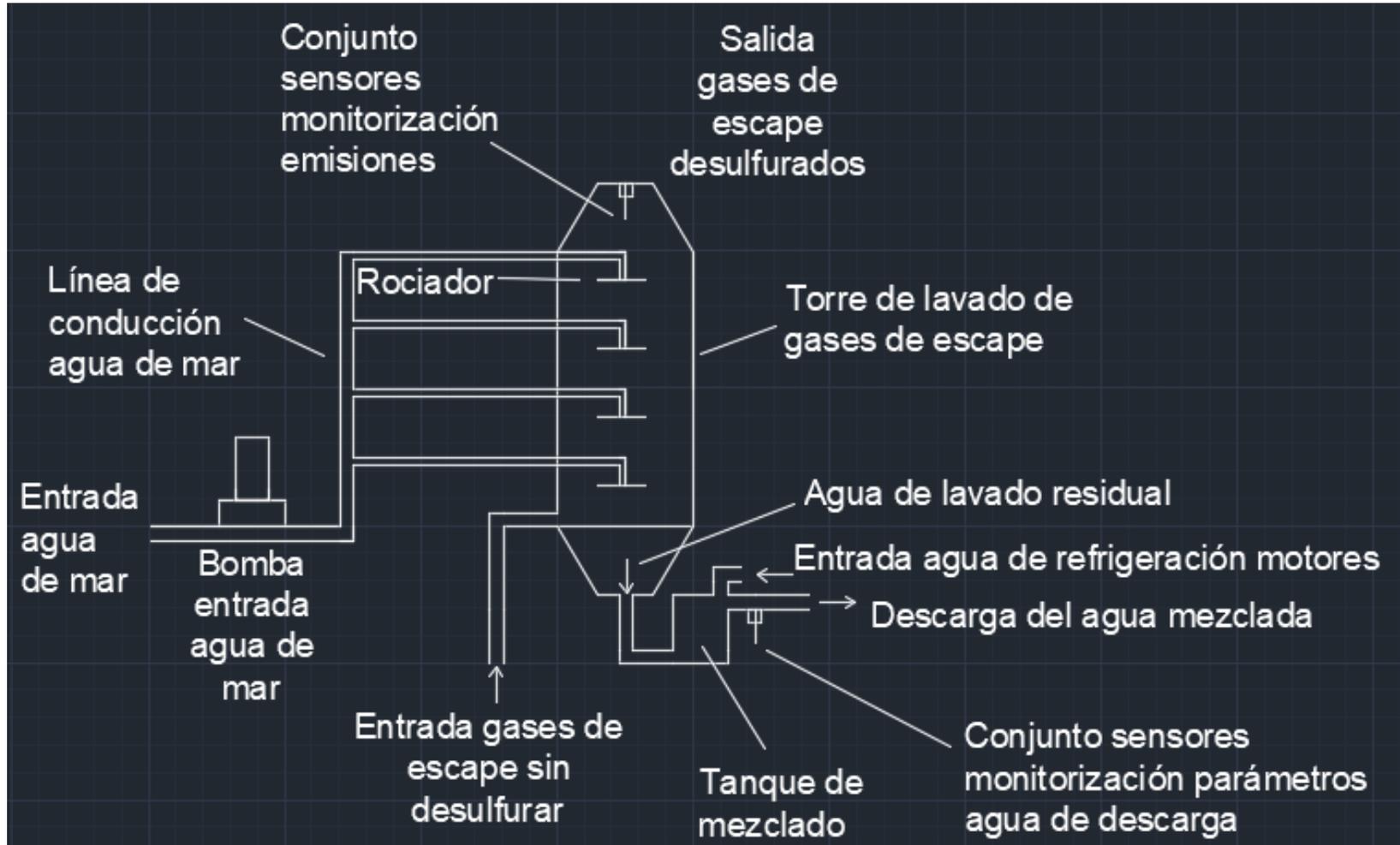


Figura 28. Vista del esquema operativo de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto. Fuente: el Autor.

2.5.4. Sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado.

2.5.4.1. Introducción

Los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado se caracterizan (a diferencia de los SLGE de ciclo abierto), por emplear agua dulce como medio para filtrar los óxidos de azufre presentes en los gases de escape generados por los motores principales y/o auxiliares del buque. Sin embargo, el agua dulce como tal no tiene la alcalinidad suficiente para actuar eficientemente como medio para extraer los óxidos de azufre de los gases de escape. Comparativamente el agua de mar (abierto) tiene una alcalinidad (A_T) media de $2.300 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}\cdot\text{sw}^{-1}$ mientras que el agua dulce (río) tiene una alcalinidad (A_T) media de $210 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}\cdot\text{sw}^{-1}$ [27]. Este hecho tiene una gran importancia en el rendimiento de un sistema de limpieza de los gases de escape desde el punto de vista de la eliminación de los óxidos de azufre (SO_x). Para el caso del agua dulce y teniendo en cuenta su baja alcalinidad en comparación con el agua de mar, se requeriría para obtener la reducción de las emisiones de los gases de escape de un buque al 0.5% m/m mediante el uso de un SLGE y sin el uso de aditivos, aproximadamente el doble del volumen de agua que para el caso de un SLGE que emplee agua de mar [27]. Por este motivo todos los sistemas de limpieza de gases de escape de tipo húmedo y ciclo cerrado emplean, además del agua dulce una solución alcalina que es dosificada en el tanque de agua dulce para incrementar la alcalinidad de esta. Algunas de las soluciones alcalinas que se emplean de acuerdo a los Manuales Técnicos consultados hasta el momento de varios fabricantes de SLGE de ciclo cerrado son el hidróxido de sodio (NaOH), el carbonato de sodio (Na_2CO_3), el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y el hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).

2.5.4.2. Componentes de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado

Los SLGE de ciclo cerrado están compuestos básicamente por los siguientes elementos:

- Tanques de agua dulce / recirculación.
- Tanque de solución alcalina.
- Líneas y sistema de inyección de la solución alcalina.
- Sistema de refrigeración (intercambiador de calor).
- Bomba/s de agua de mar para intercambiador de calor.
- Tanque/s de residuos (fangos).
- Tanque/s cero descargas
- Conjunto de bombas de impulsión de agua (dulce), líneas de conducción y sistema de válvulas (entrada, conducción, recuperación y purga).
- Boquillas de rociado/aspersión de agua.
- Torre de lavado y eliminador de rocío.
- Líneas de conducción y sistemas de impulsión de los gases de escape.
- Líneas de conducción agua de lavado residual.
- Planta de tratamiento del agua de lavado residual.
- Conjunto de sensores para la monitorización de los gases de escape.
- Conjunto de sensores para la monitorización de los parámetros del agua de lavado.
- Panel de control del sistema.

Se puede afirmar que los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado son actualmente los que mayor coste generan a una empresa naviera [31]. Esto se debe a varios

factores, entre ellos se puede destacar el coste de todos los componentes, entre ellos la planta de tratamiento del agua de lavado, el sistema de dosificación de la solución alcalina, bombas adicionales para la gestión/tratamiento del agua de lavado, inyección de la solución alcalina, tanques adicionales para la recirculación, enfriado, almacenamiento de residuos entre otros, además del coste generado por la entrega y gestión en tierra de los residuos generados por el sistema de ciclo cerrado (fangos). Debemos tener en cuenta que los SLGE de ciclo cerrado generan una cantidad de residuos/partículas considerables.

Dependiendo del fabricante, existen sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado en los que los fangos generados durante la fase de tratamiento de las aguas de lavado son almacenados en uno o varios tanques (sludge tank) y desde aquí son bombeados directamente a la instalación autorizada de recepción en tierra (puertos). Otros sistemas también emplean un sistema de prensa desde el que se separan las partículas sólidas de los fangos procedentes del tratamiento del agua residual de lavado (dewatering). Este fango seco es almacenado en sacas tipo “big bags” o en bidones a bordo del buque, tras haber sido prensado y compactado por el sistema.

A continuación, se muestra la apariencia del residuo seco de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado.

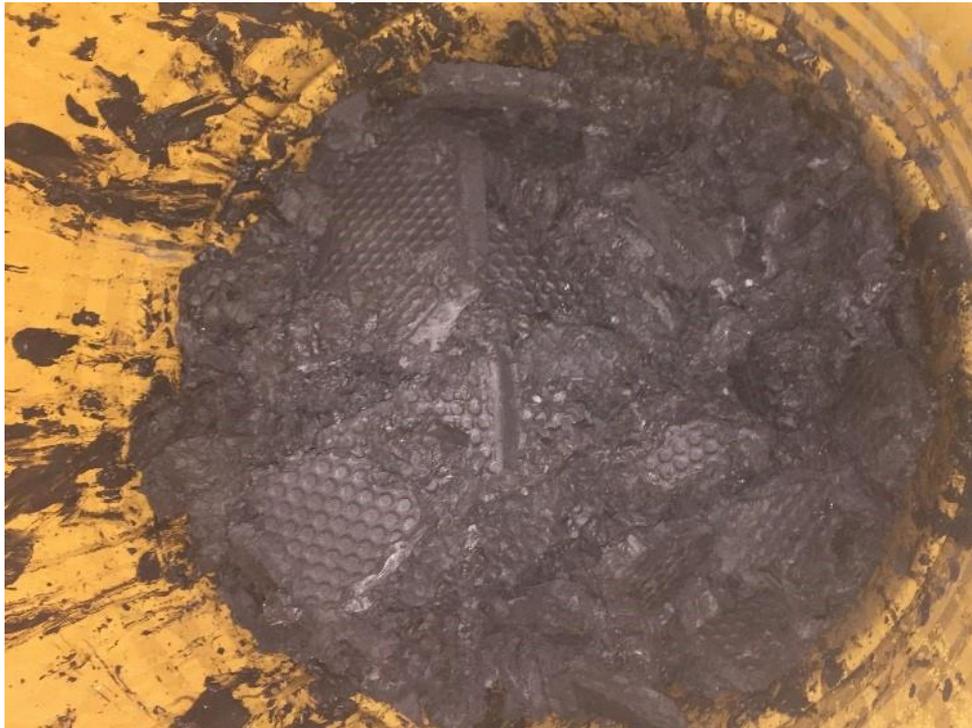


Figura 29. Vista del residuo seco de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado instalado a bordo de un buque tipo crucero. Fuente: el Autor

2.5.4.3. Operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado

El suministro de agua dulce que el sistema emplea para la desulfuración de los gases de escape es conducido en primera instancia al denominado tanque de recirculación. El tanque de recirculación está compuesto, dependiendo del fabricante y del diseño del sistema propiamente, de 3 entradas. La primera de ellas son las aguas residuales procedentes de la torre de limpieza de los gases de escape, la segunda corresponde al suministro de agua dulce procedente de los tanques y la tercera entrada al tanque de recirculación es la procedente de la planta de tratamiento de aguas residuales.

No obstante y como se indica supra, la alcalinidad del agua juega un papel muy importante en el proceso de limpieza de los gases de escape. Dicha alcalinidad está determinada por la concentración de sales de ácidos débiles y de bases fuertes en el agua. Como se ha mencionado, los sistemas de ciclo cerrado operan con agua dulce, luego la concentración de sales y bases fuertes en dicha agua es muy reducida, por lo que se requiere de una aportación externa de aditivos alcalinos.

Dicha aportación de aditivos generalmente tiene lugar, en el momento en el que las aguas abandonan la torre de lavado de los gases de escape y son dirigidas al tanque de recirculación. En esa fase, las aguas procedentes de la torre de lavado son enviadas al tanque de recirculación y a la entrada, reciben la aportación de los aditivos, para aumentar su alcalinidad.



Figura 30. Vista del tanque de recirculación de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado instalado a bordo de un buque tipo crucero. Fuente: el Autor



Figura 31. Vista de la entrada del agua residual de lavado a los tanques de recirculación de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado instalado a bordo de un buque tipo crucero. Fuente: el Autor

Los aditivos empleados en los sistemas de ciclo cerrado y que confieren al agua dulce empleada, la basicidad necesaria para neutralizar los ácidos de los gases de escape (SO_2), tal y como se ha mencionado en la introducción del presente apartado, pueden variar en función del tipo de sistema y del fabricante, aunque se utiliza con determinada frecuencia el hidróxido de sodio (NaOH), sustancia también conocida como sosa cáustica.

Es necesario mencionar que el sistema de ciclo cerrado requiere, además de los aditivos necesarios para aumentar la alcalinidad del agua dulce empleada en el proceso de limpieza de gases, otros aditivos que son añadidos directamente a la unidad de limpieza de aguas residuales (planta de tratamiento) con objeto de incrementar el rendimiento del proceso de depuración de estas. Dichos aditivos, están compuestos por una serie de agentes químicos que actúan como floculantes⁷. Una de las soluciones generalmente más empleadas para tal efecto, es el cloruro de polialuminio.

El cloruro de polialuminio, es una de las soluciones químicas que mayor eficiencia tiene en diversos procesos de tratamiento de aguas residuales [32]. Esto se debe principalmente a su alta eficiencia de floculación, creando grandes flóculos de residuos a una elevada velocidad, facilitando de esta forma la sedimentación de estos y, por lo tanto, aumentando el rendimiento de la unidad de tratamiento, en este caso de las aguas residuales de limpieza de los gases de escape. Además, esta sustancia, tiene un pequeño impacto en los niveles del pH de las aguas, por lo que éste no se ve alterado tras la aplicación de la citada solución química.

⁷ Una sustancia floculante es aquella que induce a la combinación o conglomeración de partículas sólidas suspendidas generalmente empleada con fines de depuración/filtrado de aguas.

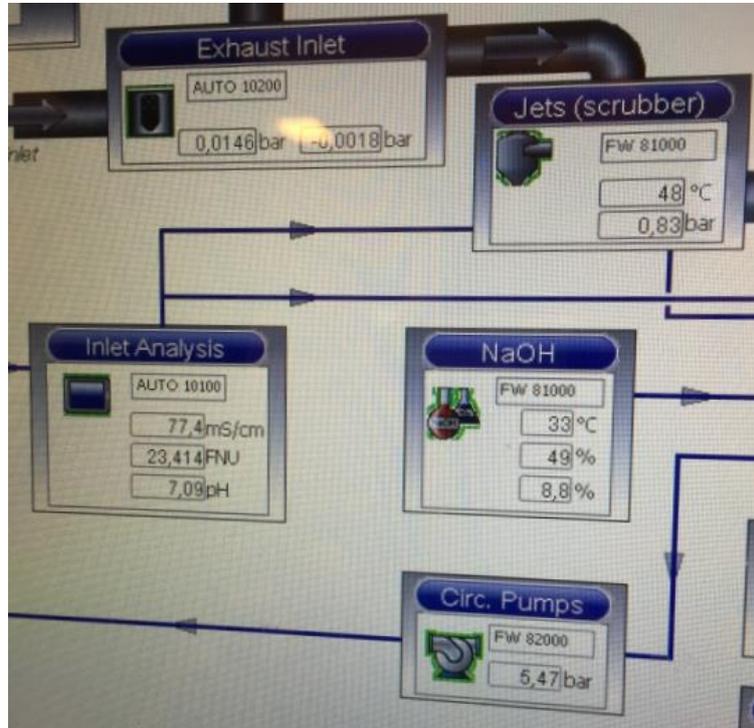


Figura 32. Vista del panel de control de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado con detalle de los parámetros relativos a la solución alcalina utilizada (NaOH) instalado a bordo de un buque tipo crucero. Fuente: el Autor.

Una vez las aguas han sido tratadas, en la unidad de limpieza de aguas residuales, el residuo generado, flóculos y partículas capturadas, son almacenadas en los tanques de almacenamiento de lodos, dispuestos a tal efecto. Las aguas tratadas, son conducidas al tanque de recirculación desde donde van a ser bombeadas de nuevo al sistema. No obstante, estas aguas, a medida que van siendo recirculadas por el sistema, su temperatura va incrementado. Esto se debe al proceso de limpieza de los gases de escape y a la elevada temperatura de estos. Por este motivo, las aguas procedentes del tanque de recirculación y previamente a ser conducidas a la torre de lavado, son recirculadas en un intercambiador de calor de placas (plate heat exchanger), donde su temperatura se ve reducida, antes de volver a iniciar el proceso de lavado en la torre. El motivo por el que se usa generalmente un intercambiador de calor de placas, en lugar de uno de superficie rascada o en espiral, se debe a que los intercambiadores de calor de placas soldadas ofrecen una mayor resistencia a las altas temperaturas y presiones.

De forma análoga a los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto, los scrubbers de ciclo cerrado, cuentan con un equipo de monitorización de los parámetros agua (water monitoring). Dicha monitorización, permite al usuario del sistema conocer determinados parámetros del agua como la temperatura, el nivel de acidez (pH), la turbidez y la alcalinidad, entre otros. Uno de estos puntos de monitorización es la propia línea que alimenta a la torre de lavado. Otro punto está situado a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales.

2.5.4.4. Análisis de la situación actual en relación al uso de los SLGE de ciclo cerrado.

Como se ha indicado en el subapartado anterior, la descarga de agua residual de lavado en los sistemas de ciclo cerrado es mucho menor que para el caso de SLGE de ciclo abierto. Recordemos que para el caso de los SLGE de ciclo abierto el volumen medio de descarga de agua de lavado para un buque cuya escala en Barcelona es de aproximadamente 10-12h, es de 7.700 metros cúbicos mientras que para un buque equipado con un SLGE de ciclo cerrado el volumen medio del agua de lavado descargada para esta escala sería de 16,5 metros cúbicos. Además, es necesario destacar que la totalidad de los sistemas de ciclo cerrado que han sido analizados hasta el momento, cuentan con una modalidad operativa “cero descargas” que les permite operar sin descargar el agua de lavado. Debemos considerar también que el agua descargada por el sistema de ciclo cerrado, ha sido previamente recirculada por la planta de tratamiento del sistema y está siendo monitorizada a su descarga de forma continua de modo que los parámetros regulados por la Resolución MEPC.340(77) [13] (pH, PAH’s, turbidez, nitratos y en este caso también aditivos (hidróxido de sodio por ejemplo)) están siendo controlados durante toda la descarga para que los límites establecidos por la citada Resolución [13] no sean superados en ningún momento.

A la vista de lo anterior y desde el punto de vista del posible impacto que puedan ocasionar las descargas del agua de lavado procedentes de un sistema de limpieza de los gases de escape sobre el nivel de acidez de las aguas del puerto de Barcelona, cabe suponer que la aportación que tienen los buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado en el aumento de la acidez de las aguas portuarias es la menor de todas.

A continuación, se muestra el esquema operativo de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado.

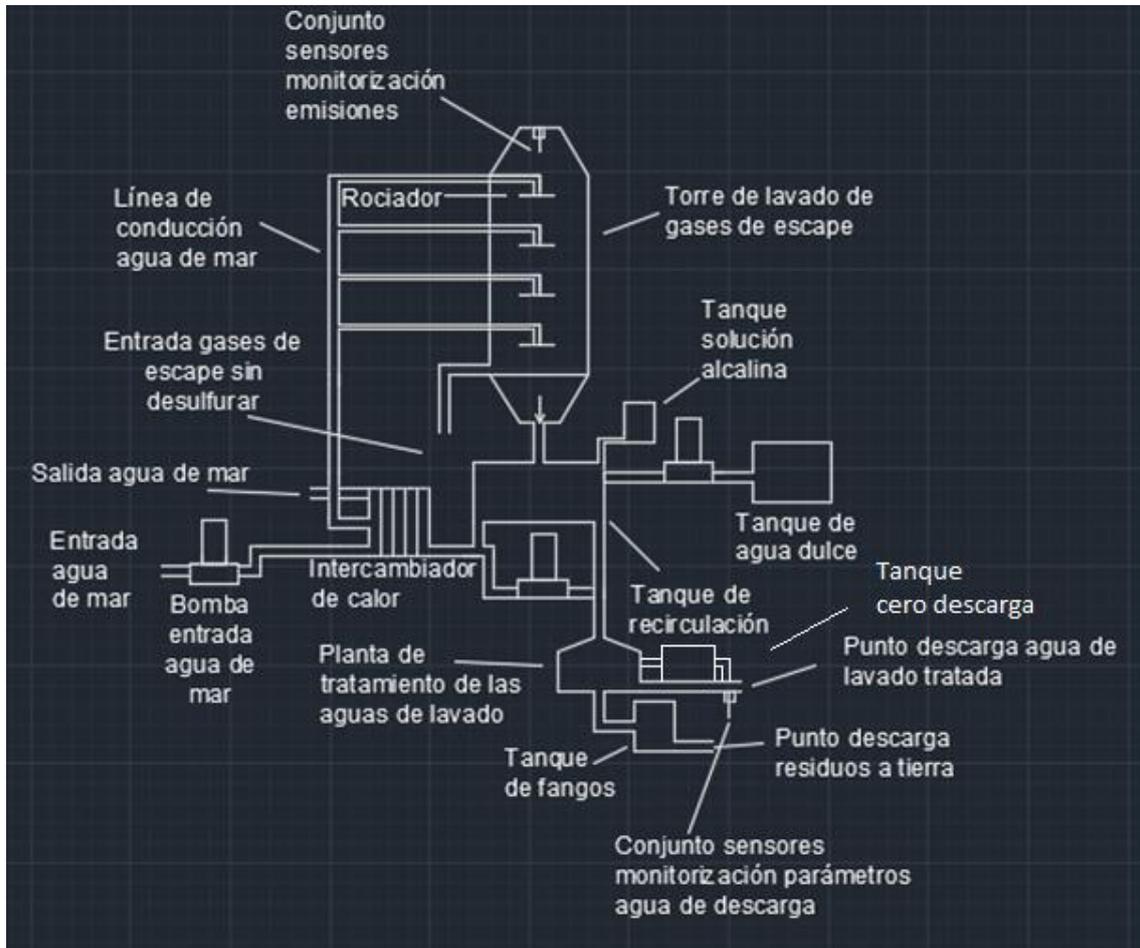


Figura 34. Vista del esquema operativo de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo cerrado. Fuente: el Autor.

2.5.5. Sistemas de limpieza de los gases de escape híbridos.

2.5.5.1. Introducción

Los sistemas de limpieza de los gases de escape híbridos, como indica su nombre, se caracterizan por poder operar tanto en ciclo abierto como en ciclo cerrado. Dependiendo del fabricante, existen sistemas híbridos que solo operan con agua de mar (la mayoría) en ambas modalidades (abierto y cerrado) y otros que emplean agua de mar en ciclo abierto y agua dulce en ciclo cerrado aunque la mayoría de estos últimos también contemplan la opción de emplear siempre que sea posible agua de mar para reducir el consumo de la solución alcalina (NaOH, Na₂CO₃, Ca(OH)₂ o el Mg(OH)₂).

Los SLGE híbridos presentan frente a sus homólogos, una mayor versatilidad en la operativa puesto que ofrece al operador del buque la posibilidad de convertir el sistema de limpieza de los gases de escape que tiene instalado en uno de ciclo abierto o en uno de ciclo cerrado dependiendo de las necesidades que tenga y en función del área de navegación, prohibiciones establecidas al respecto por el estado ribereño que se trate o incluso por averías del sistema y la disponibilidad de recambios.

2.5.5.2. Componentes de los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo híbrido

Un sistema de limpieza de los gases de escape híbrido está compuesto básicamente por los siguientes elementos:

- Tanque/s de recirculación.
- Tanque/s de agua dulce
- Tanque/s de solución alcalina.
- Líneas y sistema de inyección solución alcalina.
- Sistema de refrigeración (intercambiador de calor).
- Bomba/s de agua de mar para intercambiador de calor.
- Bomba/s de agua de mar para alimentación sistema ciclo abierto.
- Tanques de residuos (fangos).
- Tanque/s cero descargas.
- Conjunto de bombas de impulsión de agua (dulce)
- Líneas de conducción y sistema de válvulas (entrada, conducción, recuperación y purga).
- Boquillas de rociado/aspersión de agua.
- Torre de lavado y eliminador de rocío.
- Líneas de conducción y sistemas de impulsión de los gases de escape.
- Líneas de conducción agua de lavado residual.
- Planta de tratamiento del agua de lavado residual.
- Conjunto de sensores para la monitorización de los gases de escape.
- Conjunto de sensores para la monitorización de los parámetros del agua de lavado.
- Panel de control del sistema.

