



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



TRABALLO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO DE TRANSFERENCIA DE
CALOR EN TANQUES DE
REGASIFICACIÓN ON-SHORE**

MÁSTER EN ENXEÑARÍA MARIÑA

ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA E MÁQUINAS

XUÑO – 2022

AUTOR: JOSÉ MIGUEL MAHÍA PRADOS

DIRECTOR: IGNACIO ARIAS FERNÁNDEZ

RESUMEN

O presente traballo versa sobre o estudo da transferencia de calor nos tanques de almacenamento de terminais de regasificación onshore e o impacto que ten a transferencia de calor nos mesmos.

Para iso inicialmente faise unha breve introdución á situación actual do mercado do gas, seguido da análise das instalacións que operan no noso país que se realizará con apoio dos softwares *SketchUp* e *AutoCad*.

De entre elas seleccionárase unha para avaliála e diferenciar os equipos e elementos que operan para, finalmente, proceder á realización dos cálculos pertinentes en materia de análise de transferencia.

Empregarase o software *Engineering Equation Solver* (EES) para a realización dos cálculos que demostren se a planta opera de forma eficiente baixo os criterios previamente fixados de volume de Boil- Off gas (BOG) xerado no interior dos tanques, e con iso avaliar a transferencia de calor.

Finalmente, realizarase unha simulación térmica co software *SolidWorks* dun tanque de regasificación, e concluirase sobre as similitudes e diferenzas dos valores obtidos entre os cálculos do EES e os datos extraídos da simulación.

Con iso demostrárase que se conta coa capacidade de elaborar análise e síntese de problemas teórico prácticos, deseño e optimización de instalacións relacionadas co ámbito da enxeñería mariña así como detectar a necesidade de mellorar e innovar sistemas enerxéticos, empregando para iso documentación e material de apoio de diversos lugares do mundo mediante a investigación de artigos, libros e demais material en diversos idiomas, entre eles o inglés, dando cumprimento ás liñas de traballo marcadas para leste traballo fin de máster.

RESUMEN

El presente trabajo versa sobre el estudio de la transferencia de calor en los tanques de almacenamiento de terminales de regasificación onshore y el impacto que tiene la transferencia de calor en los mismos.

Para ello inicialmente se hace una breve introducción a la situación actual del mercado del gas, seguido del análisis de las instalaciones que operan en nuestro país que se realizará con apoyo de los softwares *SketchUp* y *AutoCad*.

De entre ellas se seleccionará una para evaluarla y diferenciar los equipos y elementos que operan en ella para, finalmente, proceder a la realización de los cálculos pertinentes en materia de análisis de transferencia.

Se empleará el software *Engineering Equation Solver* (EES) para la realización de los cálculos que demuestren si la planta opera de forma eficiente bajo los criterios previamente fijados de volumen de Boil-Off gas (BOG) generado en el interior de los tanques, y con ello evaluar la transferencia de calor.

Finalmente, se realizará una simulación térmica con el software *SolidWorks* de un tanque de regasificación, y se concluirá sobre las similitudes y diferencias de los valores obtenidos entre los cálculos del EES y los datos extraídos de la simulación.

Con ello se demostrará que se cuenta con la capacidad de elaborar análisis y síntesis de problemas teórico prácticos, diseño y optimización de instalaciones relacionadas con el ámbito de la ingeniería marina así como detectar la necesidad de mejorar e innovar sistemas energéticos, empleando para ello documentación y material de apoyo de diversos lugares del mundo mediante la investigación de artículos, libros y demás material en diversos idiomas, entre ellos el inglés, dando cumplimiento a las líneas de trabajo marcadas para este trabajo fin de máster.

ABSTRACT

The present work deals with the study of heat transfer in the storage tanks of onshore regasification terminals and the impact that heat transfer has on them.

To this end, a brief introduction to the current situation of the gas market is initially made, followed by an analysis of the facilities that operate in our country, which will be carried out with the support of *SketchUp* and *AutoCad* software.

Among them, one will be selected to evaluate it and differentiate the equipment and elements that operate in it to, finally, proceed to carry out the pertinent calculations in terms of transfer analysis.

The *Engineering Equation Solver* (EES) software will be used to carry out the calculations that show whether the plant operates efficiently under the previously established criteria of volume of Boil-Off gas (BOG) generated inside the tanks, and with this evaluates the heat transfer.

Finally, a thermal simulation will be carried out with the *SolidWorks* software of a regasification tank, and the similarities and differences of the values obtained between the EES calculations and the data extracted from the simulation will be concluded.

This will demonstrate that they have the ability to prepare analysis and synthesis of theoretical-practical problems, design and optimization of facilities related to the field of marine engineering, as well as detect the need to improve and innovate energy systems, using documentation and support material from various parts of the world through the research of articles, books and other material in various languages, including English, fulfilling the lines of work set for this master's thesis.

ÍNDICE

1 – ESTADO DEL ARTE DEL GAS NATURAL.....	7
1.1 – ¿Qué es el gas natural?	7
1.2 – Evolución del sector	8
1.3 – El ciclo del gas natural en España	12
2 – ESTADO DEL ARTE DE LAS PLANTAS DE REGASIFICACIÓN EN ESPAÑA.....	14
2.1 – Plantas de regasificación en España	14
2.1.1 – Planta de Barcelona	15
2.1.2 – Planta de Huelva	16
2.1.3 – Planta de Sagunto	16
2.1.4 – Planta de Cartagena	17
2.1.5 – Planta de Bilbao.....	17
2.1.6 – Planta de Mugaros	18
2.2 – Análisis comparativo entre las características de las terminales	18
2.3 – Definición del Mínimo Técnico	22
3 – ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES DE REGASIFICACIÓN ONSHORE	25
3.1 – Características de la planta modelo objeto del estudio	25
3.1.1 – Estructura de los tanques de almacenamiento de GNL.....	28
3.1.1.1 – Tanque exterior	28
3.1.1.2 – Tanque interior.....	30
3.1.2 – Aislamiento de los tanques de almacenamiento de GNL	30
3.1.2.1 – Aislamiento del fondo	31
3.1.2.2 – Aislamiento de la envolvente	32
3.1.2.3 – Aislamiento de la cubierta suspendida	33
3.2 – Generación de BOG en la planta modelo	33
3.2.1 – Balance de masa y energía.....	34

3.2.2 – Cálculo de la transferencia de calor	35
3.2.2.1 – Conducción	35
3.2.2.2 – Convección	36
3.2.2.3 – Radiación	37
3.2.2.4 – Analogía eléctrica	37
3.2.3 – Transferencia de calor a través del tanque.....	38
3.2.4 – Cálculo de la transferencia de calor	41
3. 3 – Modelo termodinámico y análisis.....	43
3.3.1 – Modelado con EES.....	44
3.3.2 – Modelado en SolidWorks	47
3. 4 – Comparativa de cálculos	51
3. 5 – Cálculo de la generación de Boil-Off Gas	53
4 – CONCLUSIÓN.....	54
5 – BIBLIOGRAFÍA, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	56
6 – ÍNDICE DE IMÁGENES Y DE TABLAS	61
7 – ÍNDICE DE FIGURAS.....	63

OBJETO

El objetivo del presente trabajo es realizar los cálculos sobre la transferencia de calor que se genera en los tanques de almacenamiento de gas natural licuado de las plantas de regasificación onshore.

Con ello se pretende conocer todos los elementos que operan en la transferencia de calor y analizar posibles problemas de aislamiento que hagan que la planta no sea todo lo energéticamente eficiente que pudiera ser influyendo directamente en su rendimiento.

1 – ESTADO DEL ARTE DEL GAS NATURAL

1.1 – ¿Qué es el gas natural?

El Gas Natural (GN) es un hidrocarburo que está constituido en su mayoría, en torno una media del 90%, por metano (CH_4), y que contiene además trazas de otros gases como pueden ser el etano, propano y butano entre otros, variando dichos porcentajes en función de la ubicación de los yacimientos de los cuales se extraen.

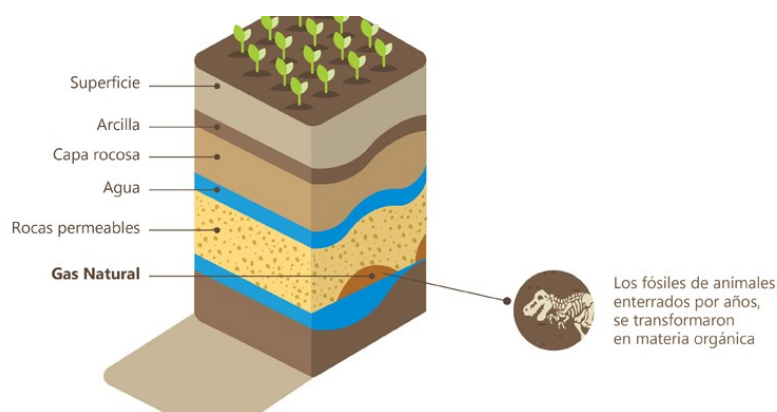


Imagen 1.1.1. Ubicación de yacimientos de gas natural [1]

El GN se forma tras la acumulación hace miles de años de material orgánico que fue sometido a elevadas presiones y temperaturas por los sedimentos que se fueron depositando sobre él. A través del terreno este gas generado por la descomposición de la materia orgánica fue encontrando lugares en los cuales se acumula, creando lo que hoy se denomina yacimientos.

Composición molar (%)	GN Ligero	GN Medio	GN Pesado
Metano (CH_4)	98,6	92,3	85,87
Etano (C_2H_6)	1,18	5	8,4
Propano (C_3H_8)	0,1	1,5	3
Butano (C_4H_{10})	0,02	0,6	1,2
Pentano (C_5H_{12})	-	0,1	0,23
Nitrógeno (N_2)	0,1	0,5	1,3
Densidad (kg/m^3)	427,74	445,69	464,83
PCI (kJ/kg)	49.935,06	49.557,05	48.984,02

Tabla 1.1.1. Composición del gas natural [2]

En función de la ubicación de dichos yacimientos, tanto de las condiciones que dieron lugar a la formación del GN, como de su almacenamiento, puede variar la concentración de gases en presencia de metano que lo constituyen. En lo referente a su composición, no todos los yacimientos cumplen con unos criterios mínimos de calidad para su puesta en el mercado.

De acuerdo con la información publicada por ENAGAS (Empresa Nacional del Gas), que cuenta con la certificación UNE-EN-ISO 9001 en Proceso de Medición, los porcentajes mínimos para una buena calidad del gas son los siguientes:

Elementos	Máximo	Mínimo	Unidades
Metano (CH ₄)	-	95	% mol
CO	2	-	% mol
H ₂	5	-	% mol
Flúor	10,1	-	mg/m ³
Cloro	10,1	-	mg/m ³
Amoníaco	3	-	mg/m ³
Mercurio	1	-	µg/m ³
Siloxanos	10	-	mg/m ³
Benceno, tolueno, Xileno (BTX)	500	-	mg/m ³
Microorganismos	-	Técnicamente puro	-
Polvo/Partículas	-	Técnicamente puro	-

Tabla 1.1.2. Porcentajes mínimos de ENAGAS para buena calidad del gas [3]

Estos datos han sido expresados en las siguientes condiciones de estado de referencia ($p_0 = 1 \text{ bar}$ y $T_0 = 0^\circ\text{C}$)

1.2 – Evolución del sector

Hasta antes de la irrupción de la pandemia de la COVID-19, la demanda mundial del GN se incrementaba año tras año. Esto, sumado a la abundancia de la materia prima y la caída del consumo, ha provocado que en Mayo de 2020 los precios marcaran su mínimo histórico.

De acuerdo con el Informe de Funcionamiento del mercado del GN elaborado por la Comisión Nacional de Mercados y Competencia (CNMC) en el año 2019 [4], antes de la época de la COVID-19, Argelia superaba el 51% de la cuota de proveedores, seguido de Nigeria (12%), Catar (10%), Noruega (9%) y Trinidad Tobago (6%).

Estos valores han cambiado totalmente, y la irrupción de Estados Unidos (EEUU) como exportador, que desde 2017 ha aumentado de forma importante su presencia en este mercado, ha hecho que el transporte de gas vía marítima mediante la fórmula del Gas Natural Licuado (GNL, o Liquefied Natural Gas, LNG, por sus siglas en inglés) se imponga.

A fecha de Marzo de 2022, el reparto de importaciones de GN en 2022 en España fue el siguiente:

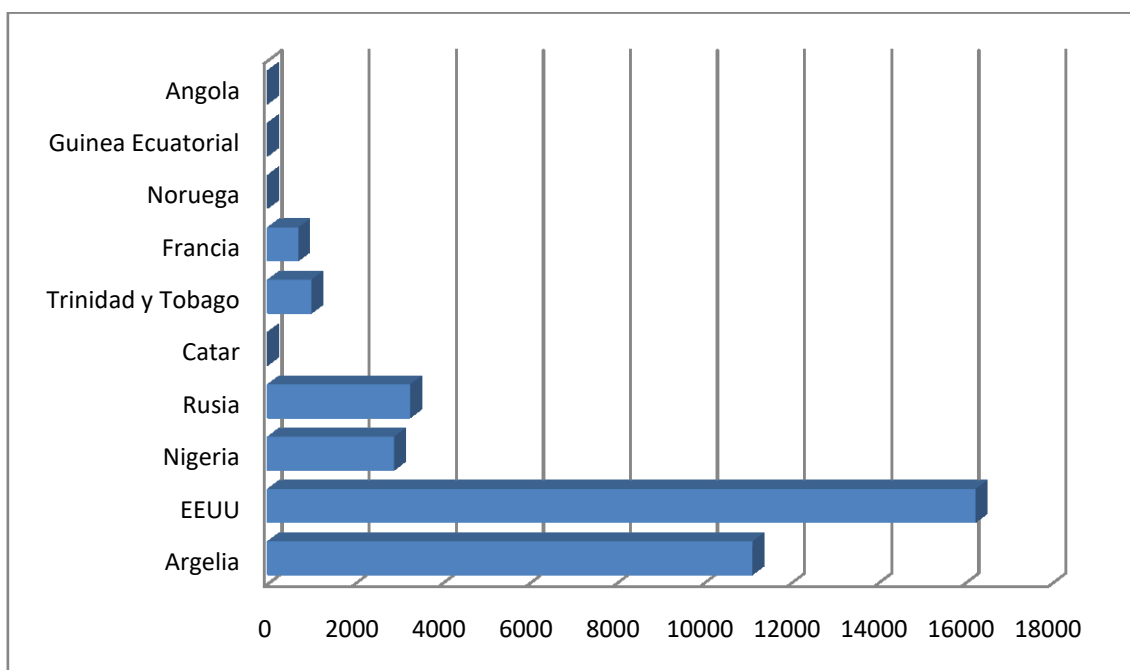


Figura 1.2.1. Importaciones en GWh de gas natural en Marzo de 2022 [5]

Cabe destacar que ya antes de la COVID-19, el 42% del GN que se consumía en España entraba por vía marítima en las plantas de regasificación, y que en nuestro país cuenta con el mayor porcentaje de regasificación del total de la Unión Europea, un 33%. A febrero de 2022, el 68,7% del GN que entró en España lo hizo en forma de GNL, mientras que el año anterior había sido del 45,4% [6]

En el año 2021, tras la reactivación de la economía a través de los fondos europeos *Next Generation* y el comienzo de las vacunaciones contra la COVID-19, el mercado de la energía comenzó a vivir una escalada de precios precisamente por la orientación de las políticas energéticas de la Unión Europea (UE).

El objetivo por parte de la UE es claro, y es ampliar el uso de energías menos contaminantes para la preservación y defensa del medioambiente, pero al ser la energía una competencia de cada estado miembro, cada país tiene una forma diferente de hacerlo.

La consecuencia de esto es que el precio del gas se ha incrementado un 500% en Europa, tal y como se puede comprobar en la figura 1.2.2 donde se evalúa la evolución de los HUB gasistas europeos. En el caso de España, en febrero de 2022 el gas llegó a incrementarse hasta un 651% [7]

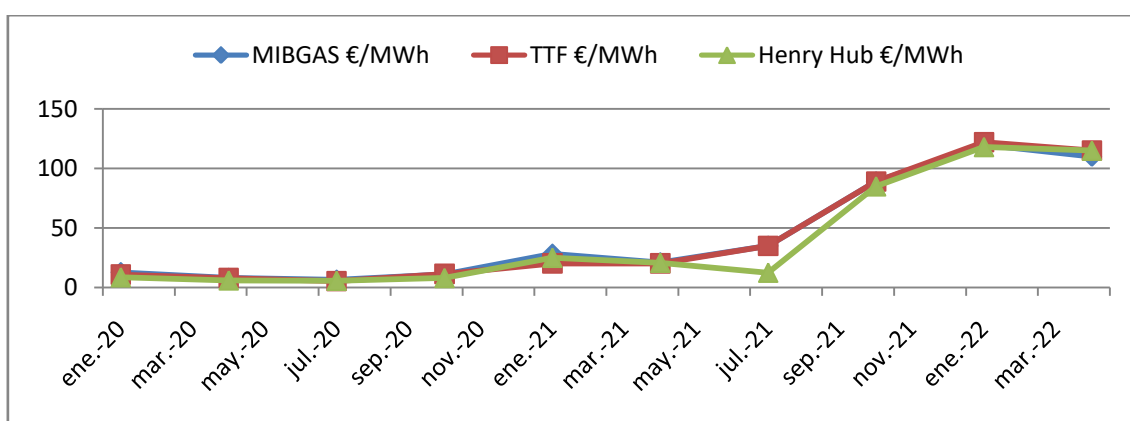


Figura 1.2.2. Evolución de los precios del gas en €/MWh [7]

En declaraciones de la vicepresidenta tercera y ministra para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Teresa Ribera, *“por cada euro que sube el precio del gas en los mercados internacionales, sube dos euros la electricidad en el mercado mayorista”*, según un informe elaborado por el Banco de España en Agosto de 2021, y que atribuye al gas nada más y nada menos que la mitad de la subida del recibo de la luz. [8]

Además existen circunstancias ajenas al propio sector que han provocado el encarecimiento del precio; Desde el duro invierno que pasamos en toda Europa, hasta el acopio de Asia del 70% del GNL global existente, pasando por las tensiones entre Rusia y EEUU por la puesta en funcionamiento del Nord Stream 2, un gasoducto que llega hasta Alemania de forma directa duplicando las exportaciones rusas.

También destacar la situación política entre España y Argelia después del cambio de postura sobre la soberanía del Sahara y Marruecos, o la situación por el conflicto bélico

en Ucrania, que está elevando la tensión entre las potencias a niveles de la Guerra Fría [9], lo que afecta de forma directa al mercado y al sector.

A día de finalizar este trabajo fin de máster, el continuo cambio de las situaciones geopolíticas que está viviendo el mundo globalizado y que tienen una incidencia directa en el mercado del gas, así como del resto de combustibles y materias primas, hacen prácticamente imposible establecer un modelo previsible a largo plazo sobre la evolución del sector y que, como ejemplo de esta situación, se dio que en febrero de 2022 España redujo un 17,7% las importaciones de gas de Rusia con respecto febrero de 2021.

En referencia a la política energética, cada país miembro de la UE tiene sus propias políticas energéticas y de exteriores, y aquí existen otros dos claros ejemplos que afectan a España en esta divergencia de opiniones y que afectan a la tarifa de la luz, como son el proceso de descarbonización de los ciclos combinados y el desmantelamiento de la energía nuclear.

Mientras en Alemania aún se inauguró el pasado 1 de Junio de 2020 la central térmica de ciclo combinado de Datteln-4 (Dortmund), de una potencia instalada de 1,1 GW y se ha fijado el fin del carbón para la obtención de energía en 2038, en España se ha procedido al desmantelamiento de la mayor térmica que tiene en As Pontes (A Coruña), con una potencia instalada de 2.34 GW habiendo todavía margen para su funcionamiento [10] y que se tuvo que paralizar en Octubre de 2021 por el elevado precio del kW/h poniéndola de nuevo en funcionamiento.

En el caso de la energía nuclear, en el país vecino de Francia se ha fijado el objetivo de bajar del 70% que actualmente ostenta como fuente de energía primaria hasta el 50% en 2035. [11]

En el caso de España, en el cual la energía nuclear presenta el 23% del total nacional, ha desmantelado ya la primera de las centrales el pasado Febrero de 2021. Este tema no es baladí, ya que actualmente España le está comprando energía nuclear a Francia porque en 15 de las 24 franjas horarias la energía es más barata allí que aquí.

Estas dos fuentes de energía, en febrero de 2022, ocupan el 45% del total, a lo que si se le suma la cogeneración, situada en el 10%, supone más del 55% de la producción de energía nacional.

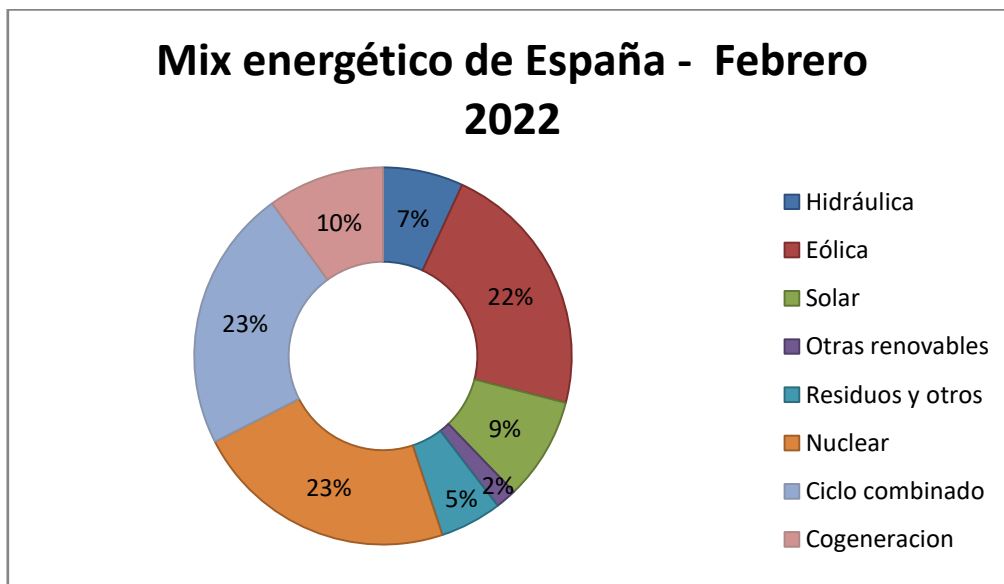


Figura 1.2.3. Gráfico de la energía generada en España en Febrero de 2022 [7]

1.3 – El ciclo del gas natural en España

El funcionamiento del ciclo del GN en España está regulado mediante el Real Decreto (RD) del 13/2012 de 30 de Marzo por el que se transponen directivas en materia de mercados interiores de electricidad y gas y en materia de comunicaciones electrónicas, y por el que se adoptan medidas para la corrección de las desviaciones por desajustes entre los costes e ingresos de los sectores eléctricos y gasista [12]. Este RD, en su artículo 59, define las infraestructuras que constituyen la red del sector gasista:

«Artículo 59. Sistema gasista y red básica de gas natural.

1. El sistema gasista comprenderá las siguientes instalaciones: las incluidas en la red básica, las redes de transporte secundario, las redes de distribución, los almacenamientos no básicos y demás instalaciones complementarias.

2. A los efectos establecidos en la presente Ley, la red básica de gas natural estará integrada por:

a) Los gasoductos de transporte primario de gas natural a alta presión. Se considerarán como tales aquellos cuya presión máxima de diseño sea igual o superior a 60 bares, diferenciándose entre:

- Red troncal: Gasoductos de transporte primario interconectados esenciales para el funcionamiento del sistema y la seguridad de suministro excluyendo la parte de los gasoductos de transporte primario utilizados fundamentalmente para el suministro local de gas natural. En todo caso se considerarán incluidas las conexiones internacionales del sistema gasista español con otros sistemas, las conexiones con yacimientos de gas natural en el interior o con almacenamientos básicos, las conexiones con las plantas de regasificación, las estaciones de compresión y los elementos auxiliares necesarios para su funcionamiento.*
- Red de influencia local: Gasoductos de transporte utilizados fundamentalmente para el suministro local de gas natural.*

b) Las plantas de regasificación de gas natural licuado que puedan abastecer el sistema gasista y las plantas de licuefacción de gas natural.

c) Los almacenamientos básicos de gas natural, que puedan abastecer el sistema gasista.

