



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO  
ADAPTACIÓN DE BUQUE A NUEVAS FUNCIONES

**Autor: Rodrigo Vecino de Haro**

Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

Mayo 2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**ADAPTACIÓN DE BUQUE A NUEVAS FUNCIONES**  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es  
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada  
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: RODRIGO VECINO DE HARO Fecha: 15/05/2022

Rodrigo Vecino

### Autorizada la entrega del proyecto

## EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: ÍÑIGO SANZ FERNANDEZ

Fecha: 15/ 05/ 2022

*[Handwritten signature]*





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO  
ADAPTACIÓN DE BUQUE A NUEVAS FUNCIONES

**Autor: Rodrigo Vecino de Haro**

Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

Mayo de 2022



## **Agradecimientos**

Quisiera dedicar este trabajo de fin de grado a todas las personas que me han ayudado a realizar el trabajo con su tiempo y esfuerzo. Especialmente quisiera mencionar al equipo de Seaplace con el que he trabajado, a Brian Helenbrook quien me ayudó a programar en ANSYS, y a mi director Íñigo Sanz Fernández que siempre ha estado a mi disposición para ayudarme.

# **ADAPTACIÓN DE BUQUE A NUEVAS FUNCIONES**

**Autor:** Rodrigo Vecino de Haro

Director: Íñigo Sanz Fernández

Entidad Colaboradora: Seaplace

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Se quiere estudiar si el buque FPSO Petrojarl Foinaven puede ser convertido en un buque “shuttle tanker”, un petrolero más convencional que tan sólo transporta el crudo desde el punto de extracción del crudo en el océano hasta la refinería, descargándolo allí. Para ello se ha estudiado el sistema de tuberías y bombas de los tanques de crudo para poder descargar el crudo en un tiempo menor al tiempo mínimo establecido por las refinerías.

Posteriormente, debido a que el crudo no puede ser bombeado a temperaturas menores de 40°C, se ha estudiado la transmisión de calor del crudo con su entorno durante el traslado desde el punto de extracción donde se encuentra ahora mismo el FPSO, Este de Escocia, hasta la refinería en Rotterdam.

Debido a la complejidad de las ecuaciones para el cálculo de la temperatura del crudo, se ha desarrollado un modelo en ANSYS. Asimismo, se ha realizado un ejercicio económico de la viabilidad del proyecto de los próximos 15 años. Por último, se ha realizado un estudio medioambiental del buque y se ha documentado la prevención de riesgos laborales.

Tras la finalización del proyecto se ha concluido que el buque FPSO Pretojarl Foinaven puede ser convertido a buque shuttle tanker, puesto que el crudo no desciende de 40°C. Además, en el ejercicio económico realizado de los próximos 15 años de la conversión del buque se ha determinado que la conversión del buque FPSO a un buque shuttle tanker supone un mayor retorno sobre los ingresos que el caso de comprar un buque shuttle tanker.

**Palabras clave:** FPSO, shuttle tanker, transmisión de calor, crudo, bomba hidráulica, conversión, buque.

## **1. Introducción**

El buque FPSO (Unidad flotante de Producción, almacenamiento y transferencia) Petrojarl Foinaven fue diseñado en los años 90 para establecerse durante 25 años en un yacimiento petrolífero, tratando y almacenando el crudo. Sin embargo, a pesar del alto precio del barril de los años 2000 no se construyeron muchas unidades debido a la gran crisis económica.

Un buque “shuttle tanker” es un petrolero más convencional cuya función es transportar el crudo desde el punto de extracción del crudo en el océano hasta la refinería, descargándolo allí.

## **2. Definición del proyecto y metodología de trabajo**

Se quiere estudiar si el buque FPSO Petrojarl Foinaven puede ser convertido en un buque “shuttle tanker”. Para ello se ha estudiado el sistema de tuberías y bombas de los tanques de crudo para poder descargar el crudo en un tiempo menor al tiempo mínimo establecido por las refinerías.

Posteriormente, debido a que el crudo no puede ser bombeado a temperaturas menores de 40°C, se ha estudiado la transmisión de calor del crudo con su entorno durante el traslado desde el punto de extracción donde se encuentra ahora mismo el FPSO, Este de Escocia, hasta la refinería en Rotterdam.

Debido a la complejidad de las ecuaciones para el cálculo de la temperatura del crudo, se ha desarrollado un modelo en ANSYS. El problema ha sido resuelto con dos métodos distintos: Estableciendo la conductividad térmica a cada elemento que rodea el tanque de crudo; Calculando el coeficiente de Transferencia de Calor equivalente.

Asimismo, se ha realizado un ejercicio económico de la viabilidad del proyecto de los próximos 15 años. Para realizar este ejercicio se ha calculado el número de tripulantes mínimos según las características del buque para predecir el coste anual en sueldos y seguros sociales. Además, también se han calculado los gastos por mantenimiento y reparaciones, aceite lubricante, compañía de seguros, provisiones, los gastos por trayecto, y los ingresos anuales previstos.

### 3. Descripción del buque

El buque FPSO en cuestión, Petrojarl Foinaven, dispone de un módulo de producción, al cual le es inyectado el crudo que procede de la perforación, su principal objetivo es la separación del crudo de restos sólidos; una torreta, que establece una entrada para los risers, tubos de la perforación, y para el sistema de fondeo; un sistema de bombeo, el cual es usado para poder bombear el crudo a lo largo del módulo de producción o para descargar el crudo. Además, consta de 5 tanques de acero, cuya principal función es el almacenamiento de crudo. Los tanques están situados de la siguiente disposición: El primer tanque (tanque 1) se encuentra en la proa (parte de delante) de la torreta; el resto de los tanques se encuentran en la popa (parte de detrás) de la torreta, en la crujía (centro). Además, de los 5 tanques ya mencionados, el buque dispone de 2 tanques de decantación paralelos entre ellos (d1 y d2), pertenecientes al módulo de producción, situados en la popa de los tanques de carga, ver ANEXO III: Plano de Disposición General II.

### 4. Resultados

Con los resultados obtenidos tras la finalización del proyecto se ha concluido que el buque FPSO Pretojarl Foinaven puede ser convertido a buque shuttle tanker. Tras calcular la temperatura final del crudo después del trayecto con dos métodos distintos, se puede comprobar en las tablas Tabla 16 y Tabla 19 que el crudo no llega a 40°C.

Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [°C]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [°C]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [°C]
1538	1.8371e+005	6.3912	61.133	54.574
1539	1.8383e+005	6.3913	61.135	54.574
1540	1.8395e+005	6.3914	61.136	54.574
1541	1.8407e+005	6.3915	61.138	54.574
1542	1.8419e+005	6.3916	61.139	54.574
1543	1.8431e+005	6.3917	61.141	54.574
1544	1.8443e+005	6.3918	61.143	54.574
1545	1.8455e+005	6.3919	61.144	54.574
1546	1.8467e+005	6.392	61.146	54.574
1547	1.8479e+005	6.3921	61.147	54.574
1548	1.8491e+005	6.3922	61.149	54.574
1549	1.85e+005	6.3922	61.15	54.574

Tabla 16: Temperatura final del Crudo, Método I - elaboración propia.

Tabular Data				
	Time [s]	✓ Minimum [°C]	✓ Maximum [°C]	✓ Average [°C]
1540	1.837e+005	-6.2268	61.474	54.494
1541	1.8382e+005	-6.2265	61.473	54.493
1542	1.8394e+005	-6.2263	61.472	54.493
1543	1.8406e+005	-6.226	61.47	54.493
1544	1.8418e+005	-6.2258	61.469	54.492
1545	1.843e+005	-6.2256	61.468	54.492
1546	1.8442e+005	-6.2253	61.466	54.492
1547	1.8454e+005	-6.2251	61.465	54.491
1548	1.8466e+005	-6.2249	61.463	54.491
1549	1.8478e+005	-6.2246	61.462	54.49
1550	1.849e+005	-6.2244	61.461	54.49
1551	1.85e+005	-6.2242	61.46	54.49

Tabla 19: Temperatura final del Crudo, Método II - elaboración propia.

Además, en el ejercicio económico realizado de los próximos 15 años de la conversión del buque se ha determinado que la conversión del buque FPSO a un buque shuttle tanker supone un mayor Retorno sobre los Ingresos que el caso de comprar de un buque shuttle tanker. Ver Tabla 28.

	Modificación buque	Compra buque
ROI	2.39	0.22

Tabla 28: Cálculo del Retorno sobre la Inversión - Elaboración propia.

Por último, se ha realizado un estudio medio ambiental del buque, estableciendo las principales causas de contaminación del buque. Además, se ha documentado las normas y cumplimientos que se deben cumplir establecidas establecidos por la Unión Europea, en las cuales se vela por la salud y seguridad de los tripulantes de barcos y buques.

## 5. Conclusiones

Este proyecto supone una gran aporte económico y medio ambiental. Como ya se ha mencionado el proyecto supone un gran aporte económico. Además, la realización de este proyecto también supone menos contaminación atmosférica ya que se reutiliza el caso del buque FPSO Petrojarl Foinaven.

## 6. Referencias

- [RGS18] Soutullo, R.G., “Buques FPSO y Posicionamiento Dinámico”, Universidad de Cádiz, Enero 2018. Obtenido de Wuolah:  
<https://www.wuolah.com/apuntes/Buques-FPSO-y-Posicionamiento-Dinamico4-Buques-FPSO-y-Posicionamiento-Din%C3%A1mico.pdf-727146>
- [CR12] Rodríguez, C., “FPSO Petrojarl Foinaven”, Abril 2012. Fuente de Tecnología Marítima:  
<http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2012/04/fpsو-petrojarl-foinaiven.html>
- [PB13] Boschee, P., “Tanker Conversions to FPSO Design and Integrity Management -Challenges”, Septiembre 2013. Fuente de Journal of Petroleum Technology: <https://jpt.spe.org/tanker-conversions-fpso-design-and-integrity-management-challenges>
- [GGD] Dimitris, G. G. and Emmanuel, S. S., “Conversion of an Oil tanker into FPSO: Strength and Reliability Assessment”. Fuente de CEMT:  
<https://www.cemt.eu/res/HIMT%20PAPER.pdf>
- [JRL] Dr. Rodrigo de Larrucea, Jaime., “Seguridad Marítima en Buques Tanques Petroleros (Oil Tankers Safety)”.  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/3020/Seguridad%20Buques%20Petroleros.pdf>
- [NS22] Sønnichsen, N., “Average annual OPEC crude oil price from 1960 to 2022”, 18 de Febrero de 2022. Fuente Statista:  
<https://www.statista.com/statistics/262858/change-in-opec-crude-oil-prices-since-1960/>

- “Cálculo de la Potencia de una bomba hidráulica”, 26 de Agosto de 2021. Fuente de Gargil: <https://gargil.es/calculo-de-la-potencia-de-una-bomba-hidraulica>
- [OLS20] López Sánchez, O., “Análisis de la operativa del buque petrolero y diseño de la zona de carga”, Diciembre de 2020, Trabajo de Fin de Máster, Universidad Politécnica de Cataluña:  
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/334818>
- [RGS16] García Soutullo, R., “Buques FPSO. Offshore”, 2016. Obtenido en Ingeniero Marino: <https://ingenieromarino.com/buques-fpsو-offshore/>
- [NC19] Conor, N., “¿Qué es la ecuación de Darcy-Weisbach? Definición”, 30 de Septiembre de 2019. Fuente: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ecuacion-de-darcy-weisbach-definicion/>
- [SRM18] Robles Mendoza, S., “Flujo laminar y flujo turbulento”, 10 de Mayo de 2016. Fuente: <https://www.slideshare.net/SusanRoblesMendoza/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>
- [NC20] Conor, N., “¿Qué es el número de Reynolds?”, 20 de Enero de 2020. Fuente: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>  
El gobierno de España, “El petróleo y su comportamiento”. Fuente: [https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo\\_y\\_comportamiento.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo_y_comportamiento.aspx)
- [RCC05] Chaquinga Cortés, R. F. , “Construcción de un banco hidráulico para pérdidas localizadas e implementación de su sistema automatizado de medición”, Enero de 2005. Fuente:  
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/364/1/t170id.pdf>
- “Azufre 2020: reduciendo las emisiones óxido de azufre”, Organización Marítima Internacional:  
<https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx>
- [HAK16] Kurniawati, H., Aryawan W., Baidowi, A., “LONG-TERM FSO/FPSO CHARTER RATE ESTIMATION”. Sepuluh November Institut of Technology, Indonesia, Febrero de 2016. Fuente:  
<https://ejurnal.undip.ac.id/index.php/kapal/article/download/10105/8028>

# ADAPTACIÓN DE BUQUE A NUEVAS FUNCIONES

**Author:** Rodrigo Vecino de Haro

Supervisor: Íñigo Sanz Fernández

Collaborating Entity: Seaplace

## ABSTRACT

This project study if the FPSO Petrojarl Foinaven can be converted into a "shuttle tanker", a more conventional oil tanker that only transports crude oil from the point of extraction of crude oil in the ocean to the refinery, unloading it there. For this project, the system of pipes and pumps of the crude tanks has been studied to be able to unload the crude in less time than the minimum time established by the refineries.

Subsequently, since the crude oil cannot be pumped at temperatures below 40°C, the heat transmission of the crude oil with its surroundings during the transfer from the extraction point where the FPSO is currently located, East of Scotland, to the refinery in Rotterdam.

Due to the complexity of the equations for calculating the crude oil temperature, an ANSYS program has been developed. Likewise, an economic exercise of the profitability of the project for the next 15 years has been carried out. Lastly, an environmental study of the ship has been carried out and occupational risk prevention has been documented.

After the completion of the project, it has been concluded that the FPSO vessel Pretojarl Foinaven can be converted to a shuttle tanker vessel. Since the crude does not reach 40°C. In addition, in the financial year of the next 15 years of the conversion of the vessel, it has been determined that the conversion of the FPSO vessel to a shuttle tanker vessel supposes a higher Return on Income than the case of buying from a shuttle tanker vessel. See "Tabla 28".

**Keywords:** FPSO, shuttle tanker, heat transmission, crude oil, hydraulic pump, conversion, vessel.

## **1. Introduction**

The FPSO (Floating Production, Storage and Transfer Unit) vessel Petrojarl Foinaven was designed in the 1990s to settle for 25 years in an oil field, treating and storing crude oil. However, despite the high price of a barrel in the 2000s, few vessels manufactured due to the great economic crisis.

A "shuttle tanker" is a more conventional oil tanker whose function is to transport crude oil from the point of extraction of crude oil in the ocean to the refinery, unloading it there.

## **2. Project definition and work method**

The project wants to study if the FPSO Petrojarl Foinaven can be converted into a "shuttle tanker" ship. For this project, the system of pipes and pumps of the crude tanks has been studied to be able to unload the crude in less time than the minimum time established by the refineries.

Subsequently, since the crude oil cannot be pumped at temperatures below 40°C, the heat transmission of the crude oil with its surroundings during the transfer from the extraction point where the FPSO is currently located, East of Scotland, to the refinery in Rotterdam.

Due to the complexity of the equations for calculating the crude oil temperature, a model has been developed in ANSYS. The problem has been solved with two different methods: Establishing the thermal conductivity of each element that surrounds the crude oil tank; Calculating the equivalent Heat Transfer coefficient.

Likewise, an economic exercise of the profitability of the project for the next 15 years has been carried out. To carry out this exercise, the number of minimum crew members has been calculated according to the characteristics of the ship to predict the annual cost in salaries and social security. In addition, expenses for maintenance and repairs, lubricating oil, insurance company, provisions, expenses per trip, and expected annual income have also been calculated.

### 3. Vessel description

The FPSO vessel in question, Petrojarl Foinaven, has a production module, into which the crude oil that comes from drilling is injected, its main objective is the separation of crude oil from solid remains; a turret, which establishes an entrance for the risers, drilling pipes, and for the mooring system; a pumping system, which is used to be able to pump the crude oil along the production module or to discharge the crude oil. In addition, it consists of 5 steel tanks, whose main function is the storage of crude oil. The tanks are disposed in the following arrangement: The first tank (tank 1) is located in the bow (front) of the turret; the rest of the tank is located in the stern (part behind) of the turret, in the bay (center). In addition, to the 5 tanks already mentioned, the ship has 2 parallel settling tanks (d1 and d2), belonging to the production module, located at the stern of the cargo tanks, see “ANEXO III: Plano de Disposición General II”.

### 4. Results

With the results obtained after the completion of the project, it has been concluded that the FPSO vessel Pretojarl Foinaven can be converted to a shuttle tanker vessel. After calculating the final temperature of the crude oil after the project with two different methods, it can be verified in the Table 16 and Table 19 that the crude oil does not reach 40°C.

Tabular Data				
	Time [s]	✓ Minimum [°C]	✓ Maximum [°C]	✓ Average [°C]
1538	1.8371e+005	6.3912	61.133	54.574
1539	1.8383e+005	6.3913	61.135	54.574
1540	1.8395e+005	6.3914	61.136	54.574
1541	1.8407e+005	6.3915	61.138	54.574
1542	1.8419e+005	6.3916	61.139	54.574
1543	1.8431e+005	6.3917	61.141	54.574
1544	1.8443e+005	6.3918	61.143	54.574
1545	1.8455e+005	6.3919	61.144	54.574
1546	1.8467e+005	6.392	61.146	54.574
1547	1.8479e+005	6.3921	61.147	54.574
1548	1.8491e+005	6.3922	61.149	54.574
1549	1.85e+005	6.3922	61.15	54.574

Table 16: Oil final temperature, Method I – Own elaboration.

Tabular Data				
	Time [s]	✓ Minimum [°C]	✓ Maximum [°C]	✓ Average [°C]
1540	1.837e+005	-6.2268	61.474	54.494
1541	1.8382e+005	-6.2265	61.473	54.493
1542	1.8394e+005	-6.2263	61.472	54.493
1543	1.8406e+005	-6.226	61.47	54.493
1544	1.8418e+005	-6.2258	61.469	54.492
1545	1.843e+005	-6.2256	61.468	54.492
1546	1.8442e+005	-6.2253	61.466	54.492
1547	1.8454e+005	-6.2251	61.465	54.491
1548	1.8466e+005	-6.2249	61.463	54.491
1549	1.8478e+005	-6.2246	61.462	54.49
1550	1.849e+005	-6.2244	61.461	54.49
1551	1.85e+005	-6.2242	61.46	54.49

Table 19: T Oil final temperature, Method II – Own elaboration.

In addition, in the financial year of the next 15 years of the conversion of the vessel, it has been determined that the conversion of the FPSO vessel to a shuttle tanker vessel supposes a higher Return on Income than the case of buying from a shuttle tanker vessel. See Table 28.

	Modificación buque	Compra buque
ROI	2.39	0.22

Table 28: Return of Investment Calculation – Own elaboration.

Finally, an environmental study of the ship has been carried out, establishing the main causes of contamination of the ship. In addition, the standards and compliances that must be met established by the European Union have been documented, in which the health and safety of the crew of ships and vessels is ensured.

## 5. Conclusions

This project has made a great economic and environmental contribution. As already mentioned, the project represents a great economic contribution. In addition, the realization of this project also means less atmospheric pollution since the case of the FPSO vessel Petrojarl Foinaven is reused.

## 6. References

- [RGS18] Soutullo, R.G., “*Buques FPSO y Posicionamiento Dinámico*”, Universidad de Cádiz, January 2018. Source from Wuolah:  
<https://www.wuolah.com/apuntes/Buques-FPSO-y-Posicionamiento-Dinamico4-Buques-FPSO-y-Posicionamiento-Din%C3%A1mico.pdf-727146>
- [CR12] Rodríguez, C., “*FPSO Petrojarl Foinaven*”, April 2012. Fuente de Tecnología Marítima:  
<http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2012/04/fpsو-petrojarl-foinaiven.html>
- [PB13] Boschee, P., “*Tanker Conversions to FPSO Design and Integrity Management -Challenges*”, September 2013. Source of Journal of Petroleum Technology: <https://jpt.spe.org/tanker-conversions-fpso-design-and-integrity-management-challenges>
- [GGD] Dimitris, G. G. and Emmanuel, S. S., “*Conversion of an Oil tanker into FPSO: Strength and Reliability Assessment*”. Source of CEMT:  
<https://www.cemt.eu/res/HIMT%20PAPER.pdf>
- [JRL] Dr. Rodrigo de Larrucea, Jaime., “*Seguridad Marítima en Buques Tanques Petroleros (Oil Tankers Safety)*”. Source:  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/3020/Seguridad%20Buques%20Petroleros.pdf>
- [NS22] Sønnichsen, N., “*Average annual OPEC crude oil price from 1960 to 2022*”, February 18, 2022. Source of Statista:  
<https://www.statista.com/statistics/262858/change-in-opec-crude-oil-prices-since-1960/>

- “Cálculo de la Potencia de una bomba hidráulica”, August 26, 2021. Source of Gargil: <https://gargil.es/calculo-de-la-potencia-de-una-bomba-hidraulica>
- [OLS20] López Sánchez, O., “Análisis de la operativa del buque petrolero y diseño de la zona de carga”, December 2020, Master’s Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña:  
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/334818>
- [RGS16] García Soutullo, R., “Buques FPSO. Offshore”, 2016. Obtained in Ingeniero Marino: <https://ingenieromarino.com/buques-fpso-offshore/>
- [NC19] Conor, N., “¿Qué es la ecuación de Darcy-Weisbach? Definición”, September 30, 2019. Source: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ecuacion-de-darcy-weisbach-definicion/>
- [SRM18] Robles Mendoza, S., “Flujo laminar y flujo turbulento”, May 10, 2016. Source: <https://www.slideshare.net/SusanRoblesMendoza/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>
- [NC20] Conor, N., “¿Qué es el número de Reynolds?”, January 20, 2020. Source: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>  
El gobierno de España, “El petróleo y su comportamiento”. Source: [https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo\\_y\\_comportamiento.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo_y_comportamiento.aspx)
- [RCC05] Chaquinga Cortés, R. F. , “Construcción de un banco hidráulico para pérdidas localizadas e implementación de su sistema automatizado de medición”, January 2005. Source:  
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/364/1/t170id.pdf>
- “Azufre 2020: reduciendo las emisiones óxido de azufre”, Organización Marítima Internacional:  
<https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx>
- [HAK16] Kurniawati, H., Aryawan W., Baidowi, A., “LONG-TERM FSO/FPSO CHARTER RATE ESTIMATION”. Sepuluh November Institut of Technology, Indonesia, February 2016. Source:  
<https://ejurnal.undip.ac.id/index.php/kapal/article/download/10105/8028>

## **INDICE DE LA MEMORIA**

---

Capítulo 1. Introducción .....	11
Capítulo 2. Estado de la Cuestión.....	13
Capítulo 3. Definición del Trabajo .....	14
1.3    Justificación.....	14
2.3    Objetivos .....	15
3.3    Estimación Económica.....	16
4.3    Metodología de trabajo.....	16
Capítulo 4. Buque FPSO – Petrojal Foinaven .....	18
1.4    Descripción.....	18
2.4    Normativas .....	20
3.4    Tanques .....	21
Capítulo 5. Descarga y carga del crudo .....	23
1.5    Operación de carga del crudo.....	23
2.5    Operación de descarga del crudo .....	24
Capítulo 6. Sistema de bombeo .....	25
1.6    Sistema de bombeo actual .....	25
2.6    Cálculo del nuevo sistema de bombeo .....	26
Capítulo 7. Sistema de Tuberías .....	27
1.7    Cálculo de las dimensiones de la tubería .....	28
Capítulo 8. Bomba Hidráulica .....	30
1.8    Cálculo de la Potencia I.....	30
2.8    Pérdidas de carga primarias.....	32
3.8    Pérdidas de carga secundaria.....	35
4.8    Cálculo de la Potencia II .....	38

Capítulo 9. Selección del sistema de bombeo .....	39
Capítulo 10. Transmisión de Calor .....	42
1.10 Introducción .....	42
2.10 Cálculo de la pérdida de Energía.....	44
3.10 Cálculo de la temperatura con ANSYS.....	46
4.10 Método I: Estableciendo la conductividad térmica de cada elemento. ....	47
5.10 Método II: Calculando el coeficiente de transferencia de calor equivalente	54
6.10 Cálculos Suplementarios .....	60
Capítulo 11. Ejercicio Económico .....	62
1.11 Modificación FPSO a shuttle tanker .....	62
2.11 Compra de un Buque shuttle tanker .....	68
Capítulo 12. Estudio Medioambiental .....	75
Capítulo 13. Prevención de Riegos Laborables.....	77
Capítulo 14. Conclusiones .....	79
Capítulo 15. Operaciones .....	82
1.15 Apartado 2.8. Pérdidas de carga primaria .....	82
2.15 Apartado 4.8. Cálculo de la Potencia II .....	83
3.15 Capítulo 10. Cálculo de la temperatura con ANSYS. Método II.....	84
Capítulo 16. Bibliografía .....	85
Capítulo 17. Anexos .....	88
1.17 ANEXO I: Diagrama del Sistema de Flujo.....	88
2.17 ANEXO II: Plano de Disposición General I .....	89
3.17 ANEXO III: Plano de Disposición General II .....	90
4.17 ANEXO IV: Plano de Disposición General III.....	91
5.17 ANEXO V: Sistema de Bombeo .....	92