2.5.5.3. Operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape de tipo híbrido

Como se ha indicado anteriormente los SLGE de tipo híbrido tienen la opción de operar en las dos modalidades (ciclo abierto y cerrado). Es frecuente encontrar incluso buques que tienen instalado un sistema híbrido compuesto por varios “scrubbers” dependiendo del número de motores con los que cuente el buque y del número de estos que estén equipados con un SLGE y que se encuentre operando cada uno de estos de forma independiente en ciclo cerrado o ciclo abierto.

Para el caso de los SLGE de tipo híbrido que únicamente emplean agua de mar en ambos ciclos, el agua es captada por las bombas de aspiración instaladas a este efecto y conducida a la torre de lavado mediante las líneas de circulación y conjunto de válvulas del sistema.



Figura 35. Vista de las bombas de aspiración de agua de mar de un SLGE de tipo híbrido instalado a bordo de un buque tipo portacontenedores. Fuente: el Autor.



Figura 36. Vista de las válvulas y líneas de conducción primarias del agua de mar captada por las bombas de aspiración en un SLGE de tipo híbrido instalado a bordo de un buque portacontenedores. Fuente: el Autor.

El agua de mar es conducida hasta la torre de lavado (scrubbing tower) del sistema donde siguiendo la misma operativa que en el caso de los SLGE de ciclo puramente cerrado o abierto, el agua es rociada a través de los gases de escape que han sido conducidos a su vez hasta la torre de lavado para someterse al proceso de desulfuración y depuración de los gases de escape. Cabe recordar que, durante el proceso de rociado de agua de mar en la torre de lavado, la materia particulada que se haya podido generar por una mala combustión del combustible y que viaja con los gases de escape también es extraída de los gases de escape viéndose arrastrada en la torre de lavado con el resto del agua de lavado residual, hacia la planta de tratamiento.



Figura 37. Vista de las líneas de conducción del agua de mar y su conexión a la torre de lavado de un SLGE de tipo híbrido instalada a bordo de un buque portacontenedores. Fuente: el Autor.



Figura 38. Vista de la línea de conducción del agua de lavado residual hacia la planta de tratamiento, de un SLGE de tipo híbrido instalada a bordo de un buque portacontenedores. Fuente: el Autor

Si el sistema está operando en ciclo cerrado, en la planta de tratamiento, el agua de lavado residual es recirculada y enfriada a través de los intercambiadores de calor para evitar la evaporación de ésta y el sistema dosifica en el agua la cantidad de solución alcalina necesaria para que el agua recupere su capacidad de neutralizar ácidos y siendo de nuevo bombeada a la torre de lavado. Este proceso se va repitiendo de forma continuada y en el caso de que el sistema requiera llevar a cabo la purga de agua necesaria para evitar la precipitación de sales dentro del conjunto de líneas y bombas, el agua residual que va a ser descargada mediante el sistema de purga recibe un tratamiento previo a su descarga, controlando todos los parámetros regulados por la Resolución MEPC.340(77) “Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape” [13]. Una vez que el agua residual de lavado ha sido recirculada por el sistema de tratamiento del agua que va a ser purgada (sistema BOTU de sus siglas en inglés Bleed Off Treatment Unit), ya puede ser directamente descargada o bien y dependiendo del fabricante del SLGE puede ser almacenada en el tanque de cero descargas en caso de ser requerido.



Figura 39. Vista de la caixa de connexions de la planta de tractament d'aigua de lavado residual de un SLGE de tipus híbrid instal·lada a bord d'un buque tipus portacontainers. Fuente: el Autor.



Figura 40. Vista del intercanviador de calor amb detall de la línia d'entrada d'aigua de lavado residual calent (negre) i sortida (blau) d'un SLGE de tipus híbrid instal·lada a bord d'un buque tipus portacontainers. Fuente: el Autor



Figura 41. Vista de la planta de tratamiento de las aguas residuales de un SLGE de tipo híbrido instalado a bordo de un buque portacontenedores con detalle de la línea de conducción de las aguas residuales y su entrada a la planta de tratamiento. Fuente: el Autor.

En el caso de que el sistema se encuentre operando en ciclo abierto, éste irá captando el agua de mar en el régimen que se requiera de acuerdo con la carga de los motores y la irá utilizando en la torre de lavado y descargando directamente por el punto de descarga autorizado con la continua monitorización de los parámetros regulados por la Resolución [13], tal y como se ha descrito en el apartado relativo a los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto.

Para el caso de los SLGE de tipo híbrido que operen en ciclo cerrado con agua dulce y en ciclo abierto con agua de mar, la operativa es muy similar a la de los sistemas de ciclo puramente cerrado/abierto, pero dependiendo del fabricante se han observado diversas modalidades, concretamente en lo que a la gestión del agua dulce se refiere cuando el sistema opera en ciclo cerrado. Una de las diferencias que se ha podido verificar durante el análisis de los manuales correspondientes, está directamente relacionada con la descarga del agua de lavado en ciclo cerrado en la que en lugar de descargar únicamente el agua residual de purga que el sistema requiere descargar para evitar la precipitación de sales, se ha observado que existen otros fabricantes que en lugar de utilizar este método, descargan el agua de lavado residual completamente una vez ha sido utilizada y recirculada en varias ocasiones.

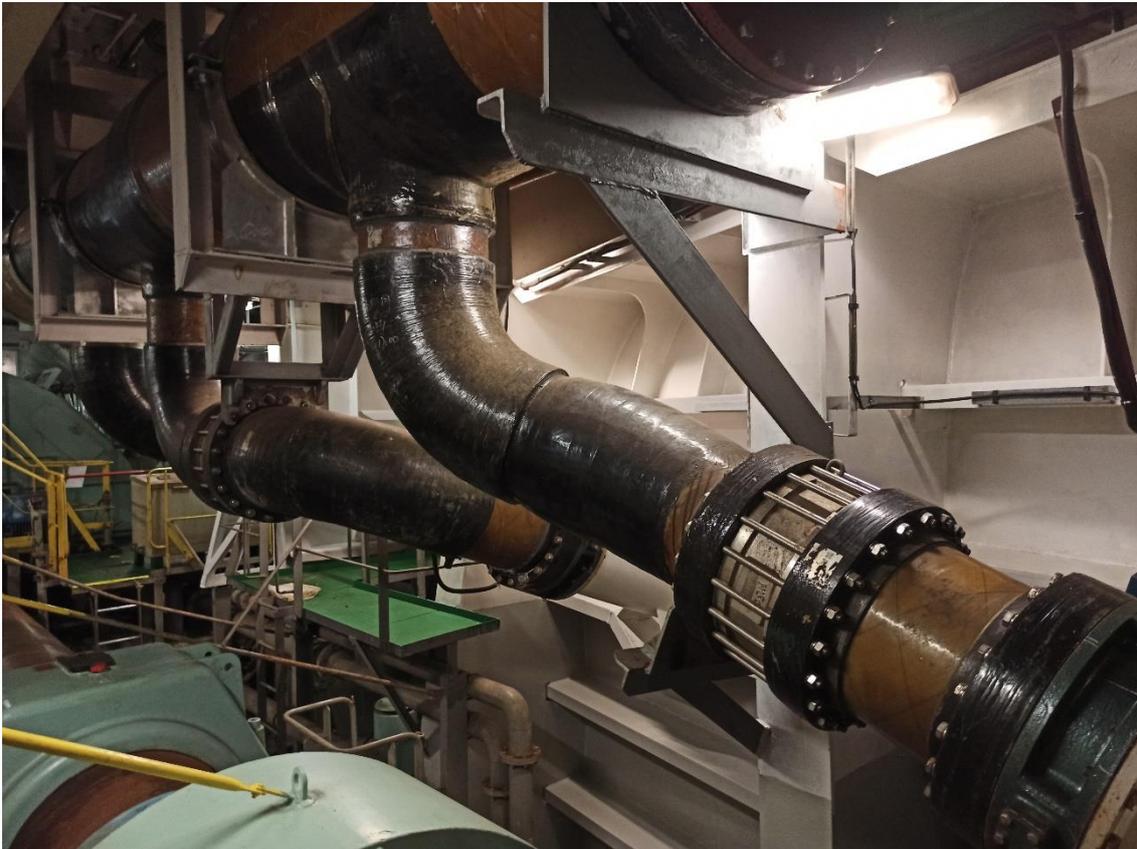


Figura 42. Vista de las líneas de descarga al exterior de aguas residuales de un SLGE de tipo híbrido instalado a bordo de un buque portacontenedores con detalle de la línea primaria de aguas residuales y su derivación a tres puntos de descarga (overboard valves). Fuente: el Autor.

Es importante destacar que el agua de lavado residual ha sido recirculada por la planta de tratamiento correspondiente para que se cumpla con los límites regulados por la Resolución [13] con relación a los parámetros del agua de descarga.

No obstante lo anterior, todos los sistemas de este tipo que se han analizado cuentan con los tanques adicionales de retención del agua de lavado residual “cero descargas” para poder retener a bordo la totalidad de las aguas en caso de ser requerido.

Como se ha indicado anteriormente, los SLGE de tipo híbrido que operan en ciclo cerrado e independientemente de si emplean el agua de mar o el agua dulce, utilizan la solución alcalina para mantener alta la capacidad de reducción de ácidos del agua de lavado. Con objeto de reducir el consumo de la solución alcalina que se trate, algunos sistemas aconsejan emplear tanto como sea posible el agua de mar, por la alcalinidad natural que presenta esta.

El agua de lavado procedente del proceso de desulfuración en ciclo abierto es generalmente recirculada por una planta de tratamiento centrífuga en la que las partículas de mayor tamaño son separadas del resto del agua residual de lavado y mezclada con agua de mar en estado natural. Las partículas de mayor tamaño son enviadas al tanque de fangos para ser posteriormente descargada en tierra y el agua residual restante es bombeada al exterior monitorizando de forma continua todos los parámetros regulados por la Resolución [13].



Figura 43. Vista de la línea de descarga de un SLGE de tipo híbrido instalado a bordo de un buque tipo portacontenedores con vista de los sensores para la monitorización de parámetros. Fuente: el Autor.

Para el caso de los SLGE de tipo híbrido que operan en ciclo cerrado, el agua de lavado residual va siendo reutilizada de forma continua y las purgas requeridas por el sistema son realizadas una vez el agua ha sido tratada en la planta de tratamiento para el agua de purga.

A continuación, se muestra el esquema gráfico de un sistema de limpieza de los gases de escape de tipo híbrido.

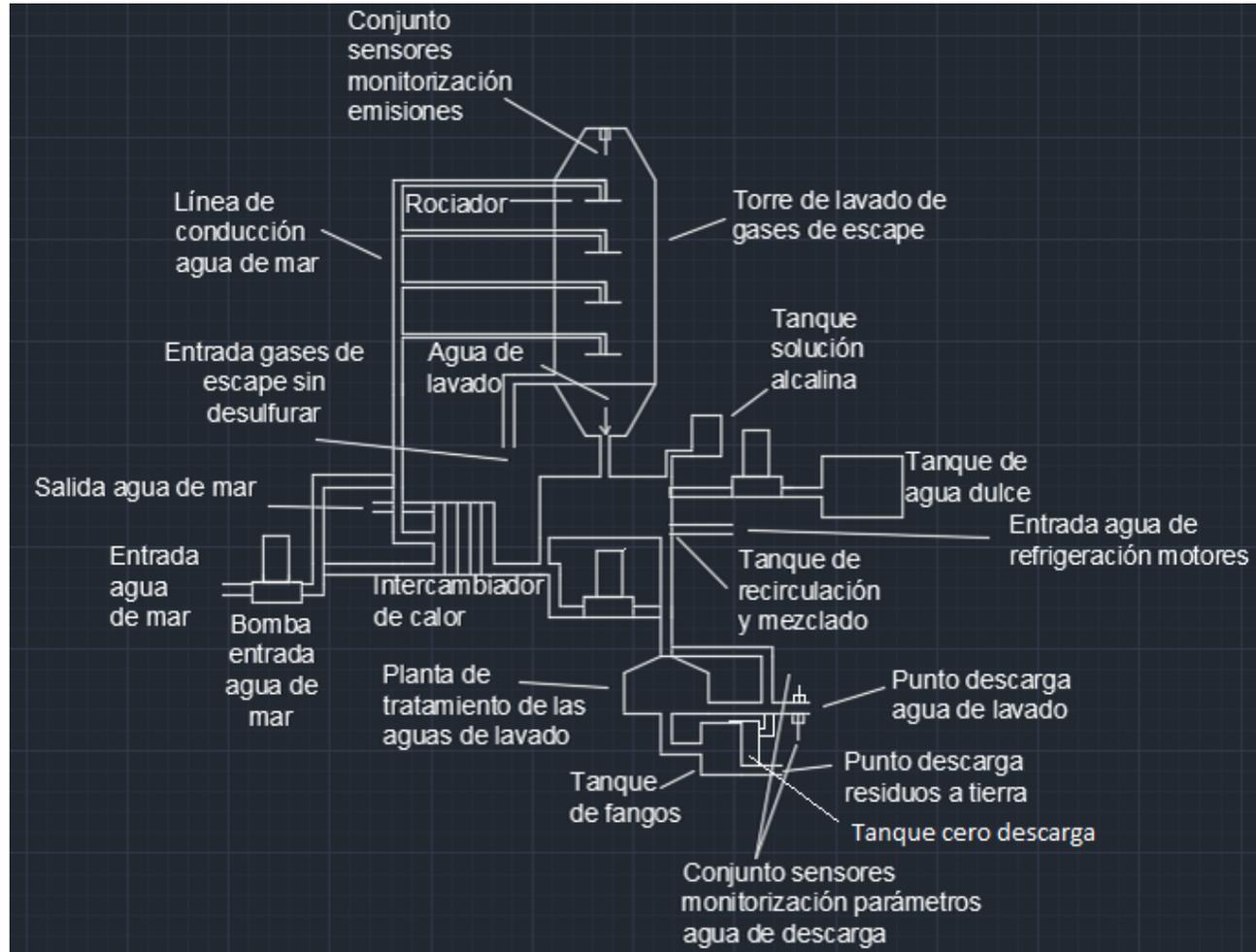


Figura 44. Vista del esquema operativo de un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo híbrido. Fuente: el Autor.

2.6. Análisis de la situación actual con relación al uso de los SLGE en el puerto de Barcelona

Durante la presente investigación se han obtenido los datos de los buques que realizan escala en el puerto de Barcelona y que están equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape a bordo. Analizados todos los datos se ha observado que aproximadamente tan solo el 1% de estos buques tiene instalado un SLGE de ciclo cerrado, el 30% es de ciclo abierto y el 69% de estos utilizan el SLGE de tipo híbrido. De estos datos se desprende que el 99% de los buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape tienen como mínimo la opción de descargar el agua residual de lavado generada durante el proceso de desulfuración durante sus escalas en el puerto de Barcelona. Como se ha indicado anteriormente y para el caso de buques equipados con sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto o híbrido, dependiendo del tipo de buque, de la potencia de los motores principales y de los motores auxiliares y de su escala en puerto (duración y actividad), los SLGE descargarán una cantidad de agua residual de lavado en puerto distinta.

Se han analizado los datos correspondientes a los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto instalados a bordo de varios tipos de buques que hacen escala en el puerto de Barcelona. Se ha considerado en este análisis la potencia de estos buques, el volumen de descarga del agua residual de lavado, duración media de sus escalas y características de estas. Tras el citado análisis se ha podido determinar que el tipo de buque que tiene una mayor aportación en cuanto al volumen de agua residual descargada del SLGE en el puerto de Barcelona son los cruceros, seguidos por los buques portacontenedores, los de carga rodada y finalmente y a mayor distancia en lo que a volumen de agua residual descargada durante sus escalas se refiere, los buques tipo ro-pax y finalmente los buques tanque.

A continuación, se muestra una tabla en la que se reflejan los datos obtenidos tras el estudio realizado sobre las escalas en Barcelona de diversos tipos de buques que están equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto. En este estudio se han considerado las principales características del buque y de su SLGE como el número de motores principales y motores auxiliares y sus correspondientes potencias, el régimen de descarga del agua residual de lavado, la duración de sus escalas y finalmente el cálculo del volumen de agua residual de lavado descargada por escala y por tipo de buque. De los datos obtenidos por tipo de buque se ha obtenido una media que es la que se refleja en la tabla para cada uno de los parámetros analizados.

Para el cálculo del volumen de agua residual de lavado descargada durante la estancia del buque en su atraque se ha considerado un régimen de descarga medio acorde a lo establecido en los Manuales Técnicos consultados. Asimismo, para el cálculo del volumen de agua residual de lavado descargada durante las maniobras de atraque y desatraque y considerando que la carga de los motores principales y auxiliares durante la maniobra es alto, acorde a los registros consultados de monitorización de datos obtenidos de varios buques, se ha tomado como referencia el régimen máximo de descarga facilitado por el fabricante del SLGE de ciclo abierto.

Tipo de buque	Número de motores principales / Potencia (kW)	Número de motores auxiliares / Potencia	Régimen (m ³ /h) de descarga agua residual de lavado (media)	Emplea el SLGE durante su escala	Duración (h) escala (media)	Volumen (m ³ /h) de agua residual de lavado descargada (escala)	Volumen (m ³ /h) de agua residual de lavado descargada (maniobras atraque / salida)
Crucero	2 x 14.000	3 x 9.000	1.500	SI	40	38.000	2.250
Portacontenedores	1 x 50.000	4 x 3.500	2.100	SI	18	28.800	3.150
Tanque	1 x 12.000	3 x 930	450	NO ⁸	50	15.000 ⁸	1.080
Ferry (ro-pax)	2 x 10.500	3 x 1.200	600	NO ⁹	5	1.750 ⁹	900
Carga rodada	1 x 12.000	3 x 1.050	750	SI	26	11.700	1.500

Tabla 4. Vista de la media de volúmenes descargados de agua de lavado por tipo de buque en el puerto de Barcelona. Fuente: el Autor.

⁸ Actualmente existen escalas en el puerto de Barcelona de buques tanque que están equipados con un SLGE de ciclo abierto exclusivamente para el motor/es principal/es, por lo que el sistema no es empleado durante su estancia en puerto y solamente es utilizado durante las maniobras de atraque/salida.

⁹ Actualmente existen escalas en el puerto de Barcelona de buques tipo ro-pax que están equipados con un SLGE de ciclo abierto exclusivamente para el motor/es principal/es, por lo que el sistema no es empleado durante su estancia en puerto y solamente es utilizado durante las maniobras de atraque/salida.

De acuerdo con un informe de la Autoridad Portuaria de Barcelona [33], con respecto al uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape en el puerto de Barcelona, se calcula que las descargas procedentes de los buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto que hacen escala en el puerto de Barcelona son de aproximadamente 11.795.000 metros cúbicos al año. Si tomamos en consideración el dato anterior y el volumen creciente de escalas en el puerto de Barcelona de buques equipados con un SLGE de ciclo abierto, así como los datos analizados relativos al nivel de acidez (pH) que pueden alcanzar las aguas residuales de lavado de los SLGE de ciclo abierto, cabe plantear la necesidad de adoptar medidas para o bien reducir el volumen de las aguas residuales de los EGCS de ciclo abierto o bien reduciendo el nivel de acidez de las aguas descargadas.

Actualmente el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto o que puedan operar (híbridos) en ciclo abierto, se ha limitado o restringido en varias regiones marítimas del mundo. Según la base de datos que mantiene actualizada el club de protección e indemnización (P&I) North [34], los siguientes países han establecido alguna clase de prohibición en el uso de los SLGE de ciclo abierto en sus aguas territoriales, puertos o Bahías: Alemania, Arabia Saudí, Baréin, Bélgica, Belice, Bermuda, Brasil, Canadá, China, Costa de Marfil, Croacia, Egipto, Emiratos Árabes Unidos (Abu Dhabi, Dubái, Fujairah), Escocia, Eslovenia, España, Estados Unidos (California, Connecticut, Hawái, Washington), Finlandia, Francia, Gales, Gana, Gibraltar, Inglaterra, Irlanda, Kenia, Malasia, Islas Mauricio, Mozambique, Noruega, Omán, Pakistán, Panamá, Portugal, Qatar, Rumanía, Singapur, Suecia y Turquía.

Para el caso particular de España, actualmente está prohibido el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto en los puertos de Algeciras, Valencia, Cartagena y Huelva. Asimismo, está previsto que a mediados de 2023 entre en vigor una nueva ordenanza portuaria que prohíba el uso de los SLGE de ciclo abierto en el puerto de Barcelona.

La lista de países, regiones marítimas y puertos que están prohibiendo o estableciendo fuertes restricciones en el uso de los SLGE de ciclo abierto no deja de aumentar. Y esto se debe claramente a una interpretación “unilateral” de que la operativa de los sistemas de ciclo abierto o híbridos que operen en modo abierto pueden llegar a causar efectos perjudiciales en el medio ambiente marino. La presente investigación se ha centrado en determinar la afectación que puede llegar a tener sobre el nivel de acidez de las aguas del puerto de Barcelona. No obstante, existen otros parámetros del agua de mar que pueden verse también afectados por la descarga del agua de lavado procedente de los SLGE. Actualmente existen varios estudios/artículos que proporcionan datos relativos al impacto que tiene la descarga de las aguas de lavado sobre la concentración de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's), nitratos y metales pesados entre otros. Un ejemplo de esto último es el estudio [35] realizado por el propio Comité de Protección del Medio Marino de la OMI (MEPC) en colaboración con la entidad EGCSA (Exhaust Gas Cleaning Systems Association) y con Euroshore, asociación relacionada con el ámbito de instalaciones de recepción de residuos en los puertos. Dicho estudio fue realizado tras efectuar una campaña de muestreo (238 muestras en total) de las aguas de lavado procedentes de los SLGE de ciclo abierto e híbridos instalados a bordo de 20 buques que navegan en el área del mar Báltico y mar del Norte, así como de 2 buques que navegan en el área del mar Mediterráneo.

El informe citado [35] supra tiende a tener unas conclusiones benévolas en cuanto al impacto de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto sobre determinados parámetros del agua de mar. Muchas de sus conclusiones se basan en que los resultados obtenidos muestran

que ciertos parámetros (concentración de metales pesados, PAH's) se encuentran por debajo de los valores máximos admitidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el caso del agua potable. Sin embargo, se puede observar que la concentración de ciertos parámetros como por ejemplo el Vanadio (metal pesado) en el agua residual de lavado de los SLGE, es hasta 50 veces superior que en el agua de mar.

Asimismo, se puede observar también que la concentración de Naftaleno, uno de los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH's) analizados, es hasta 340 veces superior en el agua residual de lavado del SLGE que la que se encuentra en el mar.