3. Las redes de transporte secundario están formadas por los gasoductos de presión máxima de diseño comprendida entre 60 y 16 bares.

4. Las redes de distribución comprenderán los gasoductos con presión máxima de diseño igual o inferior a 16 bares y aquellos otros que, con independencia de su presión máxima de diseño, tengan por objeto conducir el gas a un único consumidor partiendo de un gasoducto de la Red Básica o de transporte secundario.

5. Almacenamientos no básicos de gas natural son las estructuras de almacenamiento de gas natural en el subsuelo y las instalaciones de superficie que se requieran, con carácter temporal o permanente, para el desarrollo de la actividad de explotación del almacenamiento subterráneo de gas natural, incluidos los gasoductos

de conexión entre el almacenamiento y la red básica de gas natural. Estas instalaciones quedarán excluidas del régimen retributivo del sistema de gas natural.»

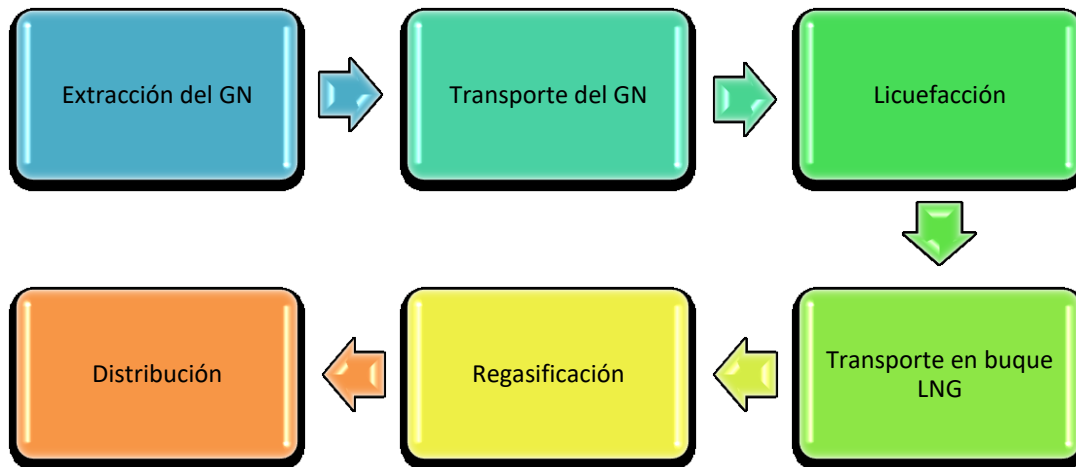


Figura 1.2.4. Ciclo del gas natural. Original del autor

Como se expuso con anterioridad, España supone el 33% del total de regasificación de la Unión Europea, por ello es un país idóneo para analizar las capacidades de sus plantas de regasificación, características, similitudes y diferencias a la hora de gestionar el proceso de regasificación.

Con la situación energética actual y la guerra de Ucrania, EEUU ha situado a España como uno de sus principales puertos de descarga de LNG para el suministro de gas a Europa si Rusia decide cortar el suministro.

2 – ESTADO DEL ARTE DE LAS PLANTAS DE REGASIFICACIÓN EN ESPAÑA

2.1 – Plantas de regasificación en España

En la actualidad en España existen 6 plantas en funcionamiento.

Dichas plantas son las de Barcelona, Huelva, Cartagena, Bilbao y Sagunto, que son controladas por ENAGAS o en las que ENAGAS participa dentro de su accionariado, y la planta de Mugarodos, que pertenece a Regasificadora del Noroeste SA (REGANOSA), que está formada por capital privado y la participación de la Xunta de Galicia.

Se ha dejado al margen aquellas que se encuentran en situación de hibernación como es la de El Musel, en Gijón, aunque en Mayo de 2021 recibió la autorización del

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico para la tramitación de la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) para ponerla de nuevo en funcionamiento.



Imagen 2.1.1. Red de gas española [13]

2.1.1 – Planta de Barcelona

Comenzó sus operaciones en el año 1969, contaba con seis tanques que le permitía almacenar 760.000 m³ de GNL y tenía una capacidad de emisión de 1.950.000 m³/h en gas. [14]

Características	Barcelona
Nº de Tanques	6
Capacidad de Almacenamiento	760.000 m ³ GNL
Capacidad de Emisión	1.950.000 m ³ (n)/h
Atraque máximo	266.000 m ³ GNL
Atraque mínimo	80.000 m ³ GNL
Carga de cisternas	50 al día

Tabla 2.1.1.1. Características de la planta de Barcelona [14]

2.1.2 – Planta de Huelva

Comenzó a operar en 1985, cuenta con cinco tanques que le permite almacenar 619.500 m³ de GNL y tiene una capacidad de emisión de 1.350.000 m³/h en gas. Esta planta está incluida dentro del proyecto *Shaky*, para emplear la energía fría del GNL en refrigeración de productos de alimentación, así como generación de pilas de combustible de hidrógeno. [15]

Características	Huelva
Nº de Tanques	5
Capacidad de Almacenamiento	619.000 m ³ GNL
Capacidad de Emisión	1.350.000 m ³ (n)/h
Atraque máximo	180.000 m ³ GNL
Atraque mínimo	29.500 m ³ GNL
Carga de cisternas	50 al día

Tabla 2.1.2.1. Características de la planta de Huelva [15]

2.1.3 – Planta de Sagunto

Ubicada en el arco Mediterráneo, es receptora de gas de África y Oriente Medio. Controlada por ENAGAS al contar con un 72,5% de SAGGAS, tiene 4 tanques de almacenamiento con una capacidad total de 600.000 m³ y una capacidad de emisión de 1.000.000 m³/h en gas. [16]

Características	Sagunto
Nº de Tanques	4
Capacidad de Almacenamiento	600.000 m ³ GNL
Capacidad de Emisión	1.000.000 m ³ (n)/h
Atraque máximo	266.000 m ³ GNL
Atraque mínimo	30.000 m ³ GNL
Carga de cisternas	40 al día

Tabla 2.1.3.1. Características de la planta de Sagunto [16]

2.1.4 – Planta de Cartagena

Entró en funcionamiento en 1989, cuenta con cinco tanques con una capacidad total de almacenamiento de 587.000 m³ de GNL y una capacidad de emisión de 1.350.000 m³/h en gas. Además esta planta lleva desde mediados del año 2009 dotada de los medios necesarios para realizar descargas de hasta 266.000 m³ tras la remodelación del puerto de atraque. [17]

Características	Cartagena
Nº de Tanques	5
Capacidad de Almacenamiento	587.000 m ³ GNL
Capacidad de Emisión	1.350.000 m ³ (n)/h
Atraque máximo	266.000 m ³ GNL
Atraque mínimo	40.000 m ³ GNL
Carga de cisternas	50 al día

Tabla 2.1.4.1. Características de la planta de Cartagena [17]

2.1.5 – Planta de Bilbao

También conocida como la Planta BBG (Bahía de Bizkaia Gas), se encuentra ubicada en Zierbena. Está operada al 50% entre ENAGAS y el EVE (Ente Vasco de Energía). Cuenta con tres tanques y una capacidad total de 450.000 m³, y su capacidad de emisión es de 800.000 m³/h en gas. [18]

Características	Bilbao
Nº de Tanques	3
Capacidad de Almacenamiento	450.000 m ³ GNL
Capacidad de Emisión	800.000 m ³ (n)/h
Atraque máximo	270.000 m ³ GNL
Atraque mínimo	7,500 m ³ GNL
Carga de cisternas	15 al día

Tabla 2.1.5.1. Características de la planta de Bilbao [18]

2.1.6 – Planta de Mugaros

Entró en funcionamiento en 2007, cuenta con dos tanques y una capacidad de de 300.000 m³, y una capacidad de emisión de 413.000 m³/h en gas. Está gestionada por la empresa REGANOSA. [19]

Características	Mugaros
Nº de Tanques	2
Capacidad de Almacenamiento	300.000 m ³ GNL
Capacidad de Emisión	413.000 m ³ (n)/h
Atraque máximo	266.000 m ³ GNL
Atraque mínimo	15.600 m ³ GNL
Carga de cisternas	35 al día

Tabla 2.1.6.1. Características de la planta de Mugaros [19]

2.2 – Análisis comparativo entre las características de las terminales

Como resultado del análisis del anterior punto se extrae la siguiente tabla y figura:

Planta	Capacidad (m ³)	Emisión (m ³ /h)	Titular
Barcelona	760.000	1.950.000	ENAGAS
Huelva	619.500	1.350.000	ENAGAS
Sagunto	600.000	1.000.000	SAGGAS
Cartagena	587.000	1.350.000	ENAGAS
Bilbao	450.000	800.000	ENAGAS+EVE
Mugaros	300.000	413.000	REGANOSA

Tabla 2.2.1. Resumen de capacidades de las plantas españolas. Elaboración propia

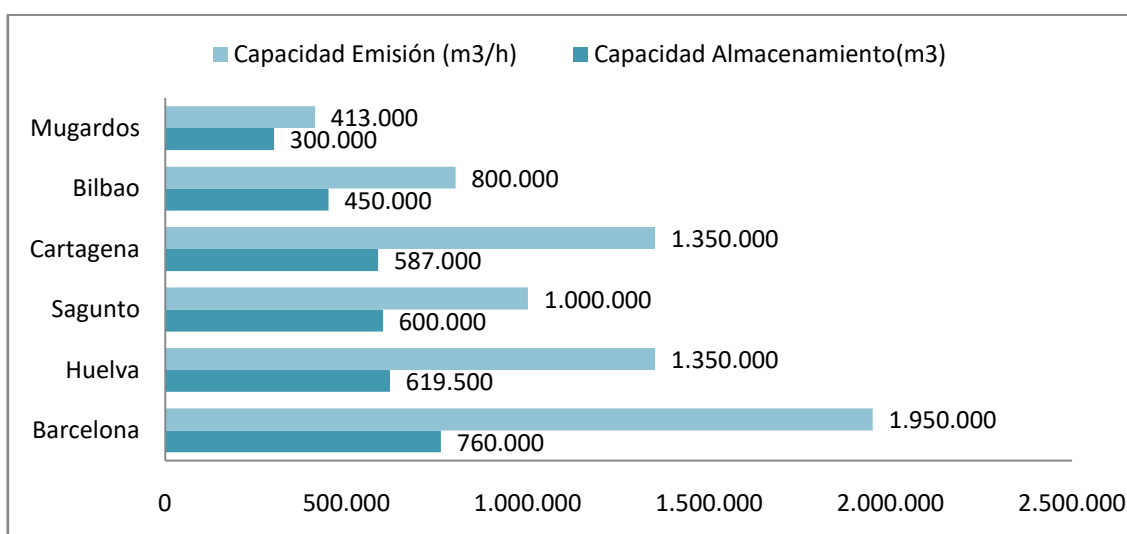


Figura 2.2.1. Representación de los datos de la Tabla 2.2.1. Original del autor

Una de las primeras conclusiones que se pueden extraer es que un mayor número de tanques no quiere decir que se tenga mayor capacidad de almacenamiento. La planta de Sagunto tiene una capacidad de más de 13.000 m³ con respecto a la de Cartagena teniendo esta última un tanque a mayores.

Además de esto es interesante resaltar la diferencia que existe entre la capacidad emisión de la planta de Barcelona en comparación con el resto de plantas existentes, impulsada principalmente por los consumidores instalados en el entorno de la ciudad condal.

Además de ello, si se realiza una comparativa entre la relación de la capacidad de emisión y la de almacenamiento de cada planta, tal y como se puede comprobar en la figura 2.2.2, podríamos distinguir entre dos grupos las instalaciones situadas en la península.

Por un lado estarían las de Huelva, Cartagena y Barcelona, siendo las tres cuya diferencia es superior, y por otro lado estarían Mugardos, Bilbao y Sagunto, siendo la primera la que menor relación tiene de todas.

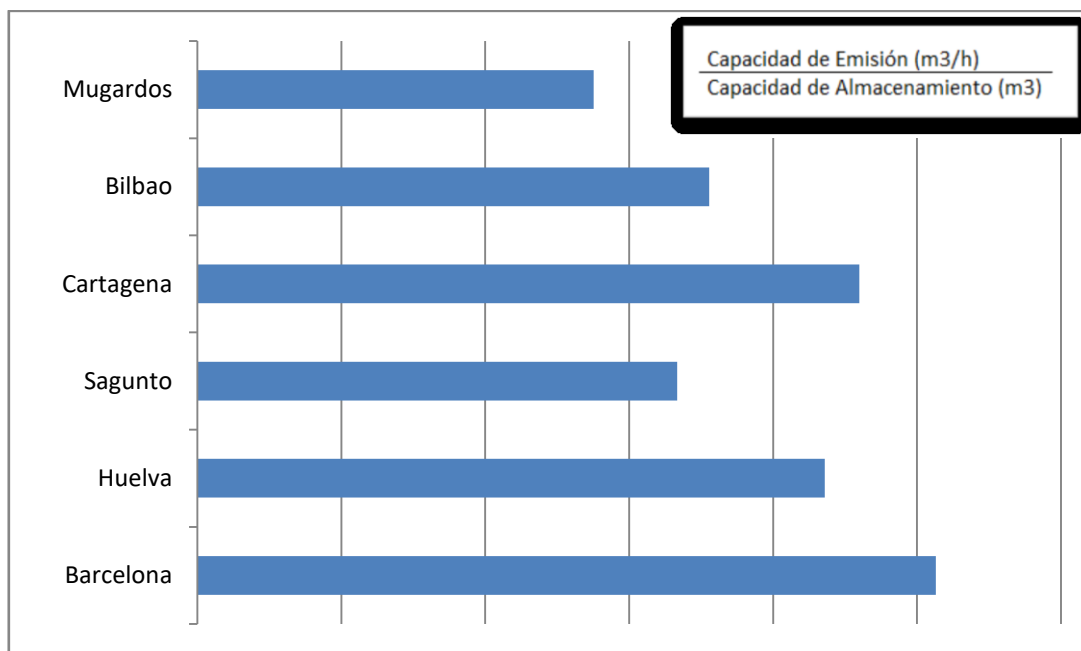


Figura 2.2.2. Relación entre la capacidad de emisión y de almacenamiento. Original del autor

La capacidad de emisión de una planta es la cantidad de gas que pueden suministrar a la red, y por lo tanto en las plantas de Huelva, Cartagena y Barcelona existe un

dimensionamiento de sus instalaciones que les permiten suministrar gas a grandes consumidores o bien durante más tiempo.

En cambio las plantas de Mugarodos, Bilbao y Sagunto no tienen consumidores que puedan demandar tan altas capacidades de emisión de gas como las instalaciones del grupo anterior, lo cual puede ocasionar mayor probabilidad de pérdidas, tanto económicas como energéticas, por no existir demanda del suministro ni la necesidad de almacenamiento a largo plazo.

Para este estudio se centrará el análisis en este tipo de plantas que carecen de estos grandes consumidores.

Si se compara las configuraciones de los equipos de las plantas de Mugarodos, Bilbao y Sagunto se pueden observar dos esquemas diferentes, elaborados con el software *AutoCad*, y que se diferencian principalmente en la instalación de un compresor directo desde la línea de vapor hasta el gasoducto. Las plantas de Mugarodos y de Bilbao no cuentan con ese compresor que permitiría el envío directo a gasoducto, de acuerdo con la imagen 2.2.1. [19-20]

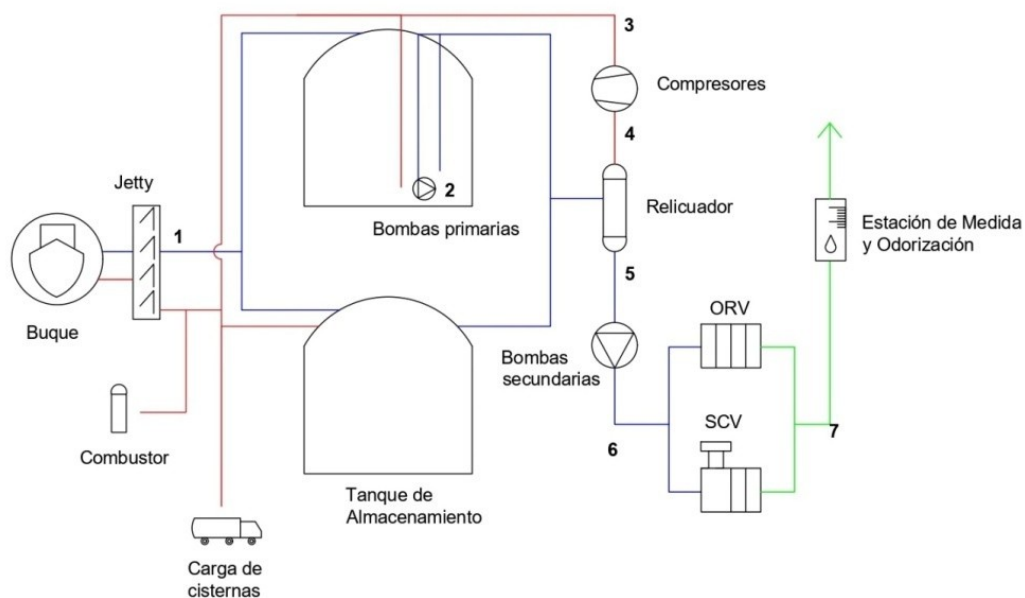


Imagen 2.2.1. Esquema de las plantas de Mugarodos y Bilbao sin compresor directo. Elaboración propia

En el caso de la planta de Sagunto, sí que existe ese compresor para gestionar el vapor de la carga denominado Boil-Off Gas (BOG) que conecta la línea de vapor de los

tanques y del buque con la estación de medida y odorización y con el gasoducto, tal y como se puede comprobar con la imagen 2.2.2. [21]

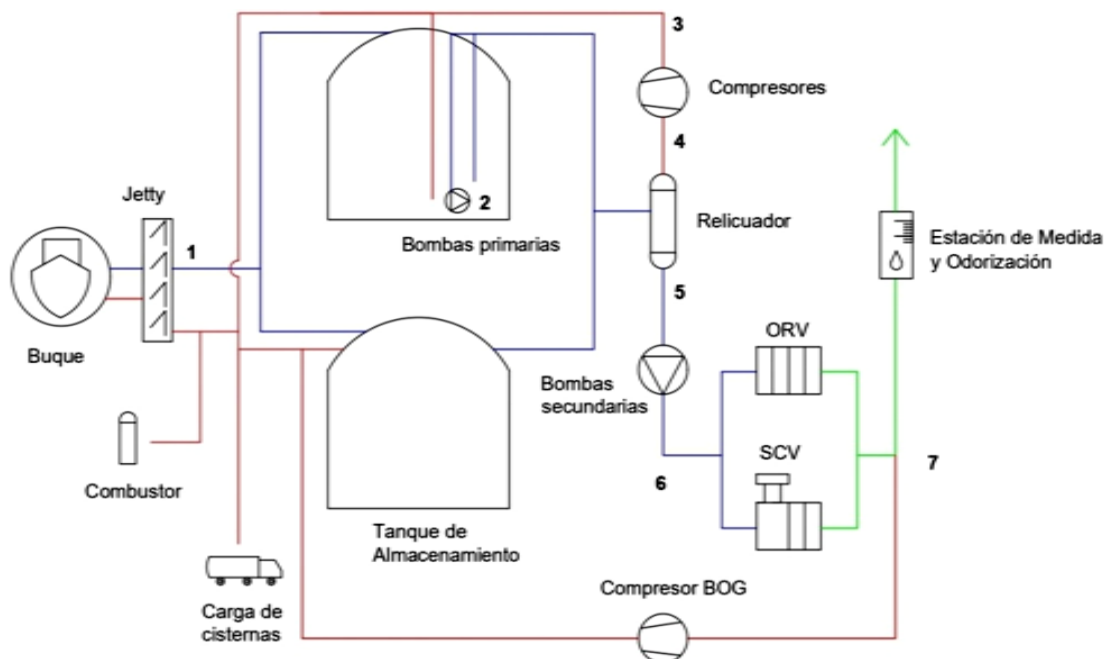


Imagen 2.2.2. Esquema de la planta de Sagunto con compresor directo. Elaboración propia

En base a estas configuraciones [19-21] se elabora con el software *SketchUp* el siguiente esquema de planta de regasificación de acuerdo con las imágenes 2.2.3 y 2.2.4.

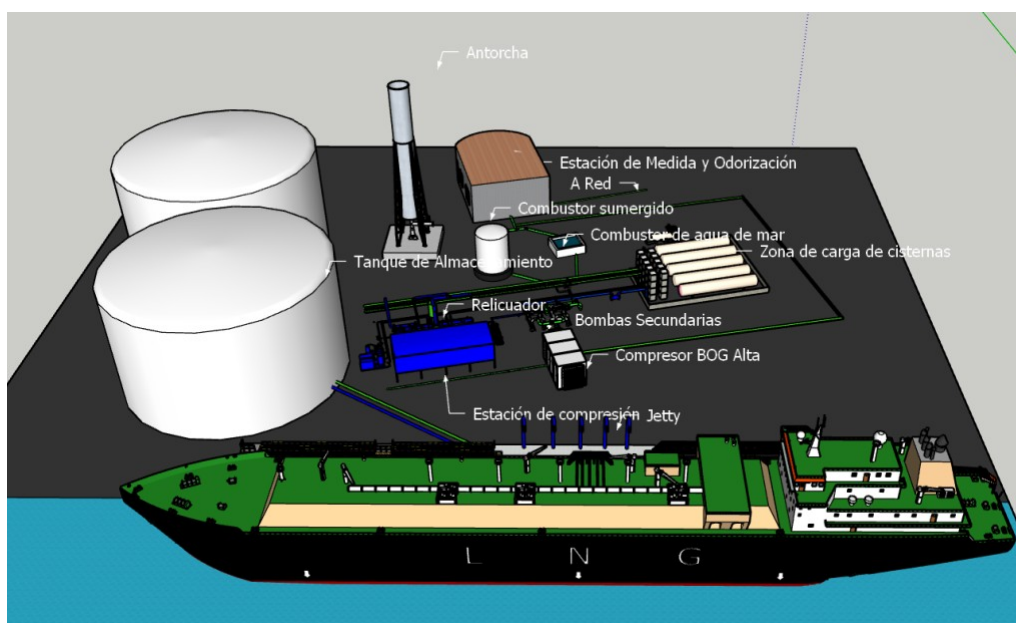


Imagen 2.2.3. Esquema de planta de regasificación (1). Elaboración propia

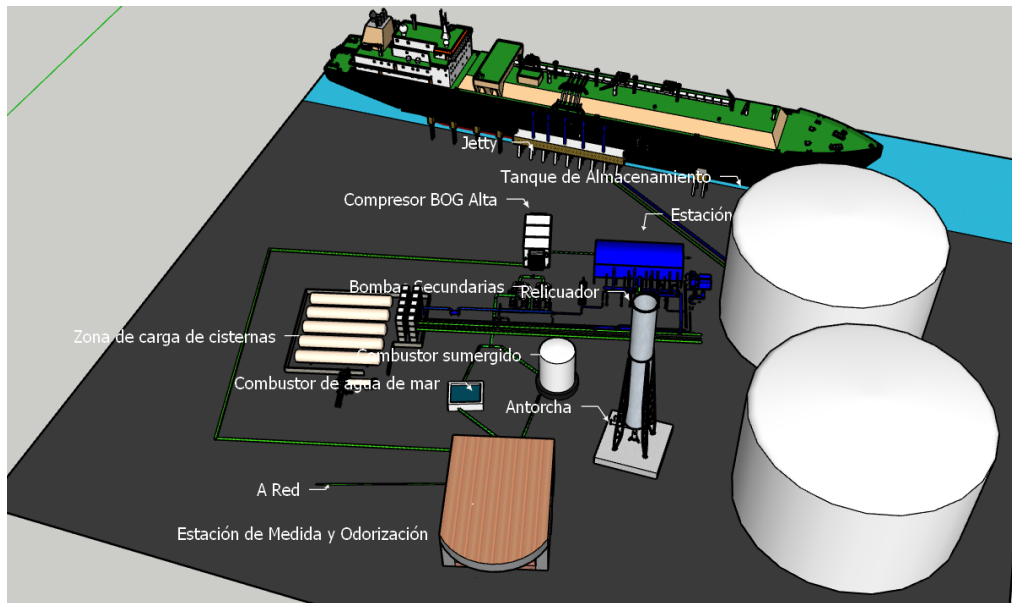


Imagen 2.2.4. Esquema de planta de regasificación (2). Elaboración propia

Como se puede comprobar, todas siguen el esquema básico de funcionamiento Buque –Tanque – Relicador – Compresores – Vaporizadores – Odorización y Medición – Gasoducto, no obstante si se analiza la planta de Sagunto (Imagen 2.2.2), se puede apreciar que tienen un compresor que envía el vapor de carga generado en los tanques de almacenamiento al gasoducto, siendo esta una de las formas de gestionar estos vapores para disminuir las pérdidas económicas derivadas de las pérdidas de GNL durante el proceso, y de la operación de la planta por debajo de su mínimo técnico.