6.17	ANEXO VI: Información técnica las bombas hidráulicas Framo.....	93
7.17	ANEXO VII: Dimensiones Tuberías Octal.....	94
8.17	ANEXO VIII: Filosofía de Carga del Buque I.....	96
9.17	ANEXO IX: Filosofía de Carga del Buque II .....	97
10.17	ANEXO X: DNV Part 4 Chapter 6 .....	98
11.17	ANEXO XI: Resolución de la OMI .....	100
12.17	ANEXO XII: Cargo Design Petrojarl.....	102

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Representación FPSO y shuttle tanker .....	11
Ilustración 2: Disposición de los tanques - Fuente de Seaplace.....	19
Ilustración 3: Estructura del FPSO - Fuente Petrojarl .....	20
Ilustración 4: Representación tanque - Fuente Seplease .....	22
Ilustración 5: Diagrama del sistema de bombeo – Fuente Seaplace. ....	25
Ilustración 6: Ampliación del sistema de tuberías y bombeo – Fuente Seaplace.....	27
Ilustración 7: Válvula mariposa tipo BBNV(w) – Fuente Sigeval.....	36
Ilustración 8: Codo 90° Butt weld ANSI B16.9 DN350 - Fuente ASME Alloys.....	37
Ilustración 9: Rango del posible caudal bombeado por cada tipo de bomba - Fuente Framo.....	40
Ilustración 10: Bomba de carga hidráulica tipo SD300 - Fuente: Framo.....	41
Ilustración 11: Representación frontal tanque-lastre - Elaboración propia. ....	43
Ilustración 12: Dimensiones tanque-lastre en metros - Elaboración propia.....	43
Ilustración 13: Representación de un cuarto de tanque – Elaboración propia.....	48
Ilustración 14: Mallado del tanque y lastre – Elaboración propia.....	49
Ilustración 15: Temperatura final del Crudo, Método I - Elaboración propia.....	52
Ilustración 16: : Representación Crudo - Elaboración propia. ....	56
Ilustración 17: Mallado del modelo - Elaboración propia.....	57
Ilustración 18: Temperatura final del Crudo, Método II - Elaboración propia. ....	58
Ilustración 19: Temperatura final del Crudo, Cálculos Suplementarios - Elaboración propia.....	60
Ilustración 20: Buque Golden Energy. ....	69

**INDICE DE GRAFICOS**

Gráfico 1: Evolución del Precio medio del Petróleo – Elaboración propia. ....	14
Gráfico 2: Temperatura del crudo según el tiempo, Método I - Elaboración propia. ....	52
Gráfico 3: Temperatura del crudo según el tiempo, Método II - Elaboración propia. ....	58
Gráfico 4: Temperatura final del Crudo, Cálculos Suplementarios - Elaboración propia. .....	61
Gráfico 5: Precio petroleros según el año y peso – Elaboración propia.....	68
Gráfico 6: Tiempo vs ROI - Elaboración propia. ....	74

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Planificación del Proyecto - Elaboración propia.....	17
Tabla 2: Dimensiones de los tanques - Fuente Seaplace.....	21
Tabla 3: Dimensiones de la tubería – Elaboración propia.....	29
Tabla 4: Longitud de los tramos rectos de cada tubería – Elaboración propia.....	34
Tabla 5: Pérdidas primarias de cada tubería – Elaboración propia. ....	34
Tabla 6: Valores de K según el tipo de pérdida de carga. ....	37
Tabla 7: Pérdidas de carga secundarias de cada tubería - Fuente, elaboración propia... ..	37
Tabla 8: Potencia necesaria por cada tubería – Elaboración propia. ....	38
Tabla 9: Características bomba de carga hidráulica SD350 - Fuente Framo. ....	40
Tabla 10: Dimensiones de la bomba de carga hidráulica tipo SD350 - Fuente Framo.. .	41
Tabla 11: Propiedades Aire exterior - Elaboración propia.....	49
Tabla 12: Propiedades Crudo - Elaboración propia.....	50
Tabla 13: Propiedades Agua - Elaboración propia.....	50
Tabla 14: Temperaturas Iniciales de los elementos del modelo - Elaboración propia... ..	50
Tabla 15: Coeficiente de convección - Fuente Seaplace, especificaciones del barco. ...	51
Tabla 16: Temperatura final del Crudo, Método I - elaboración propia. ....	53
Tabla 17: Espesores y coeficientes para el cálculo del coeficientes de transferencia de calor – Fuente Seaplace, Especificaciones del barco. ....	55
Tabla 18: Coeficiente de Transferencia de Calor equivalente - Elaboración propia.....	55
Tabla 19: Temperatura final del Crudo, Método II - elaboración propia. ....	59
Tabla 20: Temperatura final del Crudo, Cálculos Suplementarios - Elaboración propia. ....	61
Tabla 21: Cálculo Salario más Seguridad Social anual – Elaboración propia. ....	64
Tabla 22: Ejercicio económico del proyecto en un plazo de 0-5 años (miles de euros) - Elaboración propia.....	65
Tabla 23: Ejercicio económico del proyecto en un plazo de 6-10 años (miles de euros)- Elaboración propia.....	66
Tabla 24: Ejercicio económico del proyecto en un plazo de 11-15 años (miles de euros)- Elaboración propia.....	67

Tabla 25: Ejercicio económico de la compra de un buque en un plazo de 0-5 años (miles de euros)- Elaboración propia.....	70
Tabla 26: Ejercicio económico de la compra de un buque en un plazo de 6-10 años (miles de euros)- Elaboración propia. ....	71
Tabla 27: Ejercicio económico de la compra de un buque en un plazo de 11-15 años (miles de euros)- Elaboración propia. .....	72
Tabla 28: Cálculo del Retorno sobre la Inversión - Elaboración propia. ....	73

## INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 .....	26
Ecuación 2 .....	26
Ecuación 3 .....	28
Ecuación 4 .....	28
Ecuación 5 .....	30
Ecuación 6 .....	30
Ecuación 7 .....	30
Ecuación 8 .....	30
Ecuación 9 .....	31
Ecuación 10 .....	32
Ecuación 11 .....	33
Ecuación 12 .....	33
Ecuación 13 .....	35
Ecuación 14 .....	36
Ecuación 15 .....	44
Ecuación 16 .....	44
Ecuación 17 .....	44
Ecuación 18 .....	45
Ecuación 19 .....	45
Ecuación 20 .....	45
Ecuación 21 .....	45
Ecuación 22 .....	45
Ecuación 23 .....	45
Ecuación 24 .....	54
Ecuación 25 .....	54
Ecuación 26 .....	73
Ecuación 27 .....	82
Ecuación 28 .....	82
Ecuación 29 .....	82
Ecuación 30 .....	82

Ecuación 31 .....	82
Ecuación 32 .....	83
Ecuación 33 .....	83
Ecuación 34 .....	83
Ecuación 35 .....	83
Ecuación 36 .....	83
Ecuación 37 .....	84
Ecuación 38 .....	84
Ecuación 39 .....	84
Ecuación 40 .....	84
Ecuación 41 .....	84
Ecuación 42 .....	84

## **GLOSARIO**

bbls	Barril de crudo.
FPSO	Unidad flotante de producción, almacenamiento y transferencia
h	Horas.
m	Metros.
s	Segundos.
DNV	Dent Norske Veritas
OMI	Organización Marítima Internacional
ROI	Retorno sobre la Inversión
mca	Metros de columna de agua

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En los años noventa se construyeron en los Astilleros de Ferrol, Galicia, varias unidades FPSO (Unidad flotante de Producción, almacenamiento y transferencia). Estos buques fueron diseñados para establecerse durante 25 años en un yacimiento petrolífero, tratando y almacenando el crudo. Cuando los tanques de almacén están llenos, son bombeados a otro tipo de buque: “shuttle tanker”, un petrolero más convencional que tan sólo transporta el crudo a la refinería, descargándolo allí.

Los FPSO son diseñados para una vida útil de 25 años, principalmente por la fatiga en el sistema de fondeo, pero el casco, sistemas de propulsión... tienen una vida útil de hasta 40 años.

Recientemente estas unidades han llegado al fin de su vida útil, siendo reemplazados por otros FPSO o plataformas de producción.

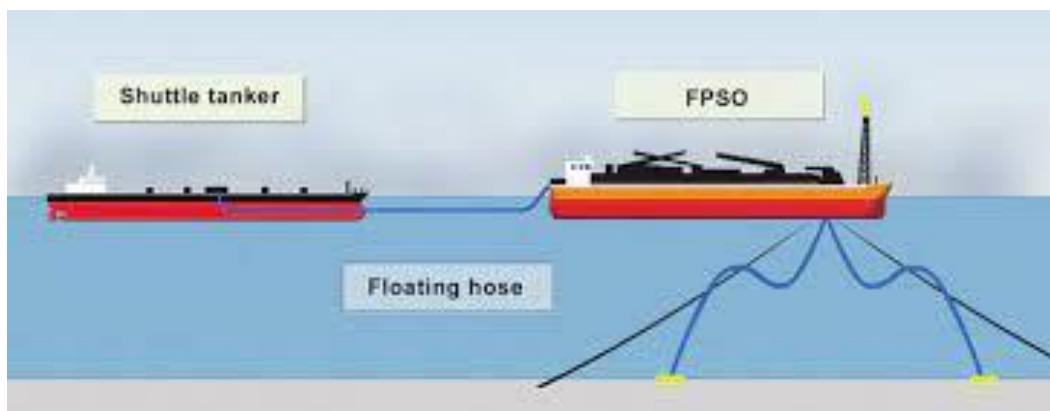


Ilustración 1: Representación FPSO y shuttle tanker – Fuente de Eureka Cargo Pump System.

Sin embargo, construir un buque de gran envergadura puede suponer una gran carga económica. Por ello, en este proyecto se va a estudiar si el FPSO Petrojarl Foinaven puede ser convertido en un shuttle tanker. Para ello habrá que eliminar el módulo de producción de crudo y la torreta. Esta conversión es relativamente sencilla.

También se requiere estudiar la temperatura del crudo, ya que los sistemas de bombeo requieren una temperatura mínima entre 40°C y 60°C, si se bajara de esa temperatura deberíamos incorporar un sistema para calentar el crudo. Por ello vamos a estudiar la distancia máxima de la refinería sin necesidad de calentadores.

Igualmente, se deberá incluir un sistema de bombeo del crudo para descargarlo en 8 horas<sup>1</sup>, tiempo normalmente exigido en las operaciones de las refinerías.

---

<sup>1</sup> Dato proporcionado por Juan Manuel de la Cruz en su publicación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (UPM): “Sistemas Auxiliares Especiales – Tema 2: SISTEMAS DE MANEJO DE LA CARGA EN BUQUES DE CARGA LÍQUIDA. PETROLEROS”

## **Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

Existen muchos ejemplos en los últimos 40 años de conversiones de buques a FPSO: petroleros, FSU, FSO, shuttle tanker, incluso de buques de carga general. El 70% de los FPSO actuales provienen de una conversión de este tipo.<sup>2</sup>

La necesidad de este tipo de embarcaciones ha disminuido en los últimos 15 años debido a la crisis y al precio del barril. Por este motivo se plantea la operación inversa, convertirlos en shuttle tanker para operar en campos que no les queda mucha vida. De esta manera se evita construir otro buque sin tener asegurada su explotación más allá de 10-15 años.

El estudio que se plantea es bastante novedoso, siendo solicitado su estudio por varios armadores.

---

<sup>2</sup> Proyecto de Georgiadis, G.D. y Samuelides, E.S. (<https://www.cemt.eu/res/HIMT%20PAPER.pdf>)

## Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

### 1.3 Justificación

En los años entre 1980 y 1990, en los años en el que se fabricó el buque, el precio del barril de petróleo era muy bajo, una media de 24.90 \$ en la década de 1980 y de 17.69 \$ en la década de 1990. Por lo que realizar operaciones de descarga de crudo no era beneficioso, lo que conllevo a que se fabricasen pocos buques FPSO o shuttle tanker. Asimismo, en la década de los 2000 el precio del barril de petróleo aumentó a más de 125 \$, sin embargo, debido a la gran crisis económica, tampoco se fabricaron muchas unidades.

Actualmente, debido a la inflación y a la guerra de Rusia con Ucrania, el precio del barril del petróleo se encuentra en casi 105 \$. Casi un 81% más que en los años anteriormente mencionados.<sup>3</sup> Ver Gráfico 1.

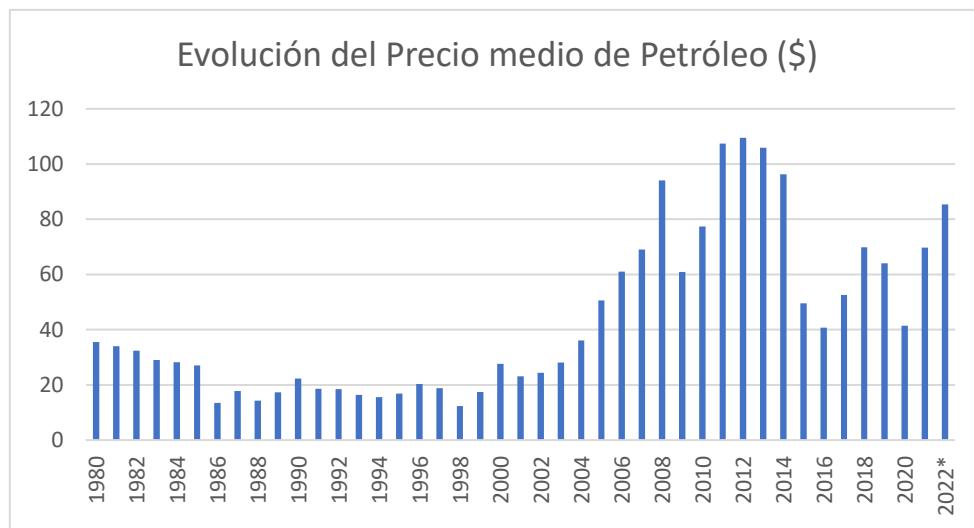


Gráfico 1: Evolución del Precio medio del Petróleo – Elaboración propia.

<sup>3</sup> Datos obtenidos en Statista: <https://www.statista.com/statistics/262858/change-in-opec-crude-oil-prices-since-1960/>; y en Datosmacro: <https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/opec>

Por ello, la conversión del buque FPSO Petrojarl Foinaven a shuttle tanker es una excelente oportunidad, puesto que los beneficios por venta la venta de barriles de crudo es más elevada, se estiman unos ingresos de más de 25.72 Millones por cada llegada del buque a la refinería con los tanques llenos. Además de economizar la construcción de un shuttle tanker y amortizar el buque FPSO ya construido.

## **2.3 Objetivos**

Con este proyecto se persigue convertir el FPSO en cuestión en un shuttle tanker para alargar su vida útil y evitar gastos innecesarios.

Para ello se estudiará si puede transportar crudo desde la planta petrolífera en el este de Escocia, en el que se encuentra actualmente el buque, hasta una refinería en Rotterdam. Para ello, es necesario instalar un sistema de bombeo para descargar el crudo en 8 horas, tiempo medio de descarga establecido por las refinerías. Además, se estudiará la temperatura del crudo a lo largo del trayecto, ya que el sistema de bombeo no puede trabajar a temperaturas menores de 40°C.

También se estudiará, si es que es posible su traslado, un ejercicio económico de los próximos 15 años de convertir el FPSO en un shuttle tanker comparándolo con adquirir un shuttle tanker. Con ello se pretende buscar si el estudio propuesto es retributivo.

Por último, se quiere estudiar el efecto medioambiental de ambas soluciones, dentro del objetivo del armador (en este caso BP) de cero emisiones netas en 2050. Para ello, se realizará un estudio del CO<sub>2</sub> emitido durante el proceso.

### 3.3 Estimación Económica

La conversión del buque FPSO Petrojarl Foinaven a un shuttle tanker requiere la eliminación del módulo de producción, un nuevo sistema de tuberías con un diámetro suficientemente grande para descargar el crudo con el caudal necesario, y bombas hidráulicas con la suficiente potencia para descargar el crudo a la velocidad necesaria.

Se estima que la eliminación del módulo de producción y tanque conlleva un gasto de 2 millones de euros<sup>4</sup>, el nuevo sistema de bombeo un valor de 3 millones con una vida útil de 30 años, y el sistema de tuberías un valor de 1.5 millones con una vida útil de 25 años. Además, se estima un coste de uso del buque de 18 mil euros por día de uso, 5 millones de euros por el mantenimiento anual del buque y unos ingresos de 25.72 millones de euros por cada llegada del buque a la refinería con los tanques de crudo en su capacidad máxima.

### 4.3 Metodología de trabajo

Para el estudio de la propuesta primero se calculará la potencia calorífica de los materiales de los tanques de carga del buque. A continuación se procede a calcular la pérdida de energía del crudo desde el llenado de los tanques hasta la llegada a la refinería. Para ello se va a emplear la transmisión de calor por convección del crudo al mar. Para el estudio se emplea la ecuación de Fourier de la conducción y las aplicaciones mencionadas posteriormente.

Posteriormente se estudiará el sistema de bombeo que es necesario instalar para poder descargar el crudo en la refinería en 8 horas.

---

<sup>4</sup> Según ofertas recibidas en Seaplace.

Además, se hará un ejercicio económico de los próximos 15 años. Para ello se calcularán los gastos necesarios en convertir el FPSO en cuestión en un shuttle tanker y se compararán con los gastos de adquirir un shuttle tanker y su depreciación de valor.

Por último, se realizará un estudio medio ambiental del transporte del crudo. Este estudio se llevará a cabo calculando la cantidad de CO<sub>2</sub> que supone el traslado en el FPSO y así poder examinar si los niveles de CO<sub>2</sub> emitidos son suficientemente bajos o si se pueden buscar soluciones para evitar la contaminación del medio ambiente.

Para la realización del estudio de la propuesta se han establecido las siguientes fechas límite para realizar cada paso del proyecto.

Estructura del Proyecto	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Recogida de Información					
Estudio Metodología					
Estudio del sistema de tuberías					
Estudio del sistema de bombeo					
Estudio de la transmisión de calor en el tanque					
Cálculo de la temperatura final del crudo con ANSYS					
Estudio de mejoras					
Estudio Económico					
Estudio Medioambiental					

Tabla 1: Planificación del Proyecto - Elaboración propia.

Para la realización del trabajo se ha estimado que se han invertido más de 200 horas.

## Capítulo 4. BUQUE FPSO – PETROJAL FOINAVEN

### 1.4 Descripción

El buque FPSO en cuestión, Petrojal Foinaven, dispone de un módulo de producción, al cual le es inyectado el crudo que procede de la perforación, su principal objetivo es la separación del crudo de restos sólidos; una torreta, que establece una entrada para los risers, tubos de la perforación, y para el sistema de fondeo; un sistema de bombeo, el cual es usado para poder bombear el crudo a lo largo del módulo de producción o para descargar el crudo. Además consta de 5 tanques de acero, cuya principal función es el almacenamiento de crudo. Los tanques están situados de la siguiente disposición: El primer tanque (tanque 1) se encuentra en la proa (parte de delante) de la torreta (ver Ilustración 3); el resto de tanque se encuentran en la popa (parte de detrás) de la torreta, en la crujía (centro). Todos los tanques (tanques 2, 3, 4 y 5) se encuentran de forma equidistante del centro del barco, en la Ilustración 2 se muestra el plano de la caro superior del buque con los numerados. Además, además de los 5 tanques ya mencionados, el buque dispone de 2 tanques de decantación paralelos entre ellos (d1 y d2), pertenecientes al módulo de producción, situados en la popa de los tanques de carga, ver ANEXO III: Plano de Disposición General II.

DESCRIPCIÓN DEL BUQUE FPSO – PETROJAL FOINAVEN

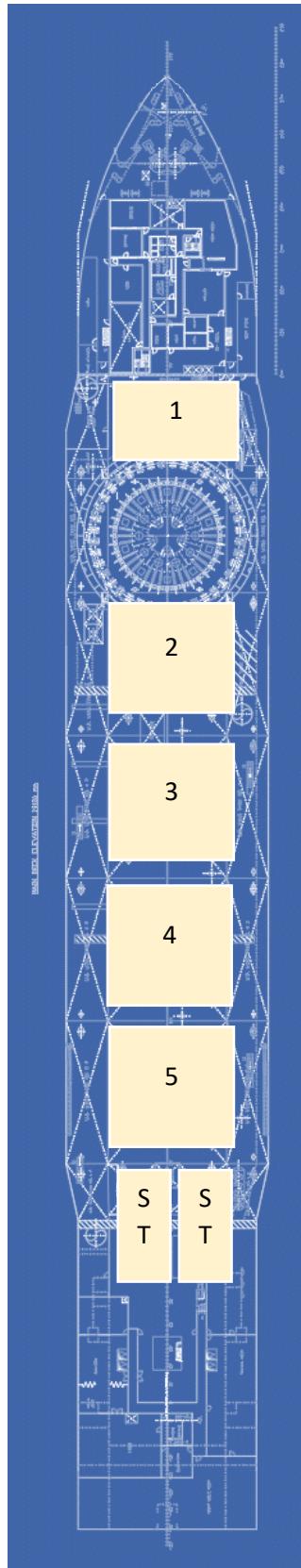


Ilustración 2: Disposición de los tanques - Fuente de Seaplace.

Por último, el buque consta de un módulo de producción del crudo y de una torreta , los cuales han de ser eliminados, como se ha mencionado anteriormente, ver Ilustración 3.



Ilustración 3: Estructura del FPSO - Fuente Petrojari.

1: Torreta

2: Módulo de producción

## 2.4 Normativas

El proyecto se ha realizado con las normas establecidas por la Organización Marítima Internacional, por el Gobierno de España, la Comisión Europea y Det Norske Veritas. Las normas usadas se encuentran numeradas a continuación:

- **Det Norske Veritas Part 4 Chapter 6**
- **OMI Anexo I del convenio MARPOL** – Prevención de la contaminación por hidrocarburos.
- **MARPOL 73/78 – Anexo I, II, III, IV, V, y VI.**
- **Real Decreto 1627/1997**
- **Ley de trabajo Seguro en barcos y buques**, establecida por la Fiscalidad y Unión Aduanera de la Comisión Europea.

- **Ley del Ministerio de Trabajo y Economía Social**, recogida en el BOE número 53.
- **Real Decreto 963/2013**, de 5 de diciembre - tripulación mínima necesaria del buque.

### 3.4 Tanques

La normativa Det Norske Veritas para un shuttle tanker requiere un doble fondo, y de un doble casco. Como se ha mencionado anteriormente, los tanques de crudo que actualmente dispone el buque son de doble fondo, por lo que no hay que realizar ningún cambio. Las dimensiones del tanque están representadas en la *Tabla 2*.