Analysis results		
Ship	A	
Sample description	Seawater	Port Scrubber Overboard
Metals Total	mg/L	mg/L
Arsenic (As)	< 0.01	< 0.01
Cadmium (Cd)	< 0.002	< 0.002
Chromium (Cr)	< 0.01	0.03
Copper (Cu)	< 0.01	0.08
Lead (Pb)	< 0.01	0.09
Mercury (Hg)	< 0.0002	< 0.0002
Nickel (Ni)	< 0.01	0.13
Vanadium (V)	< 0.01	0.50
Zinc (Zn)	0.02	0.07
PAH	µg/L	µg/L
Naphthalene	< 0.01	3.40
Acenaphthylene	< 0.01	0.05
Acenaphthene	< 0.01	0.12
Fluorene	< 0.01	0.35
Phenanthrene	< 0.01	0.62
Anthracene	< 0.01	< 0.01
Fluoranthene	< 0.01	0.03
Pyrene	< 0.01	0.04
Benz(a)anthracene	< 0.01	0.02
Chrysene	< 0.01	0.04
Benzo(b)fluoranthene	< 0.01	< 0.01
Benzo(k)fluoranthene	< 0.01	< 0.01
Benzo(a)pyrene	< 0.01	< 0.01
Dibenzo(a,h)anthracene	< 0.01	< 0.01
Benzo(g,h,i)perylene	< 0.01	< 0.01
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	< 0.01	< 0.01

Figura 45. Vista comparativa de los resultados obtenidos para el buque "A" y para el agua de mar con respecto a la concentración de metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's). Fuente: IMO

Todo lo anterior puede ser considerado por un país o región marítima como un motivo fundado para sospechar que la aportación de las aguas residuales de lavado de los SLGE puede llegar a tener un impacto negativo en la calidad de las aguas de un puerto o de una zona marítima en particular. Por ello, varios países han intentado tomar medidas preventivas restringiendo o prohibiendo el uso de estos sistemas en sus aguas. Sin embargo, estas prohibiciones nacionales y en ocasiones locales, esta falta de legislación a nivel internacional sobre el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto está provocando serias dificultades para las tripulaciones de los buques, especialmente para Capitán y Jefe de Máquinas. Esto se debe principalmente a que no existe una norma homogénea en todos los países y tienen que estar continuamente adaptándose a la legislación nacional y/o local del puerto que escalen, solicitando si pueden hacer uso de los sistemas de ciclo abierto. Un ejemplo de esto es el puerto de Barcelona, en el que actualmente y a falta de que se publique la ordenanza que regule o prohíba el uso de los

SLGE de ciclo abierto, la Administración Marítima realiza el control documental correspondiente de los sistemas y la Autoridad Portuaria recomienda no emplear el sistema de ciclo abierto.

Por lo tanto, sería muy recomendable que la Organización Marítima Internacional (IMO), adoptara a través del Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) una nueva Resolución en la que se homogeneizara la restricción y/o prohibición de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto, estableciendo las medidas oportunas y facilitando una base de datos actualizada con el listado de países, regiones marítimas y puertos en los que está prohibido el uso de estos sistemas. Este listado podría publicarse de forma periódica mediante la Resolución correspondiente de modo que pudiera ser consultada por todo el personal interesado como las compañías navieras, buques, fabricantes de SLGE, etc.

Además de lo anterior es necesario considerar que es de gran importancia que los sistemas de limpieza de los gases de escape y específicamente todo el conjunto de sensores, tanto los del agua de lavado como los correspondientes al control de las emisiones de los gases de escape se encuentren debidamente mantenidos y calibrados. De ello depende que la monitorización de datos y su control se ajuste a la realidad de modo que se puedan cumplir con efectividad todos los límites establecidos por Resolución MEPC 340(77) “Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape” [13].



Figura 46. Vista del proceso de calibración de un sensor de pH (acidez) de un SLGE de tipo híbrido instalado a bordo de un buque portacontenedores. Fuente: el Autor.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

El principal objetivo de este capítulo es exponer el planteamiento general que se le ha dado a la presente investigación. Tal como se ha definido en el apartado 1.2.2 del Capítulo I de esta tesis, el objetivo prioritario es conocer el impacto que pueden llegar a tener las descargas de agua residual de lavado procedentes del sistema de limpieza de los gases de escape que operen en ciclo abierto sobre el nivel de acidez (pH) de las aguas del puerto de Barcelona. Con esta finalidad se ha seleccionado un área del puerto de Barcelona como base para llevar a cabo el muestreo del agua del puerto y su posterior análisis y determinación de acidez mediante ensayo en laboratorio independiente.

3.1. Introducción

Como se ha indicado supra, el objetivo de esta investigación es determinar en qué medida pueden afectar las descargas de agua residual de lavado procedente de los sistemas de limpieza de los gases de escape que operen en ciclo abierto, sobre el nivel de acidez (pH) de las aguas del puerto de Barcelona. Para ello primeramente se seleccionó un área del puerto de Barcelona la cual ha sido el escenario principal de la presente investigación en lo que a toma de muestras y análisis de la evolución del nivel de acidez (pH) del agua se refiere.

Para seleccionar el área del puerto se tomaron en consideración diversos parámetros, entre los que se destacan la ubicación, volumen de escalas de buques que operan en esta área con un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto instalado y finalmente y muy relacionado con la ubicación, la exposición de la zona a mar abierto y renovación de la masa de agua. Tras este primer estudio se determinó que el área donde la presente investigación podía resultar más significativa fue la dársena sur del puerto de Barcelona. En el siguiente apartado se analizan las principales características de esta área del puerto de Barcelona, con especial hincapié en los parámetros que han servido de base para su selección como área de ensayo y análisis.

Además de lo anterior, se tuvo que efectuar un estudio de los laboratorios en Barcelona disponibles para efectuar los análisis de pH de las muestras que se han tomado en la Dársena Sur del puerto y de su capacidad para realizar el análisis en un espacio de tiempo reducido tras la toma de muestras (30-60 minutos). Tras una primera observación de estos laboratorios, se determinó que el laboratorio más adecuado para llevar a cabo estos análisis iba a ser el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). En fecha 24 de noviembre de 2020 se alcanzó un acuerdo (anexo I) con el citado laboratorio para realizar el análisis de 3 muestras al mes durante 24 meses aportando para cada una de las muestras el informe elaborado por el analista correspondiente. En el citado acuerdo el laboratorio IDEA aportó el presupuesto basado en el análisis de pH de 3 muestras al mes durante 24 meses (72 muestras) a razón de 20€ por muestra de pH analizada (1.440 €). El coste total (1.440 €) de los análisis realizados ha sido totalmente cubierto gracias a la colaboración del *Departament de Ciències i Enginyeria Nàutiques (CEN) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)*.

El análisis del nivel de acidez del agua de la Dársena Sur del puerto de Barcelona comenzó con la primera muestra que fue tomada en fecha 05 de enero de 2021. Para realizar el análisis de pH, el laboratorio ha empleado un medidor electrónico de pH de alta precisión de la firma Orion Star

especializada en la fabricación de equipos de medición para laboratorios. El equipo utilizado en particular ha sido el “Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode”.



Figura 47. Vista del equipo empleado por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) para analizar la acidez (pH) de las muestras entregadas con vista de una de las muestras que ha sido analizada durante la investigación. Fuente: el Autor.

Para la toma de muestras se adquirió el material de laboratorio necesario compuesto principalmente por frascos de cristal de 250 ml DIN28, frascos de cristal de 1.000 ml DIN28, bidones apilables de 5 L, tapones DIN 28 con precinto para frascos, embudos, bolsas y precintos numerados. Además del material anteriormente citado, el doctorando tuvo que diseñar un sistema que permitiera la toma de muestras del agua de la Dársena Sur de la forma más representativa posible, obteniendo una muestra corrida de toda la columna de agua de los puntos seleccionados para tomar la muestra de agua de la Dársena Sur.

El equipo está compuesto principalmente por un soporte para frasco de 1.000 ml, varios puntos de sujeción, una cadena para su izado y conjunto de contrapesos fabricados en acero inoxidable. Con este dispositivo se consigue obtener una muestra corrida de la columna de agua de la dársena sur en un frasco de 1.000 ml, dejándola caer desde la superficie por gravedad hasta el fondo y recuperándolo posteriormente con la muestra de agua en su interior.



*Figura 48. Vista del aparejo diseñado para la toma de muestras de la Dársena Sur del puerto de Barcelona.
Fuente: el Autor.*



*Figura 49. Vista del aparejo diseñado para la toma de muestras de la Dársena Sur del puerto de Barcelona.
Fuente: el Autor*

El equipo para tomar muestras es sumergido hasta el fondo en cada uno de los puntos que se han seleccionado para la obtención de la muestra representativa dentro de la dársena sur del puerto de Barcelona. De este modo, se consigue obtener una muestra corrida de toda la columna de agua para cada uno de los citados puntos y que son definidos en el siguiente apartado.

A medida que el aparejo se va sumergiendo en el agua de la dársena por efecto de la gravedad, va recogiendo muestras de toda la columna de agua. A continuación, se muestra la vista esquemática del proceso de toma de muestra de agua de la Dársena Sur.

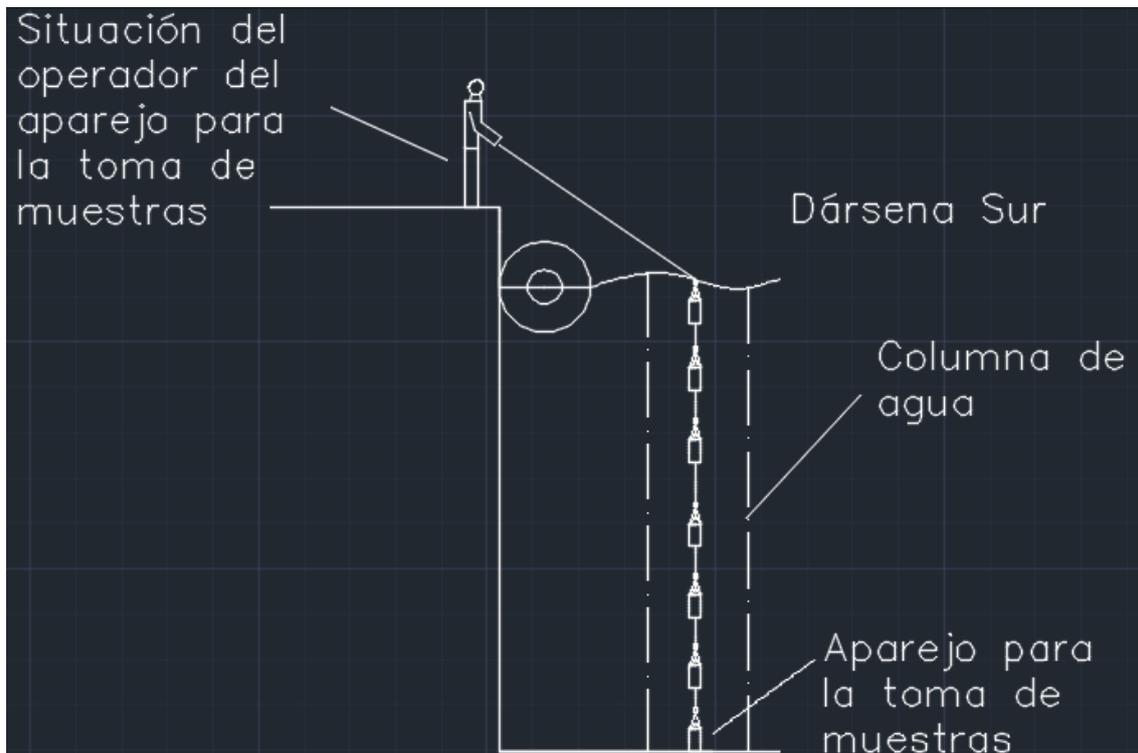


Figura 50. Vista esquemática del procedimiento seguido para la toma de muestras. Fuente: el Autor.

3.2. Características de la dársena sur del puerto de Barcelona

La dársena sur del puerto de Barcelona se encuentra situada en una de las zonas más abrigadas del puerto y en la que actualmente existen dos terminales de carga rodada, Autoterminal y SETRAM. Ambas terminales disponen de una línea de atraque incluyendo los muelles contiguos a la dársena sur (dársena interior y Príncipe de España) de 1.005 metros. Autoterminal dispone de una superficie total de explanada de 29.2 Ha y de una zona de almacenamiento vertical de vehículos de 12.7 Ha. Asimismo, SETRAM dispone de una superficie total de 5 Ha y actualmente se encuentra finalizando un proyecto de ampliación de la superficie operativa.

La dársena sur del puerto de Barcelona la conforman el conjunto de muelles 30A, 30B y 30C. El muelle 30A tiene una longitud total de 331 m, el muelle 30B de 205 m y el 30C de 280 m.

Considerando las dimensiones de la dársena sur y con objeto de obtener las muestras de agua de la forma más representativa posible, se establecieron 3 puntos de muestreo dentro de la dársena divididos uniformemente en los tres muelles (30A, 30B y 30C). Desde estos tres puntos se han extraído las muestras para análisis de pH, quedando todas las muestras debidamente registradas con el número de precinto y acompañadas con el acta de toma de muestras correspondiente.

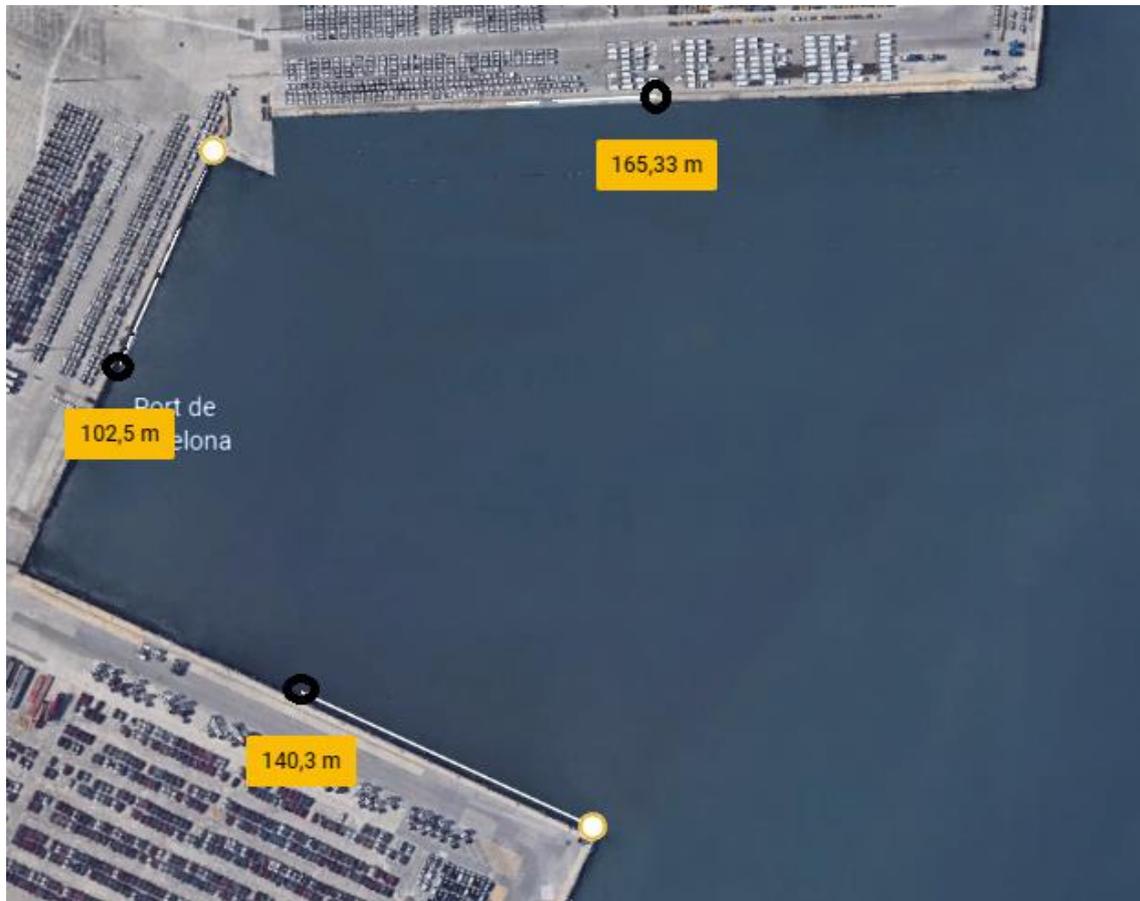


Figura 51. Vista de la dársena sur del puerto de Barcelona a través de la aplicación Google Earth con detalle de los puntos indicados para la toma de muestras en la dársena sur del puerto de Barcelona. Fuente: el Autor.

La dársena sur tiene un calado medio de 12m y a este efecto se dispuso en el aparejo de suficiente línea para poder alcanzar el fondo obteniendo de esta forma la muestra corrida que se cita supra.

Considerando las dimensiones de la dársena sur del puerto de Barcelona podemos obtener el volumen de agua aproximado que hay en su interior, como se muestra a continuación.

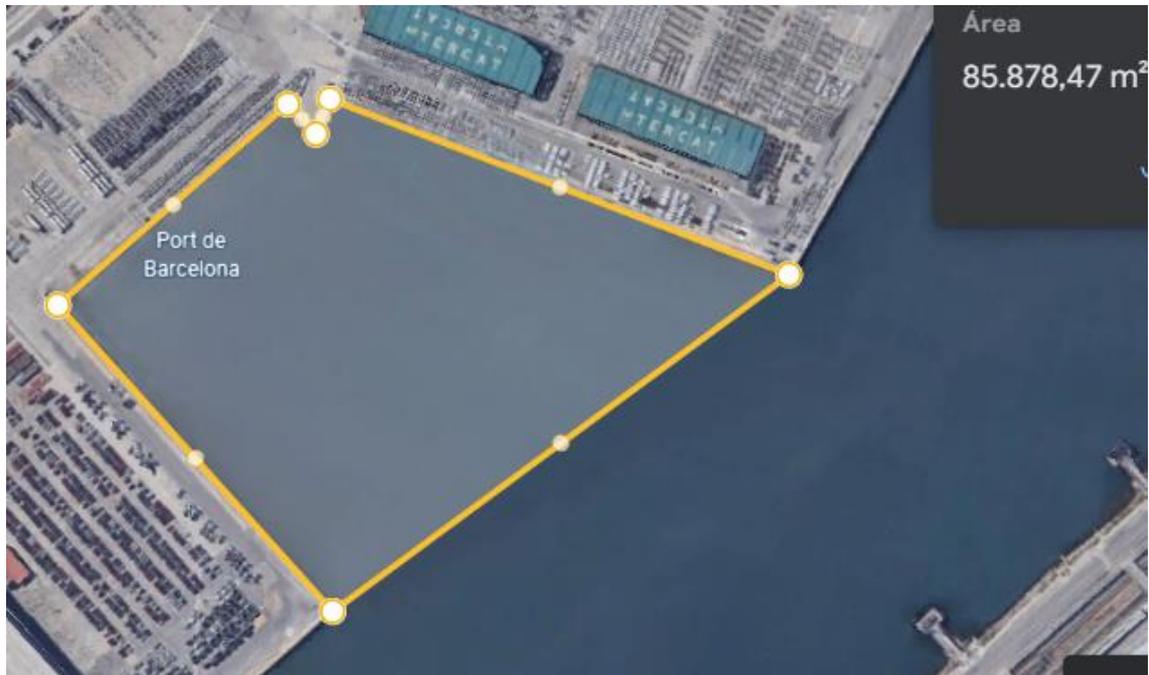


Figura 52. Vista de la obtenció de l'àrea total de la dàrsena sud del port de Barcelona a través de la aplicació Google Earth. Fuente: el Autor.

Si el valor de l'àrea total de la dàrsena sud lo multiplicamos per el valor del calado mitjà de la dàrsena (12m), obtindrem el volum aproximat de aigua de la dàrsena sud del port de Barcelona.

$$V(\text{dàrsena sud}) = 85.878,47\text{m}^2 * 12\text{m} \rightarrow V(\text{dàrsena sud}) = \mathbf{1.030.541,64\text{ m}^3}$$

El dade anterior es certament important perquè permet situar el volum de descargas de l'aigua de lavat de de los buques que emplean los sistemas de limpiea de los gases de escape de ciclo abierto a escala real comparativamente con el volum de aigua existente en la dàrsena sud.

En la dàrsena sud del port de Barcelona hacen escala principalmente buques de carga rodada. Como se ha indicado previamente, el volum mitjà de descarga de l'aigua residual de lavat de un sistema de limpiea de los gases de escape de ciclo abierto instalat a bordo de uno de estos buques es de 600-800 metros cúbicos por hora, dependiendo de la carga de trabajo de los motores principales y auxiliares. Durante las maniobras de atraque y salida, se asume un régimen de descarga de aproximadamente 750 m³, con una duración mitjà de las maniobras, de mitjà hora para el atraque y de 1 hora y mitjà para la salida. Si consideramos que la escala de un buque de este tipo en puerto tiene una duración de 11 horas, en este caso con un régimen de descarga aproximat de 600 m³, obtendrem que un buque tipo cochero descargaría de mitjà 8.100 metros cúbicos de aigua residual de lavat durante toda su escala en la dàrsena sud del port de Barcelona. El volum anterior solo supondría el 0.00786% del volum total de aigua de la dàrsena sud. Si este valor lo observamos desde un punto de vista anual, teniendo en cuenta que actualmente en la dàrsena sud hace escala semanalmente de mitjà 8-10 buques, el valor sería del 3.7728 %¹⁰.

¹⁰ Este volum es únicamente orientativo puesto que se debe considerar la baja renovación de las aguas de la dàrsena sud del port de Barcelona.

No obstante lo anterior, la dársena sur del puerto de Barcelona está situada en un área del puerto confinada en la que la renovación de sus aguas está ciertamente limitada en comparación con otras áreas del puerto como el muelle adosado en el que la exposición a corrientes y el intercambio de agua es mayor.

Según el informe de la Autoridad Portuaria de Barcelona citado anteriormente [33], la tasa de renovación de las aguas en la dársena sur es superior a 6 días por lo que el tiempo de residencia de las aguas residuales descargadas por los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto es alto en comparación con otras áreas del puerto en los que la tasa de renovación de sus aguas es de aproximadamente 1 día.

3.3. Procedimiento para la toma de muestras

Como se ha comentado en la introducción del presente Capítulo, durante el desarrollo de esta investigación se han tomado muestras de agua de la dársena sur del puerto de Barcelona para analizar el nivel de acidez de estas, a razón de 3 muestras mensuales. Las muestras han sido tomadas con el aparejo mencionado supra el cual ha sido ideado específicamente para esta investigación por el doctorando.

Los tres puntos de muestreo han sido identificados en el apartado anterior y corresponden a los muelles 30A, 30B y 30C. En cada uno de estos tres puntos y para cada fecha en la que se ha tomado una muestra siguiendo el mecanismo definido en el apartado 3.1 de este Capítulo, se ha obtenido un frasco de 1.000 ml de agua. Cada uno de los frascos de agua se ha vertido posteriormente en un recipiente plástico de 5.000 ml para ser mezclado de forma homogénea y preparar así la muestra representativa de agua de la dársena sur del puerto de Barcelona.

A continuación, se muestran un conjunto de imágenes que describe el procedimiento seguido para la toma de muestras de agua.



Figura 53. Vista del punto de muestreo en el muelle 30A de la dársena sur del puerto de Barcelona. Fuente: el Autor.

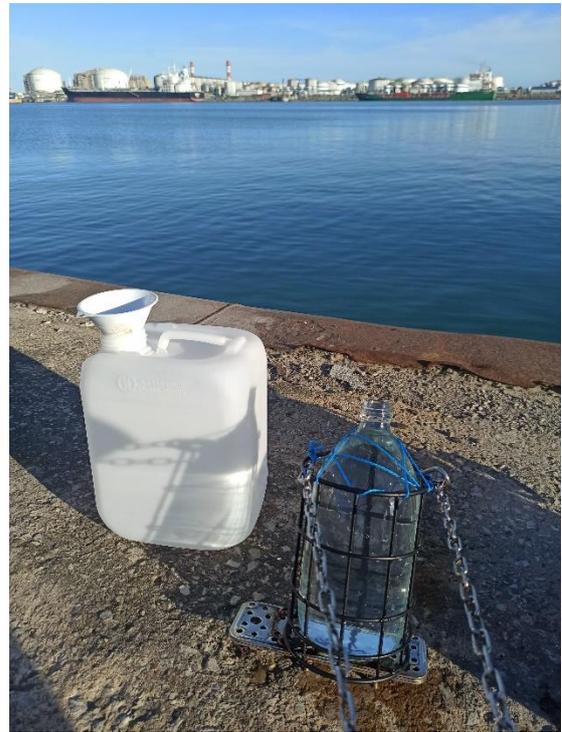


Figura 54. Vista del punto de muestreo en el muelle 30B de la dársena sur. Fuente: el Autor.



Figura 55. Vista del punto de muestreo en el muelle 30C de la dársena sur del puerto de Barcelona. Fuente: el Autor.



Figura 56. Vista del vertido de la muestra obtenida en el recipiente para muestra homogénea. Fuente: el Autor.