2.3 – Definición del Mínimo Técnico

Tras descargar desde el buque el GNL a los tanques de almacenamiento, debido a que este se almacena a una temperatura de -164°C , habrá una parte de la carga que se evapore por la transferencia de calor con el exterior generando vapores de la carga, de ahora en adelante denominado Boil-Off Gas (BOG).

La generación del BOG mayoritariamente se obtiene por razones de transferencia de calor por la variación de temperatura entre el exterior y los tanques de almacenamiento, el enfriamiento de los tanques con la pulverización del GNL, y en el caso de buques habría que sumar la agitación de la carga debido al oleaje.

La generación de BOG hará que la presión en los tanques se eleve, siendo necesaria su gestión para evitar daños estructurales de la planta.

En la actualidad existen tres formas de gestionarlo:

- 1) Quemándolo en la antorcha (o GCP, siglas por su definición en inglés Gas Combustion Unit),
- 2) Instalando un compresor que permita su suministro al gasoducto elevándolo de la presión de almacenamiento a la presión de servicio (que se encuentra en torno a los 80 bar), y
- 3) Con un ciclo de relicuación que permita relicuarlo y devolverlo al interior del tanque de almacenamiento de forma líquida.

Existe una cuarta, que sería exhaustándolo a la atmosfera cuando existen sobrepresiones en las válvulas de seguridad, pero dado que se trata más de un elemento de seguridad de la instalación que de una forma de gestión como tal, no se incluye dentro de las formas de gestión.

El Mínimo Técnico (MT) es, por definición consensuada entre todos los operadores de plantas de GN tal y como pone de manifiesto ENAGAS en su web: *“el nivel de producción mínimo necesario que permita recuperar el BOG, generado en cualquier circunstancia de operación, al tiempo que mantiene frío todas las instalaciones y garantiza el 100% de disponibilidad inmediata del resto de los equipos en condiciones de seguridad de funcionamiento estable.”* [22]

Es decir, se trata de un valor que se obtiene en función de la eficiencia energética de las instalaciones de la planta y, por debajo de él, la planta no tiene capacidad para gestionarlo, procediendo a su quema en la antorcha.

Como factores que afectan a la determinación del MT de una planta se pueden citar las características de la propia terminal (número de tanques y su capacidad, materiales de construcción, bombas, capacidad de emisión, tuberías y conexiones...), el tipo de barco que trae la carga, la calidad del GNL que esté almacenado o los propios criterios de seguridad entre otros.

Cada instalación cuenta con su propio MT. Si se analiza pormenorizadamente cada planta de regasificación se obtiene la siguiente tabla que recoge dichos valores:

Planta	Mínimo Técnico
Barcelona	42 GWh/día
Huelva	25 GWh/día
Sagunto	33 GWh/día
Cartagena	35 GWh/día
Bilbao	34 GWh/día
Mugaros	32 GWh/día

Tabla 2.3.1. Mínimos técnicos fijados para cada instalación desde 2017 [23]

Si se analiza de acuerdo a los datos facilitados por la CNMC a través de sus informes sobre la supervisión de la gestión técnica del sistema desde el año 2016, se obtiene la siguiente tabla en la que figura el porcentaje de días que cada planta ha estado por debajo del MT que tiene fijado cada instalación. A fecha de finalización de este trabajo no están publicados los datos del año 2021, dado que los de 2020 se publicaron en septiembre de 2021.

Porcentaje de días por debajo de mínimo técnico					
Planta	2016	2017	2018	2019	2020
Barcelona	71,23%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Huelva	28,49%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Sagunto	9,04%	28,49%	100,00%	48,77%	30,96%
Cartagena	98,36%	84,11%	87,40%	42,19%	1,37%
Bilbao	91,23%	1,10%	0,55%	0,00%	0,00%
Mugaros	96,44%	68,49%	66,58%	38,36%	6,30%

Tabla 2.3.2. Porcentaje de días por debajo del mínimo técnico [23]

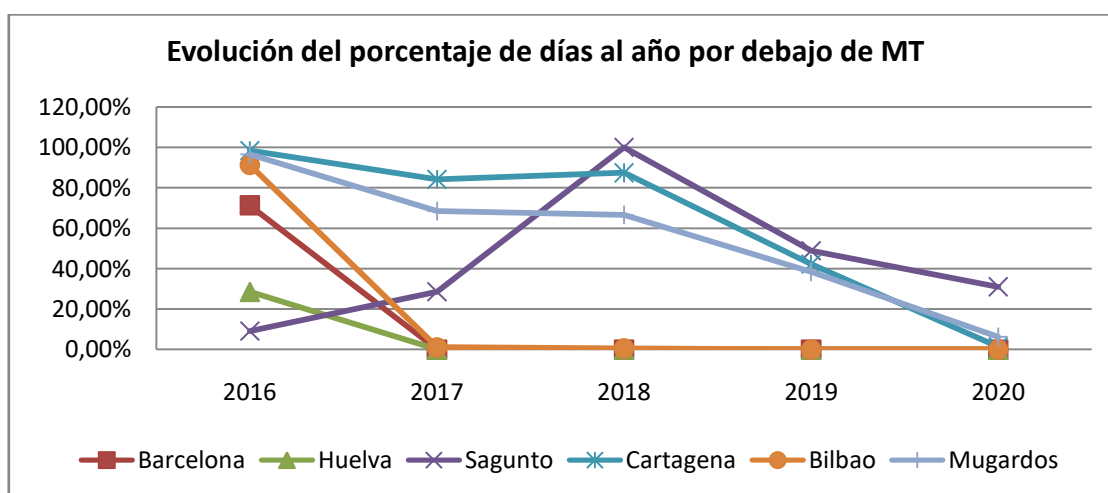


Figura 2.3.1 Gráfica sobre la evolución del porcentaje de días al año por debajo del mínimo técnico en cada instalación de regasificación. [23]

3 – ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES DE REGASIFICACIÓN ONSHORE

El objetivo del presente trabajo es la realización de un estudio sobre la transferencia de calor en los tanques de una planta de regasificación onshore, y para ello será necesario fijar que tipo de planta en cuestión se analizará.

A la vista de los datos aportados, la que menor capacidad de emisión y de almacenamiento tiene de la red española es la planta de Mugaros, siendo la única planta gallega y una planta que a su vez, carece de un compresor que permita el envío directo del BOG al gasoducto cuando existe un exceso que el sistema del relicuador no es capaz de gestionar.

Cuando esto ocurre, el BOG se quema en la antorcha, con las correspondientes pérdidas económicas que ello carrea tanto por las emisiones de CO₂ como por el quemar la propia carga en lugar de proceder a su venta.

Así mismo, tal y como se puede comprobar en la figura 2.3.1, nos encontramos con una planta que mejora sus números por la situación energética coyuntural de alta demanda que se está viviendo actualmente en la actualidad, no por una mejora de la misma.

Esta situación en la que se cuenta, junto con su ubicación y los parámetros de su capacidad de emisión y almacenamiento, justifican que sea la planta sobre la que se centre el presente estudio.

3.1 – Características de la planta modelo objeto del estudio

Para el seguimiento a cerca del funcionamiento de la terminal de Mugaros, se empleará parte de la información facilitada en el Trabajo Fin de Grado (TFG) *“Gestión del boil-off gas de una planta de regasificación”* [26]

En nuestro caso la planta está diseñada para que se permita una descarga de 12.000 m³/h y el almacenamiento a -164 °C. Se comienza con la descarga a través del jetty donde hay cuatro brazos, de los cuales uno se emplea para el trasvase de GN en estado vapor a -140°C, todos ellos permiten una capacidad aproximada de descarga de 3.500 m³/h y son de acero inoxidable bajo en carbono.

Desde el jetty se introduce el GNL en los tanques a través de dos líneas: una de 36'' y otra de menor diámetro, de 8'', siendo esta última la que se emplea para mantener frío el sistema y la recirculación del GNL.

Los tanques tienen una capacidad de 150.000 m³ cada uno.

En su interior se encuentran las bombas primarias o de baja presión; se trata de dos bombas con un caudal de 500 m³/h, y un pocete con otras dos de reserva, alcanzando el 100% de la capacidad de carga/descarga con 3 de las 4 bombas en funcionamiento, que servirán para enfriamiento de líneas, suministro a vaporizadores y la carga de camiones cisterna.

Partiendo de la figura 3.1.1 donde la línea azul es GNL, la línea roja BOG y la línea verde GN, podemos decir que la planta opera de dos formas diferentes:

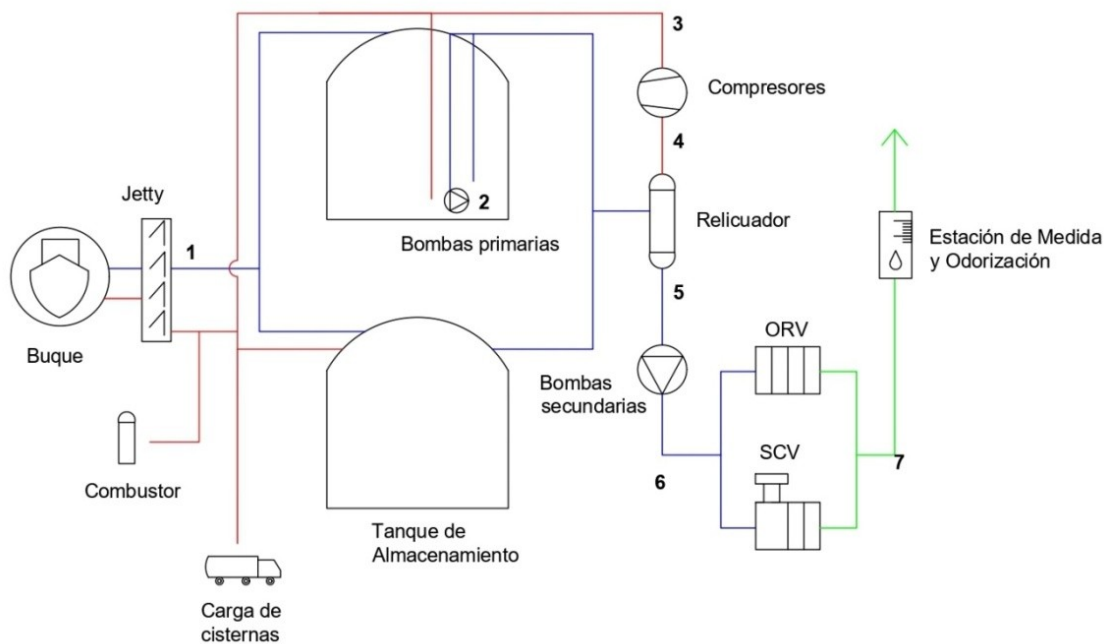


Imagen 3.1.1. Esquema de funcionamiento de la planta de Mugarodos. Elaboración propia

- **Planta activa:** Desde este punto de vista se analiza la planta en funcionamiento, es decir, cuando está efectuando labores de carga/descarga o cuando está suministrando en la red.

Cuando la planta está en funcionamiento y existe demanda de gas, se procede a regasificar empleando el agua de mar como foco térmico, aumentando

progresivamente la temperatura del gas hasta que llega a las condiciones de emisión.

El GNL se envía a través del relicuador (5) y de las bombas secundarias (6) a los vaporizadores (7). El agua de mar se bombea hasta los que se conocen como Open Rack Vaporizer (ORV), que vaporizan el GNL con agua de mar a 12º, siendo el gradiente máximo de temperatura entre la entrada y el retorno de 6 ºC, y tiene una capacidad de trabajo de 160 t/h.

Existe otro paralelo denominado Submerged Combustion Vaporizer (SCV) pero que actualmente está en desuso y que sirve de apoyo.

Cuando la planta está parada o descargando buques GNL, durante la descarga de los barcos se incrementa el nivel en los tanques creando un desplazamiento del vapor, al mismo tiempo que el nivel de los tanques del buque desciende creando una disminución de la presión. Para evitar el vacío en el interior de los tanques del buque, una parte del vapor desplazado de los tanques se envía hasta el barco por el brazo destinado a esta labor en el jetty (1).

El boil-off generado es compensado con el ritmo de envío desde el barco de la carga y se controla la presión en los tanques a través de los compresores destinados a tal efecto, conocidos como compresores de BOG, que tienen una capacidad mínima de gestionar 80 t/h (4)

- Planta pasiva: Es decir, con la planta parada. Esto ocurre cuando no existen barcos realizando una carga/descarga ni cuando hay demanda de envío de gas a la red. En el interior de los tanques de almacenamiento tiene lugar la generación del BOG como consecuencia de las transferencias de calor y para ello, se diseñó un sistema que gestionara el BOG que se produce durante la descarga de los buques y durante la operación normal y confinamiento.

El sistema de control del BOG está formado por: Tres compresores (4), un relicuador (5), combustor, sistema de venteo y estación de medida y odorización (7).

Tanto con la planta activa o pasiva, el BOG se extrae por la parte superior del tanque mediante compresores (4), su presión aumenta y se reenvía a las líneas del proceso evitando así su quemado y exhaustación al tratarse en el relicuador (5), donde devuelve líquido de nuevo y se incorpora a los tanques.

3.1.1 – Estructura de los tanques de almacenamiento de GNL

Los tanques de la terminal se construyen de acuerdo con la normativa EN 1473 del tipo contención total, de la clase H4. El tanque exterior será de hormigón pretensado y el interior de acero con un porcentaje del 9% en Níquel.

De acuerdo con las especificaciones del proyecto, las características de los mismos son:

Capacidad de almacenamiento	2 tanques de 150.000 m ³ cada uno
Tipo de tanque	Contención total con cubierta suspendida
Máximo BOG sin emisión, sin puesta en frío de tuberías y sin descarga	0.05% de la capacidad del tanque para metano puro al día y en unas condiciones de 37°C +5,5°C por causa de radiación solar
Presión de operación	100 mbar (g)
Máxima presión de operación	250 mbar (g)
Presión de diseño	290 mbar (g)
Presión de vacío de diseño	- 10 mbar (g)
Temperatura de operación	- 164°C/40°C
Densidad de diseño	480 kg/m ³
Materiales	Tanque interior de acero 9% Ni y tanque exterior de hormigón pretensado con revestimiento interior de acero
Códigos de diseño	Para el tanque interior se sigue la API 620 Q y para el exterior UNE-EN- 14620
Radiografiado	s/NFPA 59A
Pruebas hidráulicas	Según normativa API 620 Q con limitaciones EN 1473

Tabla 3.1.1.1. Características de los tanques de almacenamiento GNL [26]

3.1.1.1 – Tanque exterior

Están diseñados de acuerdo con la norma UNE-EN 14620 parte tercera *“Diseño y fabricación de tanques de acero cilíndricos, verticales y de fondo plano, construidos en el lugar de emplazamiento para el almacenamiento de gases licuados refrigerados con*

temperaturas de servicio entre los 0 y -165 °C, Parte 3: Componentes del hormigón”
[27]

Este diseño permite una vida útil de 50 años, con un periodo de 25 años sin necesidad de realizar mantenimientos importantes.

Los muros del tanque están directamente apoyados sobre una losa circular de 79,7 metros de diámetro y 600 mm de espesor, y un anillo perimetral de 1.600 mm de fundición en hormigón armado.

Este tanque exterior está diseñado para soportar las presiones generadas por los vapores y las cargas de la propia estructura, que contempla también tuberías y equipos auxiliares. Además tendrá en la esquina inferior un refuerzo de 5 metros de altura con el objetivo de protegerla de las fatigas térmicas.

La losa de hormigón estará situada sobre una capa de hormigón de limpieza de 10 cm de espesor que servirá para nivelar el suelo y que contará con un armazón metálico de 45 mm.

Esta losa contendrá el sistema de calefacción eléctrico para evitar la congelación del suelo y su escarchado, formado por dos conduits embebidos del tipo Raychem FHP-3 independientes que suministrarán 35 W/m a 0°C en la cara superior de la losa.

En lo referente a los muros, se trata de hormigón reforzado y pretensado. Además del hormigón en el interior de su estructura hay un sistema de cables denominados tensores para mejorar la resistencia estructural.

Estos sistemas son de pretensado vertical (con las cabezas de los cables anclados a la viga anular) y de pretensado horizontal (con las cabezas de los cables anclados a los pilares).

Estos tensores van por dentro de unos tubos cilíndricos que se rellenan de hormigón una vez fueron tensados y fijados.

La envolvente del tanque tiene una viga anular superior de mayor espesor que el resto de la pared, que sostendrá el domo. Se trata de la parte principal de la estructura de los tanques ya que será quien sostenga una buena parte de los esfuerzos estructurales.

En cuanto al domo, se trata de una estructura esférica rígida que combina la chapa inferior del tanque junto con el sistema de refuerzo y el espesor del hormigón. Es por aquí por donde se realizan todas las conexiones con el interior del tanque.

3.1.1.2 – Tanque interior

El diseño de este tanque se basa en las normas EN 1473, NFPA 59^a y API 620 apéndice Q, y su techo metálico tendrá que soportar un techo de hormigón vertido en una única capa.

El tanque incluye tanto su fondo, como envolvente, rigidizadores y cubierta. Las chapas del fondo tiene un espesor de 6 mm y el espesor mínimo de la envolvente sin contar con los refuerzos será de 11,6 mm, llegando a los 29,9mm en función de los elementos estructurales internos.

La cubierta y los rigidizadores de la misma están elaborados en aluminio STM B209-583-0.

En cuanto al fondo de este tanque, contará con una protección extra debido a las tensiones térmicas que se pueden generar en la descarga del GNL al interior del tanque, y que además funciona como barrera hermética al líquido en caso de que existiera una fuga en el espacio anular de la base.

Este refuerzo constará de una chapa de igual material que el tanque (acero 9% Ni) que tiene 5 metros de altura y que está ubicada por encima de la losa del fondo.

En cuanto al revestimiento de este tanque, está formado por revestimiento del fondo con chapas de acero de 5mm solapadas y soldadas, revestimiento de la envolvente con chapas similares y ancladas con pernos de acero al carbono y revestimiento del techo usando acero al carbono de 8 mm de espesor.

3.1.2 – Aislamiento de los tanques de almacenamiento de GNL

Todo el aislamiento y la estructura de los tanques estarán diseñados para garantizar que la cuota de BOG diaria son 0,05% de CH₄-Metano puro. Para ello se han considerado unas temperaturas ambiente de 37°C y un incremento de 5,5°C por la radiación solar.

3.1.2.1 – Aislamiento del fondo

Por debajo del fondo intermedio se encuentran:

- Una capa de hormigón de 100 mm vertida sobre el revestimiento del fondo.
- Dos capas de bloques de vidrio de 130 mm del grado HLB.
- Una capa de 9 mm de fieltro bituminoso
- Una capa de hormigón de 50 mm para nivelar
- Una manta de fibra de vidrio HLB de alta resistencia debajo de la envolvente.

Por encima del fondo intermedio:

- Una capa de hormigón de 100 mm vertida sobre el revestimiento del fondo.
- Dos capas de bloques de vidrio de 130 mm del grado HLB.
- Una capa de 9 mm de fieltro bituminoso
- Una capa de hormigón de 44 mm.
- Una capa de 6 mm de arena para nivelar

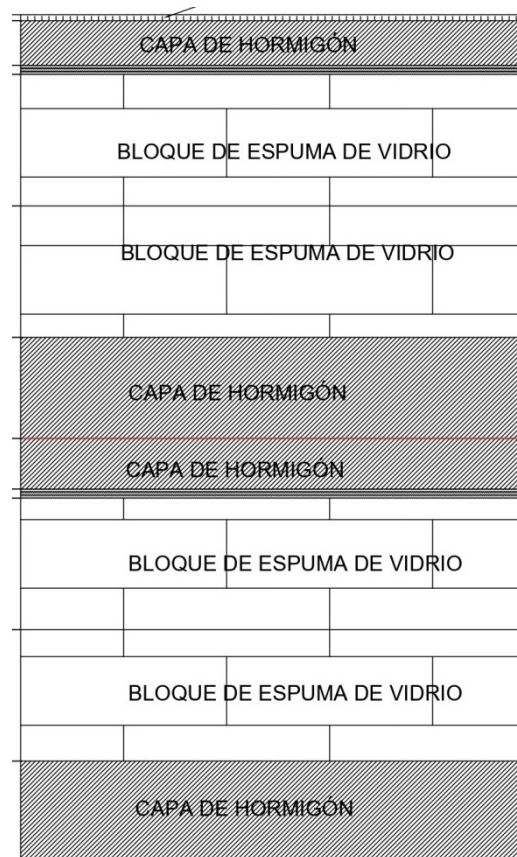


Imagen 3.1.2.1.1 Composición del aislamiento del fondo de los tanques de GNL. Elaboración propia

3.1.2.2 – Aislamiento de la envolvente

En lo referente a la protección de la esquina inferior, el muro exterior de hormigón tiene un espesor de 1,7 metros antes de encontrarse con dos barrera de 75 mm cada una y de 5 metros de altura de poliuretano-poliisocianurato rígido (PUR). Después se encuentran dos metros de hueco relleno de perlita expandida, y separando la perlita del tanque interior, hay dos mantos elásticos de fibra de vidrio y de 125 mm de espesor cada uno.