	Tanques de Carga	Tanques de Decantación
Eslora	24 m	9.6 m
Manga	28 m	28 m
Altura	17.1 m	10.1 m

*Tabla 2: Dimensiones de los tanques - Fuente Seaplace.*

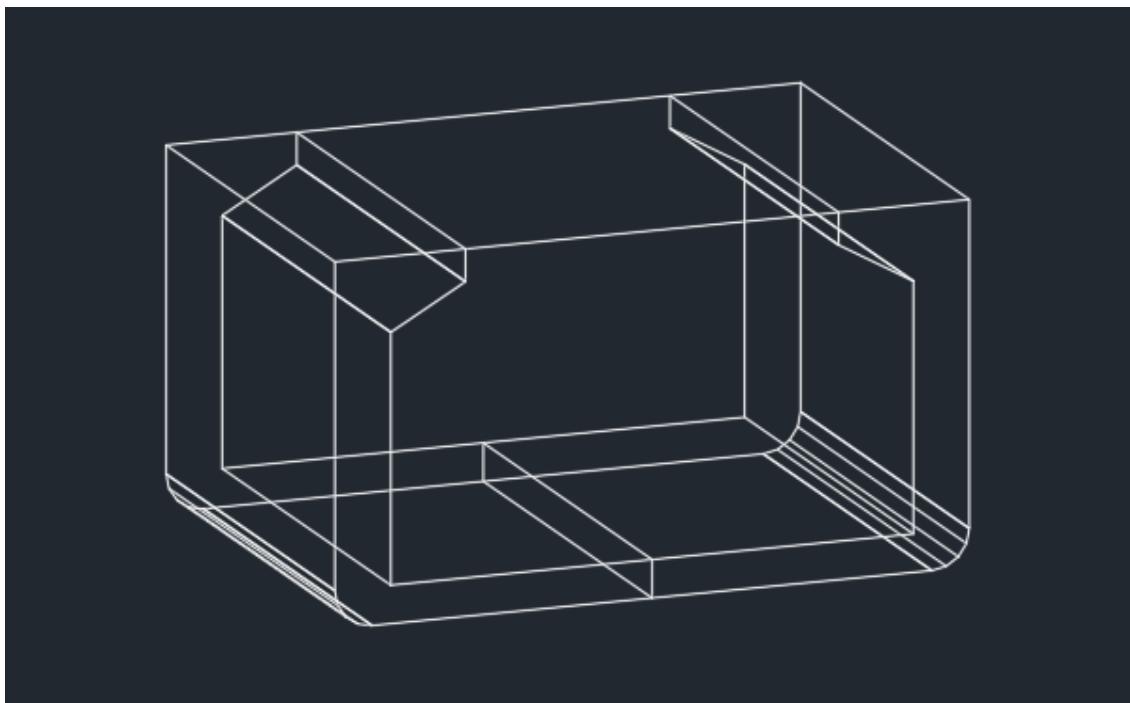


Ilustración 4: Representación tanque - Fuente Sepleace

La capacidad total del buque es de 49 000 m<sup>3</sup>, sin embargo, los tanques del buque no pueden ser llenados completamente. Esto se debe a que los tanques deben de tener gas inerte, como puede ser N, CO<sub>2</sub> o O<sub>2</sub>. Este gas es usado para prevenir incendios o explosiones en los tanques debidas a los gases del crudo. Norma que recoge SOLAS (International Maritime Organization)<sup>5</sup>, ver ANEXO XI: Resolución de la OMI.

Debido a esta normativa el buque puede cargar como máximo entre un 95% y 98% de su capacidad de carga total. Por ello, el cálculo del sistema de bombeo se va a realizar con una carga total del 98% de su capacidad, es decir, un total de 48 100 m<sup>3</sup>, equivalente a casi 302 540 barriles de petróleo, ver ANEXO XII: Cargo Design Petrojarl.

<sup>5</sup> MI: [https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20170302/20170302134845/473\\_12.pdf](https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20170302/20170302134845/473_12.pdf)

## Capítulo 5. DESCARGA Y CARGA DEL CRUDO

### 1.5 Operación de carga del crudo

El proceso de llenado de los tanques se lleva a cabo según la normativa del buque. Para el antiguo FPSO, se usaban risers: unas tuberías ascendentes de la perforación, situadas en el mar para cargar el crudo. Para ello, se utiliza una tubería de 200 mm de diámetro nominal para los tanques 1, 3 y 5. Sin embargo, para los tanques 2 y 4 se utiliza una tubería de 150 mm de diámetro nominal. Por cuestión de estabilidad estructural el proceso de llenado se realiza en dos fases. En primer lugar, se llenan los tanques 2 y 4, por último, los tanques 1, 3 y 5. De esta forma se evitan daños estructurales o que el barco escore, cuyos datos se encuentran en las especificaciones del buque.

Para la operación de carga del crudo al convertir el FPSO a shuttle tanker, se usarán los mismos tanques con doble fondo, con las mismas dimensiones mencionadas en el apartado 3.4. Al contrario del buque FPSO, los tanques de un shuttle tanker pueden ser cargados simultáneamente con varias tuberías, dependiendo del sistema de bombeo que presente el buque FPSO que cargue el shuttle tanker.

Para el estudio de la pérdida de calor en la carga de los tanques, se va a suponer que el buque FPSO que cargue el shuttle tanker puede descargar el crudo simultáneamente a una velocidad máxima de 5.000 m<sup>3</sup>/h <sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Velocidad media de carga de crudo que presentan los buques FPSO. Dato proporcionado por Seaplece.

## 2.5 Operación de descarga del crudo

Actualmente el buque FPSO dispone de un sistema de bombeo compuesto de 5 bombas, una bomba por cada tanque, cuya capacidad total de descarga entre todas las bombas es de 5000 m<sup>3</sup>/h.

La conversión del FPSO a shuttle tanker requiere que la operación de descarga del crudo se realice en menos de 8 horas, tiempo mínimo medio que las refinerías requieren para descargar el crudo. Para ello es necesario calcular el tiempo de descarga que actualmente presenta el buque.

## Capítulo 6. SISTEMA DE BOMBEO

### 1.6 Sistema de bombeo actual

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de bombeo está compuesto por cinco bombas hidráulicas, una por cada tanque, como se puede ver en Ilustración 5.

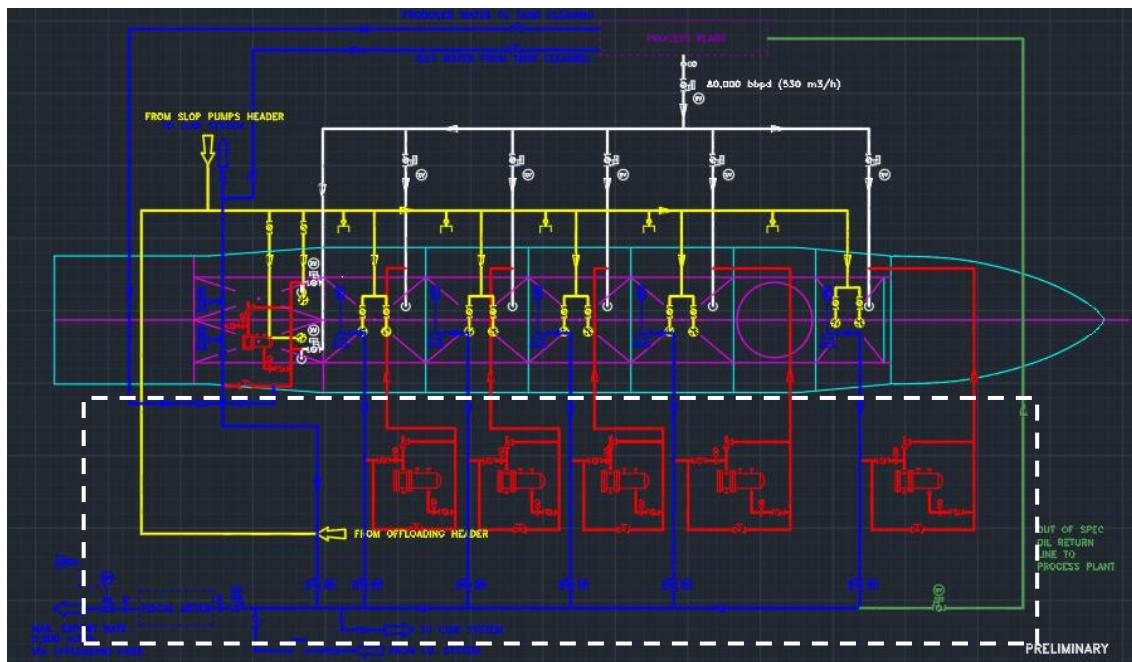


Ilustración 5: Diagrama del sistema de bombeo – Fuente Seaplace.

El tiempo promedio de descarga de crudo en las refinerías debe ser menor de 8 horas. Para poder determinar el tiempo que tardaría el buque en descargar el crudo actualmente se realiza el siguiente cálculo, siendo V el Volumen, Q el caudal del crudo y t el tiempo total:

$$V = 48\,100\,m^3$$

$$Q = 5.000 \frac{m^3}{h}$$

$$t = \frac{V}{Q} = 9.62 \text{ h}$$

*Ecuación 1*

Debido a que el tiempo de descarga es mayor que el mínimo requerido por las refinerías es necesario cambiar el sistema de bombeo del buque para que se pueda realizar en menos de 8 horas.

## 2.6 Cálculo del nuevo sistema de bombeo

Como ya se ha mencionado anteriormente, el proceso de descarga del crudo en la refinería generalmente debe hacerse en menos de 8 horas. Para poder descargar el crudo en ese tiempo el sistema de bombeo se ha de instalar una bomba de pozo profundo cuya potencia permita descargar el crudo con un mayor caudal. Para ello primero se calcula el caudal mínimo que permita descargar el crudo en ese tiempo.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{48\ 100}{8} = 6\ 012.5 \frac{m^3}{h}$$

*Ecuación 2*

Por lo tanto, se necesita un sistema de bombas capaz de bombear un caudal mayor de  $6\ 013 \text{ m}^3/\text{h}$ , un 20.25% más que anteriormente. Para ello se instalan 5 bombas de pozo profundo, una por cada tanque, con la potencia necesaria para bombear un caudal total de  $6\ 013 \text{ m}^3/\text{h}$ , es decir, una potencia necesaria para bombear un caudal de casi  $1\ 203 \text{ m}^3/\text{h}$ , por cada bomba.

## Capítulo 7. SISTEMA DE TUBERÍAS

Como se puede ver en la Ilustración 5 y en la Ilustración 6, el sistema de tuberías que conecta el sistema de bombeo con la refinería está compuesto por varias tuberías, las cuales requieren distintas dimensiones según la normativa del Det Norske Veritas, por cuestiones de seguridad. Se establece en el DNV Part 4, Chapter 6<sup>7</sup>, que el diámetro exterior depende del material de la tubería y de su diámetro interior. En el buque en cuestión se requieren unas tuberías de acero al carbono debido a su larga exposición medioambiental a lo largo del tiempo.



Ilustración 6: Ampliación del sistema de tuberías y bombeo – Fuente Seaplace.

Por ello, se han de diferenciar las tuberías según el caudal de crudo que transporta cada una. Sin embargo, en este estudio solo es necesario calcular las dimensiones de la tubería saliente de cada tanque, que como disponen de las mismas bombas, las dimensiones de las 5 tuberías serán las mismas. Esto es debido a que los tanques pueden transportar distinto tipo crudo, con lo cual no pueden ser mezclados, lo que conlleva a que las 5 tuberías salientes de cada tanque no pueden juntarse en una sola tubería.

<sup>7</sup> Normativa DNV Pt.4 Ch6. Piping systems: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2019-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch6.pdf>

## 1.7 Cálculo de las dimensiones de la tubería

En primer lugar, para poder instalar el sistema de tuberías anteriormente descrito, primero se va a calcular el diámetro interior de la tubería con la siguiente ecuación:

$$Q = v * A \quad \text{Ecuación 3}$$

Siendo A el área de la tubería, y v la velocidad de descarga, cuya velocidad máxima de descarga es especificada en las especificaciones del barco como 4 m/s, ver ANEXO VIII: Filosofía de Carga del Buque I. Sustituyendo en la ecuación anteriormente mencionada el valor de v y el área como  $\frac{D^2 * \pi}{4}$ , siendo D el diámetro de la tubería, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q = 4 * \frac{\pi * D^2}{4} \quad \text{Ecuación 4}$$

Por último, sustituyendo Q por el caudal calculado anteriormente, se obtiene el valor mínimo necesario del diámetro interior de la tubería.

$$\frac{1203}{3600} = 4 * \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{1203 * 4}{3600 * \pi * 4}} = 0.326 \text{ m}$$

Como se dijo anteriormente, para el cálculo del espesor de la tubería, es necesario cumplir la normativa establecida por Det Norske Veritas. El cual en DNV Part 4, Chapter

6<sup>8</sup> establece que el espesor de la tubería depende del diámetro interior y del material del que está compuesto, acero al carbono. Según la normativa DNV Part 4, Chapter 6, ver ANEXO X: DNV Part 4 Chapter 6, el espesor necesario para una tubería de acero inoxidable con un diámetro interior de 326 mm es necesario un espesor de 6.3 mm, es decir, un diámetro exterior de 338.6 mm.

Sin embargo, no se puede fabricar una tubería exactamente con estas dimensiones, por ello se debe escoger una tubería ya establecida con dimensiones mayores que las anteriormente mencionadas. En ANSI B36.10 & B36.19, ver ANEXO VII: Dimensiones Tuberías Octal<sup>9</sup>, se escoge una tubería con las siguientes dimensiones:

	Diámetro interior	Diámetro Exterior	Espesor	Número de Acero al Carbono
DN350	339.76 mm	355.6 mm	7.92 mm	20

Tabla 3: Dimensiones de la tubería – Elaboración propia.

Por lo tanto, usando la Ecuación 3, y con las dimensiones de esta tubería, el caudal máximo de la tubería, a 4 m/s, es de 1305.56 m<sup>3</sup>/h.

$$Q = v * A = 4 * \frac{\pi * 0.33976^2}{4} = 1305.56 \frac{m^3}{h}$$

<sup>8</sup> Fuente: <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/ru-ship/2017-01/DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch6.pdf>

<sup>9</sup> Fuente: <https://www.octalsteel.com/wp-content/uploads/2018/01/steel-pipe-dimensions-chart-ansi-b36.10-36.19.pdf>

## Capítulo 8. BOMBA HIDRÁULICA

### 1.8 Cálculo de la Potencia I

La potencia necesaria de la bomba viene dada por la siguiente ecuación<sup>10</sup>. Siendo H la presión, Q el caudal, y η el rendimiento del sistema de bombeo:

$$P = \frac{H * Q}{\eta} \quad \text{Ecuación 5}$$

Debido a que el sistema de bombeo se encuentra debajo de los tanques, la presión es igual a la presión que ejerce el tanque de crudo sobre las bombas, más la presión de las tuberías de la refinería. La presión (H) es calculada como:

$$H = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 6}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior la fuerza (F) como masa(m) \* gravedad(g), se obtiene la siguiente ecuación:

$$H = \frac{m * g}{A} \quad \text{Ecuación 7}$$

Por último, reemplazando la masa como densidad ( $\rho$ ) \* volumen(área \* altura(a)), se obtiene la siguiente ecuación:

$$H = \frac{(\rho * A * a) * g}{A} = \rho * g * a \quad \text{Ecuación 8}$$

<sup>10</sup> Ecuación administrada por Gargil: <https://gargil.es/calculo-de-la-potencia-de-una-bomba-hidraulica>

Sin embargo, durante el proceso de bombeo también se producen pérdidas de carga por el rozamiento del crudo con la tubería. Por lo tanto, las pérdidas de carga se calculan como una presión que ejerce la tubería sobre el crudo, es decir,  $p = \rho * g * h$ , siendo  $h$  las pérdidas de carga.

Además, se añade una presión de 7 bares ( 71.4 mca), presión a la que debe de llegar el crudo al Manifold<sup>11</sup>. El Manifold es una válvula que permite descargar el crudo en la refinería uniendo los caudales de todos los tanques.

Se distinguen dos tipos de pérdidas carga: pérdidas de carga primarias ( $hf$ ) y secundarias ( $hm$ ). Las pérdidas de carga primarias son las que se producen en los tramos rectos de la tubería. En cambio, las pérdidas de carga secundaria son las que se producen en la entrada del flujo en la tubería, en los codos, en las válvulas, en las uniones, y en la salida del flujo de la tubería.

Luego la ecuación del cálculo de la potencia quedaría como:

$$P = \frac{(\rho * g * (a + h + 71.4)) * Q}{\eta} = \frac{(\rho * g * (a + hf + hm + 71.4)) * Q}{\eta}$$

*Ecuación 9*

<sup>11</sup> Dato proporcionado por Juan Manuel de la Cruz en su publicación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (UPM): "Sistemas Auxiliares Especiales – Tema 2: SISTEMAS DE MANEJO DE LA CARGA EN BUQUES DE CARGA LÍQUIDA. PETROLEROS"

## 2.8 Pérdidas de carga primarias

Para el cálculo de las pérdidas primarias ( $hf$ ) se usa la ecuación de Darcy-Weisbach, anotada a continuación, donde  $f$  es el factor de fricción de Darcy,  $L$  la longitud de la tubería,  $V$  la velocidad media del crudo,  $d$  el diámetro interno de la tubería y  $g$  la gravedad.

$$hf = f * \frac{L * V^2}{d * 2 * g} \quad \text{Ecuación 10}$$

No obstante, el valor del factor de fricción de Darcy depende de si el crudo se encuentra en estado laminar o turbulento.

Se llama flujo laminar a un flujo que se mueve paralelamente a la tubería sin entremezclarse las partículas de este. Sin embargo, se llama flujo turbulento a un flujo que se mueve de forma caótica, entremezclándose las partículas de este y formando remolinos. Las ecuaciones del factor de fricción de Darcy, según su flujo, se muestran a continuación:

Para Flujo Laminar,  $Re < 2300$ : 
$$f = \frac{64}{Re}$$

Para Flujo Turbulento,  $Re > 2300$ : 
$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2 * \log \left( \frac{\varepsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re * f^{1/2}} \right)$$

Siendo  $Re$  el número de Reynolds, número adimensional que relaciona las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosas del fluido<sup>12</sup>, cuya ecuación se muestra a continuación,

<sup>12</sup> Información obtenida por Nick Conor: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>

siendo  $\rho$  la densidad,  $v$  la velocidad,  $D$  el diámetro de la tubería y  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido.

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad Ecuación 11$$

Siendo  $D = 0.34$  m y  $v = 4$ m/s, valores obtenidos en el apartado 1.7, y las propiedades del crudo las mencionadas en el apartado 4.4. Por lo tanto, el número de Reynolds es de 6759.2, es decir, es un flujo turbulento.

Por consiguiente, el factor de fricción de Darcy se calcula como se muestra a continuación, siendo  $Re$  el valor de Reynolds ya calculado,  $D$  el diámetro de la tubería y  $\epsilon$  la rugosidad de la tubería.

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2 * \log \left( \frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re * f^{1/2}} \right) \quad Ecuación 12$$

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2 * \log \left( \frac{0.045/326}{3.7} + \frac{2.51}{6520 * f^{1/2}} \right)$$

$$f = 0.0349$$

Por último, se calculan las pérdidas de carga primarias con las longitudes de los tramos rectos de las tuberías que se muestran en la Tabla 4, siendo la tubería “n” la que conecta con la bomba n. Las longitudes de cada tubería han sido calculadas como la altura del tanque más la distancia desde el centro del tanque a la popa del buque, ya que ahí se encuentra el Manifold.

Tubería 1	201.50 m
Tubería 2	162.60 m
Tubería 3	138.03 m
Tubería 4	114.30 m
Tubería 5	90.90 m

*Tabla 4: Longitud de los tramos rectos de cada tubería – Elaboración propia.*

Las pérdidas de carga primaria se muestran en la Tabla 5.

Tubería 1	16,88 m
Tubería 2	13,62 m
Tubería 3	11,56 m
Tubería 4	9,57 m
Tubería 5	7,61 m

*Tabla 5: Pérdidas primarias de cada tubería – Elaboración propia.*

### 3.8 Pérdidas de carga secundaria

Al igual que anteriormente, para el cálculo de las pérdidas secundarias ( $h_m$ ) también se usa la ecuación de Darcy-Weisbach, pero esta vez para pérdidas secundarias, donde  $k$  es un coeficiente que es determinado según el tipo de pérdida secundaria.

$$h_m = k * \frac{V^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación 13}$$

Como ya se especificó en el apartado 1.8, el valor de  $k$  varía según sea un codo, válvula, entrada o salida a tubería, etc. En este caso, se va a diseñar el sistema de tuberías con 3 codos de  $90^\circ$ , y 3 válvulas, manteniendo la disposición actual.

Las válvulas de las que dispone el buque actualmente son de tipo mariposa con cuerpo de fundición nodular, disco de bronce y junta de Viton, ver ANEXO IX: Filosofía de Carga del Buque II. No obstante, se ha de elegir otra válvula a la actual que se adecúe al diámetro de la nueva tubería.

En este caso se ha elegido una válvula mariposa de la empresa Sigeval<sup>13</sup> de tipo BBNV(w) DN350 con asiento vulcanizado y con un espesor de la hoja de 78mm, que no requiere casi mantenimiento y especializada en la industria naval, ver Ilustración 7.

---

<sup>13</sup> Fuente: <https://www.sigeval.com/productos/bbnvw-type/?lang=en>



*Ilustración 7: Válvula mariposa tipo BBNV(w) – Fuente Sigeval.*

El coeficiente k de la válvula mariposa es calculado con la siguiente ecuación<sup>14</sup>:

$$k = \frac{\text{espesor hoja}}{\text{diámetro}} = \frac{78}{350} = 0.223 \quad \text{Ecuación 14}$$

Los codos que se van a instalar son del mismo acero al carbono del resto de la tubería, es decir, 20S.

En este caso, se ha elegido un codo de 90° de la empresa Ample Alloys<sup>15</sup> Buttweild ANSI B16.9 DN350, ver Ilustración 8.

<sup>14</sup> Fuente: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/364/1/t170id.pdf>

<sup>15</sup> Fuente: <http://www.micronsteel.com/ansi-asme-b16-9-elbow/>



Ilustración 8: Codo 90º Butt weld ANSI B16.9 DN350 - Fuente ASME Alloys.

Los valores de k según el tipo de pérdida de carga se muestran en la Tabla 6<sup>16</sup>.

Válvula mariposa: completamente abierta	0.223
Codo 90º ASME B16.9 soldado	0.5
Salida y entrada de la tubería	1

Tabla 6: Valores de K según el tipo de pérdida de carga.

Una vez establecidos los valores del coeficiente k, y sabiendo del apartado 1.7 que la velocidad del fluido en la tubería es de 4m/s, se calcula la pérdida de carga secundaria por cada tubería.

Tubería 1	3,40 m
Tubería 2	3,40 m
Tubería 3	3,40 m
Tubería 4	3,40 m
Tubería 5	3,40 m

Tabla 7: Pérdidas de carga secundarias de cada tubería - Fuente, elaboración propia.

<sup>16</sup> Fuente: <https://librosdrvaliente.files.wordpress.com/2015/09/capc3adtulo-7-cac3addas-de-presic3b3n-en-tuberc3adas-comerciales.pdf>

## 4.8 Cálculo de la Potencia II

Una vez que se sabe el valor de las pérdidas de carga primaria y secundaria por cada tubería, con la Ecuación 9 determinada en el apartado 1.8, se determina el valor de la potencia necesaria de la bomba de pozo. Para ello, se usan los datos calculados previamente, la densidad mencionada en el apartado 4.4 y un rendimiento de la bomba de 80%<sup>17</sup>.

$$P = \frac{(\rho * g * (a + h + 71.4)) * Q}{\eta} = \frac{(\rho * g * (a + hf + hm + 71.4)) * Q}{\eta}$$

Tubería 1	421 kW
Tubería 2	409 kW
Tubería 3	401 kW
Tubería 4	393 kW
Tubería 5	386 kW

Tabla 8: Potencia necesaria por cada tubería – Elaboración propia.

<sup>17</sup> Valor mínimo del rendimiento de las bombas hidráulicas. Dato aportado por el fabricante.

## Capítulo 9. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

La bomba de pozo seleccionada para el sistema de bombeo debe de cumplir las anteriores especificaciones para poder operar crudo con un caudal mayor de 1306 m<sup>3</sup>/h.

Por cuestiones de mantenimiento y averías, el buque ha de tener un solo tipo de bomba, pudiendo así tener piezas de recambio si una de ellas no funciona adecuadamente o si hay que cambiar de tanque una de las bombas.

Además, la bomba de carga ha de ser hidráulica por cuestiones de seguridad, ya que se está tratando con un material inflamable.

Por ello, se elige la bomba que requiera más potencia, es decir, la bomba de la tubería 1, ver Tabla 8. La bomba de pozo se ha seleccionado de la empresa Framo, empresa noruega especializada en bombas de carga hidráulicas.

Como se puede ver en la Ilustración 9, la única bomba hidráulica con el caudal requerido, y con el diámetro necesario, es la bomba tipo SD 350 <sup>18</sup>.