Una vez obtenidas las tres muestras de cada uno de los puntos señalados se ha procedido a mezclarlas en el interior del recipiente y de esta mezcla se ha obtenido la muestra representativa que en cada ocasión se ha presentado en 2 frascos de cristal de 250 ml. Cada uno de los frascos ha sido etiquetado y precintado debidamente con precintos que fueron adquiridos específicamente para el desarrollo de la presente investigación. Además, en cada muestreo realizado se procedió a levantar la correspondiente acta de toma de muestras con detalle de la fecha de muestreo, lugar, número de precinto y persona que ha obtenido la muestra (el Autor).



Figura 57. Vista de la preparación de las muestras obtenidas de la dársena sur del puerto de Barcelona. Fuente: el Autor.



Figura 58. Vista de las muestras obtenida precintadas. Fuente: el Autor.

Una de las muestras precintadas se ha entregado en cada caso y de forma inmediata al Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) para analizar su acidez a la mayor brevedad posible, entregándola en mano al analista correspondiente junto con el acta de toma de muestras levantada en cada caso. La segunda muestra precintada y para cada una de las tomas realizadas se ha almacenado en el archivo de la presente investigación en orden correlativo junto con la correspondiente acta de toma de muestra. Una vez finalizada la última toma de muestras y analizada su acidez, el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) ha entregado un sumario (anexo II) con el número total de muestras analizadas y resultados (pH) obtenidos.

En el anexo III de la presente tesis se incluye el formato de acta de toma de muestras elaborado por el Autor y el conjunto de actas levantadas para cada una de las muestras obtenidas.

Además de las muestras analizadas por el laboratorio del IDAEA, el Autor de la presente tesis tomó la decisión de adquirir un equipo digital de medición de acidez para contrastar los resultados

obtenidos por el laboratorio y asimismo, aumentar el número de muestras analizadas durante la investigación. Todas las muestras analizadas con el equipo citado supra fueron obtenidas siguiendo el mismo procedimiento descrito en este apartado y la determinación de la acidez de la muestra fue de forma inmediata tras su toma.

El equipo en concreto es un medidor digital de pH (acidez) y de potencial redox (ORP) del fabricante “*Precise Instruments*“. Está compuesto por dos electrodos, uno para medir el nivel de pH y el otros para medir el potencial redox (ORP). El rango de medición del equipo para el nivel de acidez (pH) es de 0,00 hasta 14,00 unidades de pH. Para el caso del potencial redox el rango de medición es desde -1.999 hasta 1.999 mV. La precisión que ofrece el fabricante para las mediciones de pH es $\pm 0.1 + 0.02$ pH y de ± 5 mV para las mediciones de potencial redox.

Asimismo, se estimó oportuno complementar los análisis de pH con análisis de salinidad y densidad del agua de la dársena sur del puerto de Barcelona. Para ello se obtuvo adicionalmente un refractómetro de salinidad y densidad del fabricante “*HHTEC*”

A continuación, se muestran varias imágenes que reflejan el material empleado durante la presente investigación para analizar, de forma adicional a las muestras analizadas por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), las muestras de agua de la dársena sur del puerto de Barcelona.



Figura 59. Vista del equipo adquirido durante la investigación para análisis de acidez (pH), salinidad y densidad. Fuente: el Autor.



Figura 60. Vista de la obtención del nivel de acidez (pH) y potencial redox (ORP) con el equipo de medición particular. Fuente: el Autor.



Figura 61. Vista del análisis de la salinidad y densidad con el refractómetro. Fuente: el Autor.



Figura 62. Vista del refractómetro empleado. Fuente: el Autor.



Figura 63. Vista de una lectura a través del refractómetro. Fuente: el Autor.

3.4. Resultados obtenidos

Como se ha tratado en varias ocasiones durante la presente tesis, esta investigación se basa en determinar el impacto que pueden llegar a tener las descargas de las aguas de lavado de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto en el nivel de acidez de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona. Tal y como se ha indica en el apartado 3.1 del presente Capítulo, se alcanzó un acuerdo con el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) para llevar a cabo el análisis del nivel de acidez de las 72 muestras presupuestas. Asimismo, se han realizado los análisis del nivel de acidez, densidad y salinidad adicionales con el equipo adquirido durante el desarrollo de la investigación.

A continuación, se muestra la relación completa de muestras tomadas y analizadas, así como los resultados obtenidos por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) junto con los resultados obtenidos por el equipo medidor citado supra. Considerando que este equipo fue obtenido en marzo de 2021 y que la primera muestra analizada fue el 01 de marzo de 2021; teniendo en cuenta que el primer análisis de pH realizado por el IDAEA del CSIC se llevó a cabo el 05 de enero de 2021; se ha estimado oportuno que, vista la diferencia porcentual entre las mediciones realizadas por el CSIC y las mediciones realizadas por el Autor, se incluya una medición adicional correspondiente a la del 05 de enero de 2021 en la relación de muestras analizadas con el equipo, obteniendo dicho valor de aplicarle el coeficiente de corrección obtenido basado en la diferencia porcentual media de periodo de muestras analizadas durante el año 2021, al resultado obtenido por el IDAEA para la muestra del 05 de enero de 2021.

FECHA	UBICACIÓN	Valor pH (CSIC)	Valor pH (Medidor)	Diferencial (%)
05/01/2021	Dársena Sur	8,39	8,41	0,238
01/03/2021	Dársena Sur	7,95	7,98	0,377
03/03/2021	Dársena Sur	N/A	7,98	N/A
05/03/2021	Dársena Sur	N/A	7,94	N/A
08/03/2021	Dársena Sur	7,96	7,99	0,377
11/03/2021	Dársena Sur	8,04	8,08	0,498
16/03/2021	Dársena Sur	8,10	8,12	0,247
18/03/2021	Dársena Sur	N/A	8,12	N/A
23/03/2021	Dársena Sur	8,13	8,16	0,369
25/03/2021	Dársena Sur	8,10	8,12	0,247
29/03/2021	Dársena Sur	N/A	8,02	N/A
31/03/2021	Dársena Sur	N/A	8,14	N/A
06/04/2021	Dársena Sur	N/A	8,08	N/A
15/04/2021	Dársena Sur	8,09	8,09	0,000
20/04/2021	Dársena Sur	N/A	8,13	N/A
29/04/2021	Dársena Sur	8,03	8,05	0,249
06/05/2021	Dársena Sur	8,03	8,06	0,374
10/05/2021	Dársena Sur	N/A	8,01	N/A
13/05/2021	Dársena Sur	8,07	8,09	0,248
17/05/2021	Dársena Sur	N/A	7,93	N/A

FECHA	UBICACIÓN	Valor pH (CSIC)	Valor pH (Medidor)	Diferencial (%)
19/05/2021	Dársena Sur	N/A	8,07	N/A
28/05/2021	Dársena Sur	8,19	8,21	0,244
01/06/2021	Dársena Sur	N/A	7,98	N/A
03/06/2021	Dársena Sur	8,07	8,10	0,372
09/06/2021	Dársena Sur	N/A	8,10	N/A
17/06/2021	Dársena Sur	N/A	8,04	N/A
28/06/2021	Dársena Sur	8,07	8,07	0,000
30/06/2021	Dársena Sur	N/A	8,08	N/A
07/07/2021	Dársena Sur	N/A	8,08	N/A
08/07/2021	Dársena Sur	8,10	8,11	0,123
14/07/2021	Dársena Sur	N/A	8,09	N/A
19/07/2021	Dársena Sur	N/A	8,07	N/A
21/07/2021	Dársena Sur	8,08	8,08	0,000
26/07/2021	Dársena Sur	N/A	8,11	N/A
29/07/2021	Dársena Sur	8,12	8,12	0,000
31/08/2021	Dársena Sur	N/A	7,97	N/A
01/09/2021	Dársena Sur	8,09	8,09	0,000
02/09/2021	Dársena Sur	N/A	8,11	N/A
07/09/2021	Dársena Sur	N/A	8,13	N/A
09/09/2021	Dársena Sur	8,17	8,19	0,245
14/09/2021	Dársena Sur	N/A	8,11	N/A
16/09/2021	Dársena Sur	8,00	8,01	0,125
21/09/2021	Dársena Sur	N/A	8,08	N/A
29/09/2021	Dársena Sur	N/A	8,10	N/A
30/09/2021	Dársena Sur	N/A	8,07	N/A
05/10/2021	Dársena Sur	N/A	8,05	N/A
07/10/2021	Dársena Sur	7,97	8,01	0,502
14/10/2021	Dársena Sur	8,06	8,08	0,248
25/10/2021	Dársena Sur	N/A	8,09	N/A
28/10/2021	Dársena Sur	8,11	8,12	0,123
09/11/2021	Dársena Sur	8,08	8,10	0,248
18/11/2021	Dársena Sur	8,10	8,11	0,123
20/11/2021	Dársena Sur	N/A	8,09	N/A
23/11/2021	Dársena Sur	N/A	8,08	N/A
30/11/2021	Dársena Sur	8,05	8,05	0,000
02/12/2021	Dársena Sur	N/A	8,02	N/A
06/12/2021	Dársena Sur	N/A	7,98	N/A
08/12/2021	Dársena Sur	N/A	8,01	N/A
13/12/2021	Dársena Sur	N/A	8,04	N/A

FECHA	UBICACIÓN	Valor pH (CSIC)	Valor pH (Medidor)	Diferencial (%)
15/12/2021	Dársena Sur	8,12	8,12	0,000
20/12/2021	Dársena Sur	N/A	7,97	N/A
22/12/2021	Dársena Sur	N/A	7,94	N/A
27/12/2021	Dársena Sur	N/A	8,05	N/A
10/01/2022	Dársena Sur	8,10	8,11	0,123
12/01/2022	Dársena Sur	8,07	8,09	0,248
19/01/2022	Dársena Sur	8,08	8,09	0,124
27/01/2022	Dársena Sur	8,20	8,20	0,000
03/02/2022	Dársena Sur	8,26	8,28	0,242
09/02/2022	Dársena Sur	8,21	8,22	0,122
17/02/2022	Dársena Sur	8,16	8,16	0,000
24/02/2022	Dársena Sur	8,27	8,28	0,121
08/03/2022	Dársena Sur	8,07	8,09	0,248
11/03/2022	Dársena Sur	8,05	8,05	0,000
21/03/2022	Dársena Sur	8,00	7,98	-0,250
23/03/2022	Dársena Sur	7,97	7,97	0,000
29/03/2022	Dársena Sur	N/A	7,95	N/A
31/03/2022	Dársena Sur	N/A	8,01	N/A
05/04/2022	Dársena Sur	N/A	8,10	N/A
07/04/2022	Dársena Sur	N/A	8,09	N/A
12/04/2022	Dársena Sur	N/A	8,11	N/A
19/04/2022	Dársena Sur	N/A	7,98	N/A
20/04/2022	Dársena Sur	N/A	8,10	N/A
21/04/2022	Dársena Sur	N/A	8,11	N/A
25/04/2022	Dársena Sur	N/A	8,09	N/A
27/04/2022	Dársena Sur	N/A	8,10	N/A
28/04/2022	Dársena Sur	N/A	8,10	N/A
02/05/2022	Dársena Sur	N/A	8,07	N/A
04/05/2022	Dársena Sur	N/A	8,08	N/A
09/05/2022	Dársena Sur	8,03	8,04	0,125
12/05/2022	Dársena Sur	8,29	8,26	-0,362
23/05/2022	Dársena Sur	8,07	8,08	0,124
26/05/2022	Dársena Sur	8,03	8,03	0,000
07/06/2022	Dársena Sur	8,07	8,08	0,124
16/06/2022	Dársena Sur	8,03	8,05	0,249
20/06/2022	Dársena Sur	8,08	8,08	0,000
28/06/2022	Dársena Sur	N/A	8,05	N/A
30/06/2022	Dársena Sur	N/A	8,06	N/A
04/07/2022	Dársena Sur	8,03	8,03	0,000

FECHA	UBICACIÓN	Valor pH (CSIC)	Valor pH (Medidor)	Diferencial (%)
07/07/2022	Dársena Sur	8,09	8,10	0,124
11/07/2022	Dársena Sur	8,13	8,09	-0,492
19/07/2022	Dársena Sur	8,07	8,05	-0,248
25/07/2022	Dársena Sur	8,10	8,06	-0,494
27/07/2022	Dársena Sur	8,07	8,07	0,000
02/08/2022	Dársena Sur	8,07	8,07	0,000
29/08/2022	Dársena Sur	7,98	7,99	0,125
01/09/2022	Dársena Sur	8,05	8,09	0,497
05/09/2022	Dársena Sur	8,14	8,14	0,000
08/09/2022	Dársena Sur	N/A	8,13	N/A
12/09/2022	Dársena Sur	8,15	8,16	0,123
14/09/2022	Dársena Sur	8,11	8,11	0,000
21/09/2022	Dársena Sur	8,06	8,07	0,124
27/09/2022	Dársena Sur	8,03	8,03	0,000
05/10/2022	Dársena Sur	8,01	7,97	-0,499
25/10/2022	Dársena Sur	8,12	8,14	0,246
10/11/2022	Dársena Sur	8,13	8,14	0,123
17/11/2022	Dársena Sur	8,07	8,07	0,000
15/12/2022	Dársena Sur	8,12	8,09	-0,369
20/12/2022	Dársena Sur	8,08	8,10	0,248
22/12/2022	Dársena Sur	N/A	8,07	N/A
28/12/2022	Dársena Sur	N/A	8,03	N/A
02/01/2023	Dársena Sur	8,05	8,05	0,000
05/01/2023	Dársena Sur	8,10	8,07	-0,370
10/01/2023	Dársena Sur	8,13	8,11	-0,246
11/01/2023	Dársena Sur	8,15	8,10	-0,613
12/01/2023	Dársena Sur	8,11	8,12	0,123

Tabla 5. Vista de los resultados obtenidos del análisis de acidez (pH) del agua de la dársena sur del puerto de Barcelona. Fuente: el Autor.

A la vista de los resultados obtenidos por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) y los obtenidos a través del equipo de medición de pH adquirido durante el desarrollo de la investigación, se puede observar que el porcentaje diferencial es bastante reducido.

Se debe destacar que el equipo ha sido mantenido en condiciones óptimas para su utilización realizando de forma periódica las calibraciones necesarias con las soluciones de calibración correspondientes adquiridas de modo que la precisión en la determinación del nivel de acidez de las muestras fuera el máximo posible. Las soluciones para la calibración vienen dispuestas en sobres en forma sólida y para su uso hay que disolverlo su contenido en agua con un nivel de acidez neutro (7.0 unidades de pH). Una vez preparada la solución se introduce el electrodo en cada una de las tres soluciones (pH 4.01, pH 6.86 y pH 9.18).



Figura 64. Vista del equipo adquirido durante la investigación para análisis de acidez (pH) y soluciones para calibración. Fuente: el Autor.

Examinando los resultados del nivel de acidez (pH) obtenidos para cada una de las muestras analizadas por el IDAEA se puede observar que el valor de pH de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona no es completamente estable. Durante el desarrollo de la presente investigación se ha observado que además de la frecuencia de escalas de buques que empleen los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto durante su estancia en la dársena sur, tiene también un efecto considerable en la variación de valor de pH de sus aguas, la ausencia y/o el exceso de lluvias. No obstante, la variación detectada se encontraría dentro de unos márgenes relativamente constantes. En el anexo III se adjuntan los informes elaborados por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) con el resultado del pH obtenido para cada una de las muestras analizadas.



Figura 65. Vista de la dàrsena sur y dàrsena interior (contigua) del puerto de Barcelona con varias escalas de buques tipo carriers equipados con SLGE de ciclo abierto. Fuente: el Autor.

A continuación, se muestran los gráficos elaborados a partir de los resultados obtenidos por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), tras el análisis del nivel de acidez (pH) de las aguas de la dàrsena sur del puerto de Barcelona.

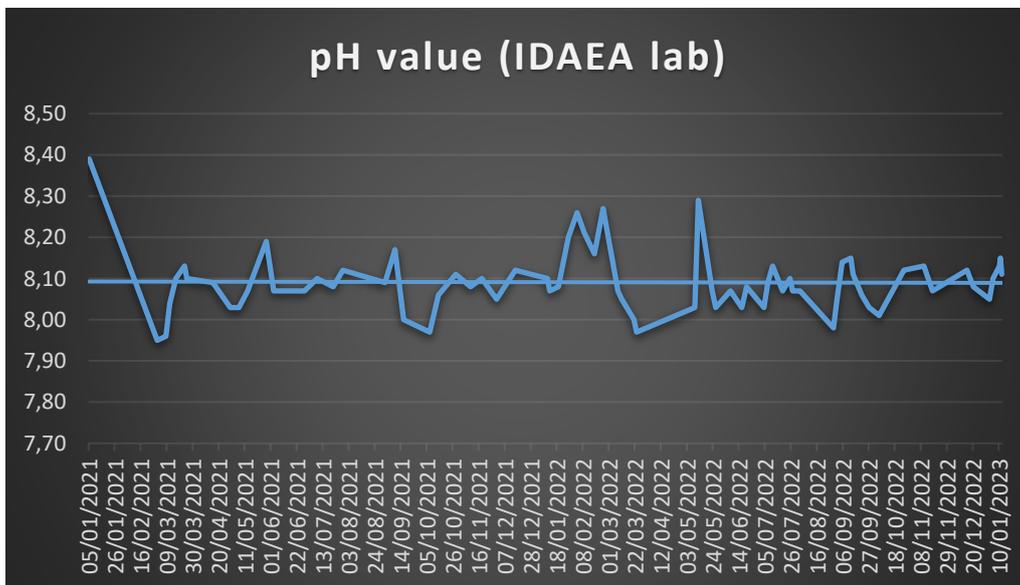


Gráfico 1. Vista de los resultados obtenidos por el IDAEA tras analizar el pH de las muestras de agua de la dàrsena sur y línea de tendencia a tiempo real. Fuente: el Autor.

En el gráfico anterior, se puede observar además de la evolución del nivel de acidez de las muestras analizadas, la línea que denota la tendencia de evolución del nivel de acidez de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona durante el período de muestreo. Se puede observar a simple vista que existe una ligera tendencia decreciente del nivel de acidez (pH). Si se realiza el estudio a corto plazo del comportamiento de esta tendencia, por ejemplo hasta el año 2026, obtenemos la siguiente situación:

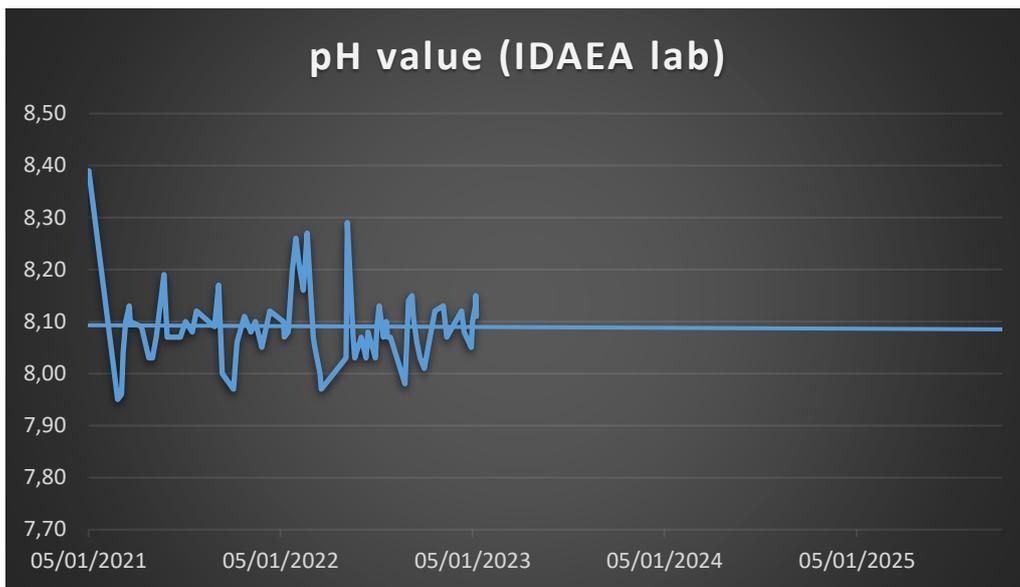


Gráfico 2. Vista de los resultados obtenidos por el IDAEA tras analizar el pH de las muestras de agua de la dársena sur y línea de tendencia hasta 2026. Fuente: el Autor.

A continuación, se muestran los gráficos elaborados a partir de los resultados obtenidos por el Autor mediante el equipo medidor adquirido durante el desarrollo de la presente investigación para llevar a cabo, de forma adicional a los análisis realizados por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA), el análisis del nivel de acidez (pH) de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona.

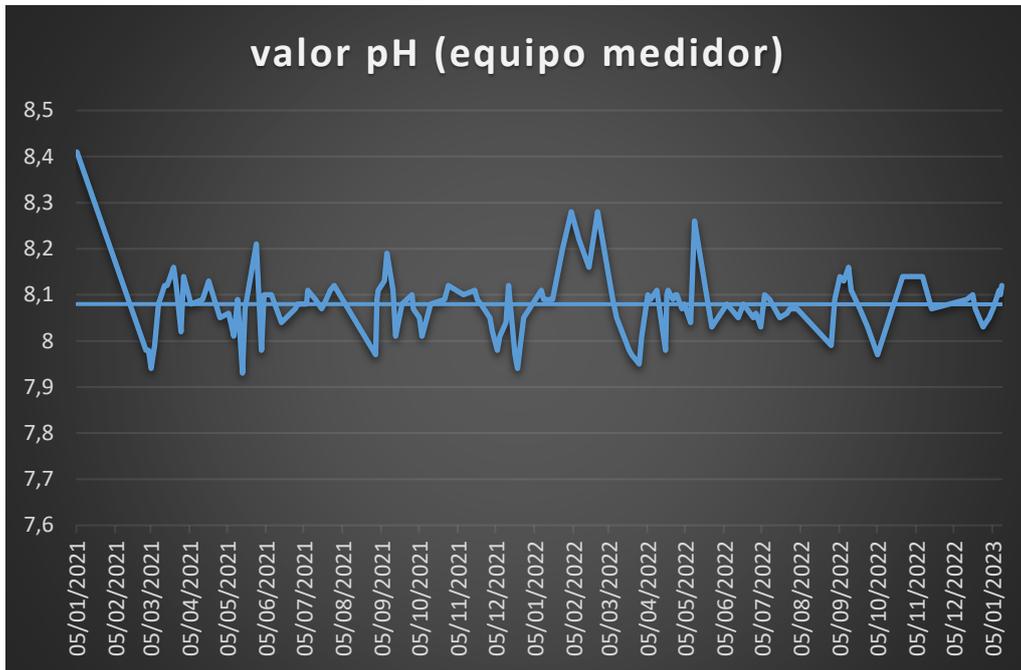


Gráfico 3. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras analizar el pH de las muestras de agua de la dársena sur con equipo medidor y línea de tendencia a tiempo real. Fuente: el Autor.

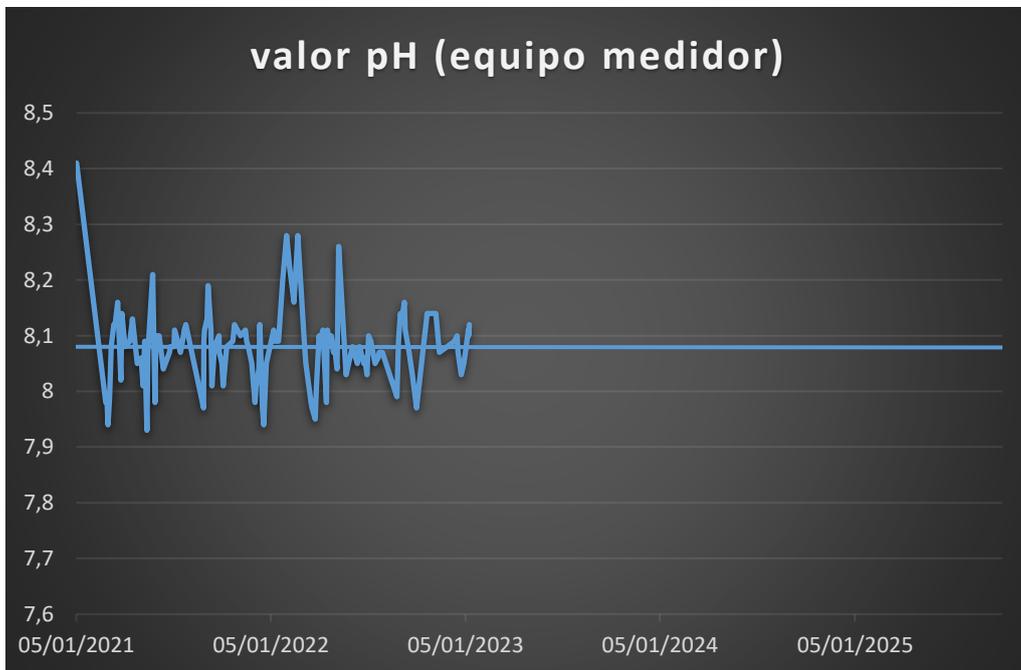


Gráfico 4. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras analizar el pH de las muestras de agua de la dársena sur con equipo medidor y línea de tendencia hasta 2026. Fuente: el Autor.