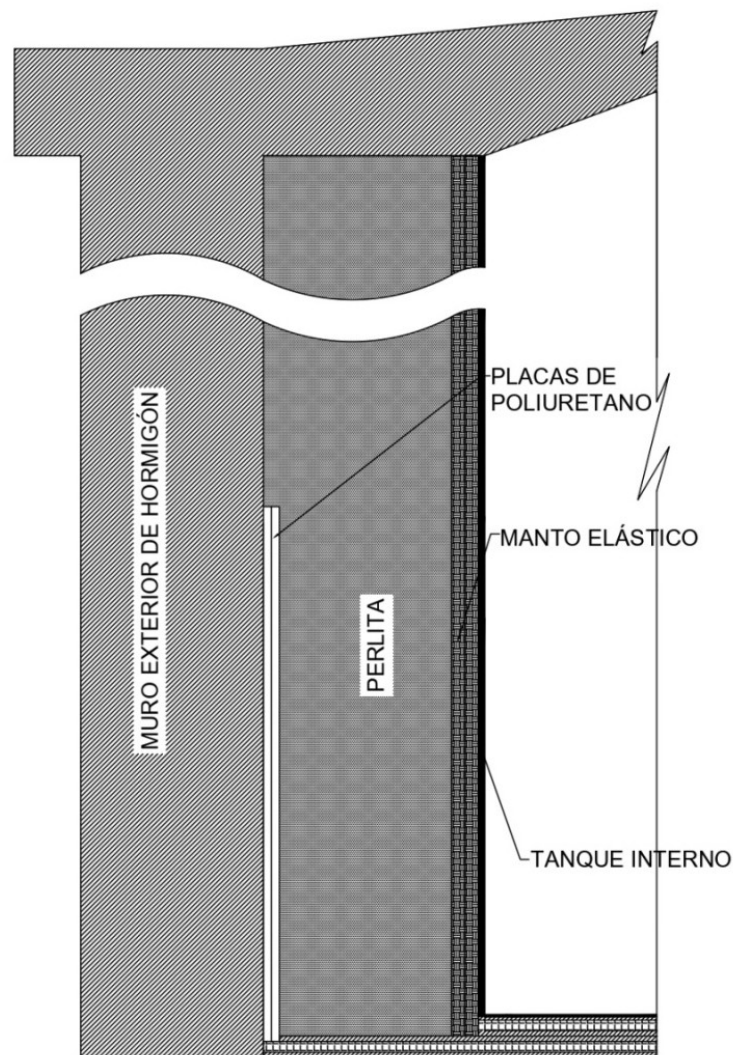


Imagen 3.1.2.2.1 Composición del aislamiento de la envolvente de los tanques de GNL. Elaboración propia

Si se procediera a realizar un despiece de uno de estos tanques, podríamos ver de acuerdo con la imagen 3.1.2.2.2 como la perlita expandida y el manto elástico forman la capa que separa al tanque interior del exterior.

La función de la perlita junto con el manto elástico es, además de crear una barrera de contención y aislamiento térmico, absorber las propias dilataciones térmicas del acero del tanque interior cuando se procede a la descarga del GNL en su interior.

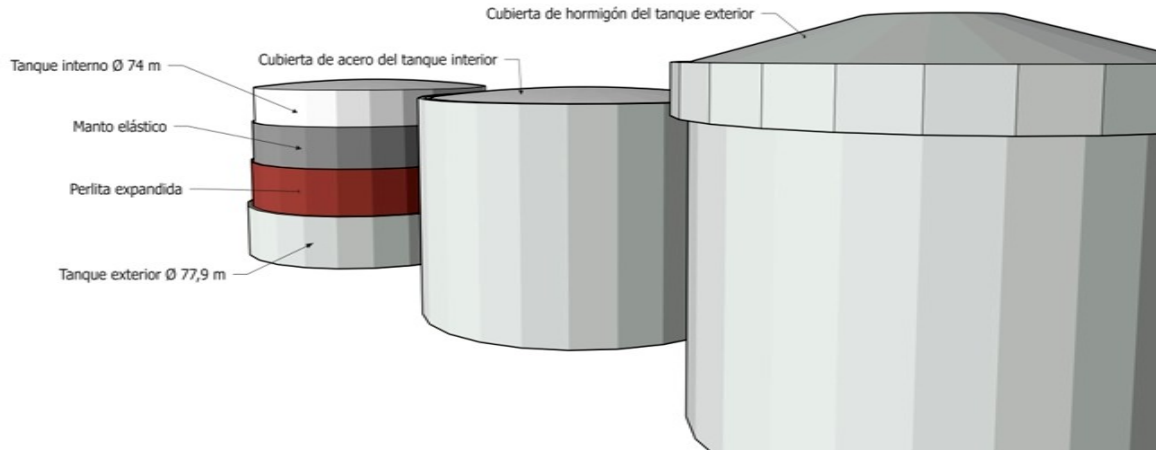


Imagen 3.1.2.2.2 Despiece de un tanque de GNL en SketchUp. Elaboración propia

3.1.2.3 – Aislamiento de la cubierta suspendida

Estará formado por mantos de fibra de vidrio de 600 mm de espesor total dispuestas en 4 mantas de 150mm cada una y una cubierta de hormigón de 400 mm de media.

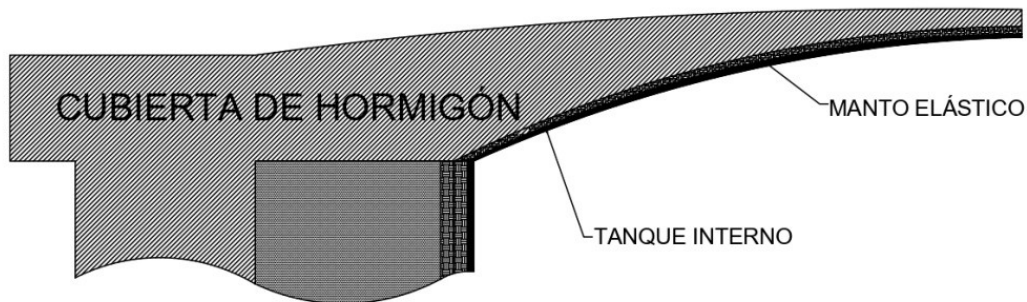


Imagen 3.1.2.3.1. Composición del aislamiento del domo de los tanques de GNL. Elaboración propia

3.2 – Generación de BOG en la planta modelo

La generación de BOG en el interior de los tanques, como se explicó con anterioridad en el apartado 2.3, se obtiene principalmente por transferencias de calor entre focos fríos y calientes, y para analizar estas transferencias de calor es necesario aplicar las Leyes de la Conservación.

De las tres leyes básicas de conservación (masa, movimiento y energía), dado que el elemento a estudio se trata de los tanques de almacenamiento de una terminal de regasificación y de la transferencia de calor que existe entre sus elementos, debemos recurrir a la realización de los balances de masa y energía.

Con ellos se conocerán las transferencias de calor que se realizan entre los propios materiales, y que nos servirán para conocer los valores de una transferencia total entre el exterior y el interior del tanque.

3.2.1 – Balance de masa y energía

Partiendo de que la ecuación de este balance es:

$$\dot{Q}_{VC} = \frac{d_{me}}{dt} + \sum_{salida} \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) - \sum_{entrada} \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) + \dot{W}_{VC} \quad (3.2.1.1)$$

La situación a analizar se trata de un tanque de almacenamiento donde existe un líquido (GNL) y un estado de vapor (BOG), ambos en un estado inicial que, al generarse una transferencia de calor con el entorno (Q) hace que aumente el volumen de vapor en un estado final y no se genera un trabajo (W) ni variación alguna de masa de entrada con respecto al tiempo (d_{me}), siendo la masa de salida en ese balance, la masa generada por la transferencia de calor [29].

Además si establecemos que como se definió con anterioridad nos encontramos en un estado estacionario, con un volumen de control cerrado y sin intercambio de masa, y que en comparación con la variación de la energía interna en sistemas termodinámicos las energías potenciales y cinéticas pueden considerarse despreciables. Se obtiene como balance la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = (M_2 * U_2) - (M_1 * U_1) + (M_s * h_s) \quad (3.2.1.2)$$

El valor de Q será el cálculo que se realizará con el software *Engineering Equation Solve* (EES) mediante la aplicación de los cálculos de la transferencia de calor.

3.2.2 – Cálculo de la transferencia de calor

La transferencia de calor se define como “la energía en tránsito debida a una diferencia de temperatura” [29], y que en este caso, rigen el procedimiento de generación de BOG, ya que nace del desequilibrio que existe entre la baja temperatura a la que se encuentra almacenado el GNL (del entorno de los -164°C) con respecto de la temperatura ambiente, y que buscan el equilibrio del proceso.

Para ello fijaremos las paredes de los tanques de almacenamiento como los elementos de volumen de control. Dentro de este volumen de control se analizarán las tres formas de transferencia de calor que existen:

- Conducción
- Convección
- Radiación

3.2.2.1 – Conducción

Se trata de la transferencia de energía desde cada porción de la materia a la materia adyacente por su contacto directo, sin intercambios, mezcla o flujo con cualquier material, produciéndose en el caso de fluidos si el fluido no se mueve con respecto de su superficie. Para ello se emplea la Ley de Fourier. [29]

Si tomamos como ejemplo un cristal que tiene un espesor de 20 mm que separa dos estancias, una de ellas a 40°C y otra a 20°C , de acuerdo a la siguiente imagen:

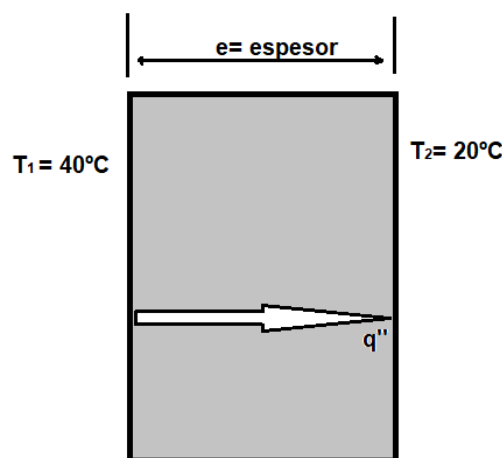


Figura 3.2.2.1. Planteamiento de la Ley de Fourier. Original del autor

Se define la Ley de Fourier como que la densidad del flujo de calor (q'') es igual al producto de la conductividad térmica negativa que tenga el material a estudio, y entre la variación de temperatura de los dos espacios y el flujo de energía de los mismos. Si la aplicamos a un área determinada, se obtiene que:

$$q'' = -k \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

(3.2.2.1.1)

3.2.2.2 – Convección

Cuando un fluido caliente se mueve en contacto con una superficie fría, el calor se transfiere a un ritmo que depende de las propiedades del fluido. Se trata de un fenómeno de transporte que tiene su origen en diferencias de densidad y para el que hay que tener en cuenta la variación de la densidad del fluido en función de su temperatura, pues esta varía. [29]

Para el estudio de la convección se emplea la Ley de enfriamiento de Newton, que establece que la densidad de flujo del calor se obtiene en función del producto del coeficiente de transferencia de calor y la diferencia de temperatura entre la superficie y la temperatura del fluido, también conocida como T_∞ .

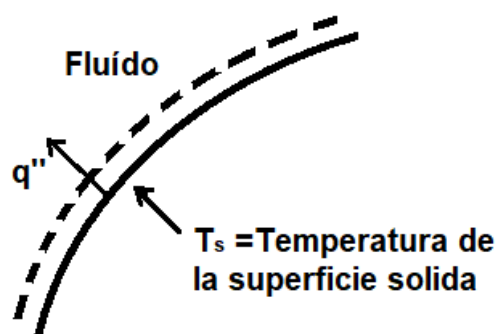


Figura 3.2.2.2.1 Planteamiento de la Ley de enfriamiento de Newton. Original del autor

En base a figura 3.2.2.2.1 se extrae como ecuación de Ley de enfriamiento la siguiente:

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

(3.2.2.2.1)

3.2.2.3 – Radiación

Se denomina radiación a la transferencia de calor que no ha podido tener lugar por convección o conducción, ya que estos no pueden desarrollarse en vacío, si no que ha ocurrido en base a la emisión de la energía interna del cuerpo.

Si se considerara un cuerpo suspendido en vacío dentro de un volumen de control cerrado como una caja, y cuyas paredes se encuentran a temperatura ambiente, al buscar el equilibrio el cuerpo suspendido se enfriará alcanzando el equilibrio térmico con su entorno. [30]

Una de las cualidades que presenta este tipo de transferencia de calor es que puede circular de un foco a otro por un medio más frío que ambos, por ejemplo si una persona (a unos 36°C) está en el exterior (a 10°C) y se calienta junto al fuego (a 500°C). La radiación que emite el fuego circula por el exterior hasta llegar a la persona, estando el exterior a una temperatura inferior a la del cuerpo de la persona y a la propia hoguera. [30]

$$h_{rad} = \frac{\dot{Q}_{rad}}{A * (T_s - T_{\infty})}$$

(3.2.2.3.1)

En el caso de este trabajo, la radiación a tener en cuenta será la radiación solar así como su incidencia en los tanques de almacenamiento de GNL.

3.2.2.4 – Analogía eléctrica

Las leyes de Kirchhoff para circuitos eléctricos son extrapolables a los cálculos de transferencias de calor debido a las similitudes que existen entre las magnitudes que representan las resistencias eléctricas y los elementos afectados por la transferencia de calor. [30]

En base a esto, se establece que cuando el calor atraviesa una pared con una determinada área (A) se genera una resistencia a la conducción de acuerdo con la ecuación 3.2.2.1.1.

$$\frac{q}{A} = -k \frac{T_2 - T_1}{x} = -\frac{T_2 - T_1}{x/k} = -\frac{T_2 - T_1}{R} = \frac{\Delta T}{R} \quad (W/m^2)$$

(3.2.2.4.1)

Esa R que se obtiene, se trata de una resistencia eléctrica.

En base a esto y a las definiciones que se dieron en los apartados 3.2.2.1, 3.2.2.2 y 3.2.2.3, podemos establecer las siguientes resistencias:

$$R_{\text{Convección}} = h * A \quad (3.2.2.4.2)$$

$$R_{\text{Conducción}} = \frac{e}{k * A} \quad (3.2.2.4.3)$$

$$R_{\text{Radiación}} = \varepsilon * \sigma * (T_s^2 + T_\infty^2) * (T_s + T_\infty) \quad (3.2.2.4.4)$$

Siendo h el coeficiente de convección, k el coeficiente de conducción, A el área de la superficie, e su espesor, ε la emisividad y σ el coeficiente de Stefan-Boltzmann.

3.2.3 – Transferencia de calor a través del tanque

Si partimos de un tanque lleno a su máximo de capacidad de GNL tal y como se muestra en la figura 3.2.3.1, donde en rojo tendríamos la superficie en contacto con BOG, en verde las paredes del tanque, en amarillo la zona de poliuretano y en azul el fondo, tendremos en total 5 zonas de estudio: zona de la base del tanque, zona de la base del tanque con paredes de poliuretano, pared del tanque, pared superior del tanque con BOG y el techo del tanque.

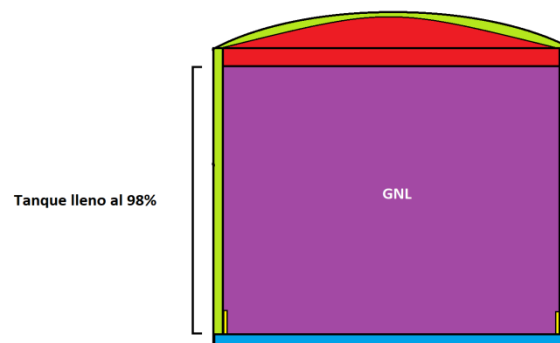


Figura 3.2.3.1 Representación de un tanque de almacenamiento lleno hasta el máximo de GNL.

Original del autor

De acuerdo con la analogía eléctrica que se puede realizar de acuerdo con el apartado 3.2.2.4, se pueden definir las estructuras de los tanques descritas en el apartado 3.1 – *Características de la planta modelo objeto del estudio*, obtenemos el siguiente esquema para cada una de las partes nombradas con anterioridad:

Base del tanque:

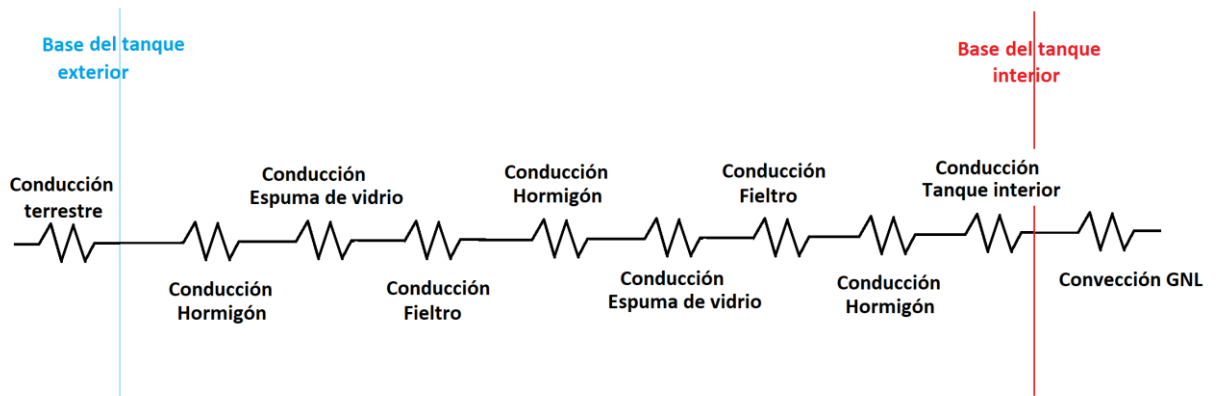


Figura 3.2.3.2 Esquema eléctrico de la base del tanque. Original del autor

Base de pared:

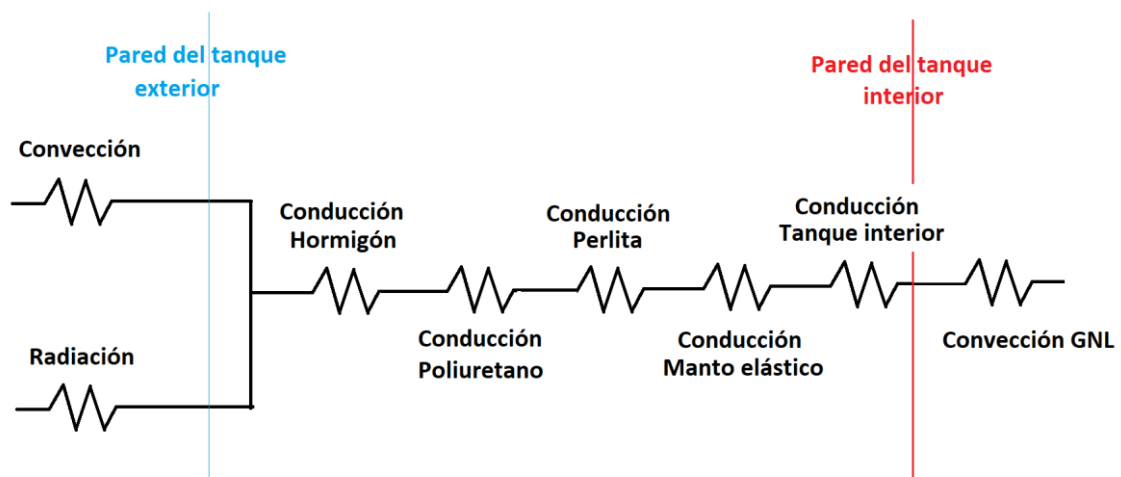


Figura 3.2.3.3 Esquema eléctrico de la base de la pared del tanque. Original del autor

Pared:

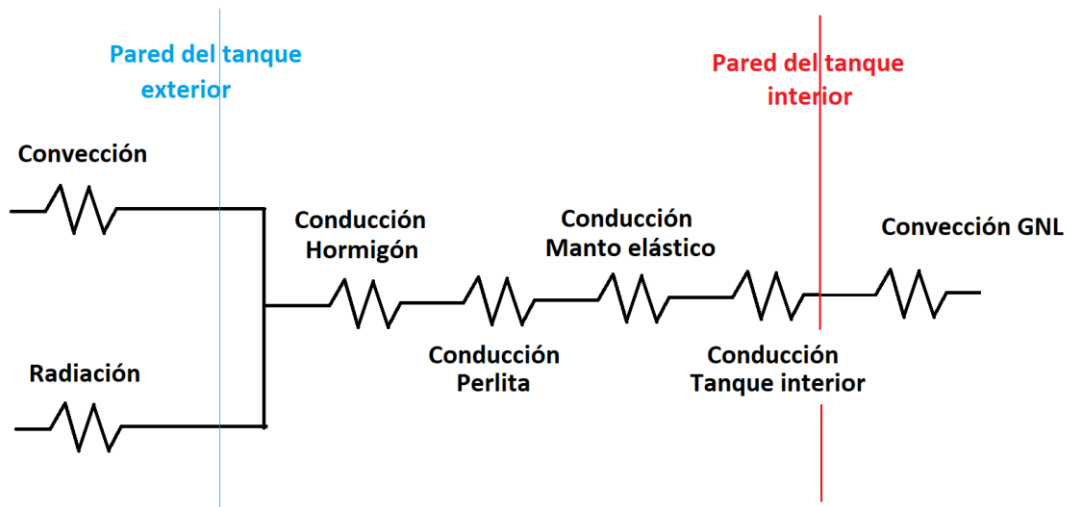


Figura 3.2.3.4 Esquema eléctrico de la pared del tanque. Original del autor

Alto de pared:

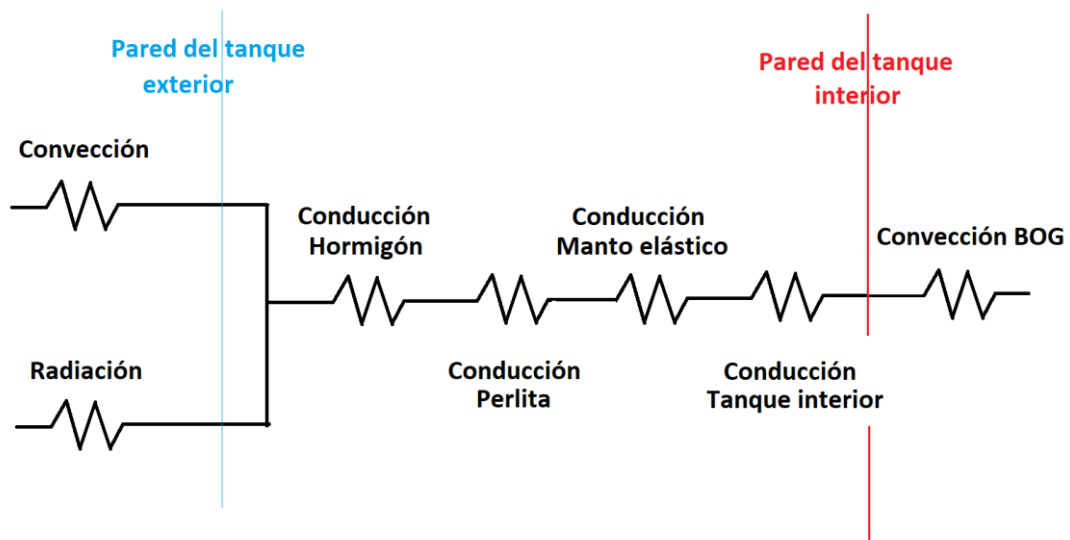


Figura 3.2.3.5 Esquema eléctrico del alto de la pared del tanque. Original del autor

Cúpula:

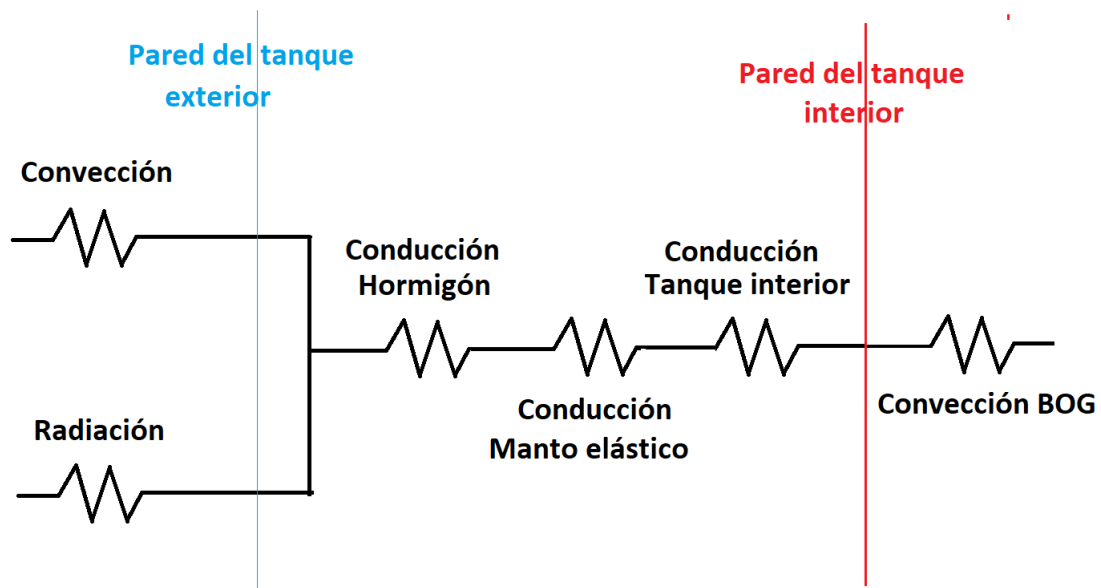


Figura 3.2.3.6 Esquema eléctrico de la cúpula del tanque. Original del autor

Existe un sistema calefactado en la cara superior de la losa base, donde se encuentran instaladas unas resistencias eléctricas que permiten mantener la cara superior de la misma en torno a los 5°C.