---

<sup>18</sup> Fuente: <https://www.framo.com/cargo-pumping-systems/cargo-pumping/submerged-cargo-pumping/>

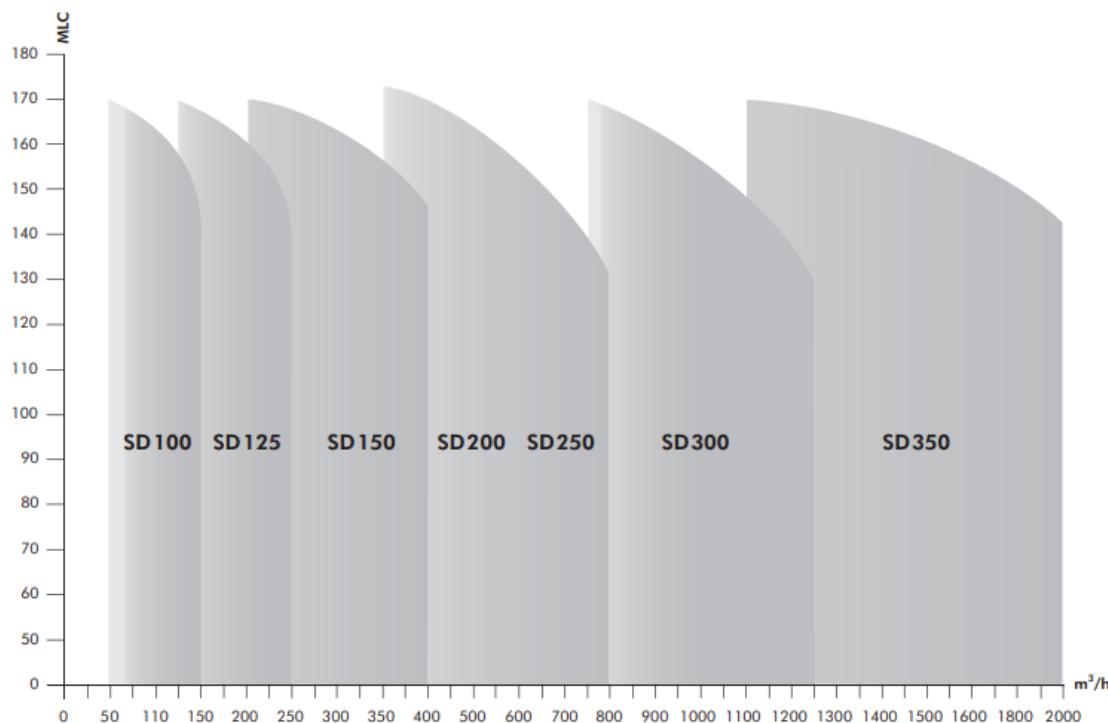


Ilustración 9: Rango del posible caudal bombeado por cada tipo de bomba - Fuente Framo.

Las características de la bomba seleccionada se muestran en la Tabla 9.

Rango del Caudal	Desde 1100 m <sup>3</sup> /h, hasta 2000 m <sup>3</sup> /h.
Peso (por cada 10 m)	2247 Kg.
Brida de Carga	DN 350.

Tabla 9: Características bomba de carga hidráulica SD350 - Fuente Framo.

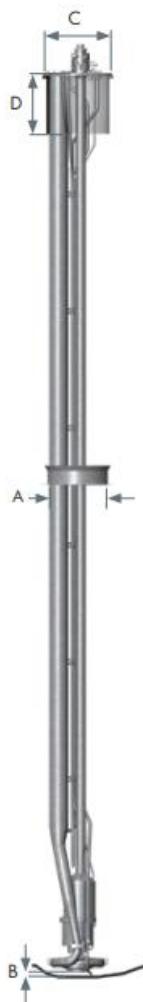


Ilustración 10: Bomba de carga hidráulica tipo SD300 - Fuente: Framo.

Las dimensiones de la bomba de carga se muestran en la Tabla 10.

A	1000 mm
B	100 mm
C	1100 mm
D	500 mm

Tabla 10: Dimensiones de la bomba de carga hidráulica tipo SD350 - Fuente Framo.

## Capítulo 10. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 1.10 Introducción

La transmisión de calor entre dos cuerpos se produce debido a que estos se encuentran a distintas temperaturas y tienden a alcanzar el equilibrio térmico, es decir, que ambos cuerpos se encuentren a la misma temperatura, *Ley cero de la Termodinámica*.

Esta transmisión de calor, que es la transmisión de energía de un cuerpo a otro, puede darse de tres formas distintas: entre dos cuerpos sólidos en contacto, conducción; entre un sólido y un fluido en contacto, convección; y entre dos cuerpos que no están en contacto, radiación.

En el problema que nos concierne se encuentra un fluido, el crudo, en un tanque de acero naval, el cual está rodeado por una capa de aire, lastre, y todo ello dentro del casco del buque, es decir, en todas las caras de contacto habrá transmisión de calor por convección. Además, una parte del barco se encuentra sumergida en el agua, mientras la otra parte se encuentra en contacto con el aire. Ver Ilustración 11 e Ilustración 12 para ver la representación y dimensiones del tanque en metros, ambas son representaciones de la vista frontal del buque.

Se va a estudiar el tanque 1, ya que tiene las peores condiciones: a proa está en contacto con el pique de proa (aire), y por popa la antigua torreta, que ahora será un tanque vacío (aire). Ver Ilustración 2. Mientras que a estribor y babor del tanque se encuentra en contacto con el mar o aire exterior, según el caso.

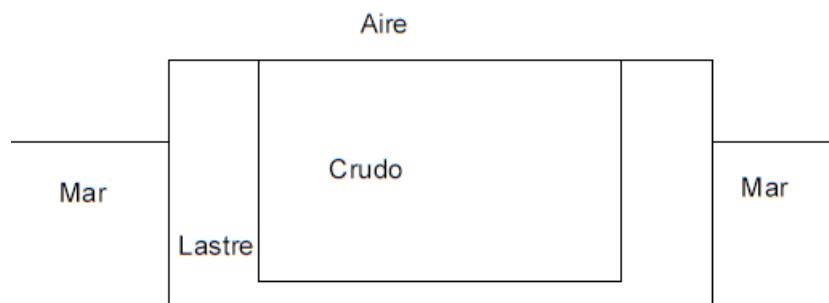


Ilustración 11: Representación frontal tanque-lastre - Elaboración propia.

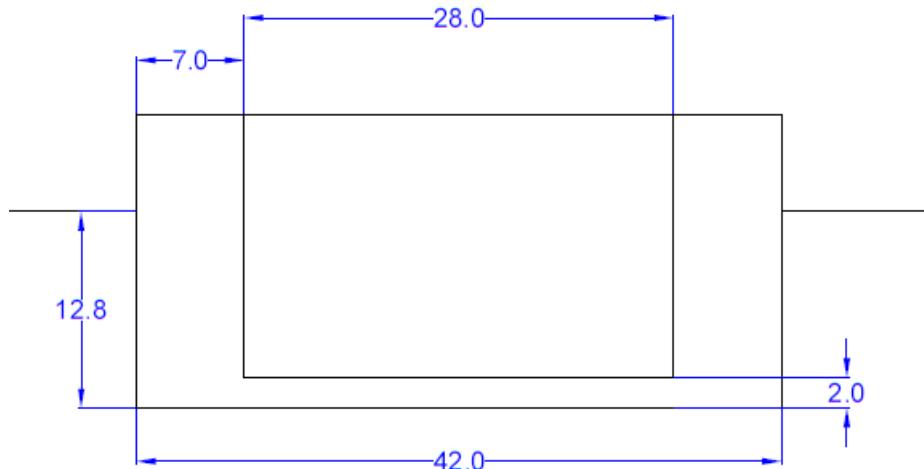


Ilustración 12: Dimensiones tanque-lastre en metros - Elaboración propia.

## 2.10 Cálculo de la pérdida de Energía

La pérdida de energía del crudo es calculada con la ecuación:

$$q_{\text{entra}} + q_{\text{generada}} = q_{\text{sale}} + U + W_{\text{expansión}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Como el crudo en cuestión está en contacto con las superficies de su entorno (tanque) la energía transmitida se realiza por convección.

Siendo:

$Q_{\text{entra}}$  la potencia calorífica que entra al crudo

$Q_{\text{generada}}$  la potencia calorífica que genera el crudo, en nuestro caso el crudo no genera potencia calorífica, luego el término es igual a cero.

$Q_{\text{sale}}$  la potencia calorífica que sale del elemento.

$U$  la velocidad a la que cambia la energía del crudo. Se calcula como:

$$U = \rho * c * \frac{\partial T}{\partial t} * dV \quad \text{Ecuación 16}$$

$W_{\text{expansión}}$  el trabajo de dilatación del elemento, despreciable en sólidos y líquidos.

La expresión resultante es:

$$q_{\text{entra}} = q_{\text{sale}} + \rho * c * \frac{\partial T}{\partial t} * dV \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde  $q_{\text{entra}} - q_{\text{sale}}$  se puede expresar como menos la diferencia de potencia calorífica en  $x$ ,  $y$  o  $z$  por la distancia en  $x$ ,  $y$  o  $z$ .

$$q_{entra\ x} - q_{sale\ x} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} * dx \quad Ecuación\ 18$$

$$q_{entra\ y} - q_{sale\ y} = - \frac{\partial q_y}{\partial y} * dy \quad Ecuación\ 19$$

$$q_{entra\ z} - q_{sale\ z} = - \frac{\partial q_z}{\partial z} * dz \quad Ecuación\ 20$$

Además, según la ley de Fourier:

$$q = -K * A * \frac{\partial T}{\partial x} \quad Ecuación\ 21$$

Luego la ecuación de la energía resultante es:

$$(K_x * dy * dz * \frac{\partial T}{\partial x}) * dx * \frac{\partial}{\partial x} + (K_y * dx * dz * \frac{\partial T}{\partial y}) * dy * \frac{\partial}{\partial y} + (K_z * dx * dy * \frac{\partial T}{\partial z}) * dz * \frac{\partial}{\partial z} = \rho * c * \frac{\partial T}{\partial t} * dV \quad Ecuación\ 22$$

Dividiendo  $dV$  ( $dV = dx * dy * dz$ ) en ambos términos de la ecuación se obtiene:

$$(K_x * \frac{\partial T}{\partial x}) * \frac{\partial}{\partial x} + (K_y * \frac{\partial T}{\partial y}) * \frac{\partial}{\partial y} + (K_z * \frac{\partial T}{\partial z}) * \frac{\partial}{\partial z} = \rho * c * \frac{\partial T}{\partial t} \quad Ecuación\ 23$$

Sin embargo, estos cálculos requieren mucho tiempo para realizarlos debido a las grandes dimensiones del tanque y la larga duración de tiempo que tendrá la transmisión de calor. Por ello se va a realizar los cálculos con el programa ANSYS.

### **3.10 Cálculo de la temperatura con ANSYS**

Como se ha mencionado anteriormente, para determinar la temperatura del crudo al final del traslado, se van a realizar los cálculos con un modelo de los tanques en ANSYS Workbench y posteriormente será calculada la temperatura a lo largo del crudo con ANSYS Transient Thermal.

Se va a hacer un estudio por elementos finitos del tanque para calcular las pérdidas de calor que se producen en el crudo y determinar la temperatura final del crudo a su llegada a la refinería.

Se van a discernir dos métodos para resolver el problema en cuestión a través de ANSYS. En primer lugar se va a resolver creando un modelo del tanque y lastre, y estableciendo la conductividad térmica de cada elemento. Por otro lado, se va a resolver creando un modelo del tanque sin el lastre y estableciendo la conductividad térmica equivalente, este modelo simplifica el cálculo al reemplazar acero, lastre y la condición externa por una única conductividad térmica equivalente.

#### **4.10 Método I: Estableciendo la conductividad térmica de cada elemento.**

En primer lugar, se ha realizado un modelo los tanques con el tanque de lastre. Sin embargo, debido a que el acero presenta una conductividad térmica muy alta, por lo que tiene una resistencia térmica muy baja, se va a suponer que el acero no interfiere en la transmisión de calor entre los cuerpos. Por lo que no se va a representar el acero del tanque ni del casco.

Además, debido a la doble simetría del tanque y el lastre se va a representar un cuarto del modelo. Con ello se busca reducir el número de cálculos necesarios para determinar la temperatura final del crudo. Así mismo, debido a la reducción del número de operaciones, se puede realizar un mallado del tanque y lastre más fino, con lo que se puede determinar con más exactitud la temperatura final del crudo.

Para realizar el modelo del tanque primero se ha dividido en 4 partes: el crudo, el gas inerte que se encuentra dentro del tanque (mencionado en 3.4 Tanques, página XV), el lastre en contacto con el agua del mar, y el lastre en contacto con el aire exterior. Ver Ilustración 13.

Sin embargo, aunque normalmente los tanques de lastre se encuentran llenos de aire en la condición de carga máxima, el estudio se va a realizar con agua en su interior. El tanque de lastre puede estar lleno de agua en el caso que el estudio estructural lo requiera. Generalmente esto ocurre cuando el peso estructural es menor del mínimo recomendado. Por ejemplo, en el caso en el que se transporte crudo con los tanques parcialmente llenos.

Como el agua tiene una conductividad térmica más elevada y se quiere estudiar el caso en las peores condiciones posibles, se va a realizar el estudio con los tanques de lastre llenos de agua.

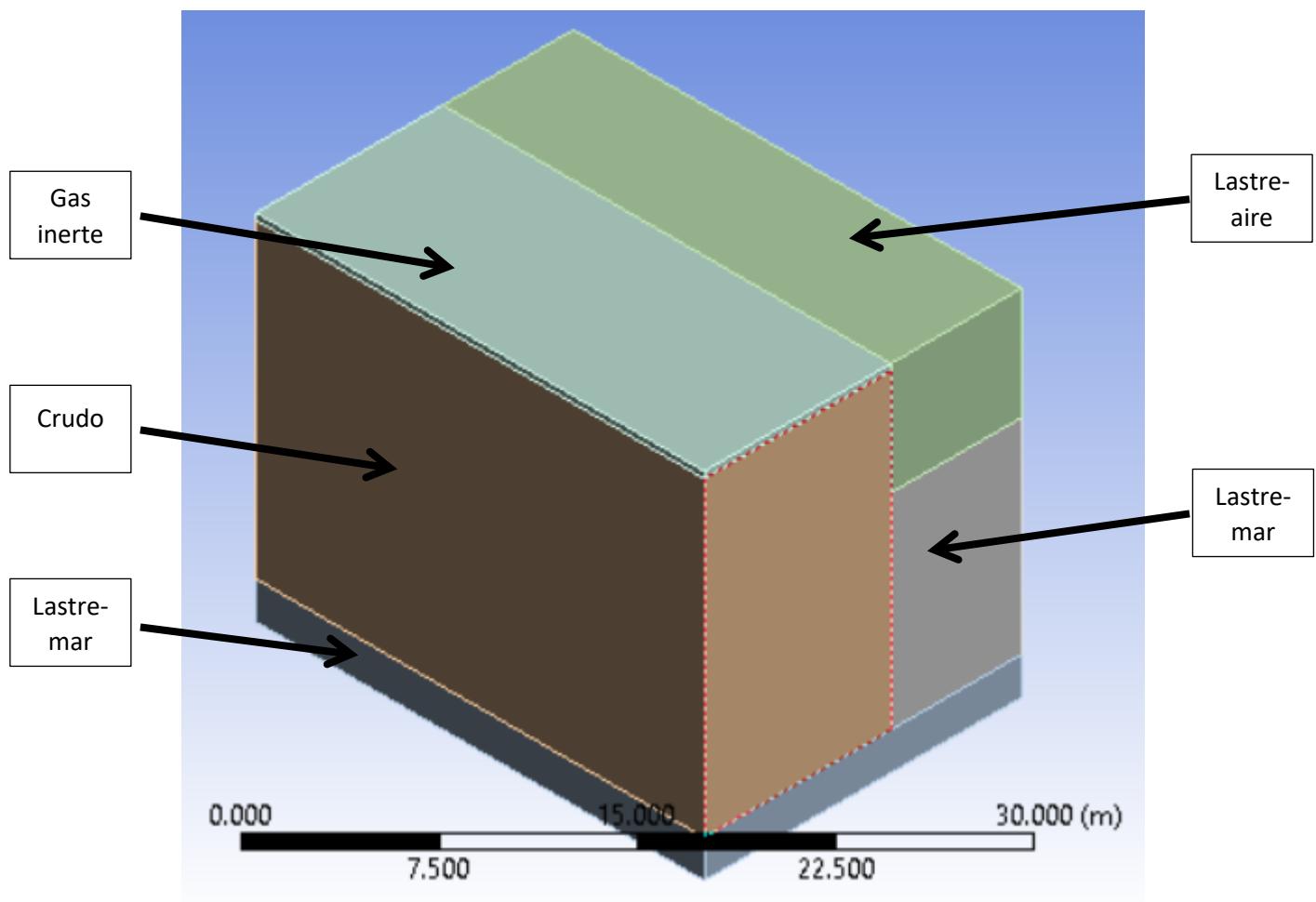
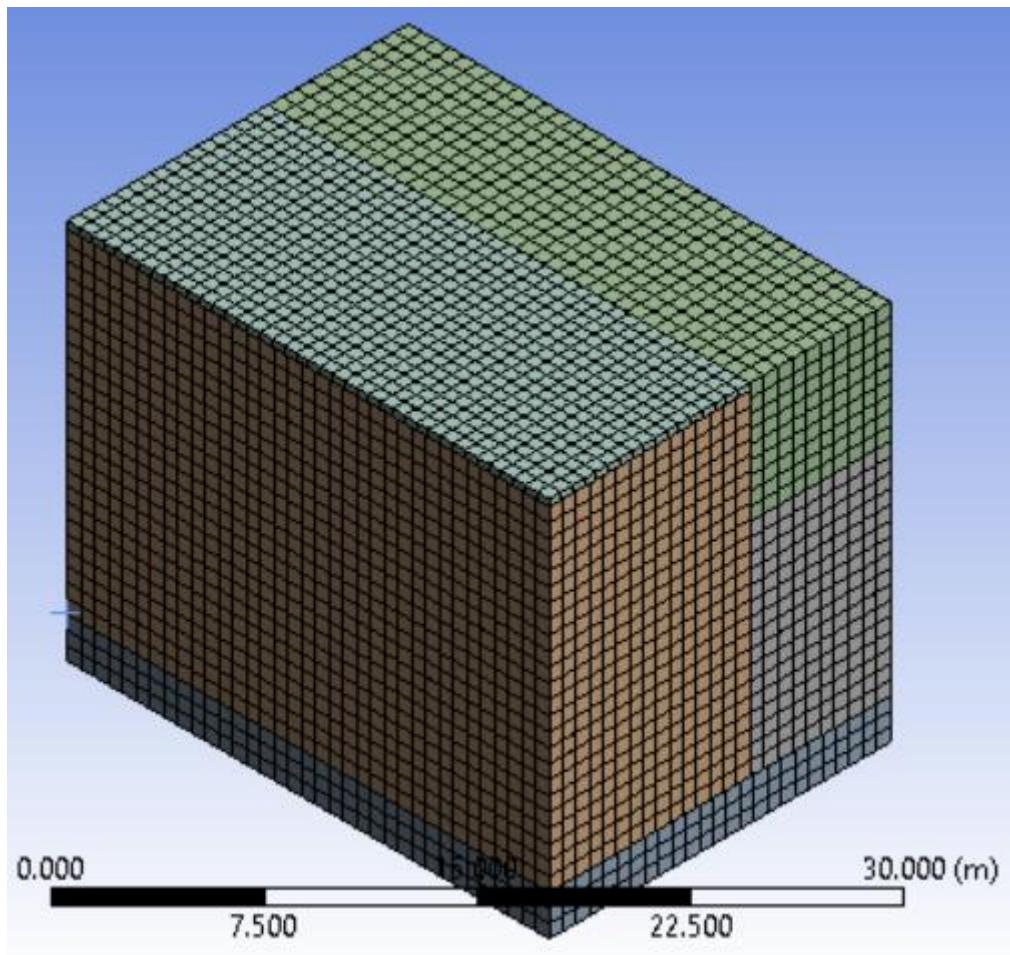


Ilustración 13: Representación de un cuarto de tanque – Elaboración propia.

Una vez establecido el modelo se ha realizado un mallado de 0.3 metros de todos los elementos. Con ello se quiere precisar la temperatura que tendrán los elementos en cada punto del mallado. Ver Ilustración 14.



*Ilustración 14: Mallado del tanque y lastre – Elaboración propia.*

A continuación, se establecen los materiales de cada elemento del modelo, con sus características correspondientes. Ver Tabla 11, Tabla 12, y Tabla 13.

Aire	
Densidad	1.225 Kg/m <sup>3</sup>
Conductividad Térmica	0.0242 W/m °C
Calor Específico	1006.4 J/Kg °C

*Tabla 11: Propiedades Aire exterior - Elaboración propia.*

Crudo	
Densidad	889 kg/m <sup>3</sup>
Conductividad Térmica	0.145 W/m °C
Calor Específico	1845 J/kg °C

Tabla 12: Propiedades Crudo - Elaboración propia.

Agua	
Densidad	998.2 kg/m <sup>3</sup>
Conductividad Térmica	0.6 W/m °C
Calor Específico	4182 J/kg °C

Tabla 13: Propiedades Agua - Elaboración propia.

Una vez establecido los materiales se procede a establecer las temperaturas iniciales de cada elemento del modelo<sup>19</sup>. Ver Tabla 14.

Temperaturas Iniciales	
Crudo	60 °C
Aire en el interior del tanque	60 °C
Aire del lastre	6 °C
Agua de mar	0 °C
Aire Exterior	-5 °C

Tabla 14: Temperaturas Iniciales de los elementos del modelo - Elaboración propia.

Posteriormente se establecen en las caras correspondientes la transmisión de calor por convección. Sin embargo, primero hay que determinar los valores del coeficiente de transmisión,  $h$ , en las caras donde se produce la transmisión de calor por convección<sup>20</sup>, ver Tabla 15.

<sup>19</sup> Las condiciones ambientales estaban definidas en la especificación del buque.

<sup>20</sup> Datos calculados por el equipo de Seaplace.

Conductividad Térmica	
Cubierta	8.13 W/m <sup>2</sup> K
Lateral en contacto con agua de mar	1250 W/m <sup>2</sup> K
Lateral en contacto con aire exterior	29 W/m <sup>2</sup> K
Casco	1250 W/m <sup>2</sup> K

Tabla 15: Coeficiente de convección <sup>21</sup>.

Por último, se estima la duración de tiempo que el buque permanecerá en mar hasta su llegada a la refinería en Rotterdam. Para ello es necesario saber la distancia y velocidad del buque durante el recorrido.

La distancia es medida a través de Google Maps<sup>22</sup> desde Escocia, hasta la refinería en Rotterdam, obteniendo una distancia total de 386 millas náuticas (715 km). La velocidad del buque ha sido calculada por un equipo de Seaplace, obteniendo una velocidad media de 10 nudos, es decir, 18.52 km/h. Lo que conlleva a un total de 38.6 horas de duración del trayecto.

Una vez introducidos todos los datos en ANSYS, se obtienen los resultados mostrados en la Ilustración 15, el Gráfico 2, y la Tabla 16.