Como se puede observar tanto en el gráfico que muestra los resultados obtenidos por el IDAEA como en el gráfico que ilustra los resultados obtenidos por el Autor con el equipo citado supra, se mantiene una ligera tendencia decreciente del nivel de acidez (pH) de las aguas de la dársena sur. Este factor se podría considerar como un indicativo de que el nivel de pH se está reduciendo progresivamente de forma muy atenuada.

Durante el desarrollo de esta investigación se ha detectado que la variación que experimenta el nivel de acidez de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona es ocasionada adicionalmente a las descargas de las aguas de lavado de los sistemas de limpieza de los gases de escape de los buques, por otros factores que contribuyen a la constante modificación del pH de las aguas de la dársena. Entre estos factores se debe destacar la periodicidad de las lluvias, ya que en ausencia de estas y siempre que no coincida con escala de buques haciendo uso de los EGCS en modo ciclo abierto, la tendencia observada del pH del agua de la dársena sur es aumentar de forma progresiva hasta alcanzar valores cercanos a 8,3 unidades. De igual forma se ha observado que en períodos de precipitación, especialmente si estas son continuadas, la tendencia del pH es decreciente. Esto es debido a que generalmente el pH del agua de lluvia según registros consultados para el área metropolitana de Barcelona [36] es inferior a 7 unidades.

Como se ha indicado en el apartado 3.3. del presente Capítulo, además de analizar con el equipo medidor el nivel de acidez (pH) de forma adicional a los análisis realizados por el IDAEA, también se ha procedido a medir el potencial redox (ORP), la salinidad y la densidad del agua de la dársena sur del puerto de Barcelona.

El potencial de óxido-reducción (redox) también conocido como ORP de sus siglas en inglés (Oxidation-Reduction Potential) es un conjunto de reacciones químicas basadas en la transferencia de electrones. En esta reacción de transferencia existen principalmente dos elementos, el reductor y el oxidante. El elemento reductor es aquel que en la reacción cede electrones y como resultado se oxida. El elemento oxidante es aquel que gana electrones y por ello se reduce. Un ejemplo claro de esta reacción sería el proceso de oxidación que sufren los metales al combinarse con el oxígeno para formar un óxido.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con el equipo medidor de las mediciones relativas al potencial redox (ORP), salinidad y densidad.

FECHA	UBICACIÓN	Valor ORP (Medidor) mV	C. Salina (ppm y %) (Refractómetro) (g/L)	Densidad
05/01/2021	Dársena Sur	N/A	N/A	N/A
01/03/2021	Dársena Sur	97	39	1,029
03/03/2021	Dársena Sur	102	39	1,029
05/03/2021	Dársena Sur	83	40	1,03
08/03/2021	Dársena Sur	106	39	1,028
11/03/2021	Dársena Sur	109	40	1,031
16/03/2021	Dársena Sur	96	40	1,03
18/03/2021	Dársena Sur	101	40	1,031
23/03/2021	Dársena Sur	93	39	1,03
25/03/2021	Dársena Sur	95	40	1,03
29/03/2021	Dársena Sur	103	40	1,031
31/03/2021	Dársena Sur	95	40	1,031
06/04/2021	Dársena Sur	113	39	1,029
15/04/2021	Dársena Sur	110	39	1,03
20/04/2021	Dársena Sur	98	40	1,03
29/04/2021	Dársena Sur	106	40	1,031
06/05/2021	Dársena Sur	112	40	1,03
10/05/2021	Dársena Sur	76	40	1,03
13/05/2021	Dársena Sur	112	40	1,03
17/05/2021	Dársena Sur	83	40	1,03
19/05/2021	Dársena Sur	107	39	1,031
28/05/2021	Dársena Sur	93	39	1,03
01/06/2021	Dársena Sur	89	39	1,03
03/06/2021	Dársena Sur	110	39	1,031
09/06/2021	Dársena Sur	110	40	1,031
17/06/2021	Dársena Sur	103	39	1,03
28/06/2021	Dársena Sur	110	40	1,031
30/06/2021	Dársena Sur	110	40	1,031
07/07/2021	Dársena Sur	110	40	1,031
08/07/2021	Dársena Sur	109	39	1,03
14/07/2021	Dársena Sur	102	39	1,03
19/07/2021	Dársena Sur	96	39	1,03
21/07/2021	Dársena Sur	96	39	1,03
26/07/2021	Dársena Sur	106	40	1,031
29/07/2021	Dársena Sur	106	40	1,031
31/08/2021	Dársena Sur	76	38	1,029
01/09/2021	Dársena Sur	98	38	1,03

FECHA	UBICACIÓN	Valor ORP (Medidor) mV	C. Salina (ppm y %) (Refractómetro) (g/L)	Densidad
02/09/2021	Dársena Sur	98	38	1,03
07/09/2021	Dársena Sur	98	39	1,029
09/09/2021	Dársena Sur	96	38	1,03
14/09/2021	Dársena Sur	98	38	1,03
16/09/2021	Dársena Sur	102	39	1,03
21/09/2021	Dársena Sur	75	39	1,03
29/09/2021	Dársena Sur	83	39	1,029
30/09/2021	Dársena Sur	91	39	1,028
05/10/2021	Dársena Sur	101	39	1,029
07/10/2021	Dársena Sur	106	38	1,029
14/10/2021	Dársena Sur	110	38	1,029
25/10/2021	Dársena Sur	107	38	1,029
28/10/2021	Dársena Sur	103	39	1,029
09/11/2021	Dársena Sur	102	39	1,028
18/11/2021	Dársena Sur	103	39	1,029
20/11/2021	Dársena Sur	103	38	1,029
23/11/2021	Dársena Sur	102	38	1,029
30/11/2021	Dársena Sur	98	38	1,029
02/12/2021	Dársena Sur	104	38	1,029
06/12/2021	Dársena Sur	105	39	1,029
08/12/2021	Dársena Sur	105	39	1,029
13/12/2021	Dársena Sur	103	39	1,028
15/12/2021	Dársena Sur	103	39	1,028
20/12/2021	Dársena Sur	74	39	1,028
22/12/2021	Dársena Sur	81	39	1,028
27/12/2021	Dársena Sur	98	39	1,028
10/01/2022	Dársena Sur	105	39	1,027
12/01/2022	Dársena Sur	106	39	1,028
19/01/2022	Dársena Sur	108	39	1,028
27/01/2022	Dársena Sur	97	39	1,028
03/02/2022	Dársena Sur	95	39	1,029
09/02/2022	Dársena Sur	106	39	1,029
17/02/2022	Dársena Sur	101	38	1,028
24/02/2022	Dársena Sur	88	40	1,031
08/03/2022	Dársena Sur	99	38	1,028
11/03/2022	Dársena Sur	103	38	1,028
21/03/2022	Dársena Sur	101	39	1,028

FECHA	UBICACIÓN	Valor ORP (Medidor) mV	C. Salina (ppm y %) (Refractómetro) (g/L)	Densidad
23/03/2022	Dársena Sur	104	39	1,028
29/03/2022	Dársena Sur	103	40	1,029
31/03/2022	Dársena Sur	105	39	1,03
05/04/2022	Dársena Sur	105	40	1,03
07/04/2022	Dársena Sur	107	40	1,03
12/04/2022	Dársena Sur	100	40	1,03
19/04/2022	Dársena Sur	86	39	1,029
20/04/2022	Dársena Sur	97	39	1,029
21/04/2022	Dársena Sur	103	39	1,029
25/04/2022	Dársena Sur	105	39	1,03
27/04/2022	Dársena Sur	105	39	1,029
28/04/2022	Dársena Sur	98	39	1,029
02/05/2022	Dársena Sur	95	39	1,029
04/05/2022	Dársena Sur	102	39	1,029
09/05/2022	Dársena Sur	96	39	1,03
12/05/2022	Dársena Sur	94	39	1,03
23/05/2022	Dársena Sur	98	39	1,029
26/05/2022	Dársena Sur	102	39	1,028
07/06/2022	Dársena Sur	105	39	1,029
16/06/2022	Dársena Sur	97	39	1,029
20/06/2022	Dársena Sur	101	39	1,029
28/06/2022	Dársena Sur	105	39	1,029
30/06/2022	Dársena Sur	98	40	1,029
04/07/2022	Dársena Sur	107	40	1,029
07/07/2022	Dársena Sur	101	39	1,028
11/07/2022	Dársena Sur	100	40	1,029
19/07/2022	Dársena Sur	89	40	1,031
25/07/2022	Dársena Sur	99	39	1,031
27/07/2022	Dársena Sur	98	40	1,030
02/08/2022	Dársena Sur	97	40	1,031
29/08/2022	Dársena Sur	102	39	1,030
01/09/2022	Dársena Sur	101	40	1,030
05/09/2022	Dársena Sur	98	39	1,030
08/09/2022	Dársena Sur	102	40	1,031
12/09/2022	Dársena Sur	106	39	1,031
14/09/2022	Dársena Sur	103	39	1,031
21/09/2022	Dársena Sur	105	39	1,030

FECHA	UBICACIÓN	Valor ORP (Medidor) mV	C. Salina (ppm y %) (Refractómetro) (g/L)	Densidad
27/09/2022	Dársena Sur	97	39	1,029
05/10/2022	Dársena Sur	88	39	1,030
25/10/2022	Dársena Sur	102	40	1,031
10/11/2022	Dársena Sur	105	40	1,030
17/11/2022	Dársena Sur	98	39	1,030
15/12/2022	Dársena Sur	102	38	1,031
20/12/2022	Dársena Sur	102	38	1,031
22/12/2022	Dársena Sur	97	39	1,030
28/12/2022	Dársena Sur	104	40	1,029
02/01/2023	Dársena Sur	98	40	1,030
05/01/2023	Dársena Sur	100	40	1,031
10/01/2023	Dársena Sur	105	40	1,030
11/01/2023	Dársena Sur	107	40	1,030
12/01/2023	Dársena Sur	96	39	1,031

Tabla 6. Vista de los resultados obtenidos de los análisis de potencial redox, salinidad y densidad del agua de la dársena sur del puerto de Barcelona. Fuente: el Autor.

A continuación, se muestran los gráficos que ilustran los resultados obtenidos tras analizar el potencial redox (ORP), la salinidad y la densidad de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona.

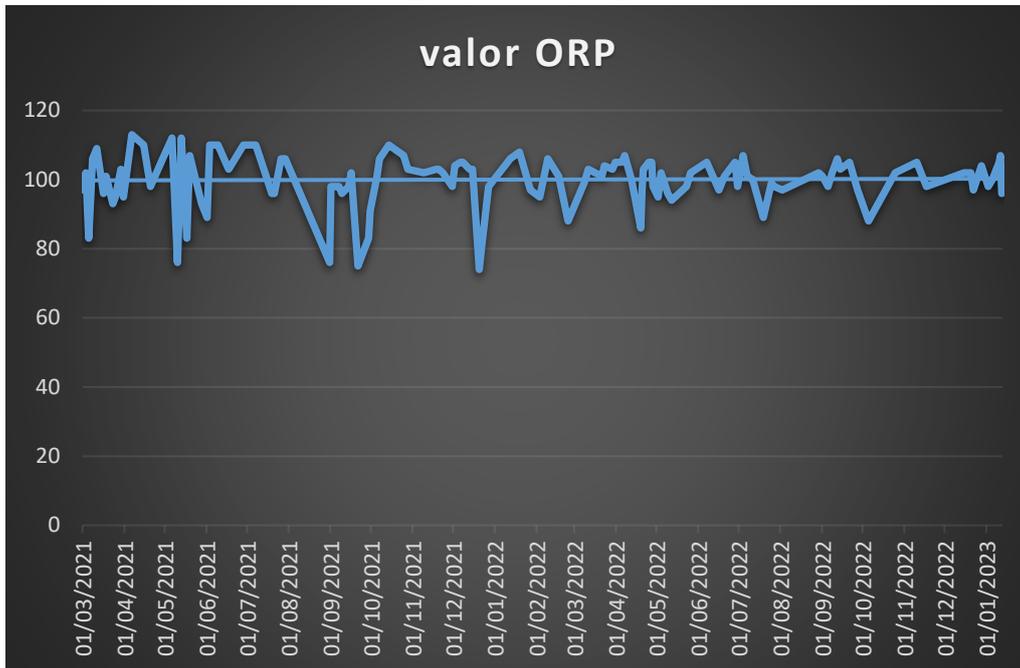


Gráfico 5. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras analizar el potencial redox (ORP) de las muestras de agua de la dársena sur con equipo medidor y línea de tendencia a tiempo real. Fuente: el Autor.

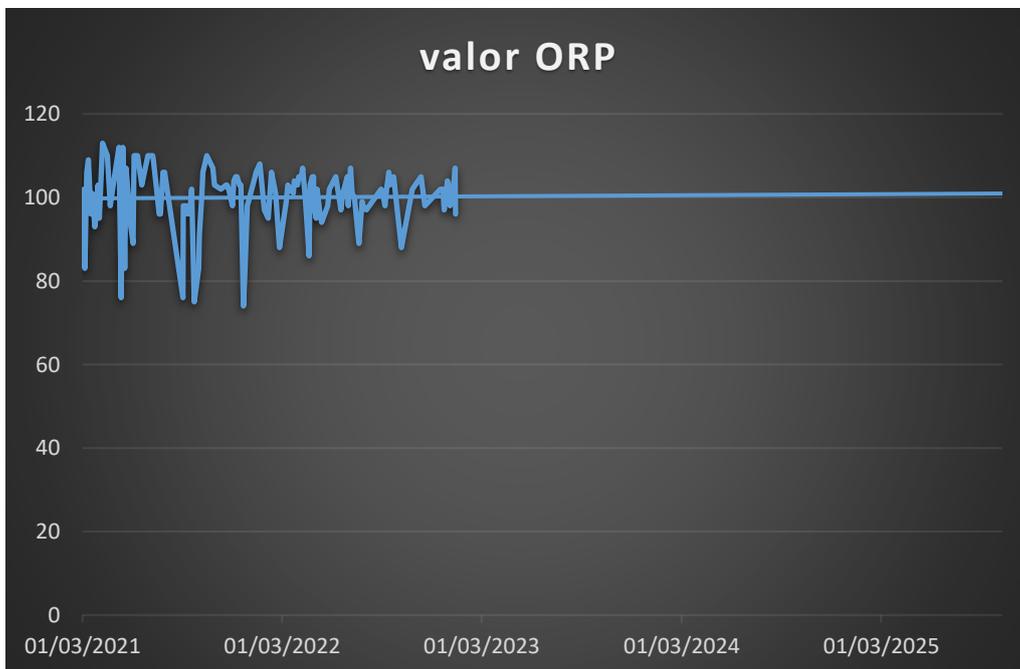


Gráfico 6. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras analizar el potencial redox (ORP) de las muestras de agua de la dársena sur con equipo medidor y línea de tendencia hasta 2026. Fuente: el Autor.

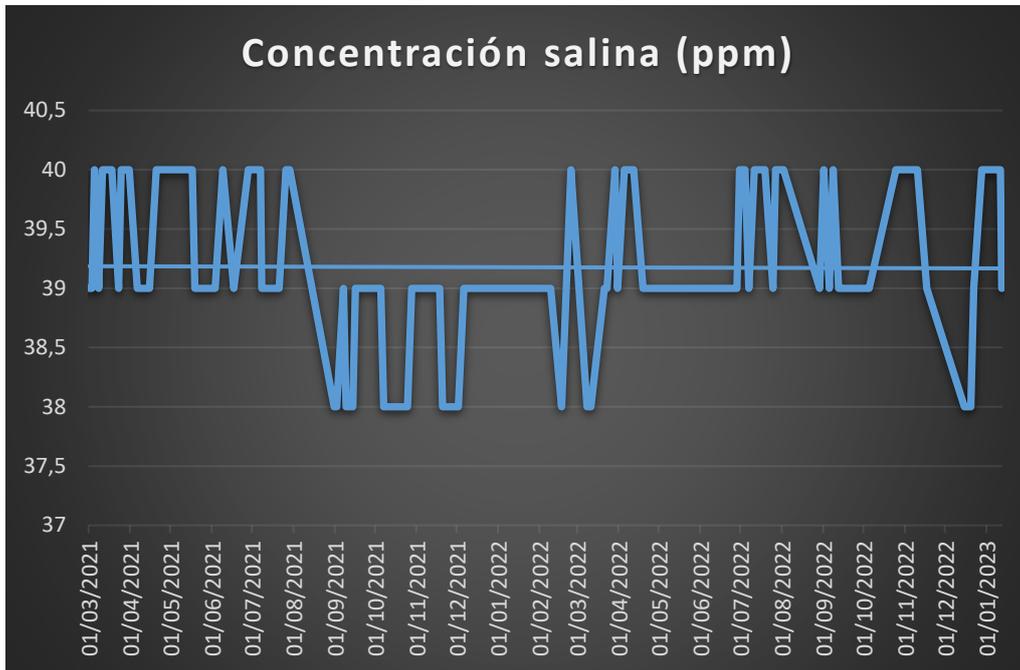


Gráfico 7. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras medir la concentración salina de las muestras de agua de la dársena sur con refractómetro y línea de tendencia a tiempo real. Fuente: el Autor.

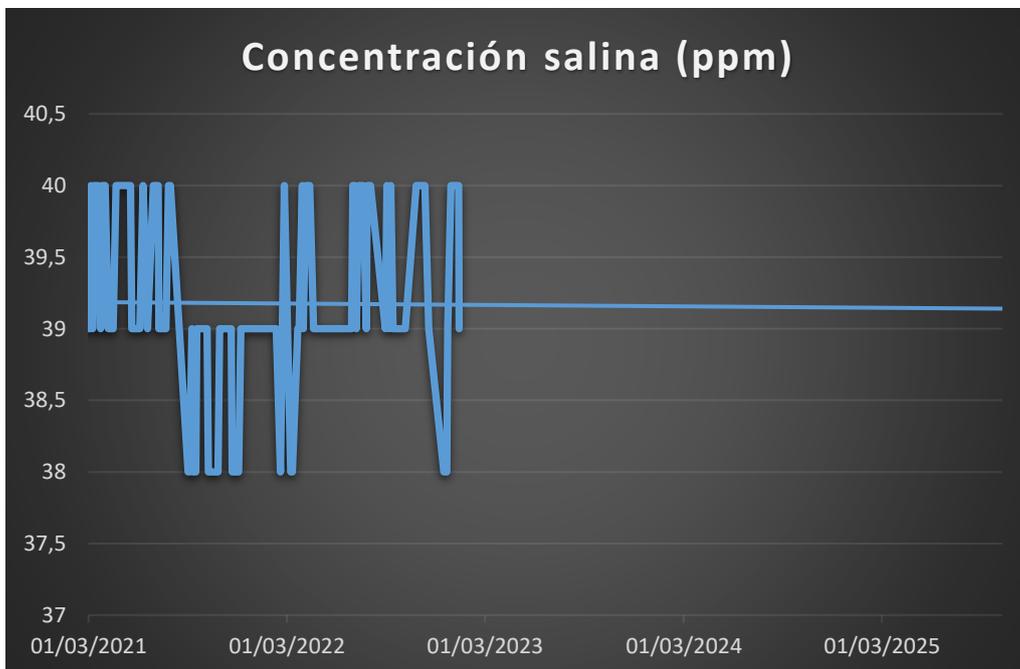


Gráfico 8. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras medir la concentración salina de las muestras de agua de la dársena sur con refractómetro y línea de tendencia hasta 2026. Fuente: el Autor.

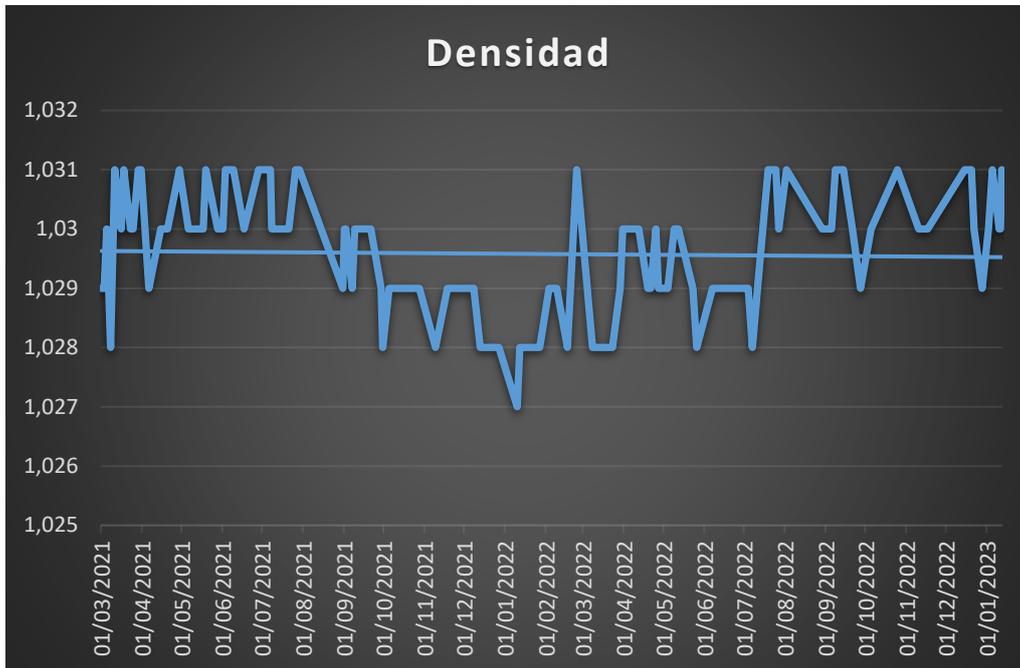


Gráfico 9. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras medir la densidad de las muestras de agua de la dársena sur con refractómetro y línea de tendencia a tiempo real. Fuente: el Autor.

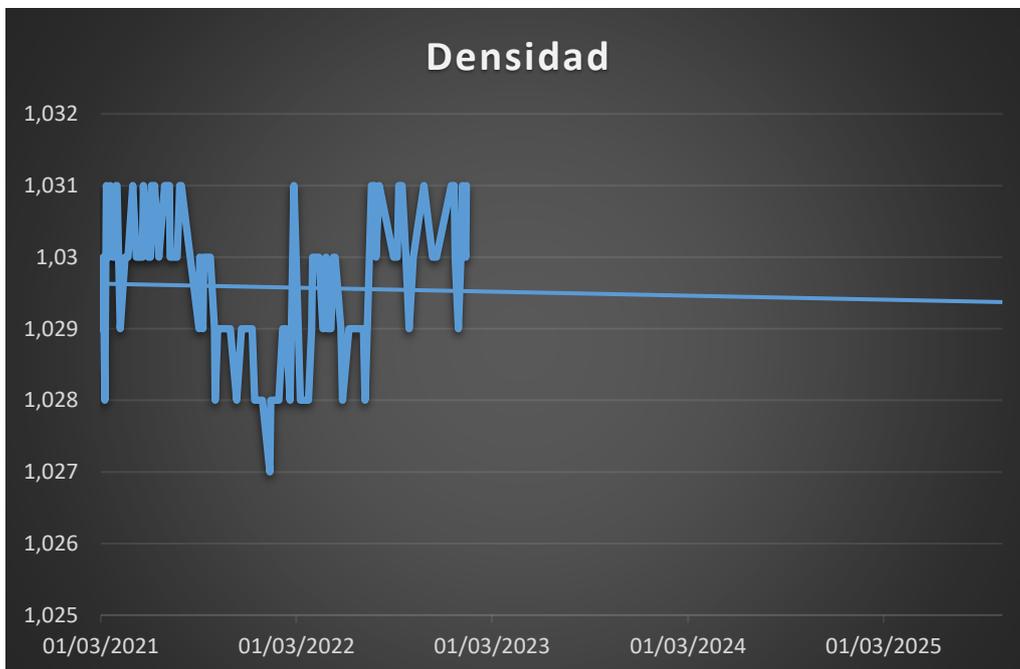


Gráfico 10. Vista de los resultados obtenidos por el Autor tras medir la densidad de las muestras de agua de la dársena sur con refractómetro y línea de tendencia hasta 2026. Fuente: el Autor.