Según los datos obrantes en el proyecto esas resistencias suministran 35 W/m.

El calor suministrado por estas resistencias permite evitar la rotura del hormigón de la base del tanque por temperaturas bajo cero y además evita la estratificación del GNL en el fondo del tanque por la variación de densidad a causa de la temperatura.

3.2.4 – Cálculo de la transferencia de calor

Para realizar los cálculos se han empleado las ecuaciones 3.2.2.4.2, 3.2.2.4.3 y 3.2.2.4.4, y se han seguido los esquemas de las figuras 3.2.3.2, 3.2.3.3, 3.2.3.4, 3.2.3.5 y 3.2.3.6.

Además se ha seguido el razonamiento empleado en el punto 3.2.1 – *Balance de masa y energía* con la obtención de la ecuación 3.2.1.2.

También se ha tomado la mezcla de gases que configuran el GNL como metano puro para facilitar la obtención de los coeficientes y datos de cálculo tal y como se realizan en diversos estudios consultados [24, 26, 31-33].

Los datos empleados en estos cálculos son los siguientes:

- Temperatura del suelo: 5 °C [27]
- Temperatura de radiación solar: 42,5 °C*
- Temperatura en la base del tanque de GNL: -161 °C*
- Temperatura a un tercio del tanque de GNL: -157 °C*
- Temperatura a mitad del tanque de GNL: -153°C*
- Temperatura a dos tercios del tanque de GNL: -147 °C*
- Temperatura en la cúpula del tanque de GNL: -140°C*

* Estas temperaturas se han obtenido mediante gradiente en base a las temperaturas de funcionamiento establecidas en la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) incluida en el expediente del proyecto de la regasificadora [26]

- Espesor del hormigón capa 1: 0,1 metros [26]
- Espesor del hormigón capa 2: 0,15 metros [26]
- Espesor del hormigón capa 3: 0,05 metros [26]
- Espesor del hormigón capa 4: 1,7 metros [26]
- Espesor del hormigón capa 5: 0,4 metros [26]
- Espesor del hormigón capa 6: 0,6 metros [26]
- Espesor de la espuma de vidrio: 0,26 metros [26]
- Espesor de capas de fieltro: 0,09 metros [26]
- Espesor del tanque interior: 0,006 metros [26]
- Espesor de la perlita: 2,00 metros [26]
- Espesor de la lana de la pared: 0,25 metros [26]
- Espesor de poliuretano: 0,15 metros [26]
- Espesor de la lana de la cúpula: 0,6 metros [26]

- Coeficiente de conducción del hormigón (k): 2,285 W/mK [26]

- Coeficiente de conducción de la espuma de vidrio (k): 0,03 W/mK [28]
- Coeficiente de conducción del fieltro bituminoso (k): 0,023 W/mK [28]
- Coeficiente de conducción del aluminio (k): 205 W/mK [28]
- Coeficiente de conducción de la perlita (k): 0,04 W/mK [26]
- Coeficiente de conducción de la lana de roca (k): 0,037 W/mK [26]
- Coeficiente de conducción del poliuretano (k): 0,0253 W/mK [26]
- Emisividad del hormigón: 0,93 [28]

Para el cálculo del coeficiente de convección (h) se emplea la ecuación de Newton [30] mediante la cual se define que:

$$h = \lambda^{0,6} + \left(\frac{C_p}{\mu}\right)^{0,4} \quad (3.2.3.1)$$

Donde λ es la conductividad térmica, C_p tiene el valor de 2,237 kJ/kgK y μ la viscosidad dinámica. Con ello se obtiene que la conductividad del aire, del GNL y del BOG sea la siguiente:

- $h_{\text{aire}} = 16 \text{ W/mK}$
- $h_{\text{GNL}} = 199 \text{ W/mK}$
- $h_{\text{BOG}} = 37,56 \text{ W/mK}$

3. 3 – Modelo termodinámico y análisis

El q''_{Total} es la transferencia de calor que existe en el tanque por cada metro cuadrado, y que se obtiene como la suma de los q'' anteriores.

Se emplearán los softwares EES y *SolidWorks* para la resolución y comparativa de los datos. Una vez obtenidos estos valores, se procede a obtener la temperatura en la superficie de cada elemento aislante de acuerdo al cálculo de la T_{∞} y a la elaboración de las gráficas temperatura-espesor mediante el software EES, cuyos datos y cálculos se encuentran recogidos en el ANEXO I, y se realizará la comparativa con los datos extraídos de la simulación en *SolidWorks* de acuerdo con el ANEXO II.

3.3.1 – Modelado con EES

Una vez cargados los datos y las ecuaciones 3.2.4 – *Cálculo de la transferencia de calor* en el software EES se ha ejecutado su resolución, que está recogida en el ANEXO I, obteniendo los siguientes resultados:

$$q''_{Base\ del\ tanque} = 9,26\ W/m^2$$

$$q''_{Pared} = 12,01\ W/m^2$$

$$q''_{Cúpula} = 10,63\ W/m^2$$

$$q''_{Total} = 31,90\ W/m^2$$

Es importante matizar que de acuerdo con Huerta F. y Velisa V. [34], los valores que existen para este tipo de tanques son entre 1 y 10 W/m² para las paredes de los tanques y por debajo de 20 W/m² para la base del tanque.

En el presente caso el valor de las paredes se encuentra ligeramente superior al indicado, ya que se obtiene 12,01 W/m² en lugar de un valor fijado entre 1 y 10 W/m², y en la base del tanque se obtiene un valor de 9,26 W/m², algo que sí está dentro del valor marcado de que lo óptimo es que se encuentre por debajo de los 20 W/m².

Es importante resaltar que la mayor transferencia de calor que se realiza en un tanque de estas características es a través de la base del tanque y de la cúpula del mismo, a pesar de que exista una mayor área en las paredes. Esto principalmente se debe al tipo de aislamiento empleado en la cúpula, así como los sistemas de calefacción, temperatura del suelo y aislamientos térmicos empleados en esta zona del tanque, que es donde se concentrará la temperatura más baja del GNL almacenado.

Una vez ejecutados los datos cargados en el programa y empleadas las ecuaciones de las cuales se partió con anterioridad y obtenido los valores de q'' , se sustituye esta incógnita en las ecuaciones pasando a ser la nueva incógnita T_{∞} en cada elemento aislante, con el fin de obtener la temperatura en ese punto y las figuras 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 y 3.3.4.

En el primer caso, la figura 3.3.1.1 se corresponde con la base del tanque, donde se puede observar como los descensos de temperatura más pronunciados tienen lugar en los bloques de espuma de vidrio seguidos de las fundiciones del hormigón.

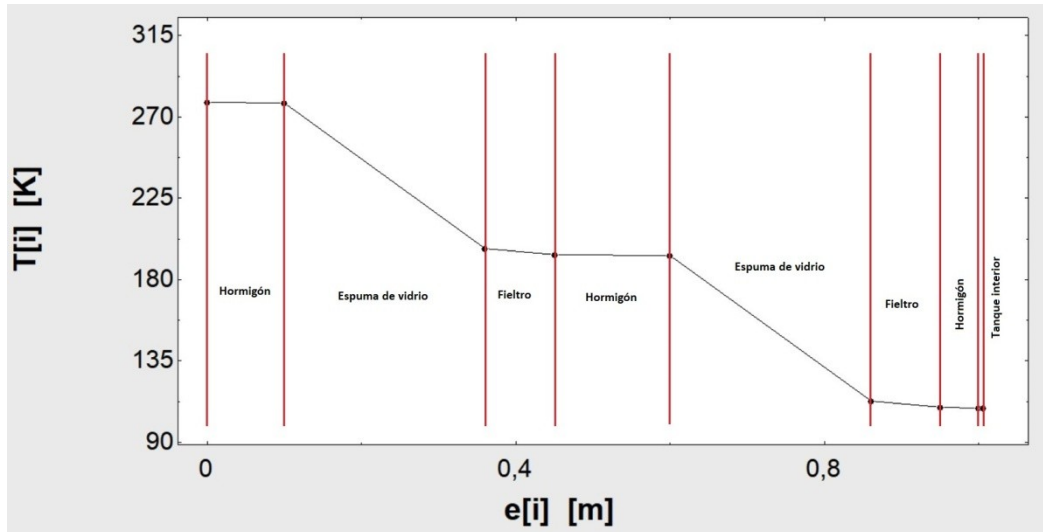


Figura 3.3.1.1 – Gráfica Temperatura-espesor de la base del tanque. Original del autor.

La figura 3.3.1.2 se corresponde con lo que se denomina como “Baja pared”, que son cinco metros de altura desde la losa de fundición del tanque y que permite un análisis de la esquina del tanque donde tienen lugar las mayores tensiones térmicas; primero por tratarse de un vértice entre la base y el primer tramo de la pared y segundo porque será donde se centre la temperatura más baja del tanque.

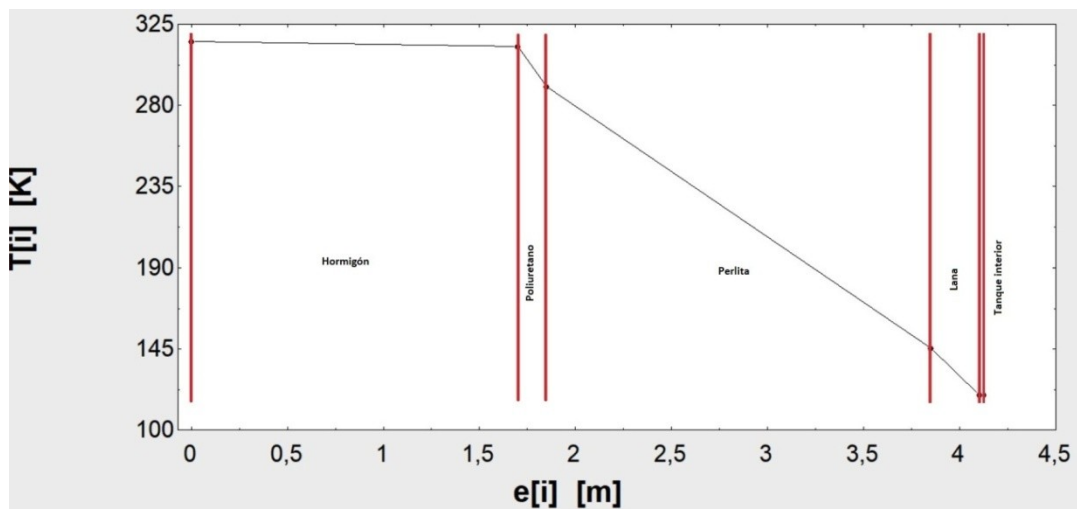


Figura 3.3.1.2 – Gráfica Temperatura-espesor de la base de la pared del tanque. Original del autor.

En el caso de la figura 3.3.1.3 se observa que es similar a la gráfica anterior pero con la ausencia del poliuretano, y representa el cuerpo de la pared que hay desde los cinco metros de la base hasta el anillo de hormigón donde comienza la cúpula, incluyendo la pared y la zona de alta pared.

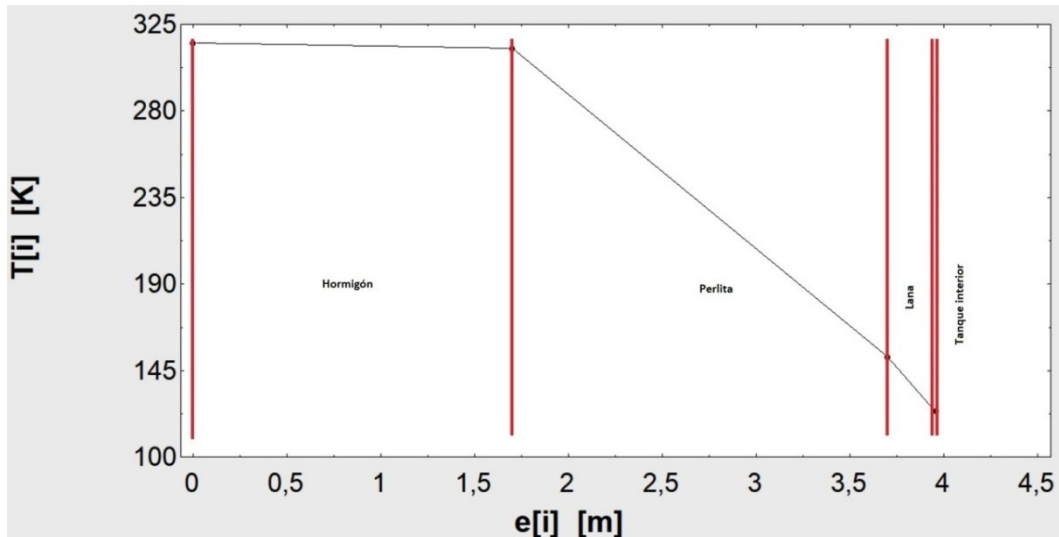


Figura 3.3.1.3 – Gráfica Temperatura-espesor de la pared y zona alta del tanque. Original del autor.

Por último, la figura 3.3.1.4 representa la cúpula del tanque, lugar por el que existe una mayor transferencia de calor de acuerdo con los cálculos realizados en el ANEXO I. Esta zona solo tiene un aislante, la lana, dejando al margen la cubierta de hormigón.

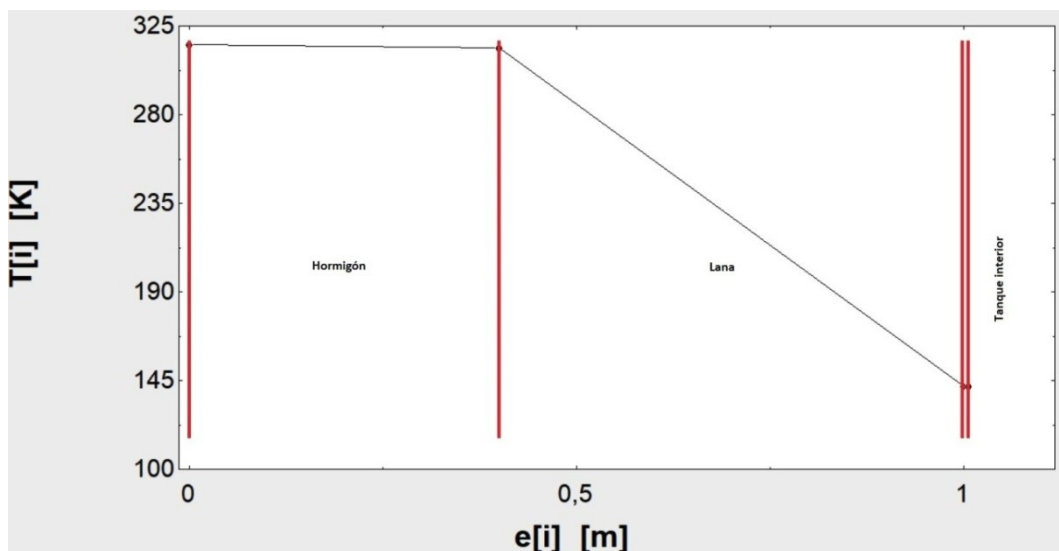


Figura 3.3.1.4 – Gráfica Temperatura-espesor de la cúpula del tanque. Original del autor.

También es importante señalar que en estos casos, la presencia del aluminio del tanque interior junto con su escaso espesor y su alto coeficiente de conducción podría

ser un elemento despreciable, aunque para la representación gráfica se ha tenido en cuenta.

3.3.2 – Modelado en SolidWorks

Si se realiza una comparativa con el software *SolidWorks* mediante una simulación de fluidos para comprobar la veracidad de estos datos, así como los diferentes efectos sobre la transferencia de calor a través de las paredes, tal y como se recoge en el estudio del ANEXO II.

En primer lugar es necesario levantar en 3D la superficie a simular, y para ello se hacen tres ensamblajes: base, paredes y cúpula.

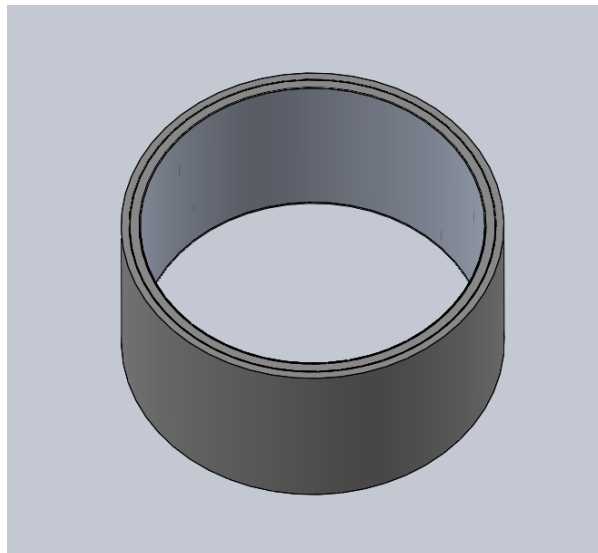


Figura 3.3.2.1 – Paredes del tanque de almacenamiento. Original del autor



Figura 3.3.2.2 – Sección de las paredes del tanque de almacenamiento. Original del autor

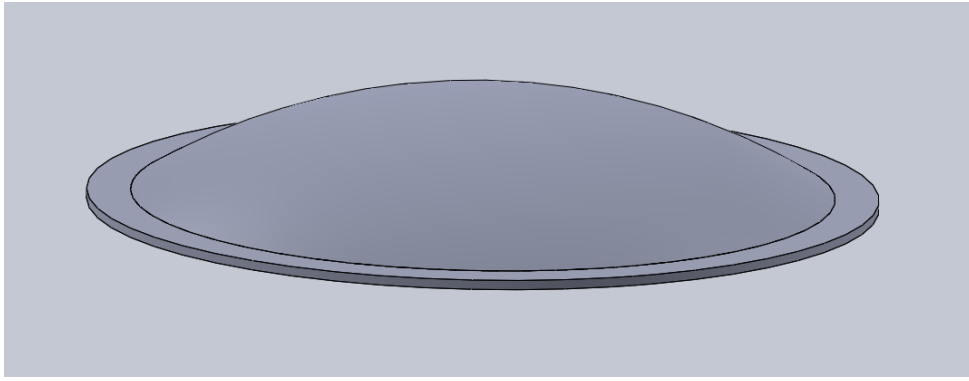


Figura 3.3.2.3 – Cúpula del tanque de almacenamiento. Original del autor

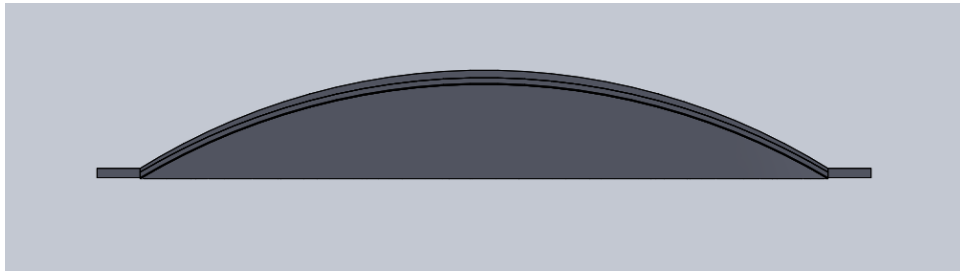


Figura 3.3.2.4 – Sección de la cúpula del tanque de almacenamiento. Original del autor

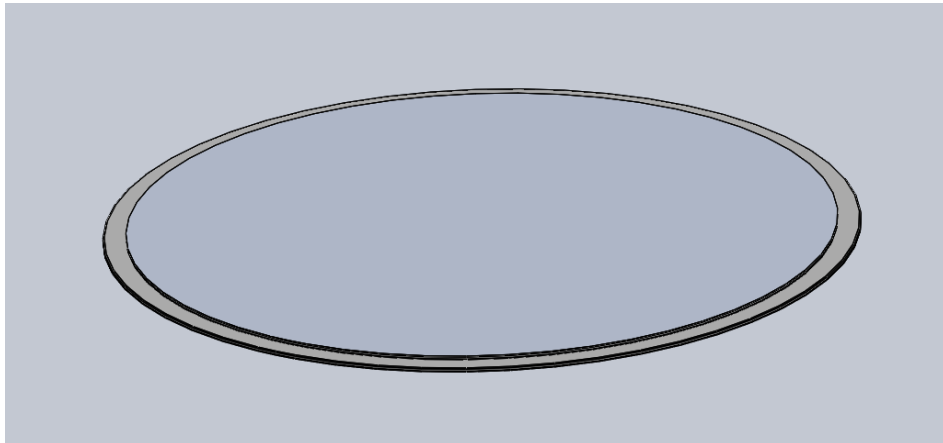


Figura 3.3.2.5 – Fondo del tanque de almacenamiento. Original del autor

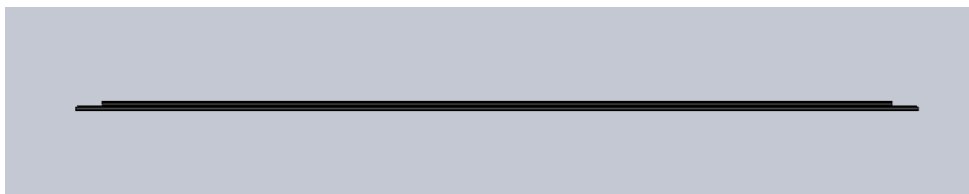


Figura 3.3.2.6 – Sección del fondo del tanque de almacenamiento. Original del autor

Una vez montados los tres ensamblajes, cada uno con sus respectivas piezas que constituyen las capas de cada material, se ensamblan los tres ensamblajes formando el tanque sobre el que se simulará.