<sup>21</sup> Fuente: [https://kntu.ac.ir/dorsapax/userfiles/file/mechanical/ostadfile/dr\\_avami/1.pdf](https://kntu.ac.ir/dorsapax/userfiles/file/mechanical/ostadfile/dr_avami/1.pdf)

<sup>22</sup> Referencia: <https://www.google.com/maps>

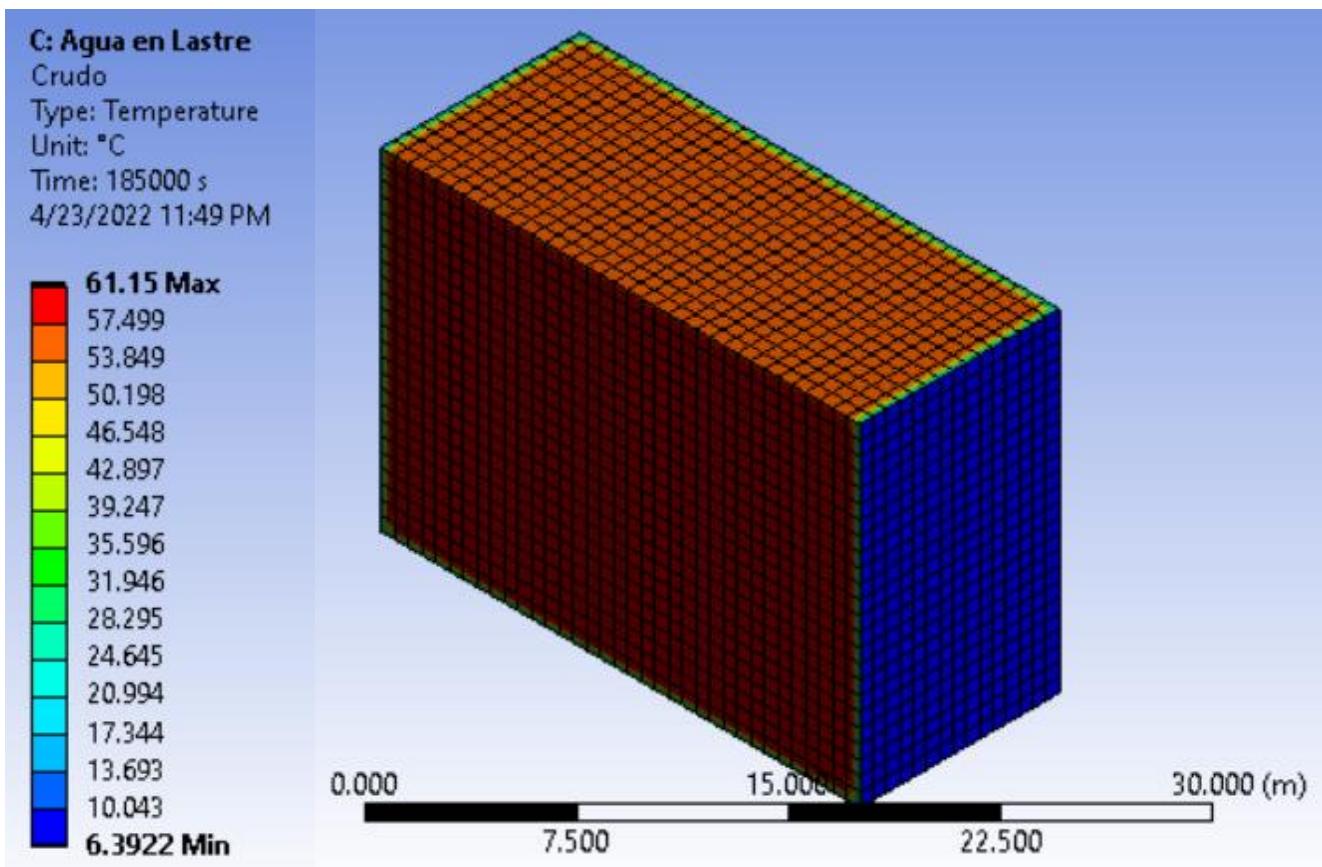


Ilustración 15: Temperatura final del Crudo, Método I - Elaboración propia.

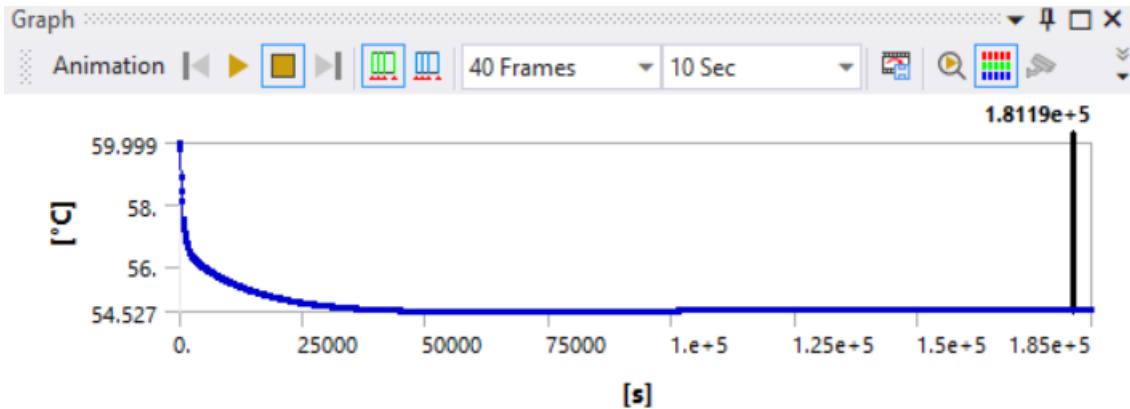


Gráfico 2: Temperatura del crudo según el tiempo, Método I - Elaboración propia.

Tabular Data				
	Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]	Average [°C]
1538	1.8371e+005	6.3912	61.133	54.574
1539	1.8383e+005	6.3913	61.135	54.574
1540	1.8395e+005	6.3914	61.136	54.574
1541	1.8407e+005	6.3915	61.138	54.574
1542	1.8419e+005	6.3916	61.139	54.574
1543	1.8431e+005	6.3917	61.141	54.574
1544	1.8443e+005	6.3918	61.143	54.574
1545	1.8455e+005	6.3919	61.144	54.574
1546	1.8467e+005	6.392	61.146	54.574
1547	1.8479e+005	6.3921	61.147	54.574
1548	1.8491e+005	6.3922	61.149	54.574
1549	1.85e+005	6.3922	61.15	54.574

Tabla 16: Temperatura final del Crudo, Método I - elaboración propia.

Como se puede comprobar la temperatura media del crudo es de 54.574°C. La temperatura mínima se alcanza en las aristas del tanque, lo cual es un resultado lógico ya que en las aristas deben estar los puntos más críticos, en contacto con el lastre y el aire.

Por lo tanto, como el crudo no baja de los 40°C de temperatura media, el proyecto puede llevarse a cabo.

## 5.10 Método II: Calculando el coeficiente de transferencia de calor equivalente

Como se ha mencionado anteriormente en el apartado 3.1, página XLI, para reducir el número de cálculos necesarios para determinar la temperatura final del crudo, se va a estudiar el caso reduciendo el número de nodos, para ello se va a eliminar el lastre y el gas inerte del modelo, y se va a calcular el coeficiente de transferencia de calor equivalente.

El proceso realizado en este método sigue el mismo orden de pasos que el Método I. Sin embargo, el modelo que se crea solo será el del crudo, sin lastre, y el coeficiente de transferencia de calor correspondiente a cada cara del crudo es calculado por la ecuación mostrada a continuación<sup>23</sup>.

$$\frac{1}{K} = \sum \frac{1}{h} + \frac{t}{l} \quad \text{Ecuación 24}$$

Por ejemplo, el coeficiente de transferencia de calor equivalente de la parte inferior del crudo es calculado de la siguiente forma. Siendo  $t_1$  el espesor del tanque,  $t_2$  el espesor del casco del barco,  $l_1$  y  $l_2$  el coeficiente de conductividad térmica del material, y  $h_1$  y  $h_2$  el coeficiente de transmisión de calor del agua del lastre y del mar respectivamente. Estos valores se muestran en la Tabla 17.

$$\frac{1}{K} = \sum \frac{1}{h_1} + \frac{t_1}{l_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{t_2}{l_2} \quad \text{Ecuación 25}$$

---

<sup>23</sup> Fuente: <https://www.mundohvacr.com.mx/2008/07/calculo-de-transmision-en-elementos-constructivos-y-temperatura-de-sus-superficies/>

Espesor del casco	12 mm
Espesor del tanque	12 mm
Coeficiente de conductividad térmica del acero	58.1 W/mk
Coeficiente de transmisión de calor agua de lastre en los laterales del tanque	17.5 W/m <sup>2</sup> K
Coeficiente de transmisión de calor agua de lastre en el inferior del tanque	8.13 W/m <sup>2</sup> K
Coeficiente de transmisión de calor del agua de mar	1250 W/m <sup>2</sup> K
Coeficiente de transmisión de calor del aire exterior	29 W/m <sup>2</sup> K

Tabla 17: Espesores y coeficientes para el cálculo del coeficientes de transferencia de calor – Fuente Seaplace, Especificaciones del barco.

Resolviendo la ecuación mostrada anteriormente para cada cara se obtienen los valores del coeficiente de transmisión de calor equivalente para cada una de ellas, las operaciones se muestran en el apartado 3.15. Los resultados se pueden ver en la Tabla 18.

Parte inferior del crudo	8.1 W/Km <sup>2</sup>
Parte superior del crudo, cubierta	6.3 W/Km <sup>2</sup>
Parte frontal del crudo, proa	5.5 W/Km <sup>2</sup>
Parte lateral del crudo en contacto con el mar	17.1 W/Km <sup>2</sup>
Parte lateral del crudo en contacto con el aire	10.9 W/Km <sup>2</sup>

Tabla 18: Coeficiente de Transferencia de Calor equivalente - Elaboración propia.

Como se realizó en el Método I, el modelo se ha dividido en dos figuras. La figura inferior representa el crudo que realiza la transmisión de calor por convección con el agua de mar, la parte superior representa el crudo que realiza la transmisión de calor por convección con el aire. Ver Ilustración 16.

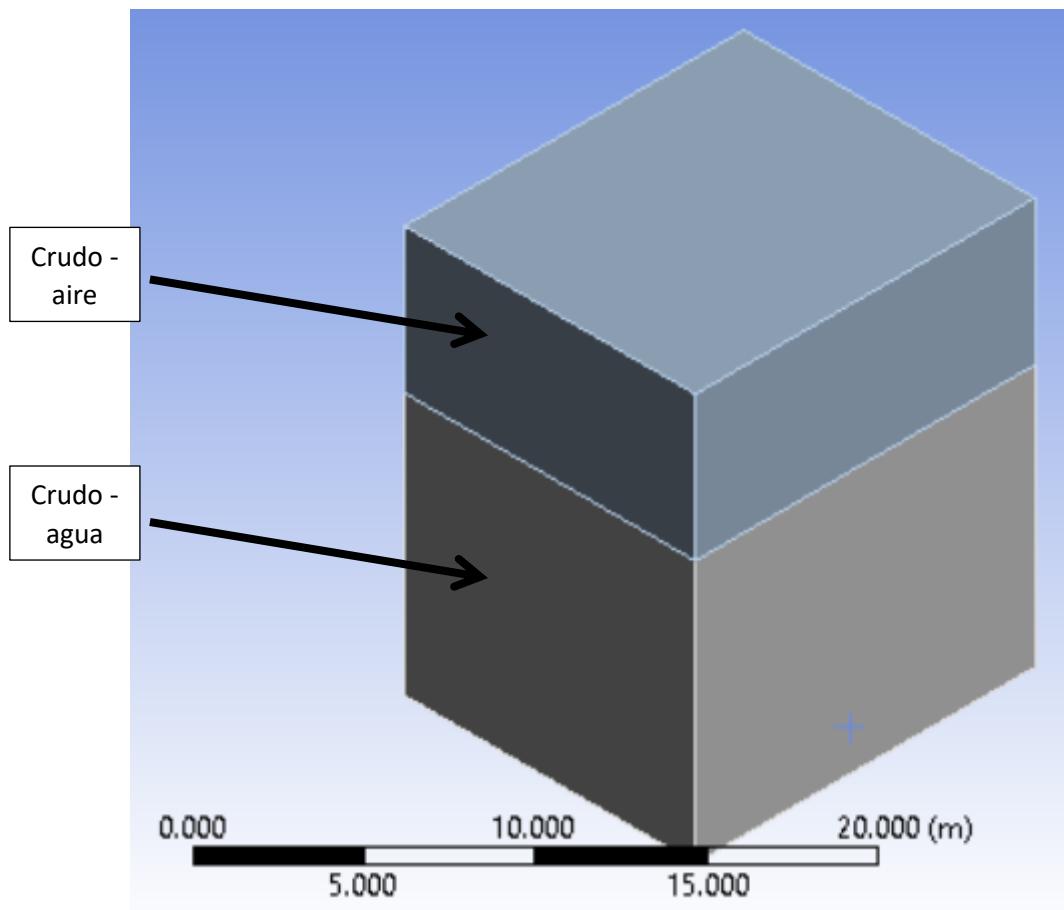
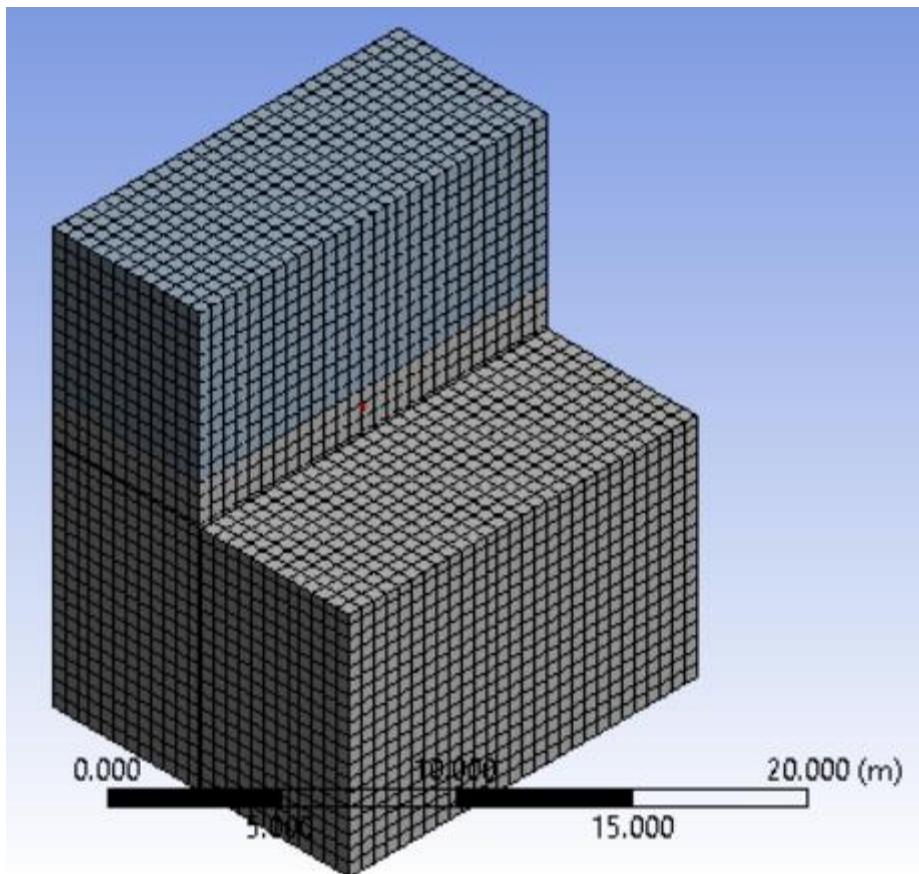


Ilustración 16: : Representación Crudo - Elaboración propia.

Al igual que se hizo en el Método I, se establece un mallado de 0.3m a todo el modelo, ver Ilustración 17.



*Ilustración 17: Mallado del modelo - Elaboración propia.*

Por último, se establece la transmisión por convección en cada una de las caras con sus valores correspondientes y se obtienen los siguientes resultados, ver Ilustración 18, Gráfico 3 y Tabla 19.

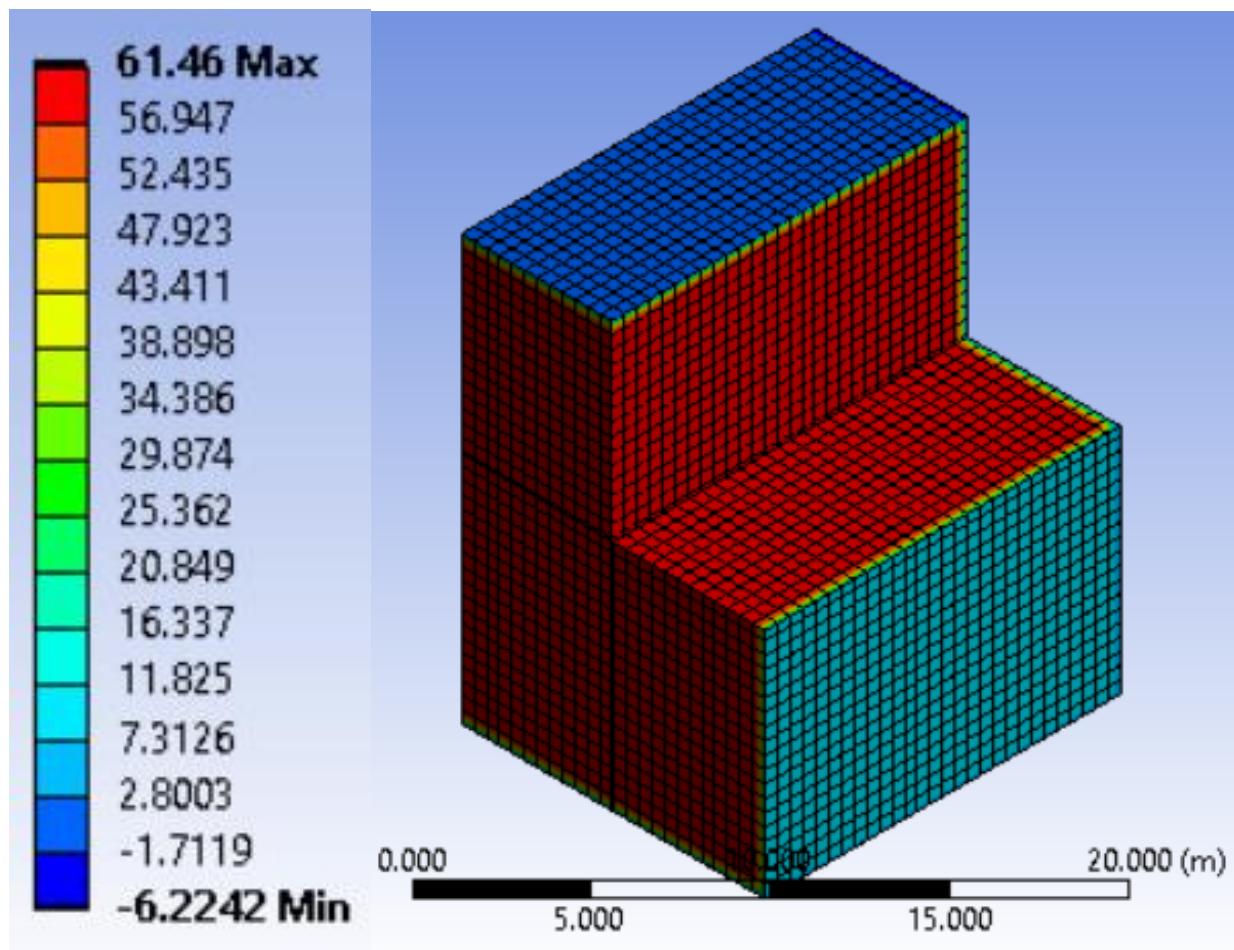


Ilustración 18: Temperatura final del Crudo, Método II - Elaboración propia.

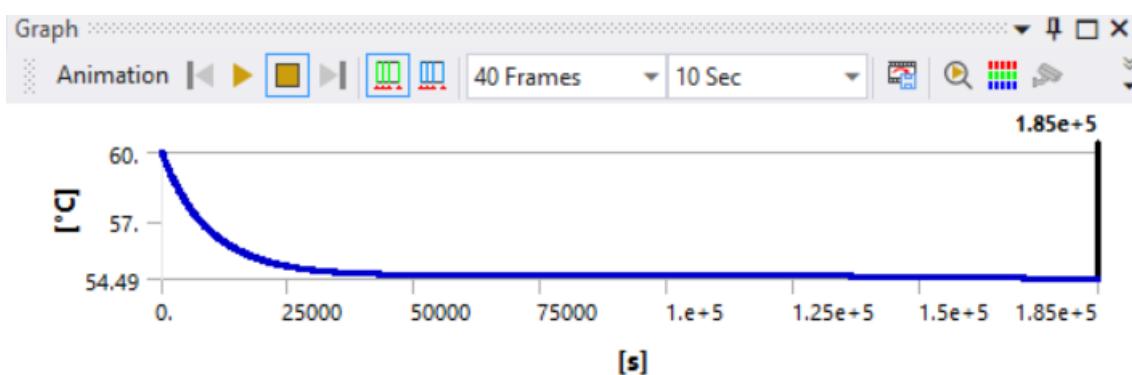


Gráfico 3: Temperatura del crudo según el tiempo, Método II - Elaboración propia.

Tabular Data				
	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [°C]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [°C]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [°C]
1540	1.837e+005	-6.2268	61.474	54.494
1541	1.8382e+005	-6.2265	61.473	54.493
1542	1.8394e+005	-6.2263	61.472	54.493
1543	1.8406e+005	-6.226	61.47	54.493
1544	1.8418e+005	-6.2258	61.469	54.492
1545	1.843e+005	-6.2256	61.468	54.492
1546	1.8442e+005	-6.2253	61.466	54.492
1547	1.8454e+005	-6.2251	61.465	54.491
1548	1.8466e+005	-6.2249	61.463	54.491
1549	1.8478e+005	-6.2246	61.462	54.49
1550	1.849e+005	-6.2244	61.461	54.49
1551	1.85e+005	-6.2242	61.46	54.49

Tabla 19: Temperatura final del Crudo, Método II - elaboración propia.

Como se puede comprobar, los resultados obtenidos son muy parecidos a los obtenidos en el Método I, es decir, el coeficiente de transferencia de calor equivalente calculado es correcto.

Por lo tanto, **el transporte de crudo puede llevarse a cabo** ya que la temperatura media del crudo no es inferior a 40°C, la mínima temperatura a la que el crudo puede ser bombeado.

## 6.10 Cálculos Suplementarios

También se ha querido estudiar el tiempo que tardaría el crudo en reducir su temperatura a menos de 40°C. Para ello, se ha utilizado el modelo de ANSYS ya empleado en el Método II. Se ha elegido el Método II en vez del Método I debido a que con el Método II son necesarias menos ecuaciones para calcular la temperatura final de crudo. Ver Ilustración 19, Gráfico 4, y Tabla 20.

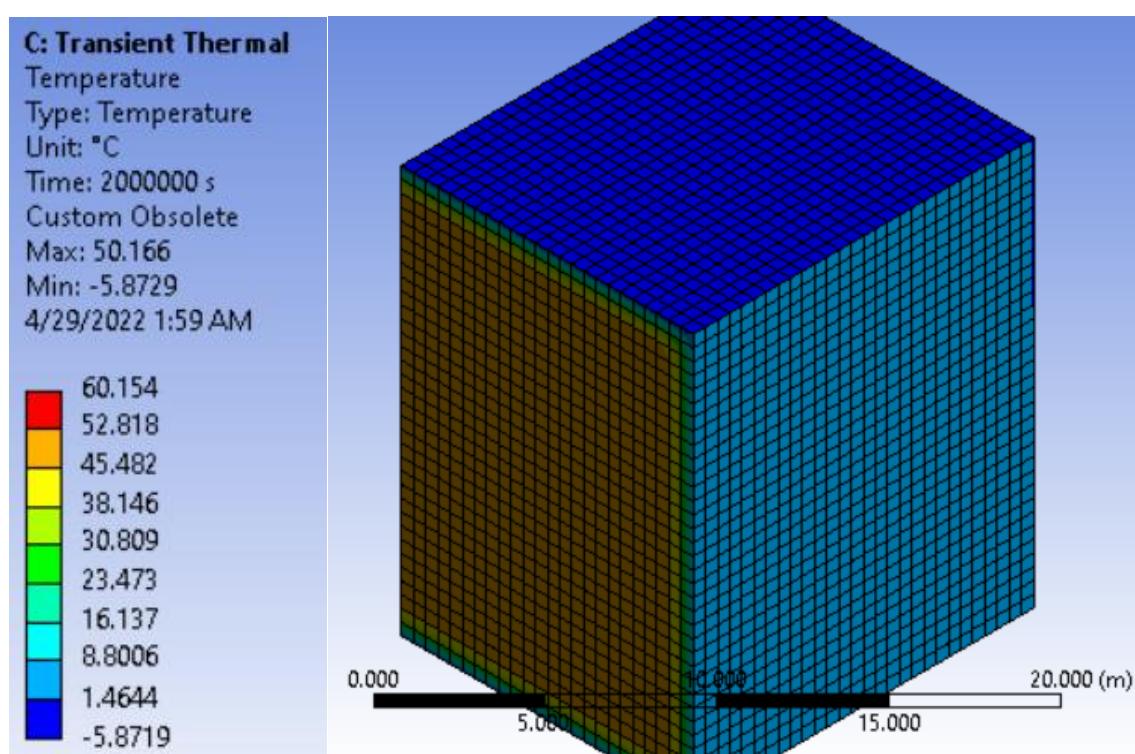


Ilustración 19: Temperatura final del Crudo, Cálculos Suplementarios - Elaboración propia.