En relación con los resultados obtenidos durante el periodo de medición del potencial redox, estos han sido en su mayoría valores muy próximos a los 100 mV. Estos valores de potencial redox son característicos de zonas con escasez de oxígeno de sus aguas [37] y este es un hecho que también se desprende del informe anual de la Autoridad Portuaria de Barcelona sobre la calidad de las aguas del puerto de Barcelona [38]. De acuerdo con estos informes, la concentración de materia orgánica y nutrientes en áreas abrigadas y zonas interiores del puerto de Barcelona tiene un impacto directo sobre las concentraciones de oxígeno disuelto en agua, el cual es continuamente consumido por las bacterias que degradan la materia orgánica. Según estos informes el contenido en oxígeno del agua de mar varía en condiciones normales entre 6 y 9 mg/l y en aguas portuarias entre 7,9 mg/l (aguas con cierta agitación e intercambio de agua con el exterior) y 2,3 mg/l (aguas abrigadas). La dársena sur por su emplazamiento es sin duda una de las zonas más abrigadas del puerto de Barcelona. Todo lo anterior justificaría los valores del potencial de óxido-reducción obtenidos.

Asimismo, con relación a la salinidad de las aguas de la dársena sur y evaluados los resultados obtenidos de las muestras analizadas con el refractómetro citado, se puede observar que su valor es relativamente constante a lo largo del período de muestreo. En todos los casos la concentración salina obtenida se encuentra entre las 38 ppm y las 40 ppm. No obstante, se ha detectado una ligera tendencia hacia la reducción de la concentración salina del agua que, sin llegar a ser significativa podría ser un indicativo de un cambio en la composición del agua. Si bien es cierto que las aguas abrigadas del puerto suelen tener una salinidad inferior por los aportes de agua dulce (escorrentías de aguas de lluvia) [38] entre otros, el plazo de muestreo comprendido entre el 1 de marzo de 2021 y el 12 de enero de 2023, no ha sido un período de tiempo en el que las precipitaciones hayan sido muy abundantes.

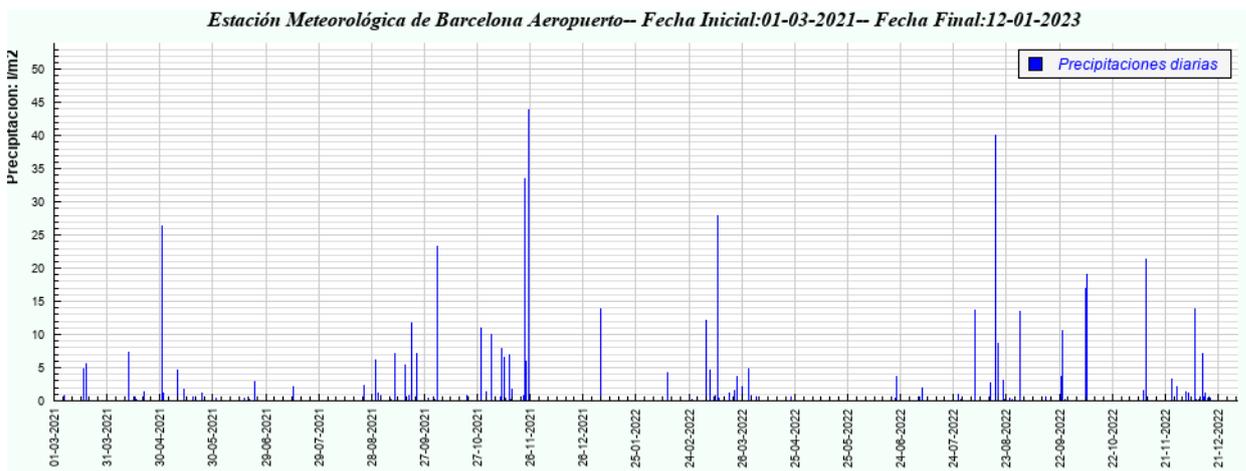


Figura 66. Vista del registro de las precipitaciones en Barcelona (estación meteorológica situada en el aeropuerto) para el período de muestreo. Fuente: www.datosclima.es.

En la imagen anterior se puede observar las precipitaciones registradas en la estación meteorológica situada en el aeropuerto de Barcelona, que se ha utilizado como referencia en esta investigación por su cercanía al puerto de Barcelona, para el período de muestreo comprendido entre el 01/03/2021 y el 12 de enero de 2023. Como se puede observar se trata de un período de tiempo caracterizado por la escasez de las precipitaciones.

Asimismo, de los resultados obtenidos tras analizar la densidad de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona se desprende que existe una tendencia hacia la disminución de su valor. Este hecho estaría directamente relacionado con la disminución observada en la concentración salina citada anteriormente. Sin embargo y del mismo modo que para el caso de la concentración salina, existen otros factores que influyen directamente sobre las variaciones observadas en la densidad del agua, entre ellos la presencia y o ausencia de lluvias y la temperatura.

Esta tesis está basada en el estudio del comportamiento del pH de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona, para determinar qué impacto tienen y/o pueden llegar a tener las descargas de las aguas residuales de los sistemas de limpieza de los gases de escape (scrubbers) instalados a bordo de los buques. Los datos obtenidos relativos al potencial redox (ORP), la salinidad y la densidad se han analizado de forma adicional para que de algún modo se pudiera observar si cualquier cambio observado en el nivel de acidez de las aguas de la dársena tiene su reflejo en el comportamiento de alguno de los parámetros citado anteriormente.

Los resultados obtenidos de analizar la salinidad de las muestras de agua de la dársena sur del puerto de Barcelona manifiestan que no existe una relación directa ni proporcional entre los valores obtenidos de pH y la salinidad. De hecho, se ha observado un comportamiento de la salinidad relativamente independiente a la evolución del nivel de acidez (pH). Este resultado tiene su lógica puesto que es la alcalinidad la que tiene una relación directa con el nivel de acidez, en este caso de las aguas de la dársena sur. Es la capacidad que tiene el agua para soportar cambios en el nivel de acidez y esta capacidad viene determinada principalmente por la presencia de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) e hidróxidos (OH^-) [39]. Sin embargo, es el cloruro de sodio (NaCl) la sal con mayor concentración en el agua de mar [40]. De lo anterior se desprende que los niveles de salinidad y en este caso el NaCl no tenga un papel decisivo en el comportamiento del nivel de acidez de las aguas como si lo tiene la concentración de bicarbonatos y carbonatos asociados a otros iones como el Na^+ , el K^+ , el Ca^{++} o el Mg^{++} .

Asimismo, y con una relación más directa que la anterior, se ha observado en la mayor parte de los casos que la tendencia de la densidad de las aguas de la dársena sur va en consonancia con el nivel de salinidad observado. En períodos de niveles altos de salinidad se ha observado una mayor densidad de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona y viceversa.

CAPÍTULO IV. SISTEMA DE TRATAMIENTO PROPUESTO

Este Capítulo tiene por objeto presentar una solución al problema detectado en los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto relacionado con la formación de aguas de lavado excesivamente ácidas. El presente Capítulo está basado en la propuesta de un sistema ideado por el Autor y en el estudio de la viabilidad de su instalación a bordo de los buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape.

4.1. Introducción

A lo largo de la presente investigación se han tratado varios aspectos todos ellos relacionados con la operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto instalados a bordo de los buques y la problemática asociada al uso de estos en el puerto de Barcelona. Se ha analizado la norma que los regula a nivel internacional, los requisitos exigidos a nivel local, los equipos y dispositivos que componen estos sistemas, su funcionamiento y operativa, así como episodios de contaminación causados y la problemática que existe actualmente en el uso de estos sistemas, entre otros. Esta tesis se ha centrado en el estudio de la acidez del agua residual de lavado generada durante el proceso de depuración de los gases de escape y su impacto sobre el nivel de pH de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona. El aspecto relacionado con la acidez de las aguas de lavado es tan solo uno de los diferentes inconvenientes que se han detectado a nivel global en el uso de los EGCS de ciclo abierto. Entre esta problemática asociada al uso de estos sistemas se encuentra de forma adicional a la acidez, la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados en el agua de lavado y su vertido al mar.

De los resultados obtenidos durante el análisis del nivel de acidez (pH) de las muestras obtenidas del agua de la dársena sur del puerto de Barcelona y analizada su evolución durante todo el período de muestreo, no se desprende que en la actualidad exista una necesidad inmediata para corregir los niveles de acidez de las aguas residuales de los EGCS que son vertidas en su interior, sin embargo, sí se ha observado una ligera tendencia hacia la acidificación.

Analizada la situación actual y la discutible idoneidad en general de todos los sistemas de limpieza de los gases de escape y en particular de los de ciclo abierto, el Autor de esta tesis con el objeto de poder aportar una solución viable al problema que pudiera presentarse a largo plazo relacionado con los niveles de acidez (pH) de las aguas residuales de lavado de los EGCS ha desarrollado un sistema que va a ser detallado en los próximos apartados y que espera pueda llegar a materializarse convirtiéndose en una solución frente a la problemática comentada anteriormente.

4.2. Anàlisi causa raíz

Como se indica en el apartado 2.5.3.3 “Operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto” del Capítulo II de esta tesis, la alta acidez de las aguas residuales de los sistemas de limpieza de los gases de escape procede inicialmente de las reacciones generadas en la propia cámara de combustión de los motores de los buques. Durante estas reacciones y mediante una rápida oxidación de todos los elementos que componen el fuelóleo consumido por el buque y entre los que debemos destacar el azufre (S) y el Vanadio (V), se produce el dióxido de azufre (SO₂) y el pentóxido de vanadio (V₂O₅):



El dióxido de azufre (SO₂) generado y debido a la alta temperatura de los gases de escape (≈350° C) dentro de la cámara de combustión es sometido a una segunda oxidación, convirtiéndose en trióxido de azufre (SO₃). Esta última reacción tiene lugar gracias a la acción del pentóxido de vanadio (V₂O₅) que actúa como catalizador de la reacción.

El trióxido de azufre viaja con el resto de los gases de escape generados en la cámara de combustión hasta la torre de lavado del sistema de limpieza de los gases de escape y al entrar en contacto con el agua de lavado se genera ácido sulfúrico como sigue:



El dióxido de azufre que no ha reaccionado previamente durante la segunda oxidación, también al entrar en contacto con el agua de lavado, reacciona formando ácido sulfuroso:



Debemos considerar que el ácido sulfúrico está clasificado como un ácido fuerte y estos son aquellos que en solución acuosa se disocian completamente [41]. La teoría relativa a los superácidos de Bronsted Lewis define como superácido [42] a todo ácido que es más fuerte que el ácido sulfúrico al 100%.

Una de las principales características del ácido sulfúrico es su alta corrosividad y es muy utilizado en la industria petrolífera y en la producción de fertilizantes entre muchos otros [43]. El ácido sulfuroso, aunque está considerado como un ácido débil, se trata de una sustancia corrosiva que es empleada principalmente en la industria papelera, en la síntesis de productos químicos y en refinerías de petróleo, entre otros [44].

Visto lo anterior es comprensible que el agua de lavado residual procedente de los sistemas de limpieza de los gases de escape tenga esa elevada acidez, en ocasiones con valores por debajo de 2,9 unidades de pH.

Una vez identificada la elevada acidez, cabe analizar su origen. Como se ha indicado la fuente proviene de los propios compuestos del fuelóleo. El combustible (HFO) utilizado a bordo de buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape tiene un alto contenido en azufre (3,5% m/m). De hecho, es la función del sistema en sí el permitir a los buques emplear combustibles altos en azufre mediante el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape que son considerados como medio equivalente al uso de combustibles bajos en azufre como el fuelóleo muy bajo en azufre (0,5 % m/m) o el gasóleo marino (0,1% m/m). Como se ha analizado en apartado 2.3.2 del Capítulo II de esta tesis, el coste del fueloil con alto contenido en azufre (HFO) sigue siendo significativamente más bajo que el coste del combustible con bajo contenido en azufre (VLSFO, MGO).

La Resolución MEPC.340(77) [13] de la OMI, Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape y como se ha comentado previamente en el Capítulo II, establece la conexión entre el contenido máximo en azufre de los combustibles y la relación dióxido de azufre y dióxido de carbono (SO_2/CO_2 ratio).

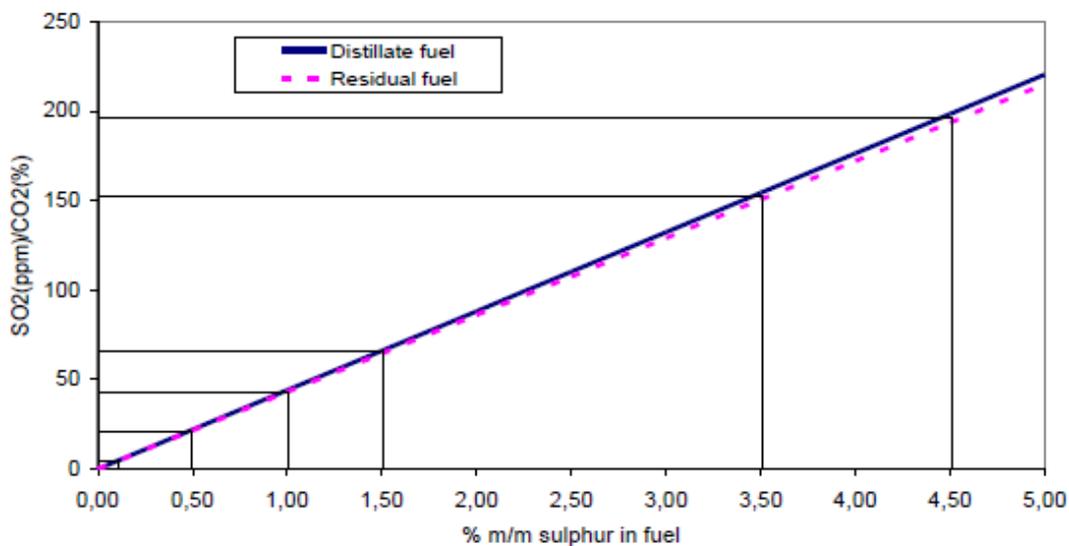


Figura 67. Vista de la relación entre el contenido en azufre de los combustibles y la relación SO_2/CO_2 . Fuente: www.imorules.com.

De todo lo anterior se desprende que desde el punto de vista de los óxidos de azufre (SO_x), con el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape lo único que se ha conseguido es sustituir el medio al que se vierten los residuos de los gases de escape derivados del contenido en azufre del combustible empleado por el buque. Antes de la utilización de los EGCS, los óxidos de azufre generados durante la combustión eran liberados a la atmósfera junto con resto de los gases de escape. Con el uso de los EGCS, los óxidos de azufre son transformados a su forma acuosa/ácida y vertidos al mar, pero en absoluto solucionan el problema de la acidez. Lo único que ofrecen algunos fabricantes de sistemas de limpieza de los gases de escape es insertar en el proceso previo a su descarga, una planta mezcladora de las aguas residuales de lavado de gases con agua de mar que ha sido empleada en la refrigeración de los motores del buque, tal como se ha descrito en el

apartado 1.1.3 del Capítulo I de esta investigación. El objeto de esta planta de mezclado es simplemente que el pH del agua residual a su descarga cumpla con los límites establecidos por la Resolución MEPC.340(77) Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape [13].

Detectada la ineficiencia de los sistemas de limpieza de los gases de escape en general para prevenir la formación de aguas residuales ácidas y la alta acidez en particular del agua descargada por los sistemas de ciclo abierto, el Autor propone el sistema que se expone en el siguiente apartado como solución para controlar el pH de las aguas residuales que van a ser descargadas.

4.3. Descripción del sistema de tratamiento y regulador de pH de las aguas residuales

El siguiente sistema ha sido ideado completamente por el Autor tras detectar la necesidad de mejorar el tratamiento de las aguas residuales generadas durante el proceso de depuración de los gases de escape (EGCS). El sistema que se describe a continuación, además de regular el pH de las aguas residuales de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto, ofrece un tratamiento adicional que permite la retención y separación de residuos sólidos que se generen durante la combustión, como el hollín.

El sistema está diseñado para recibir las aguas residuales generadas durante el proceso de depuración de los gases de escape en la torre de lavado del EGCS, recibiendo un tratamiento adicional antes de ser descargadas al mar. El sistema propuesto está compuesto por una planta de tratamiento en el que se dispone de una serie de boquillas de rociado, filtros de arena natural enriquecida con carbonato de sodio, rejillas de filtrado, un tanque de almacenamiento de agua filtrada y un conjunto de líneas, válvulas y bombas para la conducción del agua de lavado (tratada y sin tratar).

El agua residual ácida que se recibe de la torre de lavado del sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto es conducida hasta la planta de tratamiento que se propone, mediante el conjunto de líneas, válvulas y bombas correspondientes. A su entrada, el agua residual (ácida) es rociada directamente a través de las boquillas de aspersion sobre las rejillas de filtrado. Sobre la primera rejilla se encuentran dispuestos los filtros de arena natural enriquecida con carbonato de sodio. Sobre la segunda rejilla se encuentran los filtros de arena natural (sin carbonato de sodio). La primera rejilla de filtrado va situada superpuesta encima de la segunda, de modo que el agua residual filtrada a través de la primera rejilla pase directamente por gravedad sobre la segunda rejilla de filtrado. Debajo de la segunda rejilla se encuentra el tanque de almacenamiento de agua filtrada que recoge el agua procedente de la segunda rejilla y la conduce mediante un conjunto de líneas hasta su descarga al exterior. A la salida del tanque de almacenamiento se encuentra el conjunto de sensores que monitorizan de forma continua los parámetros del agua de lavado filtrada antes de su descarga. En el caso de que alguno de estos parámetros se encontrase por encima de los límites establecidos por la Resolución MEPC.340(77) “Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape” [13], el agua filtrada volvería a ser recirculada, conduciéndola de nuevo hasta las boquillas de rociado citadas supra.

Se ha estimado oportuno la utilización de arena natural en el sistema de filtrado por las características propias de la arena y su composición. La arena dependiendo de su origen, puede estar compuesta por varios elementos entre los que se pueden destacar los granos de cuarzo acompañados de otros restos de minerales, feldespatos, carbonatos, fragmentos de conchas y restos de caparazones. Cabe considerar que el principal componente de los caparazones de los

moluscos es el carbonato de calcio (94%) [45]. La arena aplicada en el sistema propuesto estaría realizando una doble función, en primera instancia lleva a cabo el filtrado del agua de forma muy eficiente por las partículas de pequeño tamaño que la componen con una dimensión del grano que oscila entre los 0,063 mm (arena muy fina) y los 2 mm (arena muy gruesa). Asimismo, ofrece gracias a algunos de sus componentes ricos en carbonatos, la alcalinidad natural con la que cuenta el agua de mar. Asimismo, con el uso de este elemento natural, se está evitando el depender de la utilización de otras bases fuertes como el hidróxido de sodio (sosa cáustica) que es altamente efectiva para neutralizar los ácidos pero que, a su vez es mucho más corrosiva y perjudicial para el medio ambiente que el carbonato de sodio.

El carbonato de sodio es el agente alcalino que permite a este sistema estabilizar el pH del agua residual de lavado (ácida), alcanzando entonces valores más próximos a los del agua de mar en estado natural.

El sistema anteriormente descrito, está compuesto por los siguientes elementos:

- Conjunto de líneas, válvulas y bomba para conducción del agua residual procedente del EGCS hasta el sistema
- Conjunto de boquillas para rociado del agua residual procedente del EGCS dentro del sistema
- 2 tanques de rociado con alojamiento específico para las bandejas de filtrado
- 2 bandejas de filtrado con alojamiento específico para colocación de filtros
- Conjunto de filtros con arena natural
- Conjunto de filtros con mezcla de arena natural y carbonato de sodio (Na_2CO_3)
- 1 tanque de almacenamiento para el agua filtrada
- Conjunto de sensores para la monitorización del nivel de acidez (pH), PAH's y turbidez
- Conjunto de líneas, válvulas y bomba para recirculación del agua filtrada
- Conjunto de líneas, válvulas y bomba para conducción del agua filtrada hasta el punto de descarga

A continuación, se muestra el esquema gráfico del sistema desarrollado por el Autor para solucionar el problema de la acidez de las aguas residuales de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto.