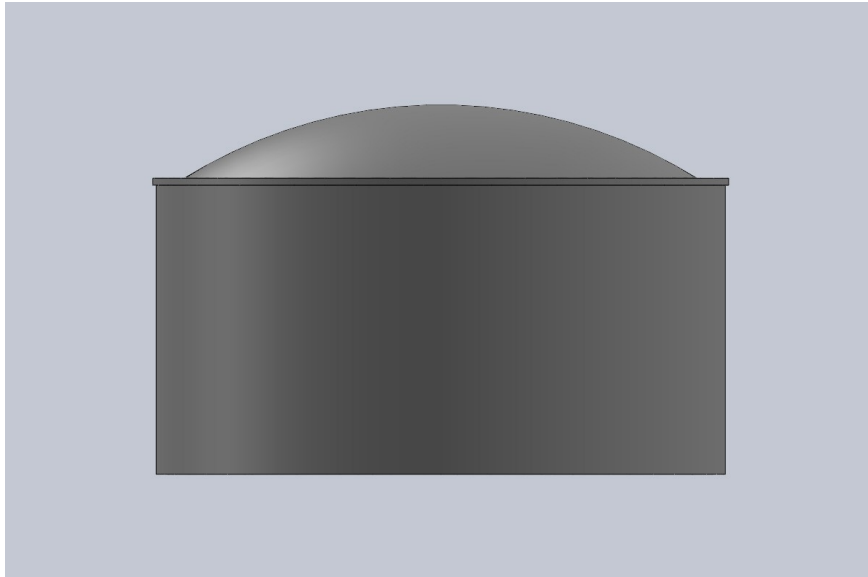


Figura 3.3.2.7 –Tanque de almacenamiento. Original del autor

Una vez levantada la réplica en 3D del tanque de almacenamiento se añaden las características a cada material y se procede a ejecutar la simulación, bajo unas condiciones de cargas térmicas de temperatura interna homogénea de -164 grados centígrados y una convección exterior de 310,5 K y un coeficiente de 25 W/m²K , y una radiación de 5º, obteniendo el siguiente mapa de temperaturas:

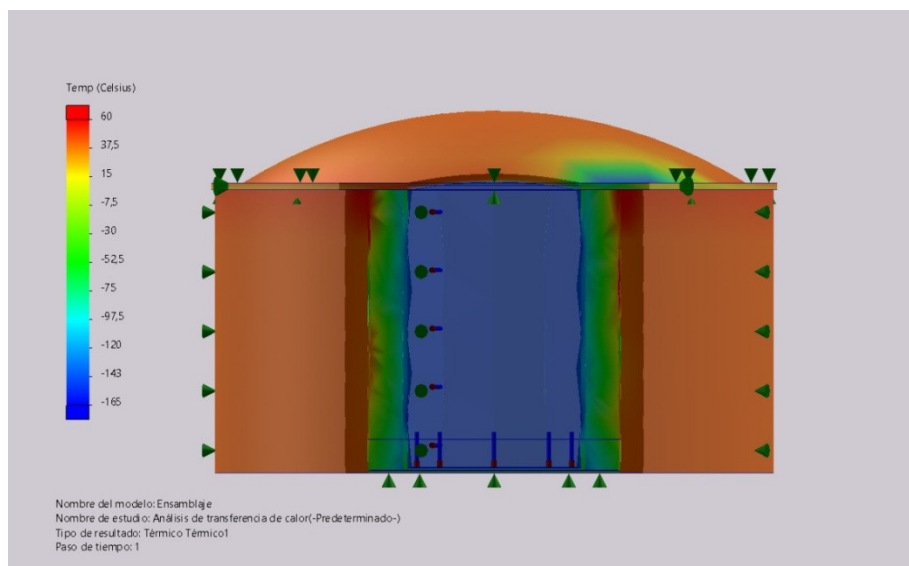


Figura 3.3.2.8 – Sección del tanque del estudio térmico (I). Original del autor

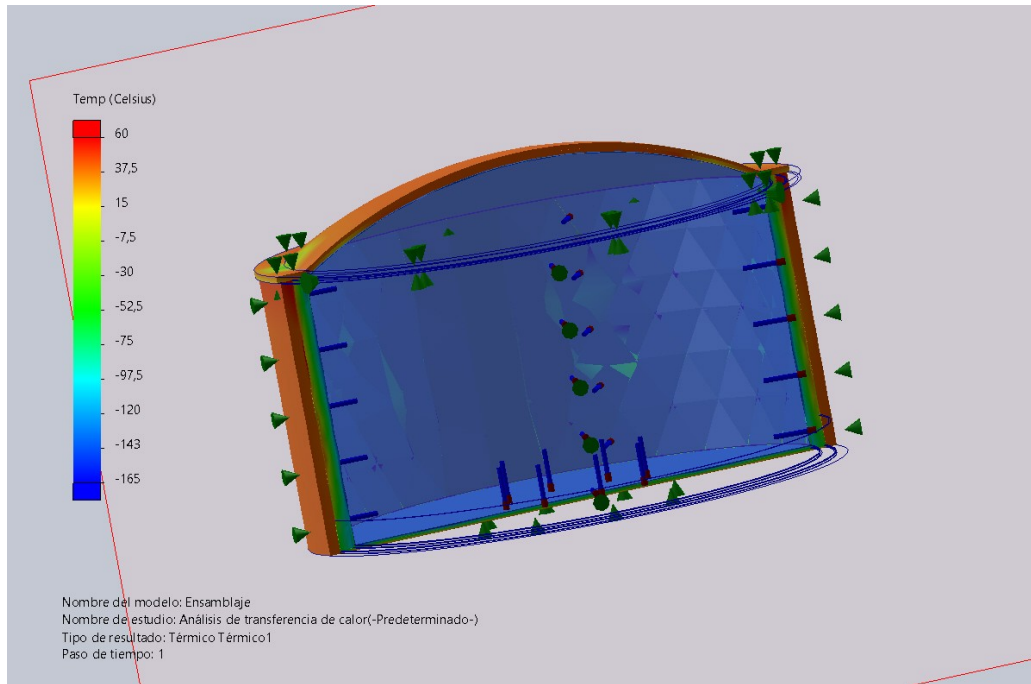


Figura 3.3.2.9 – Sección del tanque del estudio térmico (II). Original del autor

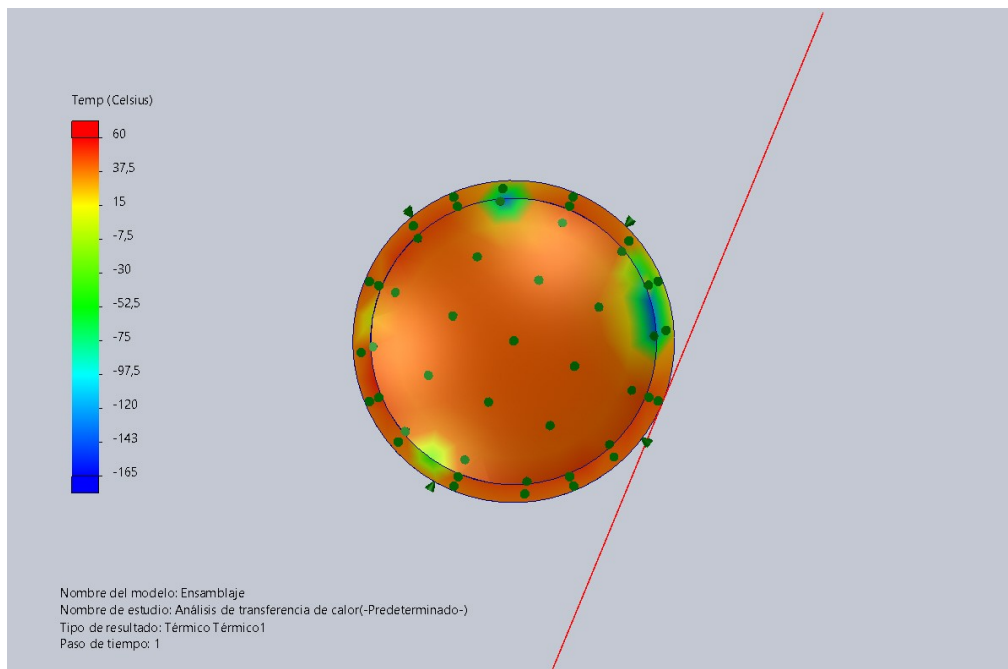


Figura 3.3.2.10 – Vista superior del tanque del estudio térmico. Original del autor

Como se puede comprobar en la figura 3.3.2.8 y con mayor profundidad en la figura 3.3.2.9, el muro de perlita es donde mayor cambio de temperatura existe tal y como se puede comprobar con las figuras 3.3.1.2 y 3.3.1.3 debido a su bajo coeficiente de conducción térmica siendo, junto con el poliuretano que hay situado en la esquina

inferior de los tanques, que cumple la función de disminuir la transmisión térmica en la esquina y con ello evitar mayor fragilidad en el tanque.

También es interesante resaltar, de acuerdo con la figura 3.3.2.10, que existen tensiones térmicas muy profundas en el anillo y en la cúpula del tanque, principalmente por lo delgada que es la capa que la cubre y que confirma lo ya adelantado en el punto 3.2.4 – *Cálculo de la transferencia de calor* del presente trabajo, y es que existe mayor transferencia de calor por la cúpula del tanque que por las paredes en proporción a su área, así como estudios que confirman que las corrientes de convección son las causantes de esta situación [34].

3. 4 – Comparativa de cálculos

Se han tomado valores entre las diferentes capas de las paredes, cúpula y fondo en *SolidWorks* del tanque obteniendo las siguientes tablas comparativas:

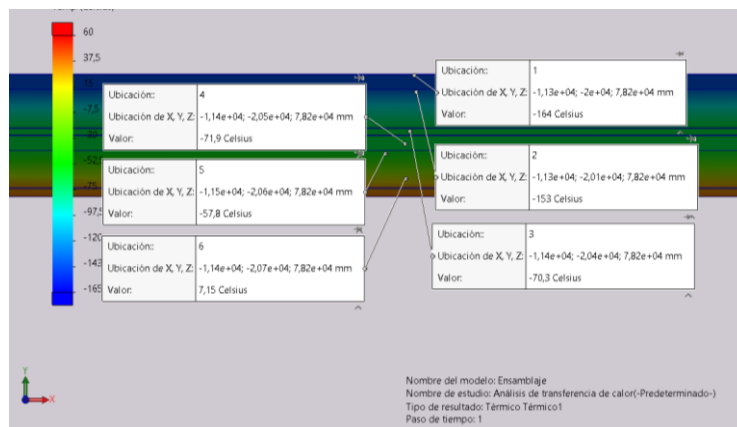


Figura 3.4.1 – Toma de datos de la base del tanque. Original del autor

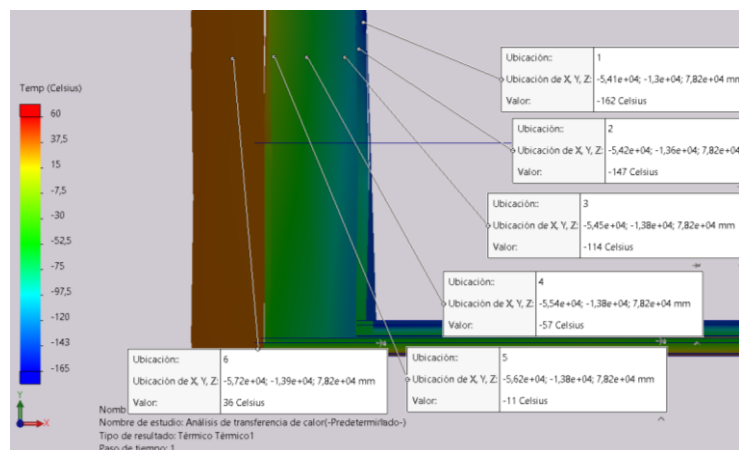


Figura 3.4.2 – Toma de datos de la pared del tanque. Original del autor

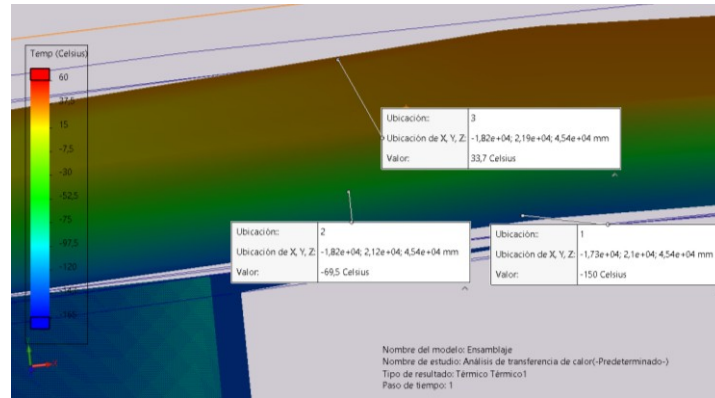


Figura 3.4.3 – Toma de datos de la cúpula del tanque. Original del autor

Tabulando los datos extraídos tanto de *SolidWorks* como del EES se extraen las siguientes tablas:

BASE TANQUE		
PUNTOS	SOLID (°C)	EES (°C)
1	-164	-164
2	-153	-154
3	-71,9	-73
4	-70,3	-70
5	-57,8	-55
6	7,15	10

Tabla 3.4.1 – Comparativa de datos de la base del tanque. Original del autor

PAREDES TANQUE		
PUNTO	SOLID (°C)	EES (°C)
1	-162	-164
2	-147	-154
3	-114	-128
4	-57	-57
5	-11	-17,3
6	36	39,7

Tabla 3.4.2 – Comparativa de datos de las paredes del tanque. Original del autor

CUPULA TANQUE		
PUNTO	SOLID (°C)	EES (°C)
1	-150	-149,5
2	-69,5	-70,1
3	33,7	40,6

Tabla 3.4.2 – Comparativa de datos de la cúpula del tanque. Original del autor

Tal y como se puede comprobar analizando las temperaturas extraídas tanto por los cálculos del EES como por la simulación del *SolidWorks* en condiciones de proyecto, existen variaciones entre las temperaturas obtenidas y las simuladas, que principalmente se pueden deber tanto a las corrientes de convección internas de los tanques y que afectan a la transferencia de calor durante la simulación, como de la situación de los puntos de medición.

3. 5 – Cálculo de la generación de Boil-Off Gas

De acuerdo con el ANEXO I, se ha procedido al cálculo de generación de BOG con el software EES en condiciones de la tasa diaria que figura en proyecto, siendo el máximo de BOG fijado para esta instalación sin emisión, sin puesta en frío de tuberías y sin descarga del 0,05% de la capacidad del tanque para metano puro al día y en unas condiciones de $37^{\circ}\text{C} + 5,5^{\circ}\text{C}$ por radiación solar.

Para una generación diaria de BOG del 0,05% del volumen del tanque, la transferencia diaria de calor debería de ser de 187,5 kJ/día, obteniendo una transferencia diaria de 123,6 kJ/día y con ello una generación diaria del 0,03346%, lo que supone que todavía tiene un margen de generación en los tanques del 34 % para llegar a lo máximo que hay fijado en proyecto. Estos datos han sido ratificados mediante simulación a través del software *SolidWorks* al comprobar que las temperaturas obtenidas en el EES si bien no son iguales, son similares y dentro de su rango.

El relicuador de la planta está diseñado para gestionar una generación diaria de BOG de 75 m^3 , y se generan según los cálculos del entorno a 50 m^3 , con lo cual no debería de tener problema para la gestión del BOG originado en los tanques de almacenamiento.

Cabe destacar que como se ha mantenido a lo largo del presente análisis, el cálculo de BOG generado se realiza sólo en los tanques, sin tener en cuenta la transferencia de calor de las tuberías, operaciones de planta etc., algo que sería interesante realizar en estudios posteriores.

4 – CONCLUSIÓN

España supone el 33% del total de regasificación de la Unión Europea, y el último ejercicio se cerró con un nivel de importaciones de GNL vía marítima del 68,7%. Además la reciente tensión entre Rusia, uno de los principales países proveedores de gas de la Unión Europea, y los países que conforman la OTAN, entre ellos principalmente Estados Unidos por la situación de Ucrania, ha desembocado en que España se convierta en un puerto de importaciones de gas estadounidense para suministro europeo.

La planta que se optó por analizar fue la terminal de Mugaros, por ser una planta que carecía de grandes consumos, una menor capacidad de emisión y almacenamiento y al mismo tiempo ser la única en el ámbito gallego.

La actual situación del mercado del gas permite que la planta funcione sin tener en cuenta que energéticamente no es todo lo eficiente que debiera ser, teniendo que abordar en un futuro, en función del rumbo que marque el mercado del gas y las decisiones que tome el consejo de administración de la empresa, si se decide realizar actuaciones que corrijan esta situación y que dan lugar a que la planta pasara demasiados días por debajo del MT fijado en años anteriores.

A la vista de los datos analizados, se desprende que el aislamiento de los tanques es correcto y proporcionado, ya que no se genera más del 0,05% diario del volumen del tanque, aunque pudiera ser mejorable en los muros y en la cúpula.

El valor de la transferencia de calor en las paredes del tanque está casi un 20% por encima del valor máximo deseado, y aunque el valor obtenido en la base del tanque se encuentra dentro de la horquilla, la transferencia de calor a través de la cúpula, así como el análisis de su estructura, invita a concluir de que se trata de un elemento del tanque en el que se podría mejorar el aislamiento, tanto durante la construcción del mismo como en una fase posterior.

Dado que los tanques se encuentran bien aislados, se puede concluir que la problemática existente referente a su MT se debe a un problema de operación de la planta, y que es necesaria la adopción de medidas correctoras en la gestión del procedimiento.

En definitiva, y tras comprobar tanto los cálculos en EES como en *SolidWorks*, se puede concluir que los tanques de la terminal están bien aislados y que la planta no tiene los medios adecuados para una correcta gestión del BOG generado, lo que hace que opere por debajo del MT en situaciones de baja demanda.

Los cálculos se han realizado sin tener en cuenta la necesidad de mantener frías las líneas y los equipos, lo que también daría lugar a un aumento del BOG generado por la transferencia de calor que existe en las líneas de la planta y que se debería cuantificar, y que no es objeto del presente estudio, al igual que el análisis de alternativas que permitan actuar en un mejor aislamiento *a posteriori* de la puesta en marcha de la terminal.

5 – BIBLIOGRAFÍA, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Se ha empleado para la numeración bibliográfica el estilo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) al ser el empleado mayoritariamente para el ámbito científico y académico del campo de la ingeniería.

[1] (14 nov. 2018), *¿Qué es el gas natural?* NativeSac.

<http://nativesac.com/2018/11/14/que-es-el-gas-natural/> (último acceso 20 jun. 2022)

[2] Querol E, Gonzalez-Regueral B, García-Torrent J, García-Martínez MJ. *Boil off gas (BOG) management in spanish liquid natural gas (LNG) terminals*. Appl Energy 2010; 87(11):3384–92.

[3] *Calidad del gas*. ENAGAS

https://www.enagas.es/enagas/es/Gestion_Tecnica_Sistema/CalidadGas (último acceso 20 jun. 2022)

[4] *“Informe de funcionamiento del mercado del gas natural”* (2019). Comisión Nacional de Mercados y Competencia. Ministerio de Hacienda. Gobierno de España <https://www.cnmc.es/sites/default/files/3085923.pdf>

[5] (11 mar. 2022), *“EE.UU. se consolida como principal exportador de gas natural a España y bajan un 17,7% las compras a Rusia”*. Europa Press. <https://www.europapress.es/economia/energia-00341/noticia-eeuu-consolida-principal-exportador-gas-natural-espana-bajan-177-compras-rusia-20220311144051.html> (último acceso 20 jun. 2022)

[6] Carrasco González, A. *“La entrada de gas en barco sube en España hasta un 69% este enero respecto a 2021”* (12 feb. 2022). Economía Digital.

<https://www.economiadigital.es/economia/la-entrada-de-gas-en-barco-sube-un-24-en-espana-este-enero-respecto-a-2021.html> (último acceso 20 jun. 2022)

[7] (3 mar. 2022), *España en 2022: crece la producción de electricidad solar un 70%; crece el precio del gas un 651%*. <https://www.energias-renovables.com/panorama/espana-en-2022-crece-la-produccion-de-20220302>

(último acceso 20 jun. 2022)

[8] (20 oct. 2021), De Santos Pascual, Juan Carlos. *Teresa Ribera: "¿Debemos consentir que sean los consumidores los que siempre asuman los riesgos?"*. EuroNews. <https://es.euronews.com/2021/10/20/teresa-ribera-debemos-consentir-que-sean-los-consumidores-los-que-siempre-asuman-los-riesg> (último acceso 20 jun. 2022)

[9] (1 ago. 2021), *Nord Stream 2, el gasoducto de la discordia entre EE. UU., Rusia y Europa*. France24. <https://www.france24.com/es/programas/reporteros/20210801-nord-stream-rusia-europa-estados-unidos-alemania> (último acceso 20 jun. 2022)

[10] (15 ene. 2020), *Alemania inaugura una central térmica en plena ola de cierres*. Economía Digital. https://www.economiadigital.es/galicia/empresas/alemania-inaugura-una-central-termica-en-plena-ola-de-cierres_20025650_102.html (último acceso 20 jun. 2022)

[11] Roca, José A., (21 nov. 2018), *Francia retrasa (10 años) hasta 2035 el plan para reducir su dependencia nuclear del 72 al 50%*
<https://elperiodicodelaenergia.com/francia-retrasa-10-anos-hasta-2035-el-plan-para-reducir-su-dependencia-nuclear-del-72-al-50/> (último acceso 20 jun. 2022)

[12] *Real Decreto del 13/2012 de 30 de Marzo por el que se transponen directivas en materia de mercados interiores de electricidad y gas y en materia de comunicaciones electrónicas, y por el que se adoptan medidas para la corrección de las desviaciones por desajustes entre los costes e ingresos de los sectores eléctricos y gasista.*

[13] (13 jul. 2021) *Mapa de infraestructuras de Enagás en España*. https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/TransporteYOperacion/MapaInfraestructuras (último acceso 20 jun. 2022)

[14] *Planta de Barcelona*. ENAGAS

https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/PlantasRegasificacion/PlantaBarcelona (último acceso 20 jun. 2022)

[15] *Planta de Huelva*. ENAGAS

[https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte de gas/PlantasRegasificacion/PlantaHuelva](https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/PlantasRegasificacion/PlantaHuelva) (último acceso 20 jun. 2022)

[16] *Planta de Sagunto*. ENAGAS

[https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte de gas/PlantasRegasificacion/PlantaSagunto](https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/PlantasRegasificacion/PlantaSagunto) (último acceso 20 jun. 2022)

[17] *Planta de Cartagena*. ENAGAS

[https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte de gas/PlantasRegasificacion/PlantaCartagena](https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/PlantasRegasificacion/PlantaCartagena) (último acceso 20 jun. 2022)

[18] *Planta de Bilbao*. Fuente: ENAGAS

[https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte de gas/PlantasRegasificacion/PlantaBBG](https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/PlantasRegasificacion/PlantaBBG) (último acceso 20 jun. 2022)

[19] *La terminal de GNL*. REGANOSA. <https://www.reganosa.com/es/caracteristicas> (último acceso 20 jun. 2022)

[20] *Total capacidad para el proceso de regasificación. Nuestra planta*. BBG. <https://www.bbg.es/servicios-y-soluciones/nuestra-planta-de-regasificacion/> (último acceso 20 jun. 2022)

[21] *Procesos de la planta*. SAGGAS. <https://www.saggas.com/es/la-planta/procesos-de-la-planta> (último acceso 20 jun. 2022)

[22] (14 dic. 2010) *Entradas Mínimas. Plantas de Regasificación* ENAGAS [https://enagasgts.es/stfls/EnagasImport/Ficheros/736/940/Resumen Entradas%20M%C3%ADnimas dic10.pdf](https://enagasgts.es/stfls/EnagasImport/Ficheros/736/940/Resumen_Entradas%20M%C3%ADnimas_dic10.pdf) (último acceso 20 jun. 2022)

[23] *“Informes sobre la supervisión de la gestión técnica del sistema gasista”*. Comisión Nacional de Mercados y Competencia. Gobierno de España (último acceso 20 jun. 2022)

<https://www.cnmc.es/buscador?t=INFORME+DE+SUPERVISI%C3%93N+DE+LA+GESTI%C3%93N+T%C3%89CNICA+DEL+SISTEMA+GASISTA+&edit-submit-buscador=Buscar&idambito=9&datefrom=01-01-2019&dateto=31-12-2021>

[24] Romero Gómez, J. & Ferreiro García, R. & Bouzón Otero, R. & De Miguel Catoira, A., *“Relicuação del Boil Off en buques LNG. Principios tecnológicos”*. Ingeniería Química (2012) Nº 504, pp. 44-50.

[25] Mahía Prados, J. M. *“Trabajo fin de grado: Gestión del boil-off gas de una planta de regasificación”* (2020), Universidad de A Coruña

[26] Regasificadora del Noroeste SA, *“Proyecto básico y de ejecución de una planta de regasificación en Punta Promontorio”*, Archivo del Ayuntamiento de Mugardos

[27] Norma UNE-EN 14620-3 *“Diseño y fabricación de tanques de acero cilíndricos, verticales y de fondo plano, construidos en el lugar de emplazamiento para el almacenamiento de gases licuados refrigerados con temperaturas de servicio entre los 0 y -165 °C”*.