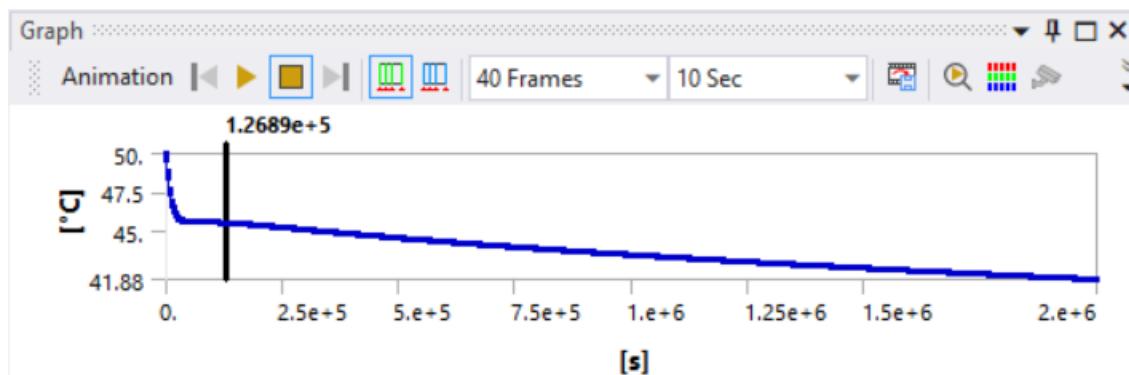


Gráfico 4: Temperatura final del Crudo, Cálculos Suplementarios - Elaboración propia.

	Time [s]	<input type="checkbox"/> Minimum [°C]	<input type="checkbox"/> Maximum [°C]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [°C]
3333	1.9935e+006	-5.8729	50.167	41.889
3334	1.9941e+006	-5.8729	50.167	41.888
3335	1.9947e+006	-5.8729	50.167	41.887
3336	1.9953e+006	-5.8729	50.167	41.886
3337	1.9959e+006	-5.8729	50.167	41.886
3338	1.9965e+006	-5.8729	50.167	41.885
3339	1.9971e+006	-5.8729	50.167	41.884
3340	1.9977e+006	-5.8729	50.167	41.883
3341	1.9983e+006	-5.8729	50.167	41.882
3342	1.9989e+006	-5.8729	50.167	41.882
3343	1.9995e+006	-5.8729	50.166	41.881
3344	2.e+006	-5.8729	50.166	41.88

Tabla 20: Temperatura final del Crudo, Cálculos Suplementarios - Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 20, el crudo tardaría en llegar a 40°C más de 2E+06 segundos, es decir, más de 23 días.

## Capítulo 11. EJERCICIO ECONÓMICO

### 1.11 Modificación FPSO a shuttle tanker

Como se ha mencionado anteriormente en el punto 3.3, página XII, la conversión del buque FPSO Petrojarl Foinaven a un shuttle tanker requiere la eliminación del módulo de producción y torreta, un nuevo sistema de tuberías con un diámetro suficientemente grande para descargar el crudo con el caudal necesario, y bombas hidráulica con la suficiente potencia para descargar el crudo a la velocidad necesaria.

Se va a realizar un ejercicio económico de los próximos 15 años. Con ello se busca averiguar si este proyecto tiene más ventajas que la compra de un nuevo buque shuttle tanker. Para ello se dispone de la siguiente información.

Se estima que la **eliminación del módulo de producción y tanque** conlleva un gasto de **2 millones de euros**. El nuevo **sistema de bombeo tiene un valor de 3 millones** de euros con un vida útil de 10 000 horas<sup>24</sup>, y el **sistema de tuberías** un valor de **1.5 millones** de euros con una vida útil de 25 años. Además, los **15 codos** necesarios para el sistema de tuberías cuestan **150 euros cada uno**<sup>25</sup>.

Además, sabiendo que el buque se encuentra navegando durante casi 2 días por traslado de crudo, y que al llegar a la refinería tiene que esperar mínimo 1 día para el descanso de la tripulación o cambiarla, y que el buque se encuentra disponible un 90% de días del año, se prevé que el buque **será usado 216 días al año**.

<sup>24</sup> Datos proporcionados por la empresa Framo y del enlace: [https://www.framo.com/globalassets/pdf-files/no16\\_1997\\_framo\\_submerged\\_cargo\\_pump-pressure\\_testing\\_routine.pdf](https://www.framo.com/globalassets/pdf-files/no16_1997_framo_submerged_cargo_pump-pressure_testing_routine.pdf)

<sup>25</sup> Fuente de los datos: ofertas recibidas por Seaplace.

Se estima un coste de **1 millones de euros por el mantenimiento y reparaciones** cada vez que el buque entra en varada cada 4 años para granallar, pintar y echar una capa antiadherente al casco. Además se considera un coste del 10% del mantenimiento programado por varada cada cuatro años por reparaciones varias anuales.

También, se estima **6 000 euros anuales en aceite lubricante, 50 000 euros en provisiones, y 600 000 euros anuales por la compañía de seguros<sup>26</sup>**. Finalmente, se calcula unos **ingresos de 18 000 euros por cada día<sup>27</sup>** que el buque ha sido alquilado, es decir, 3.888 millones de euros anuales.

El coste de los salarios y seguridad social se ha calculado siguiendo la normativa del **Ministerio de Trabajo y Economía Social recogida en el BOE número 53<sup>28</sup>**. Además, para el cálculo también se ha tenido en cuenta la tripulación mínima necesaria del buque, la cual ha sido calculada según la normativa recogida en el **Real Decreto 963/2013**, de 5 de diciembre<sup>29</sup>.

El número de tripulantes necesarios para este buque con el salario y seguridad social de cada uno de ellos se muestra en la Tabla 21. La seguridad social se ha calculado como el 32% del salario, con un tope de 15.628,80 € por trabajador, como se recoge en el BOE.

El ejercicio económico de los próximos 15 años se ha realizado suponiendo un impuesto de sociedades del 25%<sup>30</sup>. Ver Tabla 22, Tabla 23, y Tabla 24.

<sup>26</sup> Fuente: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/kapal/article/download/10105/8028>

<sup>27</sup> Fuente: [https://www.bimco.org/news/market\\_analysis/2021/2021002\\_tanker\\_shipping](https://www.bimco.org/news/market_analysis/2021/2021002_tanker_shipping)

<sup>28</sup> BOE número 53: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-3350](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-3350)

<sup>29</sup> Real Decreto 963/2013: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2013-13808>

<sup>30</sup> Fuente: <https://www.raulflorido.com/impuesto-sociedades-que-es-cuanto-paga/>

**EJERCICIO ECONÓMICO**

	Rango	Número Personas	Salario anual	Salario total por rango	Seguridad Social	Salario + Seg. Social por rango
<i>Personal titulado de puente</i>	Capitán	1	58.059,82 €	58.059,82 €	18.579,14 €	76.638,96 €
	Piloto primera clase	1	48.825,34 €	48.825,34 €	15.624,11 €	64.449,45 €
	Piloto segunda clase	2	40.968,09 €	81.936,18 €	26.219,58 €	108.155,76 €
<i>Personal titulado de máquinas</i>	Jefe de maquinas	1	53.429,61 €	53.429,61 €	17.097,48 €	70.527,09 €
	Oficial de primera clase	1	44.262,04 €	44.262,04 €	14.163,85 €	58.425,89 €
	Oficial de segunda clase	2	39.745,63 €	79.491,26 €	25.437,20 €	104.928,46 €
<i>Personal de maestranza y subalterno de máquinas</i>	Bombero	1	30.863,53 €	30.863,53 €	9.876,33 €	40.739,86 €
	Ayudantes de bombero	2	22.100,32 €	44.200,64 €	14.144,20 €	58.344,84 €
	Calderero	1	29.876,38 €	29.876,38 €	9.560,44 €	39.436,82 €
	Engrasador	4	29.876,38 €	119.505,52 €	38.241,77 €	157.747,29 €
	Limpiador	5	29.876,38 €	149.381,90 €	47.802,21 €	197.184,11 €
<i>Personal de fonda</i>	Contramaestre	1	31.745,69 €	31.745,69 €	10.158,62 €	41.904,31 €
	Marineros	3	29.876,38 €	89.629,14 €	28.681,32 €	118.310,46 €
	Mozo	1	24.146,66 €	24.146,66 €	7.726,93 €	31.873,59 €
	Cocinero	1	32.820,02 €	32.820,02 €	10.502,41 €	43.322,43 €
	Marmitón	1	28.129,64 €	28.129,64 €	9.001,48 €	37.131,12 €
	Camareros	2	27.165,80 €	54.331,60 €	17.386,11 €	71.717,71 €
<b>TOTAL</b>		<b>30</b>	<b>1.000.634,97 €</b>	<b>320.203,19 €</b>	<b>1.320.838,16 €</b>	

Tabla 21: Cálculo Salario más Seguridad Social anual – Elaboración propia.

**EJERCICIO ECONÓMICO**

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<i>Ingresos</i>		3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €
Mantenimiento y reparaciones del buque		-100,00 €	-100,00 €	-100,00 €	-1.000,00 €	-100,00 €
Sueldos		-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €
Seguridad Social		-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €
Aceite Lubricante		-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €
Provisiones Compañía de Seguros		-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €
Amortización		-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €
BAI		-160,00 €	-160,00 €	-160,00 €	-160,00 €	-160,00 €
IMP	0,00 €	1.651,16 €	1.651,16 €	1.651,16 €	751,16 €	1.651,16 €
BDI	0,00 €	-412,79 €	-412,79 €	-412,79 €	-187,79 €	-412,79 €
Amortización	0,00 €	1.238,37 €	1.238,37 €	1.238,37 €	563,37 €	1.238,37 €
Inversión		160,00 €	160,00 €	160,00 €	160,00 €	160,00 €
Flujo de Caja	-6.502,25 €	1.398,37 €	1.398,37 €	1.398,37 €	723,37 €	1.398,37 €

Tabla 22: Ejercicio económico del proyecto en un plazo de 0-5 años (miles de euros) - Elaboración propia.

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<i>Ingresos</i>	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €
Mantenimiento y reparaciones del buque	-100,00 €	-100,00 €	-1.000,00 €	-100,00 €	-100,00 €
Sueldos	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €
Seguridad Social	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €
Aceite Lubricante	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €
Provisiones	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €
Compañía de Seguros	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €
Amortización	-160,00 €	-160,00 €	-160,00 €	-160,00 €	-160,00 €
BAI	1.651,16 €	1.651,16 €	751,16 €	1.651,16 €	1.651,16 €
IMP	-412,79 €	-412,79 €	-187,79 €	-412,79 €	-412,79 €
BDI	1.238,37 €	1.238,37 €	563,37 €	1.238,37 €	1.238,37 €
Amortización	160,00 €	160,00 €	160,00 €	160,00 €	160,00 €
Inversión					
Flujo de Caja	1.398,37 €	1.398,37 €	723,37 €	1.398,37 €	1.398,37 €

Tabla 23: Ejercicio económico del proyecto en un plazo de 6-10 años (miles de euros)- Elaboración propia.

	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
<i>Ingresos</i>					
Mantenimiento y reparaciones del buque	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €
Sueldos	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €
Seguridad Social	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €
Aceite Lubricante	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €
Provisiones	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €
Compañía de Seguros	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €
Amortización	-160,00 €	-160,00 €	-160,00 €	-160,00 €	-160,00 €
BAI	1.651,16 €	1.651,16 €	751,16 €	1.651,16 €	1.651,16 €
IMP	-412,79 €	-412,79 €	-187,79 €	-412,79 €	-412,79 €
BDI	1.238,37 €	1.238,37 €	563,37 €	1.238,37 €	1.238,37 €
Amortización	160,00 €	160,00 €	160,00 €	160,00 €	160,00 €
Inversión					
<i>Flujo de Caja</i>	1.398,37 €	1.398,37 €	723,37 €	1.398,37 €	1.398,37 €

Tabla 24: Ejercicio económico del proyecto en un plazo de 11-15 años (miles de euros)- Elaboración propia.

Como se puede comprobar los resultado del ejercicio económico son muy buenos, con una recuperación del valor de la inversión inicial en el primer año de facturación.

## 2.11 Compra de un Buque shuttle tanker

La compra de un buque en vez de realizar este proyecto también es una cuestión que se debe tomar en cuenta a la hora de elegir si el proyecto se debe de llevar a cabo. Para ello, se va a comparar el proyecto con un buque con las mismas características de peso y año de fabricación.

Para ello se ha realizado una gráfica del precio del petrolero según el año y peso, con los distintos buques disponibles de Nauti SNP<sup>31</sup>, ver Gráfico 5.

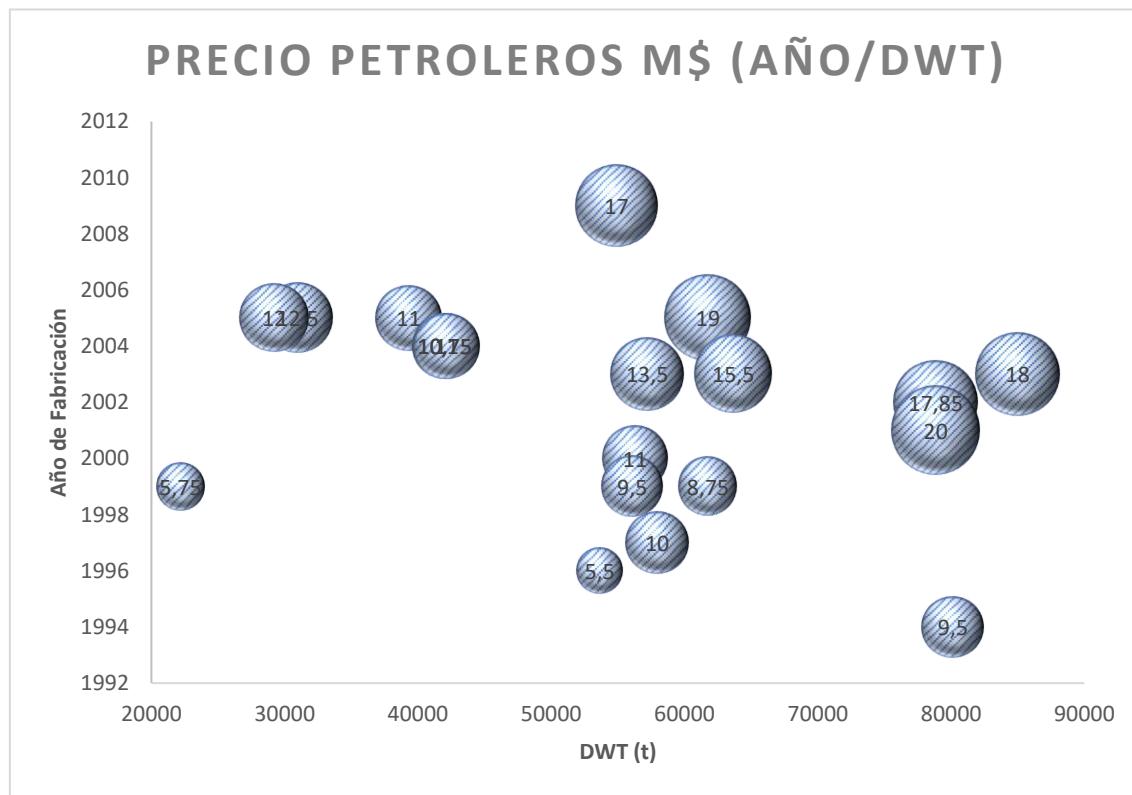


Gráfico 5: Precio petroleros según el año y peso – Elaboración propia.

<sup>31</sup> Fuente: <https://www.nautisnp.com/tankers?limit=50>

Debido a que el buque FPSO tiene un peso de 43641 toneladas<sup>32</sup>, se ha elegido el buque Golden Energy de 42172 toneladas de peso, fabricado en 2004, y con un precio de 11 millones de euros, ver Ilustración 20.



*Ilustración 20: Buque Golden Energy.*

Una vez escogido el buque, se realiza el estudio económico de este proyecto, al igual que se realizó anteriormente, ver Tabla 25, Tabla 26, y Tabla 27.

---

<sup>32</sup> Fuente: <https://www.vesselfinder.com/es/vessels/PETROJARL-FOINAVEN-IMO-8887595-MMSI-309499000>

**EJERCICIO ECONÓMICO**

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
<i>Ingresos</i>						
		3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €
<i>Mantenimiento y reparaciones del buque</i>		-100,00 €	-100,00 €	-100,00 €	-1.000,00 €	-100,00 €
<i>Sueldos</i>		-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €
<i>Seguridad Social</i>		-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €
<i>Aceite Lubricante</i>		-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €
<i>Provisiones Compañía de Seguros</i>		-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €
<i>Amortización</i>		-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €
<i>BAI</i>		-733,33 €	-733,33 €	-733,33 €	-733,33 €	-733,33 €
<i>IMP</i>	0,00 €	1.077,83 €	1.077,83 €	1.077,83 €	177,83 €	1.077,83 €
<i>BDI</i>	0,00 €	-269,46 €	-269,46 €	-269,46 €	-44,46 €	-269,46 €
<i>Amortización</i>	0,00 €	808,37 €	808,37 €	808,37 €	133,37 €	808,37 €
<i>Inversión</i>		733,33 €	733,33 €	733,33 €	733,33 €	733,33 €
<i>Flujo de Caja</i>	-11.000,00 €					
	-11.000,00 €	1.541,70 €	1.541,70 €	1.541,70 €	866,70 €	1.541,70 €

Tabla 25: Ejercicio económico de la compra de un buque en un plazo de 0-5 años (miles de euros)- Elaboración propia.

**EJERCICIO ECONÓMICO**

	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
<i>Ingresos</i>	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €
Mantenimiento y reparaciones del buque	-100,00 €	-100,00 €	-1.000,00 €	-100,00 €	-100,00 €
Sueldos	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €
Seguridad Social	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €
Aceite Lubricante	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €
Provisiones	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €
Compañía de Seguros	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €
Amortización	-733,33 €	-733,33 €	-733,33 €	-733,33 €	-733,33 €
BAI	1.077,83 €	1.077,83 €	177,83 €	1.077,83 €	1.077,83 €
IMP	-269,46 €	-269,46 €	-44,46 €	-269,46 €	-269,46 €
BDI	808,37 €	808,37 €	133,37 €	808,37 €	808,37 €
Amortización	733,33 €	733,33 €	733,33 €	733,33 €	733,33 €
Inversión					
Flujo de Caja	1.541,70 €	1.541,70 €	866,70 €	1.541,70 €	1.541,70 €

Tabla 26: Ejercicio económico de la compra de un buque en un plazo de 6-10 años (miles de euros)- Elaboración propia.

**EJERCICIO ECONÓMICO**

	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
<i>Ingresos</i>	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €	3.888,00 €
Mantenimiento y reparaciones del buque	-100,00 €	-100,00 €	-1.000,00 €	-100,00 €	-100,00 €
Sueldos	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €	-1.000,63 €
Seguridad Social	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €	-320,20 €
Aceite Lubricante	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €	-6,00 €
Provisiones	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €	-50,00 €
Compañía de Seguros	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €	-600,00 €
Amortización	-733,33 €	-733,33 €	-733,33 €	-733,33 €	-733,33 €
BAI	1.077,83 €	1.077,83 €	177,83 €	1.077,83 €	1.077,83 €
IMP	-269,46 €	-269,46 €	-44,46 €	-269,46 €	-269,46 €
BDI	808,37 €	808,37 €	133,37 €	808,37 €	808,37 €
Amortización	733,33 €	733,33 €	733,33 €	733,33 €	733,33 €
Inversión					
Flujo de Caja	1.541,70 €	1.541,70 €	866,70 €	1.541,70 €	1.541,70 €

Tabla 27: Ejercicio económico de la compra de un buque en un plazo de 11-15 años (miles de euros)- Elaboración propia.

Tras realizar el ejercicio económico de la modificación del buque FPSO a un shuttle tanker y de la compra de un buque shuttle tanker, se ha calculado el retorno sobre la inversión (ROI) a través de la siguiente ecuación<sup>33</sup>.

$$ROI = \frac{BAI - Inversión}{Inversión}$$

*Ecuación 26*

En la Tabla 28 se puede comprobar que la modificación del FPSO a shuttle tanker supone un mayor retorno de la inversión comparado con la compra de un buque shuttle tanker.

	<i>Modificación buque</i>	<i>Compra buque</i>
<i>ROI</i>	2.39	0.22

Tabla 28: Cálculo del Retorno sobre la Inversión - Elaboración propia.

En vista de que el ROI en el caso de la modificación del buque, y debido a que actualmente los buque shuttle tanker son muy escasos, concluyo que el proyecto en cuestión tiene unas ventajas económicas a largo plazo muy buenas para la empresa, y que por lo tanto es el mejor solución. En el Gráfico 6 se puede observar la variación temporal del ROI de ambos casos.

<sup>33</sup> Fuente: <https://www.rdstation.com/es/blog/roi/>

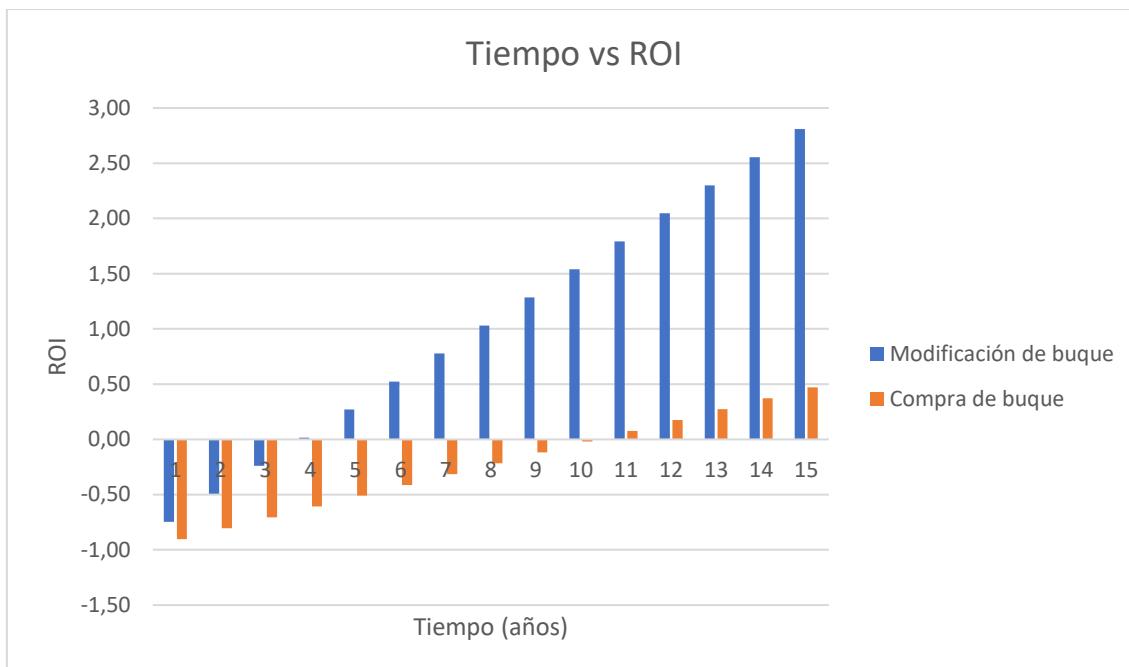


Gráfico 6: Tiempo vs ROI - Elaboración propia.

## Capítulo 12. ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL

Actualmente el medioambiente está en constante riesgo. Hay tres tipos de contaminación ambiental según el medio: la contaminación atmosférica, liberación de sustancias nocivas a la atmósfera; contaminación de suelo, arrojamiento de residuos a la superficie terrestre; y contaminación hídrica, liberación de productos contaminantes a ríos, mares o lagos.

Según como se afecte al medio se pueden distinguir varios tipos de contaminación, como puede ser: contaminación lumínica, excesiva iluminación; contaminación acústica, producción excesiva de ruido; o contaminación térmica, calentamiento del globo terrestre (calentamiento global).

Este estudio se va a centrar en la contaminación hídrica, ya que es el principal modo de contaminación del buque estudiado. Este tipo de contaminación tiene consecuencias directas con la fauna marina, lo que provoca su destrucción. Además, también tiene consecuencias directas con los seres humanos ya que provoca que el agua potable sea no apta para su consumo.

**Una gota de petróleo** arrojada al mar **contamina 25 litros de agua<sup>34</sup>**. Por ello los buques petroleros tienen riesgo alto de contaminación y se deben de tomar las medidas necesarias para prevenir la contaminación del medioambiente.

---

<sup>34</sup> Fuente: <https://tn.com.ar/sociedad/2022/01/30/cuantos-litros-de-agua-puede-contaminar-una-gota-de-petroleo/>

En 1973, para proteger el medio marino se produjo un convenio, el Convenio Internacional para la Protección de la Contaminación por Buques. En 1978, este convenio fue modificado por el Protocolo de 1978. Ambos documentos se conocen como MARPOL 73/78.