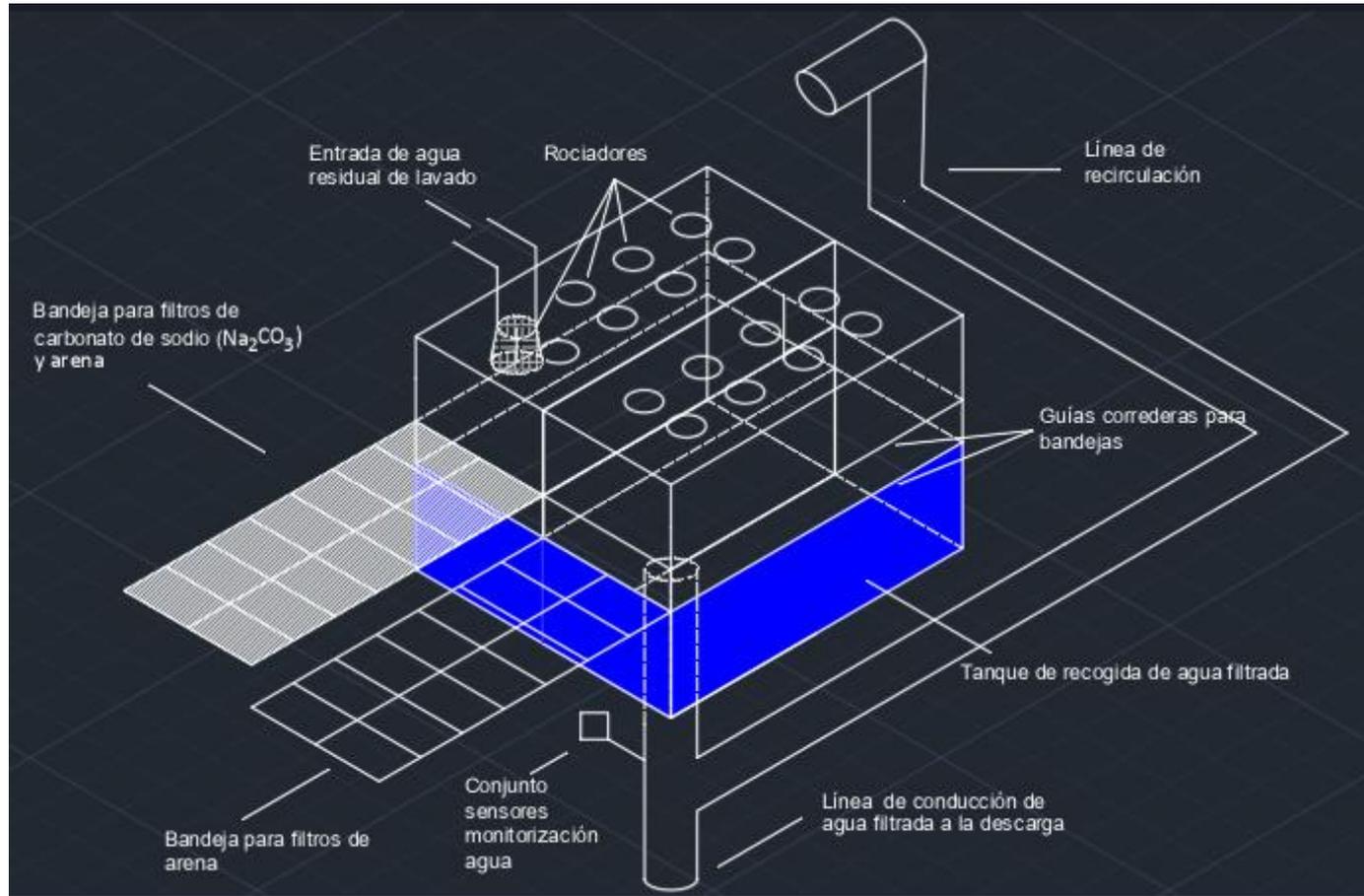


Figura 68. Vista esquemática del sistema diseñado. Fuente el Autor:

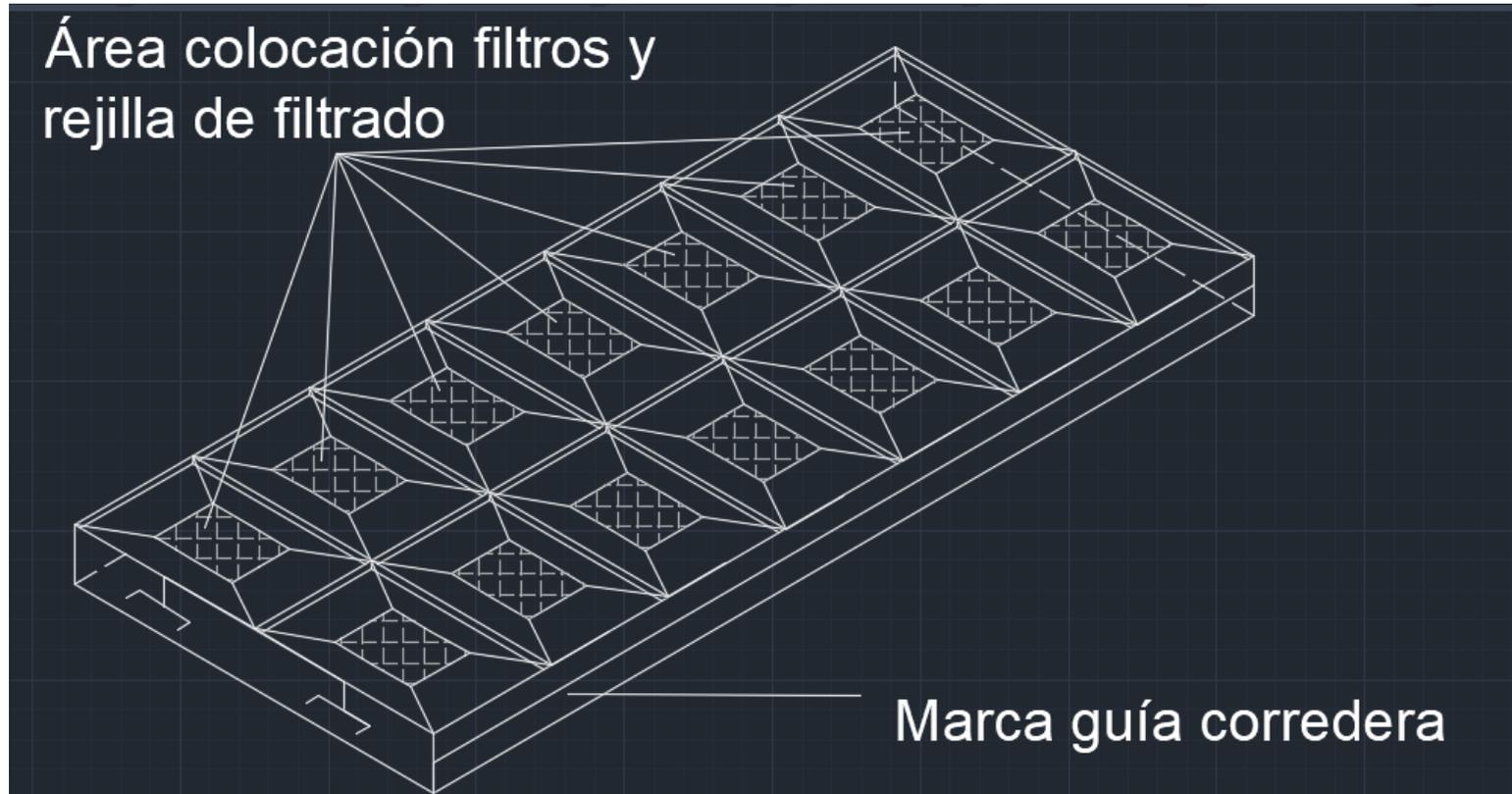


Figura 69. Vista esquemática de la rejilla de filtrado del sistema diseñado. Fuente el Autor:

Durante el desarrollo de esta tesis, el Autor ha llevado a cabo diversas pruebas con muestras de agua de la dársena sur del puerto de Barcelona en la que se ha disuelto una pequeña cantidad de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Específicamente se han preparado 3 muestras de agua de 750 mL cada una con un pH inicial de 8,05 unidades y en las que se ha disuelto 0,20 mL de H_2SO_4 al 98/99%. Esta disolución se ha realizado con objeto de simular el agua residual ácida procedente de los sistemas de limpieza de los gases de escape. La muestra de agua tras ser disuelta con ácido sulfúrico (0,2 mL) ha alcanzado un pH de 3,01 unidades. El pH obtenido es muy cercano a los valores mínimos de pH observados en los manuales técnicos de determinados fabricantes de sistemas de limpieza de los gases de escape para las aguas de lavado residuales.

Una vez obtenida la disolución con el pH citado supra, esta ha sido tratada con el prototipo de sistema que ha diseñado el Autor de esta tesis, simulando el tratamiento de las aguas residuales de los sistemas de limpieza de los gases de escape que se propone. Para ello se han empleado dos bandejas (superpuestas) de polivinilo con seis compartimentos independientes cada una, que simulan las bandejas de filtros del sistema propuesto y en las cuales se han practicado unos orificios que permitiera el paso del agua de lavado. En estos compartimentos se han alojado los correspondientes filtros de arena enriquecida con carbonato de sodio (Na_2CO_3) para la bandeja superior y arena únicamente para la bandeja inferior. Asimismo, se ha utilizado un recipiente de mayor capacidad como tanque de recogida del agua residual tratada.

Para el diseño específico de los cartuchos de los filtros se ha utilizado tela de arpillera que a la vez que contenía la arena enriquecida con carbonato de sodio (bandeja 1) y arena natural (bandeja 2) ha desarrollado función adicional de filtro de partículas sólidas junto a la arena. Además, durante el ensayo se ha utilizado ceniza común procedente de la combustión de un sólido (leña) para simular la presencia de materia particulada mezclada con el agua residual de lavado.

A continuación, se muestran algunas fotografías de los ensayos realizados.



Figura 70. Vista del análisis de pH del agua de la dársena sur del puerto de Barcelona previo al ensayo. Fuente: el Autor.



Figura 71. Vista del valor del pH obtenido del agua de la dársena sur antes de ser utilizada en el ensayo. Fuente: el Autor.



Figura 72. Vista del material empleado durante los ensayos. Fuente el Autor.



Figura 73. Vista de la preparación de la muestra con pH 3,01 unidades. Fuente: el Autor.



Figura 74. Vista de la preparación de la muestra con pH 3,01 unidades. Fuente: el Autor.

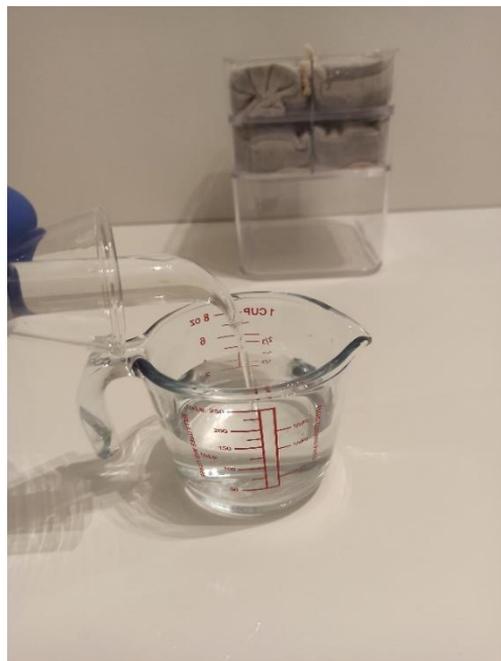


Figura 75. Vista de la preparación de la muestra con pH 3,01 unidades. Fuente: el Autor.



Figura 76. Vista del pH de la muestra preparada para los ensayos. Fuente el Autor.



Figura 77. Vista del sistema diseñado para el tratamiento de las aguas ácidas generadas. Fuente: el Autor.



Figura 78. Vista del sistema diseñado para el tratamiento de las aguas ácidas. Fuente: el Autor.



Figura 79. Vista de los filtros diseñados para el sistema propuesto. Fuente: el Autor.



Figura 80. Vista del sistema propuesto filtrando el agua con un pH de 3,01 unidades y con materia particulada en suspensión. Fuente el Autor:



Figura 81. Vista del sistema propuesto tras filtrar el agua con pH de 3,01 unidades. Fuente el Autor



Figura 82. Vista del valor de pH obtenido tras filtrar el agua ácida obtenida por el sistema propuesto. Fuente: el Autor.



Figura 83. Vista de los filtros con restos de la materia particulada del agua de ensayo. Fuente: el Autor.



Figura 84. Vista del análisis de pH del agua obtenida tras el proceso de filtrado. Fuente el Autor

Como se puede observar el pH inicial del agua de la dársena sur del puerto de Barcelona que iba a ser utilizada durante el ensayo era de 8,05 unidades. Tras disolver en esta agua la cantidad indicada de ácido sulfúrico, su pH se vio reducido hasta las 3,05 unidades añadiendo además cenizas en suspensión (simulando la presencia de hollines). Esta agua tras haber sido tratada a través del sistema propuesto no solo ha eliminado todo resto de cenizas, sino que también ha

conseguido neutralizar la acidez del agua de lavado y aumentar su pH hasta 8.04 unidades, valor muy cercano al pH inicial del agua de la dársena sur sin manipular (8,05 unidades).

A la vista de los ensayos realizados y de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el sistema propuesto cumple con el propósito de neutralizar las aguas ácidas que en su caso procederían de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto, además de eliminar la presencia sólidos en suspensión. Cabe señalar que se considera que esta misma propuesta podría ser de aplicación tanto en los sistemas de ciclo abierto como de ciclo cerrado.

4.4. Viabilidad del sistema propuesto en los buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape

Durante el desarrollo de la presente tesis, se han visitado numerosos buques equipados con los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto y se ha observado en todos ellos que existiría la opción de instalar el sistema propuesto. De hecho, este sistema fue diseñado teniendo en consideración las necesidades y las limitaciones de los buques equipados con SLGE en cuanto espacio operativo se refiere. Es decir, en la mayor parte de los buques visitados, se ha observado que existe un espacio bajo la torre de lavado de los SLGE en la que se podría anexionar el sistema propuesto, realizando los cambios necesarios sobre las líneas existentes para la conducción del agua de lavado hasta su descarga.

El conjunto del sistema no requiere el uso de materiales costosos ni que deban ofrecer una gran resistencia. Se estima que únicamente sería necesaria la utilización de un acero de una calidad específica y que contara con tratamientos adicionales contra la corrosión que pudiera provocar el agua de lavado ácida procedente de la torre de lavado del SLGE, especialmente sobre la primera bandeja de filtros que es donde esta agua va a ser directamente rociada y en el conjunto de líneas, bombas y rociadores del agua de lavado. Sin embargo, el beneficio que aportaría el sistema sería mucho mayor que el coste que pudiera suponer, puesto que podría incluso cambiar el criterio de todos aquellos países que desde un inicio han establecido algún tipo de prohibición en el uso de los sistemas de limpieza de ciclo abierto, tal como se ha indicado en el apartado 2.6 del Capítulo II de esta tesis.

Como se puede observar en la siguiente imagen, en la disposición habitual de los sistemas de limpieza de los gases de escape instalados a bordo de los buques, existe bajo la torre de lavado del sistema, un área de una dimensión más que suficiente para poder instalar el sistema propuesto.



Figura 85. Vista del área existente bajo la torre de lavado de un SLGE de ciclo abierto. Fuente el Autor

Además, el sistema propuesto y como se ha indicado supra, se estima que sería capaz de evitar la descarga de las aguas de lavado mezclada con hollines generados durante una mala combustión de los motores, evitando en estos casos la contaminación directa del agua de mar.



Figura 86. Vista de un vertido de aguas de lavado con restos de hollín procedente de un SLGE de ciclo abierto. Fuente el Autor

4.5. Recepción y tratamiento de residuos

El sistema propuesto, dada su naturaleza y su propósito que es filtrar aguas residuales que en ocasiones contiene materia particulada en suspensión (hollín), va a generar una serie de residuos que deberán ser gestionados de la manera más eficiente posible. Además, el componente principal de los filtros, la arena, se estima que deberá ser depurada de forma periódica. De este modo, los cartuchos de los filtros propuestos serán sustituidos de forma periódica, dependiendo de varios factores tales como del régimen de carga de los sistemas de limpieza de los gases de escape en términos de metros cúbicos de agua residual de lavado generada por hora, calidad del fuelóleo empleado en la combustión de los motores (contenido de azufre), calidad de la combustión y ausencia de formación de hollín principalmente. Cabe señalar que, como se ha analizado en el apartado 4.2. del Capítulo IV de esta tesis, cuanto mayor sea el contenido de azufre en el fuelóleo consumido por el motor de un buque equipado con un sistema de limpieza de los gases de escape, mayor será la acidez de las aguas residuales de lavado generadas durante el proceso de desulfuración de los gases de escape.

Con relación a la sustitución de los filtros de arena propuestos, la operativa a bordo de los buques consistirá básicamente en la apertura de las bandejas de filtros indicadas en el apartado 4.3 (Capítulo IV) de la presente investigación, volcando su contenido (cartuchos de filtros) de forma gradual sobre los sacos tipo “big bags” que estarán dispuestos bajo la bandeja de filtros a tal fin para su uso, extracción y posterior entrega a las instalaciones de recepción de residuos en los puertos. Por lo tanto, se dispondrá a bordo de cartuchos suficientes para la sustitución de los filtros del sistema que requieran ser renovados.

Los cartuchos serán diseñados con unas dimensiones y un peso que permita el manejo de estos y su colocación sobre la bandeja de filtros por un solo operario.

Las instalaciones de recepción de residuos autorizadas en los puertos que recojan los cartuchos utilizados que entreguen los buques, los transportarán con todas las medidas de seguridad necesarias dada su naturaleza ya que contendrán entre otros, metales pesados, hidrocarburos policíclicos aromáticos y restos de agua mezclada con componentes sólidos como cenizas y hollín. Asimismo, los buques deberán seguir los procedimientos de seguridad adecuados los cuales deberán formar parte de su Manual de Gestión de la Seguridad (ISM), proporcionando la compañía los elementos de protección individual adecuados, de modo que se garantice que en ningún caso puede el operario de las bandejas de filtros citadas, quedar expuesto a ninguna clase de riesgo asociado a la manipulación de los cartuchos.

Como se ha indicado supra, los cartuchos utilizados serán transportados hasta la planta de tratamiento correspondiente por la instalación de recogida autorizada. Una vez allí, ambos tipos de cartuchos, los que contienen arena y carbonato de sodio (Na_2CO_3) y los que contienen únicamente arena serán vaciados para su posterior lavado con agua a presión y las técnicas que sean más adecuadas para separar de los granos de arena los restos de partículas sólidas adheridas procedentes del proceso de filtrado de las aguas residuales de los EGCS. Una vez obtenida la arena libre de residuos, esta será sometida al proceso de carbonatación para devolverle a la arena sus propiedades naturales y que son de gran importancia en el proceso de filtrado que se propone.

Este proceso comprendería el lavado de arena con agua y la adición de determinados carbonatos como el carbonato de calcio (CaCO_3) y el bicarbonato de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ en las concentraciones adecuadas.

Una vez obtenida la arena limpia y con la alcalinidad propia de su estado natural, ésta será envasada de nuevo en los cartuchos, empleando para ello el material más adecuado. En este caso se ha utilizado tela de arpillera o yute, que se trata de una fibra natural muy empleada genéricamente en filtros y sistemas de depuración. Lógicamente se podrían emplear otros materiales naturales o incluso sintéticos más adecuados y con mayor durabilidad y resistencia que las fibras naturales, para fabricar los cartuchos descritos en la presente investigación.

Finalmente, los buques equipados con un sistema de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto que a su vez cuente la instalación del sistema propuesto, deberán ser suministrados con los cartuchos suficientes y adecuados para el mantenimiento del sistema en condiciones óptimas. Se trataría de añadir un eslabón más en la cadena que gira alrededor de la operativa de los buques, en este caso de los buques equipados con un EGCS de ciclo abierto.



Figura 87. Vista del proceso de recogida de residuos sólidos y líquidos generados a bordo de un buque tipo crucero. Fuente el Autor

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

En el presente Capítulo se exponen las conclusiones alcanzadas tras finalizar la presente investigación. Se van a analizar las diversas fases por las que esta tesis ha ido avanzando, la consecución de los objetivos fijados en un inicio, la previsión inicial de resultados y los resultados obtenidos, la necesidad de mejorar los sistemas de limpieza de los gases de escape, reflexiones sobre el sistema propuesto y sugerencias para futuras investigaciones en el ámbito de los EGCS.

5.1. Conclusiones sobre la propuesta de investigación

Esta tesis se ha centrado en analizar el impacto de las descargas de las aguas de lavado residuales procedentes de los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto sobre el nivel de acidez del agua de la dársena sur del puerto de Barcelona. Se propuso esta investigación como resultado de observar el funcionamiento de estos sistemas a bordo de los buques y la elevada acidez que puede llegar a alcanzar el agua residual que es descargada una vez se ha completado el ciclo de depuración de los gases de escape.

Los sistemas de limpieza de los gases de escape instalados a bordo de los buques y que operen en ciclo abierto, representan desde un punto de vista de la protección del medio marino un riesgo desconocido puesto que no existen actualmente estudios suficientes que demuestren fehacientemente el impacto que pueden llegar a tener las descargas del agua de lavado sobre el ecosistema marino. Por este motivo, se entiende como necesaria la investigación realizada puesto que analiza el comportamiento de uno de los parámetros del agua de lavado regulados por la Resolución MEPC.340(77) [13], el nivel de acidez (pH). En esta tesis se analiza su evolución a tiempo real y a corto plazo en un escenario del puerto de Barcelona como ha sido la dársena sur, en el que la renovación de sus aguas es bastante más reducida en comparación con otras zonas del puerto que se encuentran mucho más expuestas.

Esta investigación se estima que ha supuesto un punto de inflexión en la operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape. Esto se debe a que en esta tesis y de forma adicional a la detección temprana del cambio de tendencia en el nivel de acidez de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona se propone una mejora en el funcionamiento de estos sistemas orientada a mitigar los efectos causados por las aguas residuales de los EGCS. Asimismo, esta investigación debe ser un punto de partida para seguir analizando el impacto de las aguas residuales descargadas por estos sistemas sobre varios parámetros del agua de mar que ni han podido ser investigados en esta tesis ni probablemente se limiten únicamente a los parámetros del agua de lavado regulados por las Directrices de 2021 sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape a través de la Resolución del Comité de Protección del Medio Marino de la OMI -MEPC.340(77) [13].

5.2. Conclusiones de los resultados obtenidos y objetivos alcanzados

Como se ha analizado en el apartado 3.4 del Capítulo III de esta tesis, tanto los resultados obtenidos por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) como los obtenidos a través del equipo medidor adquirido para la investigación, muestran una ligera tendencia a la acidificación de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona.

En el Capítulo II de esta investigación se han descrito los diversos tipos de sistemas de limpieza de los gases de escape instalados a bordo de los buques, entre ellos el de ciclo abierto y se ha analizado detenidamente la problemática asociada al uso de estos. Como se ha observado durante el desarrollo del Capítulo II, en el proceso de depuración de los gases de escape a través de los EGCS se produce la generación de ácido sulfúrico y de ácido sulfuroso. Estos dos ácidos, en los sistemas que operen en ciclo abierto, son descargados junto con el resto de las aguas residuales al exterior.

De esta tesis no se puede llegar a concluir si la tendencia observada en el nivel de acidez de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona se debe únicamente a las descargas de aguas residuales procedentes de buques que empleen los sistemas de limpieza de los gases de escape en modo ciclo abierto. No obstante, sí se puede concluir que las descargas de las aguas residuales generadas por los sistemas de limpieza de los gases de escape tienen un componente ácido que no solo contribuye a la acidificación de las aguas portuarias, sino que puede acelerar el proceso de reducción en la concentración de carbonatos y bicarbonatos presentes en el agua. Cabe recordar que, la presencia de carbonatos y bicarbonatos le otorga al agua la capacidad de neutralizar ácidos y la ausencia o reducción significativa de estos se estima que podría llegar a provocar una caída drástica del pH del agua.

5.3. Conclusiones de la investigación

Que los sistemas de limpieza de los gases de escape que operan en modo ciclo abierto tienen un impacto negativo en la calidad de las aguas sobre las que se vierte el residuo acuoso generado es una realidad. Este es el principal motivo por el que cada vez más países y regiones costeras de todo el mundo han establecido fuertes restricciones en el uso de estos sistemas o directamente han prohibido su uso en aguas interiores, zonas portuarias (incluyendo las zonas de fondeo) y aguas marítimas bajo su jurisdicción.

Esta investigación ha tenido por objeto el estudio del impacto que tiene la descarga de las aguas residuales generadas por los sistemas de limpieza de los gases de escape que operan en ciclo abierto sobre el nivel de acidez de las aguas de la dársena sur del puerto de Barcelona. Afortunadamente no se ha observado que en la actualidad exista un riesgo inmediato de sufrir una gran variación en el pH de estas aguas. Sin embargo, sí se ha detectado que existe una ligera tendencia hacia la acidificación de las aguas. Durante el desarrollo de esta tesis, se ha observado la existencia de varios casos de vertidos de aguas residuales mezcladas con restos de hollín y combustible que no ha sido consumido durante el proceso de combustión y que ha sido arrastrado desde la torre de lavado hasta su descarga al exterior, contaminando las aguas circundantes al buque.

En esta tesis se demuestra que el sistema que se propone no solo sería capaz de devolver a las aguas residuales de lavado un pH más cercano al del agua de mar en estado natural, sino que reduciría en gran medida los episodios de vertido de residuos como los que se citan supra.

Asimismo, se estima que el sistema de filtrado que se propone contribuiría a reducir la concentración de otros residuos presentes en el agua residual de lavado de los EGCS como son los hidrocarburos aromáticos policíclicos y los metales pesados.

Se concluye que se ha alcanzado el objetivo de esta investigación analizando en profundidad los sistemas de limpieza de los gases de escape, observando el impacto que generan sobre el nivel de acidez de las aguas circundantes y aportando una propuesta de mejora que sería viable en todos los aspectos.

5.4. Reflexiones para futuras investigaciones

Los sistemas de limpieza de los gases de escape de ciclo abierto y desde un punto de vista operativo, requieren ser mejorados si se pretende que perdure su uso a bordo de los buques. Como se ha comentado en varias ocasiones, actualmente el número de países que prohíben específicamente el uso de los sistemas de limpieza de los gases de escape que operen en modo ciclo abierto va en aumento. Y esta tendencia creciente puede llegar a convertirse, desde el punto de vista del Autor, en un requisito internacional que pudiera llegar a materializarse a través de una hipotética Resolución de la OMI y posterior enmienda del Anexo VI del Convenio MARPOL. Las dos anteriores estarían basadas en estudios previos que pudieran demostrar fehacientemente el impacto negativo del uso de los EGCS que operen en ciclo abierto sobre las aguas circundantes y podrían suponer la prohibición del uso de los EGCS en modo ciclo abierto.