[28] Código Técnico de Edificación (CTE); Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Gobierno de España

[29] Incropera F. & De Witt D. *“Fundamentos de transferencia de calor”* Cuarta edición (1999), Editorial Prentice Hall

[30] Çengel Y. A. & Ghajar A. J. *“Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones”* Cuarta edición (2011), Editorial McGraw Hill

[31] *“GNL custody transfer manual”*. International Group of Liquefied Natural Gas Importers (2011). Traducción de ENAGAS.

https://www.enagas.es/stfls/EnagasImport/Ficheros/436/561/LNG%20Custody%20Transfer%20-%203%C2%AA%20Edici%C3%B3n_Espa%C3%B1ol.pdf (Último acceso 20 jun. 2022)

[32] Lisowski, Edward & Czyżycki, Wojciech & Grzegorz, Filo & Łazarczyk, Katarzyna *“Computer Aided Design of components for energy transfer in a local LNG station”* Bergen University College (2013) <https://hvlopen.brage.unit.no/hvlopen-xmlui/bitstream/handle/11250/2481629/Skriftserien%2C%20nr.3%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Último acceso 20 jun. 2022)

[33] Huerta F. & Vesovic V., *“A realist vapour phase heat transfer model for the weathering of LNG stored in large tanks”* Department of Earth Science and Engineering, Imperial College London (2019)

[34] Maksimov I., Nagornova T., Glazyrin V., Shestakov A. *“Analysis of influence of heat insulation on the thermal regime of storage tanks with liquefied natural gas”*. EPJ Web of Conferences (2016)

Acrónimos y siglas por orden alfabético

- BBG – Bahía de Bizkaia Gas
- BOG – Boil-Off Gas
- CNMA – Comisión Nacional de Mercados y Competencia
- DIA – Declaración de Impacto Ambiental
- ENAGAS – Empresa Nacional del Gas
- EES – Engineering Equation Solver
- EEUU – Estados Unidos
- EVE – Ente Vasco de Energía
- GCU – Gas Combustion Unit
- GN – Gas Natural
- GNL – Gas Natural Licuado
- MT – Mínimo técnico
- ORV – Open Rack Vaporizer
- PUR – Poliuterano-poliisocianurato rígido
- RD – Real Decreto
- REGANOSA – Regasificadora del Noroeste SA
- SCV – Submerged Combustion Vaporizer
- TFG – Trabajo Fin de Grado
- UE – Unión Europea

6 – ÍNDICE DE IMÁGENES Y DE TABLAS

Imagen 3.1.1. Ubicación de yacimientos de gas natural [1]

Imagen 2.1.1. Red de gas española [13]

Imagen 4.2.1. Esquema de las plantas de Mugardos y Bilbao sin compresor directo.
Elaboración propia

Imagen 5.2.2. Esquema de la planta de Sagunto con compresor directo. Elaboración propia

Imagen 2.2.1. Esquema de planta de regasificación (1). Elaboración propia

Imagen 2.2.2. Esquema de planta de regasificación (2). Elaboración propia

Imagen 2.4.1. Diagrama de flujo del proceso de relicuación [24]

Imagen 3.1.1. Esquema de funcionamiento de la planta de Mugardos. Elaboración propia

Imagen 3.1.2.1.1 Composición del aislamiento del fondo de los tanques de GNL.
Elaboración propia

Imagen 3.1.2.2.1 Composición del aislamiento de la envolvente de los tanques de GNL.
Elaboración propia

Imagen 3.1.2.2.2 Despiece de un tanque de GNL. Elaboración propia

Imagen 3.1.2.3.1. Composición del aislamiento del domo de los tanques de GNL.
Elaboración propia

Tabla 1.1.3. Composición del gas natural [2]

Tabla 1.1.4. Porcentajes mínimos de ENAGAS para buena calidad del gas [3]

Tabla 2.1.1.1. Características de la planta de Barcelona [14]

Tabla 2.1.2.1. Características de la planta de Huelva [15]

Tabla 2.1.3.1. Características de la planta de Sagunto [16]

Tabla 2.1.4.1. Características de la planta de Cartagena [17]

Tabla 2.1.5.1. Características de la planta de Bilbao [18]

Tabla 2.1.6.1. Características de la planta de Mugaros [19]

Tabla 2.2.1. Resumen de capacidades de las plantas españolas. Elaboración propia

Tabla 2.3.1. Mínimos técnicos fijados para cada instalación desde 2017 [23]

Tabla 2.3.2. Porcentaje de días por debajo del mínimo técnico [23]

Tabla 3.1.1.1. Características de los tanques de almacenamiento GNL [27]

Tabla 3.4.1 – Comparativa de datos de la base del tanque. Original del autor

Tabla 3.4.2 – Comparativa de datos de las paredes del tanque. Original del autor

Tabla 3.4.2 – Comparativa de datos de la cúpula del tanque. Original del autor

7 – ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.2.4. Importaciones en GWh de gas natural en Marzo de 2022 [5]

Figura 1.2.5. Evolución de los precios del gas [7]

Figura 1.2.6. Gráfico de la energía generada en España [7]

Figura 1.2.4. Ciclo del gas natural. Original del autor

Figura 2.2.1. Representación de los datos de la Tabla 2.2.1. Original del autor

Figura 2.2.2. Relación entre la capacidad de emisión y de almacenamiento. Original del autor

Figura 2.3.1 Gráfica sobre la evolución del porcentaje de días al año por debajo del mínimo técnico en cada instalación de regasificación. [23]

Figura 3.2.2.1. Planteamiento de la Ley de Fourier. Original del autor

Figura 3.2.2.2.1 Planteamiento de la Ley de enfriamiento de Newton. Original del autor

Figura 3.2.3.1 Representación de un tanque de almacenamiento lleno hasta el máximo de GNL. Original del autor

Figura 3.2.3.2 Esquema eléctrico de la base del tanque. Original del autor

Figura 3.2.3.3 Esquema eléctrico de la base de la pared del tanque. Original del autor

Figura 3.2.3.4 Esquema eléctrico de la pared del tanque. Original del autor

Figura 3.2.3.5 Esquema eléctrico del alto de la pared del tanque. Original del autor

Figura 3.2.3.6 Esquema eléctrico de la cúpula del tanque. Original del autor

Figura 3.3.1.1 – Gráfica Temperatura-espesor de la base del tanque. Original del autor.

Figura 3.3.1.2 – Gráfica Temperatura-espesor de la base de la pared del tanque. Original del autor.

Figura 3.3.1.3 – Gráfica Temperatura-espesor de la pared y zona alta del tanque. Original del autor.

Figura 3.3.1.4 – Gráfica Temperatura-espesor de la cúpula del tanque. Original del autor.

Figura 3.3.2.1 – Paredes del tanque de almacenamiento. Original del autor

Figura 3.3.2.2 – Sección de las paredes del tanque de almacenamiento. Original del autor

Figura 3.3.2.3 – Cúpula del tanque de almacenamiento. Original del autor

Figura 3.3.2.4 – Sección de la cúpula del tanque de almacenamiento. Original del autor

Figura 3.3.2.5 – Fondo del tanque de almacenamiento. Original del autor

Figura 3.3.2.6 – Sección del fondo del tanque de almacenamiento. Original del autor

Figura 3.3.2.7 – Tanque de almacenamiento. Original del autor

Figura 3.3.2.8 – Sección del tanque del estudio térmico (I). Original del autor

Figura 3.3.2.9 – Sección del tanque del estudio térmico (II). Original del autor

Figura 3.3.2.10 – Vista superior del tanque del estudio térmico. Original del autor

Figura 3.4.1 – Toma de datos de la base del tanque. Original del autor

Figura 3.4.2 – Toma de datos de la pared del tanque. Original del autor

Figura 3.4.3 – Toma de datos de la cúpula del tanque. Original del autor

MÁSTER EN ENXEÑARÍA MARIÑA

ANEXO I
CÁLCULOS DE TRANSFERENCIA DE
CALOR – EES

JOSÉ MIGUEL MAHÍA PRADOS

"Calculo de las transferencias de calor"

"Temperaturas"

$T_{losa} = 278$ "Temperatura del suelo por encima de los calentadores de resistencias"
 $T_{tierra} = 283,58$ "Temperatura media del suelo segun los datos de Meteogalicia, estación del Val, por ser la más próxima a Mugardos que arroje datos a -0,1m entre el 01/11/2021 y 01/02/2022"
 $T_{RadSol} = 315,5$ "Temperatura de proyecto de 37° más 5,5°C por la radiación"
 $T_{baseTk} = 109$ "Temperatura en la base del tanque del GNL"
 $T_{baseParedTk} = 116$ "Temperatura en 1/3 del tanque del GNL"
 $T_{paredTk} = 120$ "Temperatura en 1/2 del tanque del GNL"
 $T_{altoparedTk} = 126$ "Temperatura en 2/3 del tanque del GNL"
 $T_{cupulaTk} = 133$ "Temperatura en techo del tanque del GNL"

"Espesores"

$e_{hormigon1} = 0,1$ "Espesor del hormigón de la capa 1 de la base en metros"
 $e_{hormigon2} = 0,15$ "Espesor del hormigón de la capa 2 de la base en metros"
 $e_{hormigon3} = 0,05$ "Espesor del hormigón de la capa 3 de la base en metros"
 $e_{hormigon4} = 1,7$ "Espesor del hormigón de la capa 1,7 en metros de pared"
 $e_{hormigon5} = 0,4$ "Espesor del hormigón de la capa 0,4 en metros de la cupula"
 $e_{hormigon6} = 0,6$ "Espesor del hormigón de la capa 0,6 en metros de la losa calefactadas sobre la que se asienta el tanque"
 $e_{espuma} = 0,26$ "Espesor de la capa de espuma de vidrio de la base en metros"
 $e_{fieltro} = 0,09$ "Espesor de las capas de fieltro bituminoso de la base en metros"
 $e_{tanqueint} = 0,006$ "Espesor del tanque interior de GNL en metros"
 $e_{perlita} = 2$ "Espesor de la perlita de la pared en metros"
 $e_{poliuretano} = 0,15$ "Espesor del poliuretano de la pared en metros"
 $e_{lanapared} = 0,25$ "Espesor de la lana de vidrio de pared en metros"
 $e_{lanacupula} = 0,6$ "Espesor de la lana de vidrio de cupula en metros"

"Areas"

$A_{base} = (37)*(37)*3,1416$ "Area de la base del tanque"
 $A_{basepared} = 2*3,1416*37*5$ "Area desarrollada de la base de la pared"
 $A_{pared} = 2*3,1416*37*(37,436-5)$ "Area desarrollada de la pared"
 $A_{altopared} = 2*3,1416*37*(41,7-37,436)$ "Area desarrollada del alto de la pared"
 $A_{cupula} = A_{base}$ "Area de la cúpula"
 $A_{Total} = A_{pared} + A_{altopared} + A_{basepared} + A_{base} + A_{cupula}$

"Coeficientes de conducción"

$k_{hormigon} = 2,285$
 $k_{espuma} = 0,03$
 $k_{fieltro} = 0,23$
 $k_{aluminio} = 205$
 $k_{perlita} = 0,052$
 $k_{lana} = 0,037$
 $k_{poliuretano} = 0,0253$

"Coeficientes de convección"

$h_{aire} = 16$
 $h_{gnl} = 199$
 $h_{BOG} = 37,56$

$emi_{hormigon} = 0,93$ "Emisividad del hormigón"
 $coe_{SB} = 0,00000005670373$ "Coeficiente de Stefan Boltzmann"

"q" base del tanque"

$Cond_1 = e_{hormigon1} / (k_{hormigon})$
 $Cond_2 = e_{espuma} / (k_{espuma})$
 $Cond_3 = e_{fieltro} / (k_{fieltro})$
 $Cond_4 = e_{hormigon2} / (k_{hormigon})$
 $Cond_5 = Cond_2$

$$\text{Cond}_6 = \text{Cond}_3$$

$$\text{Cond}_7 = e_{\text{hormigon}} / (k_{\text{hormigon}})$$

$$\text{Cond}_8 = e_{\text{tanqueint}} / (k_{\text{aluminio}})$$

$$\text{Conv}_1 = (1/h_{\text{gnl}})$$

$$q''_{\text{Base}} = (T_{\text{losa}} - T_{\text{baseTk}}) / (\text{Cond}_1 + \text{Cond}_2 + \text{Cond}_3 + \text{Cond}_4 + \text{Cond}_5 + \text{Cond}_6 + \text{Cond}_7 + \text{Cond}_8 + \text{Conv}_1) \quad \text{"W/m}^2\text{"}$$

"q" base de la pared"

$$\text{Conv}_2 = (1/h_{\text{aire}})$$

$$\text{Rad}_1 = 1 / (e_{\text{hormigon}} * \text{coe_SB} * ((T_{\text{RadSol}}^2 - T_{\text{baseparedTK}}^2) * (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{baseparedTK}})))$$

$$\text{Cond}_9 = e_{\text{hormigon}} / (k_{\text{hormigon}})$$

$$\text{Cond}_{10} = e_{\text{poliuretano}} / (k_{\text{poliuretano}})$$

$$\text{Cond}_{11} = e_{\text{perlita}} / (k_{\text{perlita}})$$

$$\text{Cond}_{12} = e_{\text{lanapared}} / (k_{\text{лана}})$$

$$\text{Cond}_{13} = e_{\text{tanqueint}} / (k_{\text{aluminio}})$$

$$\text{Conv}_3 = (1/h_{\text{gnl}})$$

$$q''_{\text{BasePared}} = (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{baseParedTk}}) / (1 / ((\text{Conv}_2 + \text{Rad}_1) + \text{Cond}_9 + \text{Cond}_{10} + \text{Cond}_{11} + \text{Cond}_{12} + \text{Cond}_{13} + \text{Conv}_3)) \quad \text{"W/m}^2\text{"}$$

"q" de la pared"

$$\text{Conv}_4 = (1/h_{\text{aire}})$$

$$\text{Rad}_2 = 1 / (e_{\text{hormigon}} * \text{coe_SB} * ((T_{\text{RadSol}}^2 - T_{\text{paredTK}}^2) * (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{paredTK}})))$$

$$\text{Cond}_{14} = e_{\text{hormigon}} / (k_{\text{hormigon}})$$

$$\text{Cond}_{15} = e_{\text{perlita}} / (k_{\text{perlita}})$$

$$\text{Cond}_{16} = e_{\text{lanapared}} / (k_{\text{лана}})$$

$$\text{Cond}_{17} = e_{\text{tanqueint}} / (k_{\text{aluminio}})$$

$$\text{Conv}_5 = (1/h_{\text{gnl}})$$

$$q''_{\text{Pared}} = (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{paredTk}}) / (1 / ((\text{Conv}_4 + \text{Rad}_2) + \text{Cond}_{14} + \text{Cond}_{15} + \text{Cond}_{16} + \text{Cond}_{17} + \text{Conv}_5)) \quad \text{"W/m}^2\text{"}$$

"q" de alto pared"

$$\text{Conv}_6 = (1/h_{\text{aire}})$$

$$\text{Rad}_3 = 1 / (e_{\text{hormigon}} * \text{coe_SB} * ((T_{\text{RadSol}}^2 - T_{\text{altoparedTK}}^2) * (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{altoparedTK}})))$$

$$\text{Cond}_{18} = e_{\text{hormigon}} / (k_{\text{hormigon}})$$

$$\text{Cond}_{19} = e_{\text{perlita}} / (k_{\text{perlita}})$$

$$\text{Cond}_{20} = e_{\text{lanapared}} / (k_{\text{лана}})$$

$$\text{Cond}_{21} = e_{\text{tanqueint}} / (k_{\text{aluminio}})$$

$$\text{Conv}_7 = (1/h_{\text{BOG}})$$

$$q''_{\text{AltoPared}} = (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{altoparedTk}}) / (1 / ((\text{Conv}_6 + \text{Rad}_3) + \text{Cond}_{18} + \text{Cond}_{19} + \text{Cond}_{20} + \text{Cond}_{21} + \text{Conv}_7)) \quad \text{"W/m}^2\text{"}$$

$$q''_{\text{ParedTotal}} = q''_{\text{BasePared}} + q''_{\text{Pared}} + q''_{\text{AltoPared}}$$

"q" de cupula"

$$\text{Conv}_8 = (1/h_{\text{aire}})$$

$$\text{Rad}_4 = 1 / (e_{\text{hormigon}} * \text{coe_SB} * ((T_{\text{RadSol}}^2 - T_{\text{cupulaTK}}^2) * (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{cupulaTK}})))$$

$$\text{Cond}_{22} = e_{\text{hormigon}} / (k_{\text{hormigon}})$$

$$\text{Cond}_{23} = e_{\text{lanacupula}} / (k_{\text{лана}})$$

$$\text{Cond}_{24} = e_{\text{tanqueint}} / (k_{\text{aluminio}})$$

$$\text{Conv}_9 = (1/h_{\text{BOG}})$$

$$q''_{\text{Cupula}} = (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{cupulaTk}}) / (1 / ((\text{Conv}_8 + \text{Rad}_4) + \text{Cond}_{22} + \text{Cond}_{23} + \text{Cond}_{24} + \text{Conv}_9)) \quad \text{"W/m}^2\text{"}$$

"Q total"

$$q''_{\text{Total}} = q''_{\text{Base}} + q''_{\text{ParedTotal}} + q''_{\text{Cupula}} \quad \text{"W/m}^2\text{"}$$

$$Q_{\text{Total}} = ((q''_{\text{base}} * A_{\text{base}}) + (q''_{\text{basepared}} * A_{\text{basepared}}) + (q''_{\text{pared}} * A_{\text{pared}}) + (q''_{\text{altopared}} * A_{\text{altopared}}) + (q''_{\text{cupula}} * A_{\text{cupula}})) / 1000 \quad \text{"En kJ"}$$

"Diseño de gráficas de temperatura"

"Gráfica en la base del tanque"

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot ((T_1 - T_{\text{tierra}}) / e_{\text{hormigon1}})$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{espuma}} \cdot ((T_2 - T_1) / e_{\text{espuma}})$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{fieltro}} \cdot ((T_3 - T_2) / e_{\text{fieltro}})$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot ((T_4 - T_3) / e_{\text{hormigon2}})$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{espuma}} \cdot ((T_5 - T_4) / e_{\text{espuma}})$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{fieltro}} \cdot ((T_6 - T_5) / e_{\text{fieltro}})$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot ((T_7 - T_6) / e_{\text{hormigon3}})$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{aluminio}} \cdot ((T_8 - T_7) / e_{\text{tanqueint}})$$

$$e[0] = 0$$

$$T[0] = T_{\text{tierra}}$$

$$e[1] = e_{\text{hormigon1}}$$

$$T[1] = T_1$$

$$e[2] = e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T[2] = T_2$$

$$e[3] = e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T[3] = T_3$$

$$e[4] = e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T[4] = T_4$$

$$e[5] = e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T[5] = T_5$$

$$e[6] = e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T[6] = T_6$$

$$e[7] = e_{\text{hormigon3}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T[7] = T_7$$

$$e[8] = e_{\text{tanqueint}} + e_{\text{hormigon3}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T[8] = T_8$$

"Gráfica en la base de la pared"

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot ((T_{10} - T_{\text{Radsol}}) / e_{\text{hormigon4}})$$

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{poliuretano}} \cdot ((T_{11} - T_{10}) / e_{\text{poliuretano}})$$

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{perlita}} \cdot ((T_{12} - T_{11}) / e_{\text{perlita}})$$

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{lanapared}} \cdot ((T_{13} - T_{12}) / e_{\text{lanapared}})$$

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{aluminio}} \cdot ((T_{14} - T_{13}) / e_{\text{tanqueint}})$$

$$e[9] = 0$$

$$T[9] = T_{\text{radsol}}$$

$$e[10] = e_{\text{hormigon4}}$$

$$T[10] = T_{10}$$

$$e[11] = e_{\text{poliuretano}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T[11] = T_{11}$$

$$e[12] = e_{\text{perlita}} + e_{\text{poliuretano}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T[12] = T_{12}$$

$$e[13] = e_{\text{lanapared}} + e_{\text{perlita}} + e_{\text{poliuretano}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T[13] = T_{13}$$

$$e[14] = e_{\text{tanqueint}} + e_{\text{lanapared}} + e_{\text{perlita}} + e_{\text{poliuretano}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T[14] = T_{14}$$

"Gráfica en la pared y en alto pared"

$q''_{\text{Pared}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot ((T_{16} - T_{\text{Radsol}}) / e_{\text{hormigon4}})$
 $q''_{\text{Pared}} = -k_{\text{perlita}} \cdot ((T_{17} - T_{16}) / e_{\text{perlita}})$
 $q''_{\text{Pared}} = -k_{\text{ lana}} \cdot ((T_{18} - T_{17}) / e_{\text{ lanapared}})$
 $q''_{\text{Pared}} = -k_{\text{aluminio}} \cdot ((T_{19} - T_{18}) / e_{\text{tanqueint}})$

$e[15] = 0$
 $T[15] = T_{\text{radsol}}$
 $e[16] = e_{\text{hormigon4}}$
 $T[16] = T_{16}$
 $e[17] = e_{\text{perlita}} + e_{\text{hormigon4}}$
 $T[17] = T_{17}$
 $e[18] = e_{\text{ lanapared}} + e_{\text{perlita}} + e_{\text{hormigon4}}$
 $T[18] = T_{18}$
 $e[19] = e_{\text{tanqueint}} + e_{\text{ lanapared}} + e_{\text{perlita}} + e_{\text{hormigon4}}$
 $T[19] = T_{19}$

"Gráfica en la cúpula"

$q''_{\text{Cúpula}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot ((T_{21} - T_{\text{Radsol}}) / e_{\text{hormigon5}})$
 $q''_{\text{Cúpula}} = -k_{\text{ lana}} \cdot ((T_{22} - T_{21}) / e_{\text{ lanacúpula}})$
 $q''_{\text{Cúpula}} = -k_{\text{aluminio}} \cdot ((T_{23} - T_{22}) / e_{\text{tanqueint}})$

$e[20] = 0$
 $T[20] = T_{\text{radsol}}$
 $e[21] = e_{\text{hormigon5}}$
 $T[21] = T_{21}$
 $e[22] = e_{\text{ lanacúpula}} + e_{\text{hormigon5}}$
 $T[22] = T_{22}$
 $e[23] = e_{\text{tanqueint}} + e_{\text{ lanacúpula}} + e_{\text{hormigon5}}$
 $T[23] = T_{23}$

"Cálculo de BOG generado"

"Datos del tanque"

$V = 150000$
 $P1 = 100000$
 $X_v = 1$ "Título de vapor"
 $X_l = 0$ "Título de líquido"
 $X_1 = m_{\text{vapor1}} / M_1$

$V_{\text{liquido1}} = V \cdot 0,98$
 $M_{\text{liquido1}} = V_{\text{liquido1}} \cdot \rho_l$
 $V_l = \text{VOLUME}(\text{Methane}; P = P1; X = X_l)$
 $\rho_l = \text{DENSITY}(\text{Methane}; X = X_l; P = P1)$

$V_{\text{vapor1}} = V - V_{\text{liquido1}}$
 $M_{\text{vapor1}} = V_{\text{vapor1}} \cdot \rho_v$
 $V_v = \text{VOLUME}(\text{Methane}; P = P1; X = X_v)$
 $\rho_v = \text{DENSITY}(\text{Methane}; X = X_v; P = P1)$

$Q_{\text{Balance}} = Q_{\text{Total}} \cdot 24 \cdot 3600$ "kJ/día"

"Balance"

$Q_{\text{Balance}} = (M_2 \cdot U_2) - (M_1 \cdot U_1) + (M_s \cdot H_s)$

"Estado 1"

$M_1 = M_{\text{liquido1}} + M_{\text{vapor1}}$
 $U_1 = \text{INTENERGY}(\text{Methane}; P = P1; X = X_1)$