El **MARPOL 73/78** regula la prevención de contaminantes de los buque, el cual consta de 6 anexos<sup>35</sup>: Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos, entró en vigor el 2 de octubre de 1983; por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel, entro en vigor el 6 de abril de 1987; por basuras de los buques, entro en vigor el 31 de diciembre de 1988; por sustancias perjudiciales transportada por mar en bultos, entro en vigor el 1 de julio de 1992; y por aguas sucias de los buques, entro en vigor el 27 de septiembre de 2003.

Además, en 1996 el Convenio MARPOL exigió que los buques de carga de petróleo tuvieran un doble casco, lo cual tuvo grandes repercusiones en la protección del medio marino.

---

<sup>35</sup> Fuente, OMI: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

## Capítulo 13. PREVENCIÓN DE RIEGOS LABORABLES

En caso de realizarse obras de construcción temporales o móviles, se deben seguir la normas establecidas por el **Real Decreto 1627/1997**, de 24 de octubre por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción transpone al ordenamiento jurídico español la **Directiva 92/57/CEE del Consejo**, de 24 de junio 1992.

Además, **Fiscalidad y Unión Aduanera de la Comisión Europea** establece una serie de normas que se deben cumplir en barcos y buques para velar por la seguridad y salud de la tripulación<sup>36</sup>.

En primer lugar, establece que el buque debe disponer del equipo de seguridad adecuado para prevenir accidentes en el buque. Entre el equipamiento necesario se encuentra: guantes, monos, equipo salvavidas, ropa reflectante de alta visibilidad, cascos de seguridad, calzado antideslizante y linternas. Además, el buque debe de estar adecuadamente equipado en caso de que ocurra un accidente. El equipamiento necesario es: sistema de detección de gases nocivos, línea de radio, sistema de reanimación automática, arneses y cables de seguridad, señalización adecuada de líneas para conocer su localización, iluminación adecuada, y equipo de aire comprimido.

Sin embargo, los peligros a bordo según muy elevados. Por ello, toda la tripulación debe ser consciente de los riesgos y la respuesta necesaria que debe tener en cada caso.

---

<sup>36</sup> Comisión Europea:

[https://ec.europa.eu/taxation\\_customs/dds2/SAMANCTA/ES/Safety/WorkOnShipsVessels\\_ES.htm](https://ec.europa.eu/taxation_customs/dds2/SAMANCTA/ES/Safety/WorkOnShipsVessels_ES.htm)

En caso de que el buque no disponga de una iluminación adecuada, se debe usar las linternas ubicadas en el buque, también se podrá abrir escotillas y puertas si fuera necesario.

En caso de no llevar el equipamiento adecuado, no se puede entrar en ningún espacio de alto riego, como en la sala de máquinas, bodegas, tanques de carga y tanques de lastre.

Si se produce una fuga de vertidos y no ha sido identificado, se debe evitar de que se produzca contacto con la sustancia, abandonar la zona y notificar al capitán.

Evitar trabajar solo, y en el caso de que trabaje solo, mantener comunicación con mucha frecuencia con el supervisor.

En caso de que se haya movido un equipo de seguridad, como pueden ser linternas o chalecos, se debe devolver el material usado en la misma ubicación antes de que se abandone el buque.

## Capítulo 14. CONCLUSIONES

El buque FPSO (Unidad flotante de Producción, almacenamiento y transferencia) Petrojarl Foinaven fue diseñado en los años 90 para establecerse durante 25 años en un yacimiento petrolífero, tratando y almacenando el crudo. Sin embargo, a pesar del alto precio del barril de los años 2000 no se construyeron muchas unidades debido a la gran crisis económica.

Se ha estudiado convertir el buque FPSO Petrojarl Foinaven en un buque “shuttle tanker”, un petrolero más convencional que tan sólo transporta el crudo desde el punto de extracción del crudo en el océano hasta la refinería, descargándolo allí. Para ello se ha estudiado el sistema de tuberías y bombas de los tanques de crudo para poder descargar el crudo en un tiempo menor al tiempo mínimo establecido por las refinerías.

Para el diseño de las tuberías primero se ha calculado el diámetro mínimo que la tubería debe tener sabiendo la velocidad del crudo y el tiempo mínimo de descarga del crudo. Una vez calculado, se ha seleccionado una tubería de la empresa Octal que cumple estos requisitos impuestos.

A continuación, se ha estudiado la potencia necesaria que las bombas hidráulicas deben tener para poder bombear el crudo con el caudal necesario. Sin embargo, para el cálculo de la potencia primero se han calculado las pérdidas de carga que sufre el crudo debido al rozamiento de la tubería. Una vez calculado se han seleccionado una bomba hidráulica tipo SD 350 de la empresa Framo que cumplen las condiciones establecidas.

Posteriormente, debido a que el crudo no puede ser bombeado a temperaturas menores de 40°C, se ha estudiado la transmisión de calor del crudo con su entorno durante el traslado desde el punto de extracción donde se encuentra ahora mismo el FPSO, Este de Escocia, hasta la refinería en Rotterdam.

Debido a la complejidad de las ecuaciones para el cálculo de la temperatura del crudo, se ha desarrollado un modelo en ANSYS. El problema ha sido resuelto con dos métodos distintos: Estableciendo la conductividad térmica a cada elemento que rodea el tanque de crudo; Calculando el coeficiente de Transferencia de Calor equivalente. Como se puede comprobar en las tablas Tabla 16 y Tabla 19, los resultados son muy parecidos. Además, se ha calculado el tiempo que tardaría el crudo en llegar a los 40°C, dando un resultado de 23 días, ver Tabla 20.

Asimismo, se ha realizado un ejercicio económico del proyecto de los próximos 15 años. Para su realización se ha calculado el número de tripulantes mínimos según las características del buque para predecir el coste anual en sueldos y seguros sociales. Además, también se han estimado los gastos por mantenimiento y reparaciones, aceite lubricante, compañía de seguros, provisiones, los gastos por trayecto, y los ingresos anuales previstos.

Tras calcular el Retorno sobre la inversión del caso de comprar un buque, 0.22, frente al caso de modificar el buque, 2.39, se ha concluido que la modificación del buque FPSO a shuttle tanker tiene mayores ventajas económicas para la empresa. Además, actualmente hay escasez de buques shuttle tanker en venta, por lo que la conversión de buques se hace aún más necesaria.

Por último, se ha realizado un estudio medio ambiental del buque, estableciendo las principales causas de contaminación del buque. Además, se han documentado las normas y cumplimientos que se deben cumplir por la Unión Europea, en las cuales se vela por la salud y seguridad de los tripulantes de barcos y buques.

Debido a la actual inflación en el mundo y a la guerra de Rusia con Ucrania, se quiere tener una mayor independencia del crudo ruso. Por lo tanto, como se debe de importar el crudo de otras localidades, el proyecto puede ser muy útil para poder llevar estos objetivos a cabo.

## Capítulo 15. OPERACIONES

### 1.15 Apartado 2.8. Pérdidas de carga primaria

Pérdida de carga primaria en la tubería 1:

$$hf = f * \frac{L * V^2}{d * 2 * g} = 0.039 * \frac{201.5 * 4^2}{0.34 * 2 * 9.81} = 483.64 \text{ m} \quad \text{Ecuación 27}$$

Pérdida de carga primaria en la tubería 2:

$$hf = f * \frac{L * V^2}{d * 2 * g} = 0.039 * \frac{162.6 * 4^2}{0.34 * 2 * 9.81} = 39.27 \text{ m} \quad \text{Ecuación 28}$$

Pérdida de carga primaria en la tubería 3:

$$hf = f * \frac{L * V^2}{d * 2 * g} = 0.039 * \frac{138.03 * 4^2}{0.34 * 2 * 9.81} = 331.3 \text{ m} \quad \text{Ecuación 29}$$

Pérdida de carga primaria en la tubería 4:

$$hf = f * \frac{L * V^2}{d * 2 * g} = 0.039 * \frac{114.3 * 4^2}{0.34 * 2 * 9.81} = 274.34 \text{ m} \quad \text{Ecuación 30}$$

Pérdida de carga primaria en la tubería 5:

$$hf = f * \frac{L * V^2}{d * 2 * g} = 0.039 * \frac{90.9 * 4^2}{0.34 * 2 * 9.81} = 218.18 \text{ m} \quad \text{Ecuación 31}$$

## 2.15      Apartado 4.8. Cálculo de la Potencia II

Potencia requerida de la bomba de pozo en la tubería 1:

$$P = \frac{(870 * 9.80665 * (17.1 + hf + hm)) * 1306}{0.80}$$

$$= 1.944 MW$$

*Ecuación 32*

Potencia requerida de la bomba de pozo en la tubería 2:

$$P = \frac{(870 * 9.80665 * (17.1 + hf + hm)) * 1306}{0.80}$$

$$= 1.583 MW$$

*Ecuación 33*

Potencia requerida de la bomba de pozo en la tubería 3:

$$P = \frac{(870 * 9.80665 * (17.1 + hf + hm)) * 1306}{0.80}$$

$$= 1.355 MW$$

*Ecuación 34*

Potencia requerida de la bomba de pozo en la tubería 4:

$$P = \frac{(870 * 9.80665 * (17.1 + hf + hm)) * 1306}{0.80}$$

$$= 1.134 MW$$

*Ecuación 35*

Potencia requerida de la bomba de pozo en la tubería 5:

$$P = \frac{(870 * 9.80665 * (17.1 + hf + hm)) * 1306}{0.80}$$

$$= 0.917 MW$$

*Ecuación 36*

### 3.15 Capítulo 10. Cálculo de la temperatura con ANSYS. Método II

Coeficiente de transmisión de Calor para la cara superior del tanque:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{8.13} + \frac{0.012}{58.1} + \frac{1}{29} \rightarrow k = 6.3 \frac{W}{m^2 K}$$
*Ecuación 37*

Coeficiente de transmisión de Calor para la cara inferior del tanque:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{8.13} + \frac{0.012}{58.1} + \frac{1}{1250} + \frac{0.012}{58.1} \rightarrow k = 8.1 \frac{W}{m^2 K}$$
*Ecuación 38*

Coeficiente de transmisión de Calor para la cara de proa del tanque:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{8.13} + \frac{0.012}{58.1} + \frac{1}{17.5} \rightarrow k = 5.5 \frac{W}{m^2 K}$$
*Ecuación 39*

Coeficiente de transmisión de Calor para la cara de popa del tanque:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{8.13} + \frac{0.012}{58.1} + \frac{1}{17.5} \rightarrow k = 5.5 \frac{W}{m^2 K}$$
*Ecuación 40*

Coeficiente de transmisión de Calor para la cara lateral del tanque al aire:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{8.13} + \frac{0.012}{58.1} + \frac{1}{17.5} + \frac{0.012}{58.1} + \frac{1}{29} \rightarrow k = 10.9 \frac{W}{m^2 K}$$
*Ecuación 41*

Coeficiente de transmisión de Calor para la cara lateral del tanque al agua:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{8.13} + \frac{0.012}{58.1} + \frac{1}{17.5} + \frac{0.012}{58.1} + \frac{1}{1250} \rightarrow k = 17.1 \frac{W}{m^2 K}$$
*Ecuación 42*

## Capítulo 16. BIBLIOGRAFÍA

- [RGS18] Soutullo, R.G., “Buques FPSO y Posicionamiento Dinámico”, Universidad de Cádiz, Enero 2018. Obtenido de Wuolah:  
<https://www.wuolah.com/apuntes/Buques-FPSO-y-Posicionamiento-Dinamico4-Buques-FPSO-y-Posicionamiento-Din%C3%A1mico.pdf-727146>  
 Ilustración, Septiembre 2019. Fuente obtenida de Teekay:  
<https://www.teekay.com/wp-content/uploads/2018/04/foinaven-02.jpg>  
 “Petrojarl Foinaven”. Fuente de Teekay:  
<https://www.teekay.com/petrojarl-foinaven/>
- [CR12] Rodríguez, C., “FPSO Petrojarl Foinaven”, Abril 2012. Fuente de Tecnología Marítima:  
<http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2012/04/fpso-petrojarl-foinaiven.html>
- [PB13] Boschee, P., “Tanker Conversions to FPSO Design and Integrity Management -Challenges”, Septiembre 2013. Fuente de Journal of Petroleum Technology: <https://jpt.spe.org/tanker-conversions-fpso-design-and-integrity-management-challenges>
- [GGD] Dimitris, G. G. and Emmanuel, S. S., “Conversion of an Oil tanker into FPSO: Strength and Reliability Assessment”. Fuente de CEMT:  
<https://www.cemt.eu/res/HIMT%20PAPER.pdf>
- [JRL] Dr. Rodrigo de Larrucea, Jaime., “Seguridad Marítima en Buques Tanques Petroleros (Oil Tankers Safety)”.  
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/3020/Seguridad%20Buques%20Petroleros.pdf>  
 “Precio del petróleo OPEP por barril”, 2 de Marzo de 2022. Fuente de Datosmacro: <https://datosmacro.expansion.com/materias-primas/opec>
- [NS22] Sönnichsen, N., “Average annual OPEC crude oil price from 1960 to 2022”, 18 de Febrero de 2022. Fuente Statista:

<https://www.statista.com/statistics/262858/change-in-opec-crude-oil-prices-since-1960/>

“Cálculo de la Potencia de una bomba hidráulica”, 26 de Agosto de 2021.

Fuente de Gargil: <https://gargil.es/calculo-de-la-potencia-de-una-bomba-hidraulica>

“¿Qué es la presión?”. Fuente de Khan Academy:

<https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/density-and-pressure/a/pressure-article>

- [OLS20] López Sánchez, O., “Análisis de la operativa del buque petrolero y diseño de la zona de carga”, Diciembre de 2020, Trabajo de Fin de Máster, Universidad Politécnica de Cataluña:  
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/334818>
- [RGS16] García Soutullo, R., “Buques FPSO. Offshore”, 2016. Obtenido en Ingeniero Marino: <https://ingenieromarino.com/buques-fpso-offshore/>
- [NC19] Conor, N., “¿Qué es la ecuación de Darcy-Weisbach? Definición”, 30 de Septiembre de 2019. Fuente: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-ecuacion-de-darcy-weisbach-definicion/>
- [SRM18] Robles Mendoza, S., “Flujo laminar y flujo turbulento”, 10 de Mayo de 2016. Fuente: <https://www.slideshare.net/SusanRoblesMendoza/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>
- [NC20] Conor, N., “¿Qué es el número de Reynolds?”, 20 de Enero de 2020. Fuente: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-el-numero-de-reynolds-definicion/>  
El gobierno de España, “El petróleo y su comportamiento”. Fuente:  
[https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo\\_y\\_comportamiento.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/petroleo_y_comportamiento.aspx)
- [RCC05] Chaquinga Cortés, R. F. , “Construcción de un banco hidráulico para pérdidas localizadas e implementación de su sistema automatizado de medición”, Enero de 2005. Fuente:  
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/364/1/t170id.pdf>

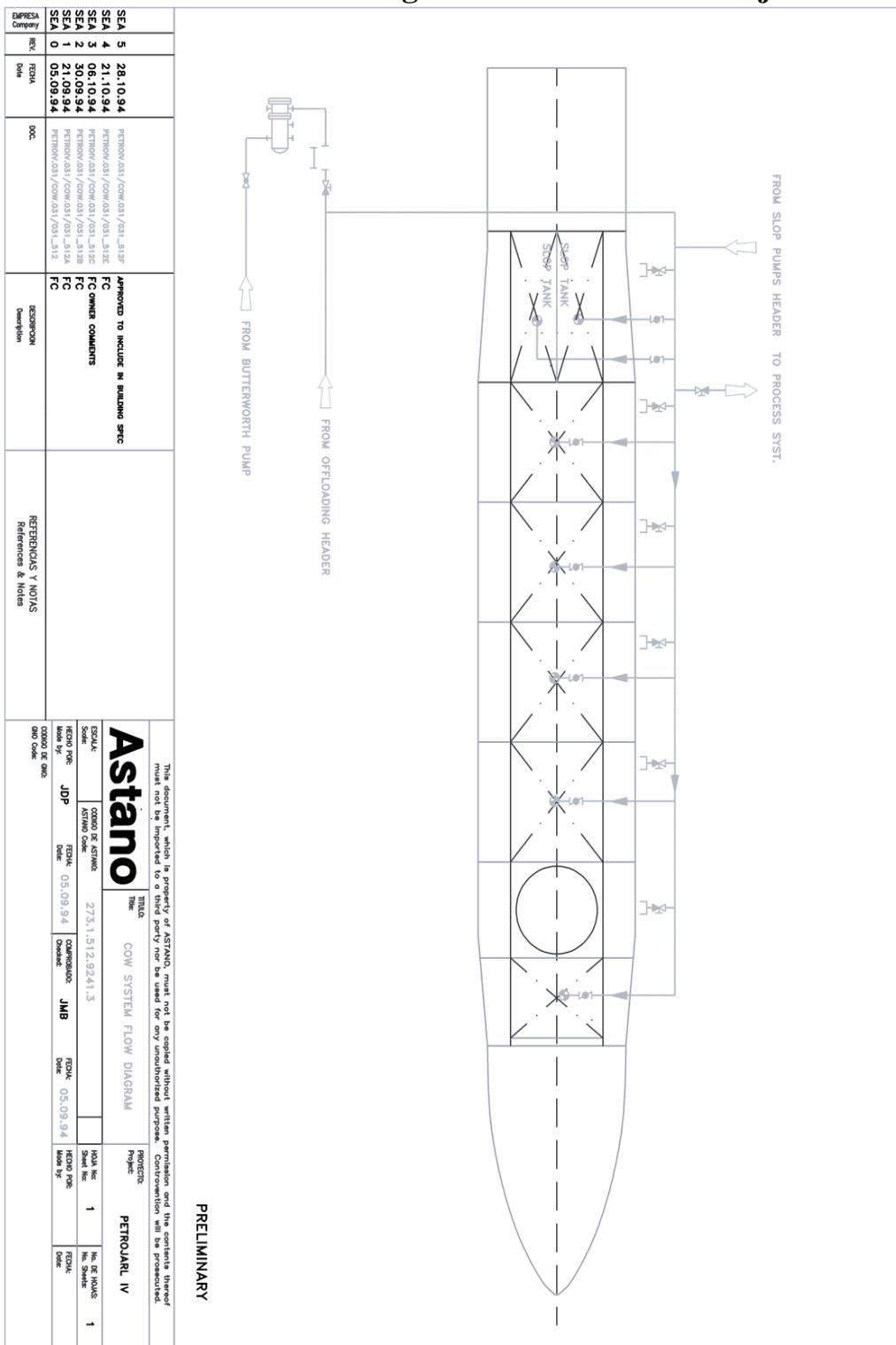
“Azufre 2020: reduciendo las emisiones óxido de azufre”, Organización Marítima Internacional:

<https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx>

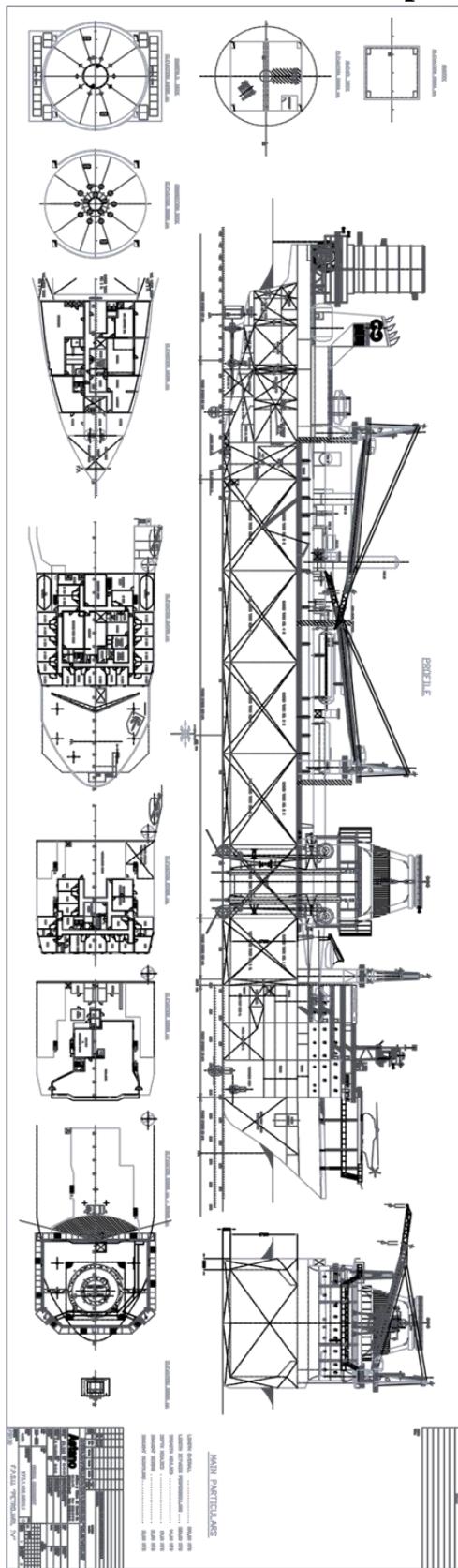
- [HAK16] Kurniawati, H., Aryawan W., Baidowi, A., “LONG-TERM FSO/FPSO CHARTER RATE ESTIMATION”. Sepuluh November Institut of Technology, Indonesia, Febrero de 2016. Fuente:  
<https://ejournal.undip.ac.id/index.php/kapal/article/download/10105/8028>
- [IBL11] Bartolomé Lamarca, I., “Tripulaciones mínimas de Seguridad”, Barcelona, Septiembre de 2011. Fuente:  
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12970/Tripulaciones\\_M%C3%ADnimasSeguridad.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12970/Tripulaciones_M%C3%ADnimasSeguridad.pdf)
- [JHL20] H. L. IV, John, “A heat transfer textbook”, 2020. Fuente:  
[https://kntu.ac.ir/dorsapax/userfiles/file/mechanical/ostadfile/dr\\_avami/1.pdf](https://kntu.ac.ir/dorsapax/userfiles/file/mechanical/ostadfile/dr_avami/1.pdf)

## Capítulo 17. ANEXOS

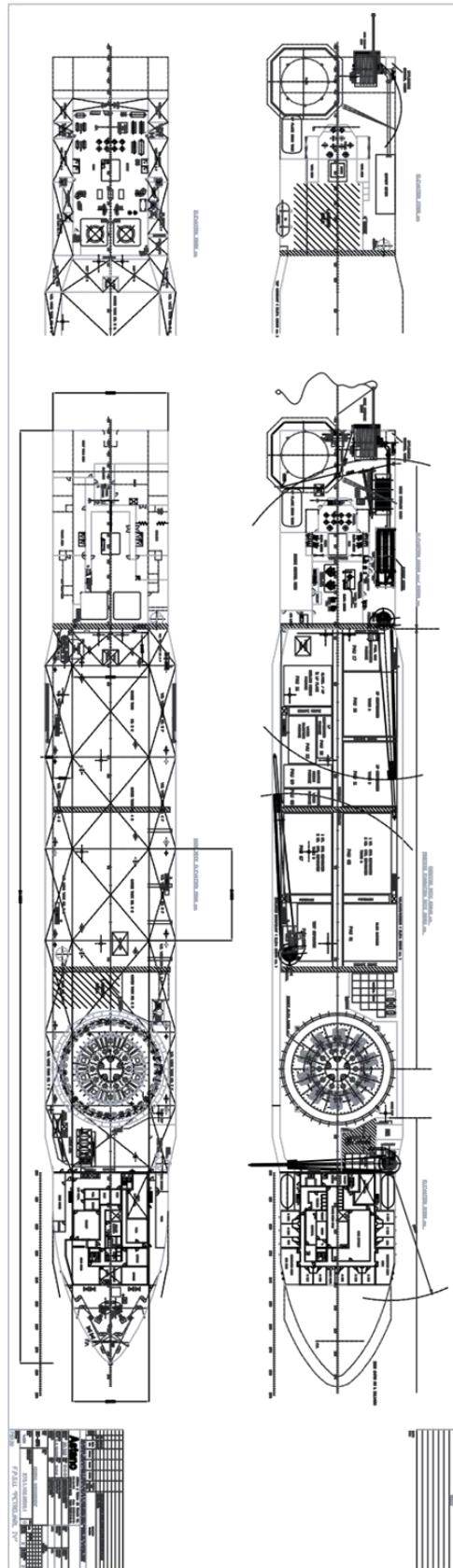
### 1.17 ANEXO I: Diagrama del Sistema de Flujo