Se debe seguir trabajando en la investigación sobre el impacto que actualmente puedan estar causando las descargas del agua residual de lavado de los sistemas de limpieza de los gases de escape que operen en modo ciclo abierto. No tiene sentido alguno aplicar una tecnología específicamente diseñada para prevenir la contaminación atmosférica que posteriormente pueda estar causando de forma colateral una contaminación marina a largo plazo.

De la misma forma se debe seguir investigando de qué modo pueden los sistemas de limpieza de los gases de escape ser mejorados, garantizando el cumplimiento de la normativa internacional y sin comprometer el medio ambiente marino.

Uno de los aspectos positivos que ciertamente tiene la tecnología es el hecho de que siempre puede ser mejorada y para el caso que nos ocupa, debe. Por este motivo el Autor entiende que se debe seguir investigando, trabajando y mejorando la operativa de los sistemas de limpieza de los gases de escape instalados a bordo de los buques para convertirlos en herramientas que garanticen su cometido, pero sin poner en riesgo la integridad del medio ambiente marino.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IMO, Convenio internacional para prevenir la contaminación de los buques, 2021-1 ed., 2021.
- [2] IMO, «Anexo VI. Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques,» 2021-1 ed., 2021.
- [3] IMO, «Regla 5.5 Sistemas de gas inerte,» de *Capítulo II-2 - Construcción-Prevención, detección y extinción de incendios*, 2020-1 ed., 2020, p. Regla 5.5.1.1.
- [4] IMO, «Capítulo II-2 - Construcción-Prevención, detección y extinción de incendios,» de *Convenio Internacional Para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar*, 2020-1 ed., 2020.
- [5] IMO, Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar, 2020-1 ed., 2020.
- [6] IMO, «Regla 33. Prescripciones relativas al lavado con crudos,» de *Anexo I. Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos*, 2021-1 ed., 2021.
- [7] IMO, «Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos,» de *Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques*, 2021-1 ed., 2021.
- [8] IMO, «Regla 4. Equivalentes,» de *Anexo VI. Reglas para prevenir la contaminación atmosférica causada por los buques*, 2021-1 ed., 2021.
- [9] M. IMO, MEPC.176(58) Enmiendas al Anexo del Protocolo de 1997 que enmienda el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978 (Anexo VI revisado del Convenio MARPOL), 2008.
- [10] IMO, «Regla 14. Óxidos de azufre y materia particulada,» de *Reglas para prevenir la contaminación atmosférica causada por los buques*, 2021-1 ed., 2021.
- [11] B. V. -. M. & Offshore, «Marine & Offshore,» Bureau Veritas, 30 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/magazine/client-corner-your-questions-about-scrubbers-answered>. [Último acceso: 21 Enero 2021].
- [12] M. IMO, MEPC.259(68) - Directrices de 2015 para los sistemas de limpieza de los gases de escape, 2015 ed., 2015.
- [13] M. IMO, MEPC.340(77) - Directrices de 2021 para los sistemas de limpieza de los gases de escape, 2021 ed., 2021.
- [14] IMO, «Anexo I. Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos,» de *Convenio MARPOL*, 2021-1 ed., 2021.

- [15] IMO, «Anexo II. Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel,» de *Convenio MARPOL*, 2021-1 ed., 2021.
- [16] IMO, «Anexo III. Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos,» de *Convenio MARPOL*, 2021-1 ed., 2021.
- [17] IMO, «Anexo IV. Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques,» de *Convenio MARPOL*, 2021-1 ed., 2021.
- [18] IMO, «Anexo V. Reglas para prevenir la contaminación por las basuras de los buques,» de *Convenio MARPOL*, 2021-1 ed., 2021.
- [19] IMO, «Protocolo de 1997 que enmienda al Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques,» de *Convenio MARPOL*, 1997 ed., 1997.
- [20] IMO, «Regla 13. Óxidos de nitrógeno,» de *Anexo VI. Reglas para prevenir la Contaminación atmosférica causada por los buques*, 2021-1 ed., 2021.
- [21] M. IMO, MEPC.184(59) - Directrices sobre los sistemas de limpieza de los gases de escape, 2009, 2009 ed., 2009.
- [22] H. Shipping, «Hellenic Shipping News,» 7 Abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.hellenicshippingnews.com/record-share-of-newbuild-orders-alternative-fuelled-green-technology-uptake/>. [Último acceso: 1 Junio 2022].
- [23] Shipandbunker, «Shipandbunker.com,» 31 Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.shipandbunker.com/>. [Último acceso: 31 Agosto 2022].
- [24] M. E. LTD, «martenaengineering.com,» 10 Enero 2022. [En línea]. Available: [http://www.martenaengineering.com/martena/index.php?option=com_content&task=view&id=129&Itemid=340#myGallery1-picture\(2\)](http://www.martenaengineering.com/martena/index.php?option=com_content&task=view&id=129&Itemid=340#myGallery1-picture(2)). [Último acceso: 15 Marzo 2022].
- [25] FreightWaves, «FreightWaves,» 21 Julio 2022. [En línea]. Available: [https://www.freightwaves.com/news/ships-that-scrub-emissions-earn-twice-as-much-as-those-that-dont#:~:text=The%20exception%3A%20Ships%20can%20install,sulfur%20fuel%20oil%20\(HSFO\)..](https://www.freightwaves.com/news/ships-that-scrub-emissions-earn-twice-as-much-as-those-that-dont#:~:text=The%20exception%3A%20Ships%20can%20install,sulfur%20fuel%20oil%20(HSFO)..) [Último acceso: 1 Agosto 2022].
- [26] HEMPEL, «HEMPEL, trust is earned,» 10 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.hempel.com/markets/marine/technical-articles/the-scrubber-dilemma-and-the-impact-of-selecting-the-optimum-hull-coating#:~:text=Installing%20a%20scrubber%20is%20an,to%208%20million%20per%20ves sel..> [Último acceso: 2 Agosto 2022].

- [27] Turner, Dr Ida-Maja Karle and Prof. David, «Seawater Scrubbing reduction of SO_x emissions from ship exhausts,» *The Alliance for Global Sustainability (AGS)*, nº 978-91-976534-1-1, p. 11, 2007.
- [28] Jiang, LQ., Carter, B.R., Feely, R.A. et al. «Surface Ocean pH and buffer capacity: past, present and future.,» *Nature.com - Scientific report 9*, vol. 9, nº 18624 (19), pp. 3-4, 9 Diciembre 2019.
- [29] INSST (Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo), «insst.es,» 2018. [En línea]. Available: https://www.insst.es/documentacion/colecciones-tecnicas/fisq?p_p_id=es_insst_buscadores_web_BuscadoresMVCPortlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&es_insst_buscadores_web_BuscadoresMVCPortlet_javax.portlet.action=search&p_auth=pjP1q3lo. [Último acceso: 22 Septiembre 2021].
- [30] Departamento Técnico, rb Bertomeu S.L., «RB-7 EL FUELÓLEO Y SUS EFECTOS CORROSIVOS EN LA COMBUSTIÓN INDUSTRIAL,» 1997. [En línea]. Available: https://www.rbbertomeu.es/html/docs/H-1_Corrosion_fueloil.htm. [Último acceso: 5 Octubre 2021].
- [31] Shu, Shih-Tung, «uliege.be,» Febrero 2013. [En línea]. Available: <https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/6127/1/Shu%20Shih-Tung%20%28EMShip%20Thesis%20Feb%202013%29%20URO.pdf>. [Último acceso: 10 Noviembre 2021].
- [32] quifransa, «quifransa.es,» [En línea]. Available: <https://quifransa.com/policloruro-de-aluminio/>. [Último acceso: 2 Noviembre 2021].
- [33] J. Romo García, «Uso de EGCS en aguas portuarias. Evaluación del impacto en aguas marinas,» Barcelona, 2022.
- [34] N. P&I, «nepi.com,» 2022. [En línea]. Available: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Industry%20News_%20No%20Scrubs_%20Countries%20and%20Ports%20where%20Restrictions%20on%20EGCS%20Discharges%20Apply%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Industry%20News_%20No%20Scrubs_%20Countries%20and%20Ports%20where%20Restrictions%20on%20EGCS%20Discharges%20Apply%20(1).pdf). [Último acceso: 2 Diciembre 2022].
- [35] M. IMO, MEPC, «Study report on analyses of water samples from exhaust gas cleaning systems,» 2018.
- [36] (XVPCA), Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica de Catalunya, «Anuari 2001 - Estadístics de pH de la pluja,» Barcelona, 2001.
- [37] S. S. Prapa Sohsalam, «Feasibility of using constructed wetland treatment for molasses wastewater treatment,» *ResearchGate*, p. 5, Septiembre 2008.
- [38] Autoritat Portuària de Barcelona, «Calidad de las Aguas y Sedimentos,» 2020.

- [39] Anke Schneider, Douglas W. R. Wallace, Arne Körtzinger, «Alkalinity of the Mediterranean Sea,» *AGUadvancing, earth and space science*, pp. 3-4, 11 Agosto 2007.
- [40] Iver W. Duedall, Peter K. Weyl I, «The partial equivalent volumes of salts in seawater,» *Association for the Sciences of Limnology and Oceanography*, pp. 7-8, 1 Abril 1967.
- [41] Quimica.es, «Quimica.es,» [En línea]. Available: https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%81cido_fuerte.html. [Último acceso: 15 Abril 2022].
- [42] Rakesh Parida, ab Sachin Ramesh Nambiar, b G. Naresh Reddyab and Santanab Giri, «Designing aromatic heterocyclic superacids in terms of Brønsted and Lewis perspectives,» *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020.
- [43] vadequimica, «www.vadequimica.com,» 1 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.vadequimica.com/blog/todos-los-articulos/aplicaciones-acido-sulfurico.html>. [Último acceso: 15 Abril 2022].
- [44] acidos.co, «acidos.co,» 2020. [En línea]. Available: <https://acidos.co/sulfuroso/>. [Último acceso: 15 Abril 2022].
- [45] Magdalena Mititelu, Gabriela Stanciu, Doina Drăgănescu, Ana Corina Ioniță, Sorinel Marius Neacșu, Mihaela Dinu, Raluca-Ioana Stefan-van Staden and Elena Moroșan, «Mussel Shells, a Valuable Calcium Resource for the Pharmaceutical Industry,» *MDPI*, pp. 1-3, 24 Diciembre 2021.

ANEXO I. Presupuesto análisis muestras IDAEA



Instituto de Diagnóstico Ambiental
y Estudios del Agua (IDAEA)
CONSEJO SUPERIOR
DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Presupuesto para el análisis de pH en muestras de agua.

A quien corresponda,

se adjunta presupuesto para el análisis de pH en muestras de agua (3 muestras al mes durante 24 meses), a realizar en la Unidad de Química del Agua, Medio Ambiente y Alimentos (ENFOCHEM) del Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) de la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Coste del análisis por muestra: 20 Euros

Número de muestras: 72

Total = 1.440 Euros (IVA no incluido)

Barcelona, 24 de Noviembre de 2020



Miren López de Alda
Water and Soil Quality Research Group
Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC)
C/ Jordi Girona 18-26, 08034 Barcelona
Spain
Tel. +34 934006134
Fax +34 932045904

 C/ Jordi Girona, 18
08034 Barcelona, España
Tel. 93 400 61 00
Fax.: 93 204 59 04

ANEXO II. Informes IDAEA



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la dársena Sur del Puerto de Barcelona

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	05/01/2021
Día de recepción de la muestra	05/01/2021
Día de análisis	05/01/2021
pH (triplicado)	8.39
Calibración (r^2)	90%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	01/03/2021
Día de análisis	01/03/2021
pH (triplicado)	7.95
Calibración (r²)	98.3%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	08/03/2021
Día de análisis	08/03/2021
pH (triplicado)	7.96
Calibración (r²)	97.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	11/03/2021
Día de análisis	11/03/2021
pH (triplicado)	8.04
Calibración (r²)	97.7%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	16/03/2021
Día de análisis	17/03/2021
pH (triplicado)	8.10
Calibración (r^2)	97.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	23/03/2021
Día de análisis	23/03/2021
pH (triplicado)	8.13
Calibración (r²)	97.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	25/03/2021
Día de análisis	25/03/2021
pH (triplicado)	8.10
Calibración (r²)	97.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	15/04/2021
Día de análisis	15/04/2021
pH (triplicado)	8.09
Calibración (r^2)	97.5%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara y Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	29/04/2021
Día de análisis	29/04/2021
pH (triplicado)	8.03
Calibración (r^2)	97.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara y Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	06/05/2021
Día de análisis	06/05/2021
pH (triplicado)	8.03
Calibración (r^2)	97.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara y Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	13/05/2021
Día de análisis	13/05/2021
pH (triplicado)	8.07
Calibración (r²)	96.5%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara y Rocio Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	27/05/2021
Día de análisis	28/05/2021
pH (triplicado)	8.19
Calibración (r^2)	95.7%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara y Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	03/06/2021
Día de análisis	03/06/2021
pH (triplicado)	8.07
Calibración (r^2)	99.3%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	28/06/2021
Día de análisis	28/06/2021
pH (triplicado)	8.07
Calibración (r²)	98.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	08/07/2021
Día de análisis	08/07/2021
pH (triplicado)	8.10
Calibración (r²)	97.1%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	21/07/2021
Día de análisis	21/07/2021
pH (triplicado)	8.08
Calibración (r²)	97%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	29/07/2021
Día de análisis	29/07/2021
pH (triplicado)	8.12
Calibración (r²)	96.4%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	01/09/2021
Día de análisis	01/09/2021
pH (triplicado)	8.09
Calibración (r²)	95.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	09/09/2021
Día de análisis	09/09/2021
pH (triplicado)	8.17
Calibración (r²)	95.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	16/09/2021
Día de análisis	16/09/2021
pH (triplicado)	8.00
Calibración (r²)	97.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	07/10/2021
Día de análisis	07/10/2021
pH (triplicado)	7.97
Calibración (r^2)	97.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	14/10/2021
Día de análisis	14/10/2021
pH (triplicado)	8.06
Calibración (r²)	98.6%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	28/10/2021
Día de análisis	28/10/2021
pH (triplicado)	8.11
Calibración (r^2)	98.4%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	09/11/2021
Día de análisis	09/11/2021
pH (triplicado)	8.08
Calibración (r^2)	98.1%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	18/11/2021
Día de análisis	18/11/2021
pH (triplicado)	8.1 ± 0.1
Calibración (r²)	97.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	30/11/2021
Día de análisis	30/11/2021
pH (triplicado)	8.05
Calibración (r²)	98%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Seal number: 513635

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	15/12/2021
Día de análisis	15/12/2021
pH (triplicado)	8.10 ± 0.01
Calibración (r ²)	98.3%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	10/01/2022
Día de análisis	10/01/2022
pH (triplicado)	8.10
Calibración (r²)	97.6%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	12/01/2022
Día de análisis	12/01/2022
pH (triplicado)	8.07
Calibración (r^2)	97.6%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	19/01/2022
Día de análisis	19/01/2022
pH (triplicado)	8.08
Calibración (r²)	97.3%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	27/01/2022
Día de análisis	27/01/2022
pH (triplicado)	8.20
Calibración (r^2)	97.3%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	03/02/2022
Día de análisis	03/02/2022
pH (triplicado)	8.26 ± 0.03
Calibración (r ²)	96.7%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	09/02/2022
Día de análisis	09/02/2022
pH (triplicado)	8.21
Calibración (r²)	97.4%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	17/02/2022
Día de análisis	17/02/2022
pH (triplicado)	8.16
Calibración (r^2)	97.4%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	24/02/2022
Día de análisis	24/02/2022
pH (triplicado)	8.27
Calibración (r²)	96.4%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	08/03/2022
Día de análisis	09/03/2022
pH (triplicado)	8.07
Calibración (r²)	98.7%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	10/03/2022
Día de análisis	11/03/2022
pH (triplicado)	8.05
Calibración (r^2)	98.6%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	21/03/2022
Día de análisis	21/03/2022
pH (triplicado)	8.00
Calibración (r^2)	98.6%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	23/03/2022
Día de análisis	23/03/2022
pH (triplicado)	7.97
Calibración (r^2)	98.6%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	09/05/2022
Día de análisis	09/05/2022
pH (triplicado)	8.03
Calibración (r^2)	97.6%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): 513604

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	12/05/2022
Día de análisis	12/05/2022
pH (triplicado)	8.29 ± 0.01
Calibración (r ²)	98.1%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dana Orlando Véliz

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	23/05/2022
Día de análisis	23/05/2022
pH (triplicado)	8.07
Calibración (r^2)	97.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	26/05/2022
Día de análisis	26/05/2022
pH (triplicado)	8.03
Calibración (r^2)	97.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	07/06/2022
Día de análisis	07/06/2022
pH (triplicado)	8.07
Calibración (r^2)	97.6%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): 513594

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	16/06/2022
Día de análisis	16/06/2022
pH (triplicado)	8,03 ± 0,01
Calibración (r ²)	97.3%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	20/06/2022
Día de análisis	20/06/2022
pH (triplicado)	8.08
Calibración (r^2)	97.6%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13581

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	04/07/2022
Día de análisis	04/07/2022
pH (triplicado)	8,03 ± 0,01
Calibración (r²)	97.1%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13583

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	07/07/2022
Día de análisis	07/07/2022
pH (triplicado)	8,09 ± 0,01
Calibración (r ²)	97.1%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13585

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	11/07/2022
Día de análisis	12/07/2022
pH (triplicado)	8,13 ± 0,01
Calibración (r ²)	96.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	19/07/2022
Día de análisis	19/07/2022
pH (triplicado)	8.07
Calibración (r^2)	98.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13589

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	25/07/2022
Día de análisis	25/07/2022
pH (triplicado)	8,10 ± 0,01
Calibración (r ²)	98.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	27/07/2022
Día de análisis	27/07/2022
pH (triplicado)	8.07
Calibración (r^2)	98.8%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13571

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	02/08/2022
Día de análisis	02/08/2022
pH (triplicado)	8,07 ± 0,02
Calibración (r ²)	96.1%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	29/08/2022
Día de análisis	29/08/2022
pH (triplicado)	7.98
Calibración (r^2)	94.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dana Pierina Orlando Véliz

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	01/09/2022
Día de análisis	01/09/2022
pH (triplicado)	8.05
Calibración (r^2)	95.1%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Identificador de muestra: S13579

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dana Pierina Orlando Véliz

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	05/09/2022
Día de análisis	05/09/2022
pH (triplicado)	8.14
Calibración (r^2)	95.0%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Identificador de muestra: S3561

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dana Pierina Orlando Véliz

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	12/09/2022
Día de análisis	12/09/2022
pH (triplicado)	8.15
Calibración (r^2)	95.0%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Identificador de muestra: S13563

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dana Pierina Orlando Véliz

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	14/09/2022
Día de análisis	14/09/2022
pH (triplicado) $\pm \sigma$	8.11 \pm 0.01
Calibración (r^2)	95.0%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	21/09/2022
Día de análisis	21/09/2022
pH (triplicado)	8.06
Calibración (r²)	95.0%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	27/09/2022
Día de análisis	27/09/2022
pH (triplicado)	8.03
Calibración (r²)	95.0%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	05/10/2022
Día de análisis	05/10/2022
pH (triplicado)	8.01
Calibración (r^2)	94.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13501

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	25/10/2022
Día de análisis	25/10/2022
pH (triplicado)	8,12 ± 0,01
Calibración (r ²)	94.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Identificador de muestra: S13504

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dana Pierina Orlando Véliz

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	10/11/2022
Día de análisis	10/11/2022
pH (triplicado) $\pm \sigma$	8.13 \pm 0.01
Calibración (r^2)	94.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Identificador de muestra: S13505

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dana Pierina Orlando Véliz

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	17/11/2022
Día de análisis	17/11/2022
pH (triplicado) $\pm \sigma$	8.07 \pm 0.01
Calibración (r^2)	94.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Identificador de muestra: S13551

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dana Pierina Orlando Véliz

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	15/12/2022
Día de análisis	15/12/2022
pH (triplicado) $\pm \sigma$	8.12 \pm 0.01
Calibración (r^2)	94.2%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Manuel García Vara

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	20/12/2022
Día de análisis	20/12/2022
pH (triplicado)	8.08
Calibración (r²)	94.9%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13554

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	02/01/2023
Día de análisis	02/01/2023
pH (triplicado)	8,05 ± 0,01
Calibración (r ²)	95.2%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13556

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	05/01/2023
Día de análisis	05/01/2023
pH (triplicado)	8,10 ± 0,01
Calibración (r ²)	94.2%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13558

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	10/01/2023
Día de análisis	10/01/2023
pH (triplicado)	8,13 ± 0,01
Calibración (r ²)	94.2%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13511

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Día de muestreo	11/01/2023
Día de análisis	11/01/2023
pH (triplicado)	8,15 ± 0,01
Calibración (r ²)	94.4%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda



IDAEA-CSIC

SHORT REPORT

Investigadora responsable: Dra. Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la Dársena Sur del Puerto de Barcelona.

Número de muestra (seal number): S13513

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analista: Dra. Rocío Inés Bonansea

Instrumentación: *Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode*

Día de muestreo	12/01/2023
Día de análisis	12/01/2023
pH (triplicado)	8,11 ± 0,01
Calibración (r ²)	94.4%

Autorizado por la investigadora responsable



Fdo.: Miren López de Alda

ANEXO III. Informe final IDAEA



IDAEA-CSIC

FINAL REPORT

Investigadora responsable: Miren López de Alda

Estudio: Análisis de pH de agua portuaria de los muelles 30A-30B-30C de la dársena Sur del Puerto de Barcelona

Organismo: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

Instituto: Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA)

Departamento/Unidad: Environmental Chemistry / Water, Environmental and Food Chemistry Unit (ENFOCHEM)

Analistas: Manuel García Vara, Rocío Inés Bonansea, Dana Pierina Orlando Véliz

Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC triode refillable electrode

Resumen final

La tabla adjunta muestra los resultados obtenidos en el análisis de pH realizado por triplicado en un total de 72 muestras de agua del Puerto de Barcelona recogidas entre los días 5/1/2021 y 12/1/2023. En todos los casos, las muestras las trajo al laboratorio del IDAEA D. Nelson Gustavo Díaz Delgado.

Autorizado por la investigadora responsable

Fdo.: Miren López de Alda

Tabla. Relación de muestras analizadas por el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA) – CSIC para la tesis doctoral de D. Nelson Gustavo Díaz Delgado.

Fecha de análisis de la muestra	Fuente / Identificación de la muestra	Resultados obtenidos pH Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC
05/01/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,39
01/03/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	7,95
08/03/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	7,96
11/03/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,04
16/03/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,10
23/03/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,13
25/03/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,10
15/04/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,09
29/04/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,03
06/05/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,03
13/05/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
28/05/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,19
03/06/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
28/06/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
08/07/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,10
21/07/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,08
29/07/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,12
01/09/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,09
09/09/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,17
16/09/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,00
07/10/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	7,97
14/10/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,06
28/10/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,11
09/11/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,08
18/11/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,10
30/11/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,05
15/12/2021	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,12
10/01/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,10
12/01/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
19/01/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,08
27/01/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,20
03/02/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,26
09/02/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,21
17/02/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,16
24/02/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,27
08/03/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
11/03/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,05

Fecha de análisis de la muestra	Fuente / Identificación de la muestra	Resultados obtenidos pH Instrumentación: Orion Star A215 pHmeter, ROSS Ultra pH/ATC
21/03/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,00
23/03/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	7,97
09/05/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,03
12/05/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,29
23/05/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
26/05/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,03
07/06/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
16/06/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,03
20/06/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,08
04/07/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,03
07/07/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,09
11/07/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,13
19/07/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
25/07/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,10
27/07/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
02/08/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
29/08/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	7,98
01/09/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,05
05/09/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,14
12/09/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,15
14/09/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,11
21/09/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,06
27/09/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,03
05/10/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,01
25/10/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,12
10/11/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,13
17/11/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,07
15/12/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,12
20/12/2022	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,08
02/01/2023	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,05
05/01/2023	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,10
10/01/2023	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,13
11/01/2023	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,15
12/01/2023	Puerto de Barcelona - Dársena Sur - muelles 30A, 30B, 30C	8,11

ANEXO IV. Modelo de acta de toma de muestras empleado