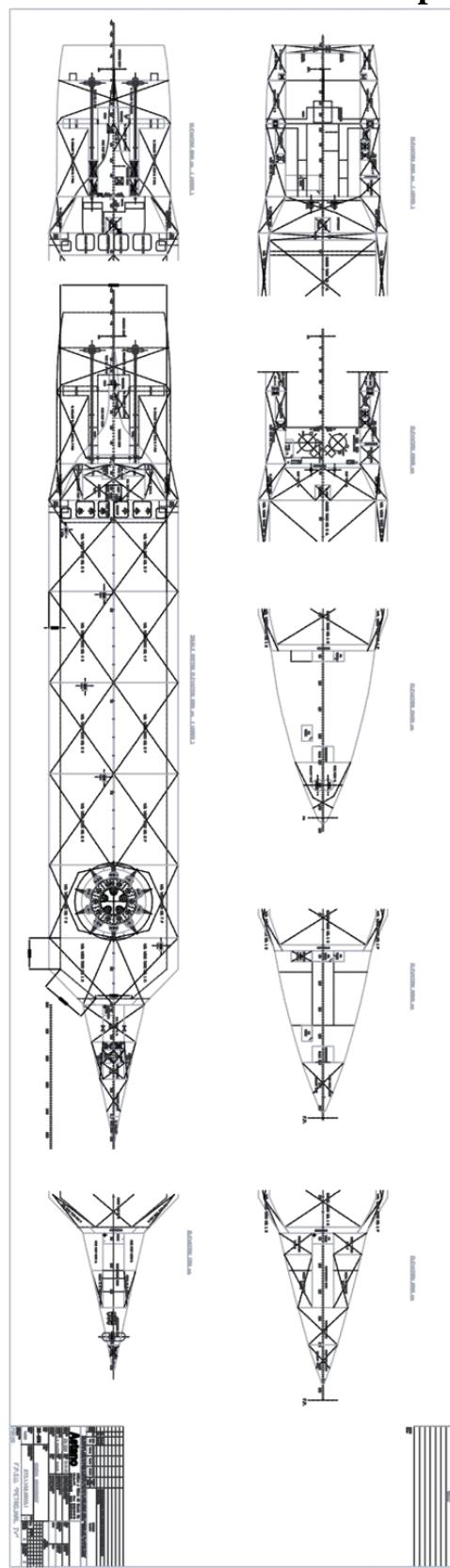
**2.17 ANEXO II: Plano de Disposición General I**



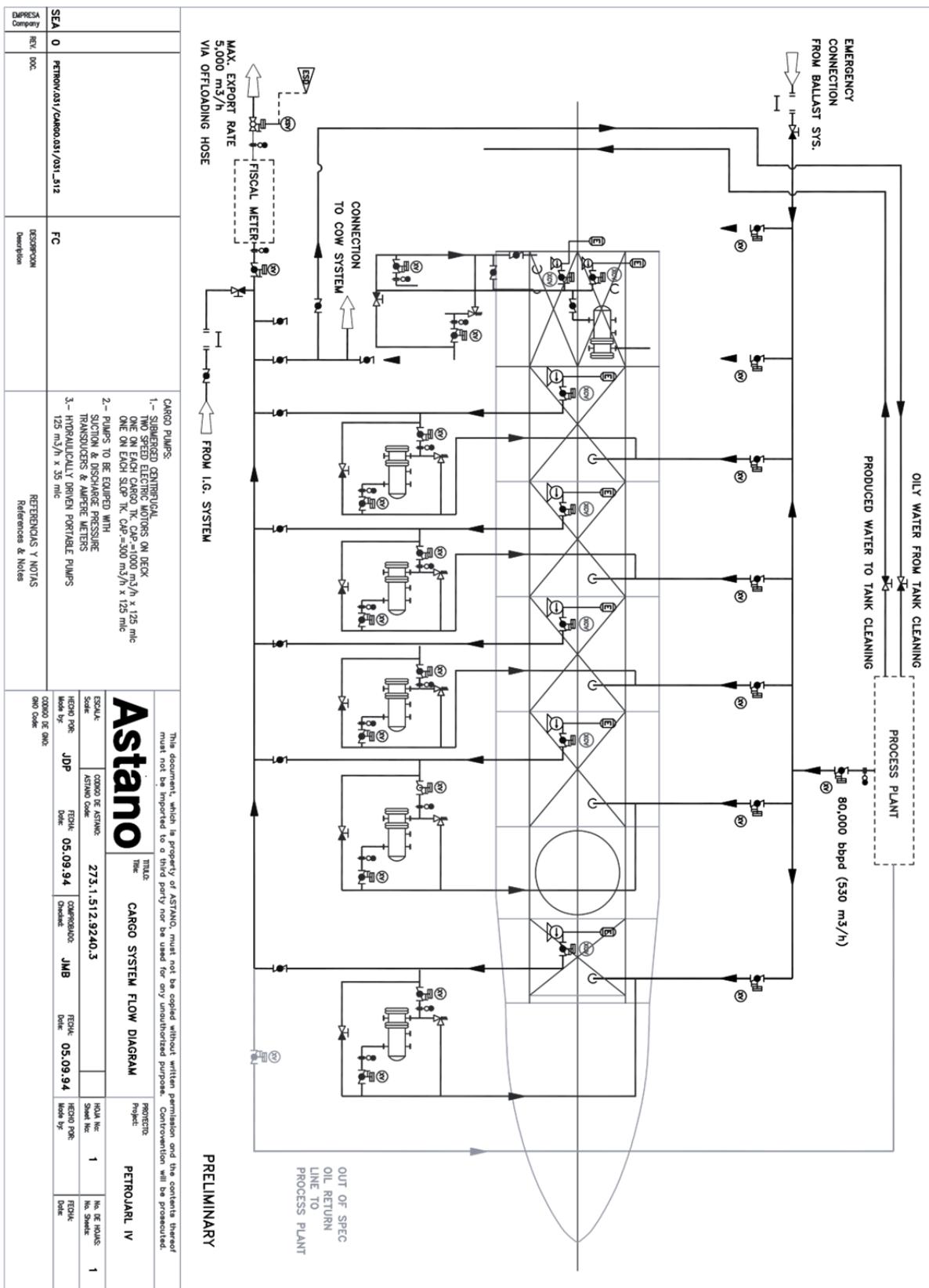
**3.17 ANEXO III: Plano de Disposición General II**



**4.17 ANEXO IV: Plano de Disposición General III**



## 5.17 ANEXO V: Sistema de Bombeo



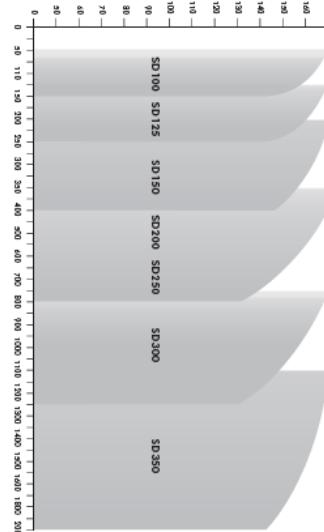
## 6.17 ANEXO VI: Información técnica las bombas hidráulicas Framo



### TECHNICAL DATA

CARGO PUMPS						
	A [in mm]	B [in mm]	C [in mm]	D [in mm]	CAPAC d 10 min	WEIGHT P.W.
SD 100	318	30	394	50	DN100	325 kg 20 kg
SD 125	448	30	524	50	DN125	503 kg 28 kg
SD 150	495	30	574	50	DN150	558 kg 30 kg
SD 200	635	40	715	50	DN200	953 kg 45 kg
SD 250	710	60	810	50	DN250	1153 kg 53 kg
SD 300	795	65	910	50	DN300	1650 kg 65 kg
SD 350	1000	100	1100	50	DN350	2247 kg 80 kg

CAPACITY RANGE CARGO PUMPS

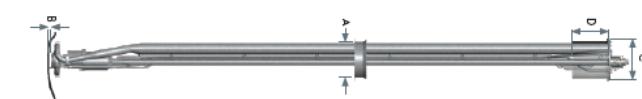


STAINLESS STEEL QUALITIES						
DESCRIPTION	CHEMICAL COMPOSITION % IN ASSI					
Qualities	C MAX	Si MAX	Mn MAX	Cr MAX	Ni MAX	Mo MAX
Standard acid resistant	0.05	1.0	2.0	16.5	10.5	2.5
Standard acid resistant low carbon content	0.03	1.0	2.0	16.5	10.5	2.5
Special acid resistant high nickel content (2 RE-5)	0.02	0.7	2.0	19.0	24.0	4.0

Stainless steel suction wells  
or on option.



SUCTION WELLS

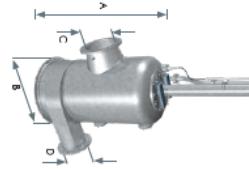
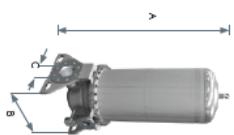


### PORTABLE PUMPS

	TK 80	TK 150	TK 4	DN 150	TK 125
CAPACITY	70 m³/h	300 m³/h	500 m³/h	150 m³/h	50 m³/h
HEAD	70 mwc	60 mwc	40 mwc	45 mwc	10 bar
MATERIAL	AlSi 31/4	AlSi 31/4	Al	AlSi 31/4	Al
WEIGHT	25 kg	78 kg	85 kg	78 kg	84 kg
PUMPHEAD	a250 mm	a300 mm	a520 mm	a300 mm	a300 mm
HEIGHT	625 mm	598 mm	640 mm	595 mm	1000 mm

The Framo cargo pump system is equipped with a portable pump type TK80 or TK150 in accordance with class requirements for secondary means of unloading.

Stainless steel suction wells  
or on option.



All pumps are individually run and tested with respect to their capacity, head, hydraulic pressure and seal flow.  
The Framo system is delivered according to the requirements of any classification society and national  
or international maritime authorities.

## 7.17 ANEXO VII: Dimensiones Tuberías Octal



Steel Pipe Dimensions Chart ANSI B36.10 & 36.19

Nominal Pipe Size			Outside Diameter (mm)	Nominal Wall Thickness Schedule																		
NPS	DN	OD		SCH 5s	SCH 10s	SCH 10	SCH 20	SCH 30	SCH 40s	SCH STD	SCH 40	SCH 60	SCH 80s	SCH XS	SCH 80	SCH 100	SCH 120	SCH 140	SCH 160	SCH XXS		
1/8	6	10.3		1.24					1.73	1.73	1.73		2.41	2.41	2.41							
1/4	8	13.7		1.65					2.24	2.24	2.24		3.02	3.02	3.02							
3/8	10	17.1		1.65					2.31	2.31	2.31		3.20	3.20	3.20							
1/2	15	21.3	1.65	2.11					2.77	2.77	2.77		3.73	3.73	3.73				4.78	7.47		
3/4	20	26.7	1.65	2.11					2.87	2.87	2.87		3.91	3.91	3.91				5.56	7.82		
1	25	33.4	1.65	2.77					3.38	3.38	3.38		4.55	4.55	4.55				6.35	9.09		
1 1/4	32	42.2	1.65	2.77					3.56	3.56	3.56		4.85	4.85	4.85				6.35	9.70		
1 1/2	40	48.3	1.65	2.77					3.68	3.68	3.68		5.08	5.08	5.08				7.14	10.15		
2	50	60.3	1.65	2.77					3.91	3.91	3.91		5.54	5.54	5.54				8.74	11.07		
2 1/2	65	73	2.11	3.05					5.16	5.16	5.16		7.01	7.01	7.01				9.53	14.02		
3	80	88.9	2.11	3.05					5.49	5.49	5.49		7.62	7.62	7.62				11.13	15.24		
3 1/2	90	101.6	2.11	3.05					5.74	5.74	5.74		8.08	8.08	8.08							
4	100	114.3	2.11	3.05					6.02	6.02	6.02		8.56	8.56	8.56		11.13		13.49	17.12		
5	125	141.3	2.77	3.40					6.55	6.55	6.55		9.53	9.53	9.53		12.70		15.88	19.05		
6	150	168.3	2.77	3.40					7.11	7.11	7.11		10.97	10.97	10.97		14.27		18.26	21.95		
8	200	219.1	2.77	3.76					6.35	7.04	8.18	8.18	10.31	12.70	12.70	12.70	15.09	18.26	20.62	23.01	22.23	
10	250	273.1	3.40	4.19					6.35	7.80	9.27	9.27	9.27	12.70	12.70	12.70	15.09	18.26	21.44	25.40	28.58	25.40
12	300	323.9	3.96	4.57					6.35	8.38	9.53	9.53	10.31	14.27	12.70	12.70	17.48	21.44	25.40	28.58	33.32	25.40
14	350	355.6	3.96	4.78	6.35	7.92	9.53		9.53	11.13	15.09		12.70	19.05	23.83	27.79	31.75	35.71				
16	400	406.4	4.19	4.78	6.35	7.92	9.53		9.53	12.70	i6.66		12.70	21.44	26.19	30.96	36.53	40.49				
18	450	457.2	4.19	4.78	6.35	7.92	11.13		9.53	14.27	19.05		12.70	23.83	29.36	34.93	39.67	45.24				
20	500	508	4.78	5.54	6.35	9.53	12.70		9.53	15.09	20.62		12.70	26.19	32.54	38.10	44.45	50.01				
22		559	4.78	5.54	6.35	9.53	12.70		9.53		22.23		12.70	28.58	34.93	41.28	47.63	53.98				
24	600	610	5.54	6.35	6.35	9.53	14.27		9.53	17.48	24.61		12.70	30.96	38.89	46.02	52.37	59.54				

26		660			7.92	12.70			9.53			12.70			
28	700	711			7.92	12.70	15.88		9.53			12.70			
30		762	6.35	7.92	7.92	12.70	15.88		9.53			12.70			
32	800	813			7.92	12.70	15.88		9.53	17.48		12.70			
34		884			7.92	12.70	15.88		9.53	17.48		12.70			
36	900	914			7.92	12.70	15.88		9.53	19.05		12.70			
38		965							9.53			12.70			
40	1000	1016						9.53		12.70					
42		1067				12.70	15.88		9.53	19.05		12.70			
44	1100	1118							9.53			12.70			
46		1168							9.53			12.70			
48	1200	1219							9.53		12.70				
52		1321													
56	1422														
60	1524														

For pipe schedule chart in inch and more explanations please visit: <http://www.octalsteel.com/steel-pipe-dimensions-sizes>

**8.17 ANEXO VIII: Filosofía de Carga del Buque I**

# Astano

## ARGO SYSTEM PHILOSOPHY

---

### Cargo unloading

The cargo unloading system shall be designed:

- To export crude oil from any storage tank, at maximum export rate of 5.000 m<sup>3</sup>/h, to a shuttle tanker moored to the stern aft of the FPSO.
- So that any cargo pump may discharge from cargo tanks to either unloading main, or slop tanks by tank stripping.
- So that five pumps can be operated at full capacity and simultaneously.
- For a required maximum fluid velocity of 4 m/sec.
- From unloading main, crude oil is routed through crude oil Fiscal metering station to the offloading system.
- The cargo pumps will offload in parallel into a unloading main.
- Slop tanks pumps to discharge into unloading main, for discharge to the offloading system.
- Inert gas system and COW system to tie in with the unloading main.

From the unloading main crude oil shall be discharged in the offloading system, through to the export hose.

One (1) Export ESD Valve shall be supplied and installed in the discharge header just upstream of the connection to the offloading hose.

it must be possible to drain the contents of the offloading pipe and hose to the slop tanks for maintenance purposes.

It must be possible to discharge slops without going via export meter.

## 9.17 ANEXO IX: Filosofía de Carga del Buque II

# Astano

### CARGO SYSTEM PHILOSOPHY

---

#### 3.2 PIPE SYSTEM

The cargo system shall comprise:

- A single loading main with branches to each of the cargo tanks.
- An unloading main with connections to each of the cargo pump discharge lines.

Hose will be flushed with Inert Gas.

In the areas outside the cargo area the single export main shall be of all welded construction.

Expansion joints or bends shall be provided, in the cargo export lines.

Branches from cargo pumps shall slope towards the cargo main for drainage.

Cargo pump discharge lines shall be fitted with throttling valves.

Valves in cargo oil system generally to be of butterfly type with body of nodular cast iron, disc of bronze and sealing of Viton.

Two slop tanks shall be provided approx. equally sized, with a total capacity of approximately 3% of the total cargo capacity.

#### 3.3. CARGO PUMPS

One Cargo pump shall be provided in each cargo tank. The cargo pumps shall be capable of:

- Discharging oil from any cargo tank into the unloading main.
- Supplying crude oil to the COW main.
- Discharging tank cleaning water/oil stripping into the slop tanks.
- Supplying crude oil to the slop tank for tank washing.
- To circulate cargo oil through steam deck heaters.



## 10.17 ANEXO X: DNV Part 4 Chapter 6

**Table 2 Minimum wall thickness for steel pipes**

<i>External diameter D [mm]</i>	<i>Pipes in general 3) 4) 5) 6) 7) 8)</i>	<i>Air, overflow and sounding pipes for structural tanks 1) 2) 3) 5) 8) 9)</i>	<i>Bilge, ballast and general seawater pipes 1) 3) 4) 5) 7) 8)</i>	<i>Bilge, air, overflow and sounding pipes through ballast or oil tanks, ballast lines through oil tanks and oil lines through ballast tanks 1) 2) 3) 4) 5) 7) 8) 9)</i>
10.2 to 12 13.5 to 17.2 20	1.6 1.8 2			
21.3 to 25 26.9 to 33.7 38 to 44.5	2 2 2	4.5	3.2 3.2 3.6	6.3
48.3 51 to 63.5 70	2.3 2.3 2.6	4.5 4.5 4.5	3.6 4 4	6.3 6.3 6.3
76.1 to 82.5 88.9 to 108 114.3 to 127	2.6 2.9 3.2	4.5 4.5 4.5	4.5 4.5 4.5	6.3 7.1 8
133 to 139.7 152.4 to 168.3 177.8	3.6 4 4.5	4.5 4.5 5	4.5 4.5 5	8 8.8 8.8
193.7 219.1 244.5 to 273	4.5 4.5 5	5.4 5.9 6.3	5.4 5.9 6.3	8.8 8.8 8.8
298.5 to 368 406 to 457	5.6 6.3	6.3 6.3	6.3 6.3	8.8 8.8

- 1) For pipes efficiently protected against corrosion, the thickness may be reduced by 20% of the required wall thickness but not more than 1 mm.
- 2) For sounding pipes, except those for cargo tanks with cargo having a flash point less than 60°C, the minimum wall thickness is intended to apply to the part outside the tank.
- 3) For threaded pipes, where allowed, the minimum wall thickness shall be measured at the bottom of the thread.
- 4) The minimum wall thickness for bilge lines and ballast lines through deep tanks and for cargo lines is subject to special consideration.
- 5) For larger diameters the minimum wall thickness is subject to special consideration.
- 6) The wall thickness of pipes within cargo oil and ballast tanks in systems for remote control of valves shall be no less than 4 mm.
- 7) For inlets and sanitary discharges, see [Pt.3 Ch.12 Sec.9](#).
- 8) For stainless steel pipes, the minimum wall thickness shall be specially considered, but it shall not be less than given in [Table 3](#).
- 9) For air pipes on exposed decks, see [Pt.3 Ch.12 Sec.7 \[3\]](#).

Rules for classification: Ships — DNV-RU-SHIP Pt.4 Ch.6. Edition July 2021

Piping systems

Page 82

DNV AS

## **11.17 ANEXO XI: Resolución de la OMI**

Res. A.473(XII)

### **REGLA TRANSITORIA**

- 1 Los sistemas generadores de gas inerte\* se proyectarán, construirán y probarán de un modo que la Administración juzgue satisfactorio. Se proyectarán y utilizarán de manera que la atmósfera de los tanques de carga\* \* resulte ininflamable y se mantenga así en todo momento cuando se usen dichos tanques para el transporte de derivados del petróleo como los antes enumerados.
- 2 Los sistemas deberán poder:
  - .1 inertizar tanques de carga vacíos por reducción del contenido de oxígeno de la atmósfera de cada tanque a un nivel en que la combustión no sea posible;
  - .2 mantener el contenido de oxígeno de la atmósfera, en todas las partes de cada tanque de carga dedicado a transportar productos inflamables que necesite la protección de un sistema de gas inerte, de manera que no exceda del 8 por ciento del volumen total y a una presión positiva en todo momento, en puerto y en la mar, salvo cuando sea necesario que el tanque esté desgasificado;
  - .3 hacer innecesario que penetre aire en ningún tanque durante las operaciones normales salvo cuando sea necesario que el tanque esté desgasificado;
  - .4 purgar los tanques de carga vacíos de vapores inflamables, de modo que las ulteriores operaciones de desgasificación no originen en ningún momento una atmósfera inflamable dentro del tanque.
- 3.1 Los sistemas deberán poder suministrar gas inerte a los tanques de carga a razón de por lo menos un 125 por ciento del régimen máximo de capacidad de descarga del buque, expresado en términos volumétricos. La Administración podrá aceptar sistemas de gas inerte de menor capacidad a condición de que el régimen máximo de descarga de los productos llevados en los tanques de carga que el sistema protege se limite al 80 por ciento de la capacidad de suministro de gas inerte.
- 3.2 Los sistemas podrán suministrar gas inerte con un contenido de oxígeno que no exceda del 5 por ciento del volumen total en el colector de suministro del gas inerte a los tanques de carga, sea cual fuere el régimen de flujo requerido.
- 4.1 Se proveerá combustible adecuado en cantidad suficiente para los generadores de gas inerte.
- 4.2 Los generadores de gas inerte se situarán fuera de la zona de los tanques de carga, según ésta queda definida en el Código de Quimiqueros. Los espacios en los que haya generadores de gas inerte no tendrán acceso directo a los espacios de alojamiento, de servicio o de puestos de control, pero los generadores podrán situarse en los espacios de máquinas. Si no están situados en los espacios de máquinas, lo estarán en un compartimiento reservado exclusivamente a su utilización. Dicho compartimiento estará separado de los espacios de

alojamiento, de servicio y de puestos de control, según éstos quedan definidos en el Código de Quimiqueros, por un mamparo y/o una cubierta herméticos de acero. El compartimiento estará provisto de un sistema adecuado de ventilación mecánica del tipo de presión positiva. Sólo desde una cubierta expuesta, fuera de la zona de los tanques de carga, habrá acceso a los compartimientos destinados a este fin y situados a popa. El acceso estará en el mamparo de extremo no encarado con la zona de la carga y/o en el lateral de la superestructura o el de la caseta que dé al costado, a una distancia al menos igual al 25 por ciento de la eslora del buque, pero no inferior a 5 m, del extremo de la superestructura o de la caseta encarado con la zona de carga. Si el compartimiento está en el castillo de proa, el acceso atravesará el techo a proa de la zona de carga.

\* Por "sistema generador de gas inerte" se entiende la maquinaria destinada a la producción y el suministro de gas inerte e incluye ventiladores impenitentes, cámaras de combustión, bombas y quemadores 'de combustible líquido, enfriadores/lavadores del gas y equipo automático de regulación y supervisión de la combustión como el constituido por dispositivos indicadores de fallos de llama.

\*\* En la presente Regla, la expresión "tanque de carga" hace referencia también a los "tanques de decantación que contengan residuos de hidrocarburos".

## **12.17 ANEXO XII: Cargo Design Petrojarl**

PETROJARL IV

# Astano

## BUILDING SPECIFICATION

slop tanks to the shuttle tanker through a connection with two manual valves in series with spectacle flange and leak check valve located aft (pipeline diameter 4"). This line shall be cross connected to the offloading main downstream of the offloading ESD valve to allow hose draining. The cross-pipeline diameter shall be 4" with a manual valve. No slop separator will be provided.

Additionally one slop overboard discharge above waterline with spool piece will be provided for emergency use only. Slop discharge monitor may be removed subject to DNV approval.

One additional bilge discharge monitor to be supplied and installed in the forward machinery spaces.

### Cargo and Slop Tank Measurements

Cargo and slop tanks to be equipped according to rules and regulations.

Each cargo and slop tank shall be equipped with:

- Radar type level gauging. Alarm for 95% filling on the cargo control desk. Automatic stop of filling at 98% to be provided.

### Tank Level Measurements

Tank levels, in general, to be measured according to rules and regulations.

### Central Control

All measurements from tanks and associated systems/equipment to be interfaced to a Central Control Unit. The Load Computer functions (S.GR. 41 5) could be integrated to this Central Control Unit.

The Central Control Unit to provide status on two 20" color video displays.  
One display in the NCC room and one in the engine control room.

Limiting values may be altered via the display keyboard in NCC room only.

The following information should at least be presented:

e

---

Rev: 0

Date: 28.10.94

Section 3 Page 9