"Estado 2"

$$M_2 = V / (V_I + X_2 * (V_v - V_I))$$

$$U_2 = U_I + X_2 * (U_v - U_I)$$

$$U_I = \text{INTENERGY}(\text{Methane}; P=P1; X=X_I)$$

$$U_v = \text{INTENERGY}(\text{Methane}; P=P1; X=X_v)$$

"Estado salida"

$$M_s = M_1 - M_2$$

$$H_s = \text{ENTHALPY}(\text{Methane}; P=P1; X=1)$$

"Cálculo de volumen de BOG generado por segundo"

$$V = (M_{\text{liquido2}} * V_I) + (M_{\text{vapor2}} * V_v)$$

$$X_2 = M_{\text{vapor2}} / M_2$$

$$V_{\text{vapor2}} = M_{\text{vapor2}} * V_v$$

$$V_{\text{liquido2}} = V - V_{\text{vapor2}}$$

$$\text{Incremento_Vapor} = V_{\text{vapor2}} - V_{\text{vapor1}}$$

"Máximo de BOG Generado"

$$\text{BOG_MAX} = 0,0005 * V \text{ "Es el 0,05\% del volumen del tanque"}$$

"Calculo de pérdida diaria"

$$\text{BOG_Generado} = (\text{Incremento_Vapor} / V) * 100$$

Calculo de las transferencias de calor

Temperaturas

$$T_{\text{losa}} = 278 \text{ Temperatura del suelo por encima de los calentadores de resistencias}$$

$$T_{\text{tierra}} = 283,58 \text{ Temperatura media del suelo segun los datos de Meteogalicia, estación del Val, por ser la más próxima a Mugardos que arroje datos a -0,1m entre el 01/11/2021 y 01/02/2022}$$

$$T_{\text{RadSol}} = 315,5 \text{ Temperatura de proyecto de } 37^{\text{a}} \text{ más } 5,5^{\circ}\text{C por la radiación}$$

$$T_{\text{baseTk}} = 109 \text{ Temperatura en la base del tanque del GNL}$$

$$T_{\text{baseParedTk}} = 116 \text{ Temperatura en 1/3 del tanque del GNL}$$

$$T_{\text{paredTk}} = 120 \text{ Temperatura en 1/2 del tanque del GNL}$$

$$T_{\text{altoparedTk}} = 126 \text{ Temperatura en 2/3 del tanque del GNL}$$

$$T_{\text{cupulaTk}} = 133 \text{ Temperatura en techo del tanque del GNL}$$

Espesores

$$e_{\text{hormigon1}} = 0,1 \text{ Espesor del hormigón de la capa 1 de la base en metros}$$

$$e_{\text{hormigon2}} = 0,15 \text{ Espesor del hormigón de la capa 2 de la base en metros}$$

$$e_{\text{hormigon3}} = 0,05 \text{ Espesor del hormigón de la capa 3 de la base en metros}$$

$$e_{\text{hormigon4}} = 1,7 \text{ Espesor del hormigón de la capa 1,7 en metros de pared}$$

$$e_{\text{hormigon5}} = 0,4 \text{ Espesor del hormigón de la capa 0,4 en metros de la cupula}$$

$e_{\text{hormigon6}} = 0,6$ Espesor del hormigon de la capa 0,6 en metros de la losa calefactadas sobre la que se asienta el tanque

$e_{\text{espuma}} = 0,26$ Espesor de la capa de espuma de vidrio de la base en metros

$e_{\text{fieltro}} = 0,09$ Espesor de las capas de fieltro bituminoso de la base en metros

$e_{\text{tanqueint}} = 0,006$ Espesor del tanque interior de GNL en metros

$e_{\text{perlita}} = 2$ Espesor de la perlita de la pared en metros

$e_{\text{poliuretano}} = 0,15$ Espesor del poliuretano de la pared en metros

$e_{\text{lanapared}} = 0,25$ Espesor de la lana de vidrio de pared en metros

$e_{\text{lanacupula}} = 0,6$ Espesor de la lana de vidrio de cupula en metros

Areas

$A_{\text{base}} = 37 \cdot 37 \cdot 3,1416$ Area de la base del tanque

$A_{\text{basepared}} = 2 \cdot 3,1416 \cdot 37 \cdot 5$ Area desarrollada de la base de la pared

$A_{\text{pared}} = 2 \cdot 3,1416 \cdot 37 \cdot [37,436 - 5]$ Area desarrollada de la pared

$A_{\text{altopared}} = 2 \cdot 3,1416 \cdot 37 \cdot [41,7 - 37,436]$ Area desarrollada del alto de la pared

$A_{\text{cupula}} = A_{\text{base}}$ Area de la cúpula

$A_{\text{Total}} = A_{\text{pared}} + A_{\text{altopared}} + A_{\text{basepared}} + A_{\text{base}} + A_{\text{cupula}}$

Coefficientes de conducción

$k_{\text{hormigon}} = 2,285$

$k_{\text{espuma}} = 0,03$

$k_{\text{fieltro}} = 0,23$

$k_{\text{aluminio}} = 205$

$k_{\text{perlita}} = 0,052$

$k_{\text{lana}} = 0,037$

$k_{\text{poliuretano}} = 0,0253$

Coefficientes de convección

$h_{\text{aire}} = 16$

$h_{\text{gnl}} = 199$

$h_{\text{BOG}} = 37,56$

$em_{\text{hormigon}} = 0,93$ Emisividad del hormigón

$co_{\text{eSB}} = 5,670373 \times 10^{-8}$ Coeficiente de Stefan Boltzmann

q'' base del tanque

$$\text{Cond}_1 = \frac{e_{\text{hormigon1}}}{K_{\text{hormigon}}}$$

$$\text{Cond}_2 = \frac{e_{\text{espuma}}}{K_{\text{espuma}}}$$

$$\text{Cond}_3 = \frac{e_{\text{fieltro}}}{K_{\text{fieltro}}}$$

$$\text{Cond}_4 = \frac{e_{\text{hormigon2}}}{K_{\text{hormigon}}}$$

$$\text{Cond}_5 = \text{Cond}_2$$

$$\text{Cond}_6 = \text{Cond}_3$$

$$\text{Cond}_7 = \frac{e_{\text{hormigon3}}}{K_{\text{hormigon}}}$$

$$\text{Cond}_8 = \frac{e_{\text{tanqueint}}}{K_{\text{aluminio}}}$$

$$\text{Conv}_1 = \frac{1}{h_{\text{gnl}}}$$

$$q''_{\text{Base}} = \frac{T_{\text{losa}} - T_{\text{baseTk}}}{\text{Cond}_1 + \text{Cond}_2 + \text{Cond}_3 + \text{Cond}_4 + \text{Cond}_5 + \text{Cond}_6 + \text{Cond}_7 + \text{Cond}_8 + \text{Conv}_1} \quad \text{W/m}^2$$

q'' base de la pared

$$\text{Conv}_2 = \frac{1}{h_{\text{aire}}}$$

$$\text{Rad}_1 = \frac{1}{\epsilon_{\text{mi}_{\text{hormigon}}} \cdot \text{coe}_{\text{SB}} \cdot \left[(T_{\text{RadSol}}^2 - T_{\text{baseParedTk}}^2) \cdot (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{baseParedTk}}) \right]}$$

$$\text{Cond}_9 = \frac{e_{\text{hormigon4}}}{K_{\text{hormigon}}}$$

$$\text{Cond}_{10} = \frac{e_{\text{poliuretano}}}{K_{\text{poliuretano}}}$$

$$\text{Cond}_{11} = \frac{e_{\text{perlita}}}{K_{\text{perlita}}}$$

$$\text{Cond}_{12} = \frac{e_{\text{lanapared}}}{K_{\text{lana}}}$$

$$\text{Cond}_{13} = \frac{e_{\text{tanqueint}}}{K_{\text{aluminio}}}$$

$$\text{Conv}_3 = \frac{1}{h_{\text{gnl}}}$$

$$q''_{\text{BasePared}} = \frac{T_{\text{RadSol}} - T_{\text{baseParedTk}}}{\frac{1}{\text{Conv}_2 + \text{Rad}_1} + \text{Cond}_9 + \text{Cond}_{10} + \text{Cond}_{11} + \text{Cond}_{12} + \text{Cond}_{13} + \text{Conv}_3} \quad \text{W/m}^2$$

q'' de la pared

$$\text{Conv}_4 = \frac{1}{h_{\text{aire}}}$$

$$\text{Rad}_2 = \frac{1}{\epsilon_{\text{hormigon}} \cdot \text{coe}_{\text{SB}} \cdot [(T_{\text{RadSol}}^2 - T_{\text{paredTk}}^2) \cdot (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{paredTk}})]}$$

$$\text{Cond}_{14} = \frac{\epsilon_{\text{hormigon4}}}{K_{\text{hormigon}}}$$

$$\text{Cond}_{15} = \frac{\epsilon_{\text{perlita}}}{K_{\text{perlita}}}$$

$$\text{Cond}_{16} = \frac{\epsilon_{\text{lanapared}}}{K_{\text{lana}}}$$

$$\text{Cond}_{17} = \frac{\epsilon_{\text{tanqueint}}}{K_{\text{aluminio}}}$$

$$\text{Conv}_5 = \frac{1}{h_{\text{gnl}}}$$

$$q''_{\text{Pared}} = \frac{T_{\text{RadSol}} - T_{\text{paredTk}}}{\frac{1}{\text{Conv}_4 + \text{Rad}_2} + \text{Cond}_{14} + \text{Cond}_{15} + \text{Cond}_{16} + \text{Cond}_{17} + \text{Conv}_5} \quad \text{W/m}^2$$

q'' de alto pared

$$\text{Conv}_6 = \frac{1}{h_{\text{aire}}}$$

$$\text{Rad}_3 = \frac{1}{\epsilon_{\text{hormigon}} \cdot \text{coe}_{\text{SB}} \cdot [(T_{\text{RadSol}}^2 - T_{\text{altoparedTk}}^2) \cdot (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{altoparedTk}})]}$$

$$\text{Cond}_{18} = \frac{\epsilon_{\text{hormigon4}}}{K_{\text{hormigon}}}$$

$$\text{Cond}_{19} = \frac{\epsilon_{\text{perlita}}}{K_{\text{perlita}}}$$

$$\text{Cond}_{20} = \frac{\epsilon_{\text{lanapared}}}{K_{\text{lana}}}$$

$$\text{Cond}_{21} = \frac{\epsilon_{\text{tanqueint}}}{K_{\text{aluminio}}}$$

$$\text{Conv}_7 = \frac{1}{h_{\text{BOG}}}$$

$$q''_{\text{AltoPared}} = \frac{T_{\text{RadSol}} - T_{\text{altoparedTk}}}{\frac{1}{\text{Conv}_6 + \text{Rad}_3} + \text{Cond}_{18} + \text{Cond}_{19} + \text{Cond}_{20} + \text{Cond}_{21} + \text{Conv}_7} \quad \text{W/m}^2$$

$$q''_{\text{ParedTotal}} = q''_{\text{BasePared}} + q''_{\text{Pared}} + q''_{\text{AltoPared}}$$

q'' de cupula

$$\text{Conv}_8 = \frac{1}{h_{\text{aire}}}$$

$$\text{Rad}_4 = \frac{1}{\epsilon_{\text{hormigon}} \cdot \text{coe}_{\text{SB}} \cdot \left[(T_{\text{RadSol}}^2 - T_{\text{cupulaTk}}^2) \cdot (T_{\text{RadSol}} - T_{\text{cupulaTk}}) \right]}$$

$$\text{Cond}_{22} = \frac{\epsilon_{\text{hormigon5}}}{k_{\text{hormigon}}}$$

$$\text{Cond}_{23} = \frac{\epsilon_{\text{lanacupula}}}{k_{\text{лана}}}$$

$$\text{Cond}_{24} = \frac{\epsilon_{\text{tanqueint}}}{k_{\text{aluminio}}}$$

$$\text{Conv}_9 = \frac{1}{h_{\text{BOG}}}$$

$$q''_{\text{Cupula}} = \frac{T_{\text{RadSol}} - T_{\text{cupulaTk}}}{\frac{1}{\text{Conv}_8 + \text{Rad}_4} + \text{Cond}_{22} + \text{Cond}_{23} + \text{Cond}_{24} + \text{Conv}_9} \text{ W/m}^2$$

Q total

$$q''_{\text{Total}} = q''_{\text{Base}} + q''_{\text{ParedTotal}} + q''_{\text{Cupula}} \text{ W/m}^2$$

$$Q_{\text{Total}} = \frac{q''_{\text{Base}} \cdot A_{\text{base}} + q''_{\text{BasePared}} \cdot A_{\text{basepared}} + q''_{\text{Pared}} \cdot A_{\text{pared}} + q''_{\text{AltoPared}} \cdot A_{\text{altopared}} + q''_{\text{Cupula}} \cdot A_{\text{cupula}}}{1000}$$

Diseño de gráficas de temperatura

Gráfica en la base del tanque

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot \left[\frac{T_1 - T_{\text{tierra}}}{e_{\text{hormigon1}}} \right]$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{espuma}} \cdot \left[\frac{T_2 - T_1}{e_{\text{espuma}}} \right]$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{fieltro}} \cdot \left[\frac{T_3 - T_2}{e_{\text{fieltro}}} \right]$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot \left[\frac{T_4 - T_3}{e_{\text{hormigon2}}} \right]$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{espuma}} \cdot \left[\frac{T_5 - T_4}{e_{\text{espuma}}} \right]$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{fieltro}} \cdot \left[\frac{T_6 - T_5}{e_{\text{fieltro}}} \right]$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot \left[\frac{T_7 - T_6}{e_{\text{hormigon3}}} \right]$$

$$q''_{\text{Base}} = -k_{\text{aluminio}} \cdot \left[\frac{T_8 - T_7}{e_{\text{tanqueint}}} \right]$$

$$e_0 = 0$$

$$T_0 = T_{\text{tierra}}$$

$$e_1 = e_{\text{hormigon1}}$$

$$T_1 = T_1$$

$$e_2 = e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T_2 = T_2$$

$$e_3 = e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T_3 = T_3$$

$$e_4 = e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T_4 = T_4$$

$$e_5 = e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T_5 = T_5$$

$$e_6 = e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T_6 = T_6$$

$$e_7 = e_{\text{hormigon3}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T_7 = T_7$$

$$e_8 = e_{\text{tanqueint}} + e_{\text{hormigon3}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon2}} + e_{\text{fieltro}} + e_{\text{espuma}} + e_{\text{hormigon1}}$$

$$T_8 = T_8$$

Gráfica en la base de la pared

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot \left[\frac{T_{10} - T_{\text{RadSol}}}{e_{\text{hormigon4}}} \right]$$

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{poliuretano}} \cdot \left[\frac{T_{11} - T_{10}}{e_{\text{poliuretano}}} \right]$$

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{perlita}} \cdot \left[\frac{T_{12} - T_{11}}{e_{\text{perlita}}} \right]$$

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{lana}} \cdot \left[\frac{T_{13} - T_{12}}{e_{\text{lanapared}}} \right]$$

$$q''_{\text{BasePared}} = -k_{\text{aluminio}} \cdot \left[\frac{T_{14} - T_{13}}{e_{\text{tanqueint}}} \right]$$

$$e_9 = 0$$

$$T_9 = T_{\text{RadSol}}$$

$$e_{10} = e_{\text{hormigon4}}$$

$$T_{10} = T_{10}$$

$$e_{11} = e_{\text{poliuretano}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T_{11} = T_{11}$$

$$e_{12} = e_{\text{perlita}} + e_{\text{poliuretano}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T_{12} = T_{12}$$

$$e_{13} = e_{\text{lanapared}} + e_{\text{perlita}} + e_{\text{poliuretano}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T_{13} = T_{13}$$

$$e_{14} = e_{\text{tanqueint}} + e_{\text{lanapared}} + e_{\text{perlita}} + e_{\text{poliuretano}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T_{14} = T_{14}$$

Gráfica en la pared y en alto pared

$$q''_{\text{Pared}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot \left[\frac{T_{16} - T_{\text{RadSol}}}{e_{\text{hormigon4}}} \right]$$

$$q''_{\text{Pared}} = -k_{\text{perlita}} \cdot \left[\frac{T_{17} - T_{16}}{e_{\text{perlita}}} \right]$$

$$q''_{\text{Pared}} = -k_{\text{lana}} \cdot \left[\frac{T_{18} - T_{17}}{e_{\text{lanapared}}} \right]$$

$$q''_{\text{Pared}} = -k_{\text{aluminio}} \cdot \left[\frac{T_{19} - T_{18}}{e_{\text{tanqueint}}} \right]$$

$$e_{15} = 0$$

$$T_{15} = T_{\text{RadSol}}$$

$$e_{16} = e_{\text{hormigon4}}$$

$$T_{16} = T_{16}$$

$$e_{17} = e_{\text{perlita}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T_{17} = T_{17}$$

$$e_{18} = e_{\text{lanapared}} + e_{\text{perlita}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T_{18} = T_{18}$$

$$e_{19} = e_{\text{tanqueint}} + e_{\text{lanapared}} + e_{\text{perlita}} + e_{\text{hormigon4}}$$

$$T_{19} = T_{19}$$

Gráfica en la cúpula

$$q''_{\text{Cúpula}} = -k_{\text{hormigon}} \cdot \left[\frac{T_{21} - T_{\text{RadSol}}}{e_{\text{hormigon5}}} \right]$$

$$q''_{\text{Cupula}} = -k_{\text{Iana}} \cdot \left[\frac{T_{22} - T_{21}}{e_{\text{IanaCupula}}} \right]$$

$$q''_{\text{Cupula}} = -k_{\text{aluminio}} \cdot \left[\frac{T_{23} - T_{22}}{e_{\text{tanqueint}}} \right]$$

$$e_{20} = 0$$

$$T_{20} = T_{\text{RadSol}}$$

$$e_{21} = e_{\text{hormigon5}}$$

$$T_{21} = T_{21}$$

$$e_{22} = e_{\text{IanaCupula}} + e_{\text{hormigon5}}$$

$$T_{22} = T_{22}$$

$$e_{23} = e_{\text{tanqueint}} + e_{\text{IanaCupula}} + e_{\text{hormigon5}}$$

$$T_{23} = T_{23}$$

Cálculo de BOG generado

Datos del tanque

$$V = 150000$$

$$P1 = 100000$$

$$X_v = 1 \text{ Título de vapor}$$

$$X_l = 0 \text{ Título de líquido}$$

$$X_1 = \frac{m_{\text{vapor1}}}{M_1}$$

$$V_{\text{liquido1}} = V \cdot 0,98$$

$$M_{\text{liquido1}} = V_{\text{liquido1}} \cdot \rho_l$$

$$V_l = v \text{ ['Methane' ; P = P1 ; x = X_l]}$$

$$\rho_l = \rho \text{ ['Methane' ; x = X_l ; P = P1]}$$

$$V_{\text{vapor1}} = V - V_{\text{liquido1}}$$

$$m_{\text{vapor1}} = V_{\text{vapor1}} \cdot \rho_v$$

$$V_v = v \text{ ['Methane' ; P = P1 ; x = X_v]}$$

$$\rho_v = \rho \text{ ['Methane' ; x = X_v ; P = P1]}$$

$$Q_{\text{Balance}} = Q_{\text{Total}} \cdot 24 \cdot 3600 \text{ kJ/día}$$

Balance

$$Q_{\text{Balance}} = M_2 \cdot U_2 - M_1 \cdot U_1 + M_s \cdot H_s$$

Estado 1

$$M_1 = M_{\text{liquido1}} + m_{\text{vapor1}}$$

$$U_1 = u \text{ ['Methane' ; P = P1 ; x = X_1]}$$

Estado 2

$$M_2 = \frac{V}{V_1 + X_2 \cdot [V_v - V_l]}$$

$$U_2 = U_l + X_2 \cdot [U_v - U_l]$$

$$U_l = u \text{ ['Methane' ; P = P1 ; x = X_l]}$$

$$U_v = u \text{ ['Methane' ; P = P1 ; x = X_v]}$$

Estado salida

$$M_s = M_1 - M_2$$

$$H_s = h \text{ ['Methane' ; P = P1 ; x = 1]}$$

Cálculo de volumen de BOG generado por segundo

$$V = M_{\text{liquido2}} \cdot V_l + M_{\text{vapor2}} \cdot V_v$$

$$X_2 = \frac{M_{\text{vapor2}}}{M_2}$$

$$V_{\text{vapor2}} = M_{\text{vapor2}} \cdot V_v$$

$$V_{\text{liquido2}} = V - V_{\text{vapor2}}$$

$$\text{Incremento}_{\text{vapor}} = V_{\text{vapor2}} - V_{\text{vapor1}}$$

Máximo de BOG Generado

$$\text{BOG}_{\text{MAX}} = 0,0005 \cdot V \text{ Es el 0,05\% del volumen del tanque}$$

Calculo de pérdida diaria

$$\text{BOG}_{\text{Generado}} = \frac{\text{Incremento}_{\text{vapor}}}{V} \cdot 100$$

Unit Settings: [kJ]/[K]/[Pa]/[kg]/[degrees]

$$A_{\text{altopared}} = 991,3 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{\text{basepared}} = 1162 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{\text{pared}} = 7541 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{BOG}_{\text{Generado}} = 0,03346 \text{ [\%]}$$

$$\text{coe}_{\text{SB}} = 5,670\text{E-}08$$

$$\text{Cond}_{10} = 5,929 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{12} = 6,757 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{14} = 0,744 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{16} = 6,757 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{18} = 0,744 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_2 = 8,667 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$A_{\text{base}} = 4301 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{\text{cupula}} = 4301 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{\text{Total}} = 18296 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\text{BOG}_{\text{MAX}} = 75 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\text{Cond}_1 = 0,04376 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{11} = 38,46 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{13} = 0,00002927 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{15} = 38,46 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{17} = 0,00002927 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{19} = 38,46 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$$\text{Cond}_{20} = 6,757 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$$

$Cond_{21} = 0,00002927 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Cond_{23} = 16,22 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Cond_3 = 0,3913 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Cond_5 = 8,667 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Cond_7 = 0,02188 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Cond_9 = 0,744 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Conv_2 = 0,0625 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Conv_4 = 0,0625 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Conv_6 = 0,0625 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Conv_8 = 0,0625 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $emi_{hormigon} = 0,93$
 $e_{fieltro} = 0,09 \text{ [m]}$
 $e_{hormigon2} = 0,15 \text{ [m]}$
 $e_{hormigon4} = 1,7 \text{ [m]}$
 $e_{hormigon6} = 0,6 \text{ [m]}$
 $e_{lanapared} = 0,25 \text{ [m]}$
 $e_{poliuretano} = 0,15 \text{ [m]}$
 $h_{aire} = 16 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $h_{gnl} = 199 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Incremento_{Vapor} = 50,18 \text{ [m}^3\text{]}$
 $k_{espuma} = 0,03 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $k_{hormigon} = 2,285 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $k_{perlita} = 0,052 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $M_1 = 6,213E+07 \text{ [kg]}$
 $M_{liquido1} = 6,212E+07 \text{ [kg]}$
 $M_s = 21117 \text{ [kg]}$
 $M_{vapor2} = 5474 \text{ [kg]}$
 $q''_{AltoPared} = 4,051 \text{ [W/m}^2\text{]}$
 $q''_{BasePared} = 3,782 \text{ [W/m}^2\text{]}$
 $q''_{Pared} = 4,177 \text{ [W/m}^2\text{]}$
 $q''_{Total} = 31,9 \text{ [W/m}^2\text{]}$
 $Q_{Total} = 125,5 \text{ [kJ]}$
 $Rad_2 = 1,139 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Rad_4 = 1,269 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $\rho_v = 1,795 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
 $T_{10} = 312,7 \text{ [K]}$
 $T_{12} = 144,8 \text{ [K]}$
 $T_{14} = 119,3 \text{ [K]}$
 $T_{17} = 151,7 \text{ [K]}$
 $T_{19} = 123,5 \text{ [K]}$
 $T_{21} = 313,6 \text{ [K]}$
 $T_{23} = 141,3 \text{ [K]}$
 $T_4 = 198,7 \text{ [K]}$
 $T_6 = 114,8 \text{ [K]}$
 $T_8 = 114,6 \text{ [K]}$
 $T_{baseParedTk} = 116 \text{ [K]}$
 $T_{cupulaTk} = 133 \text{ [K]}$
 $T_{paredTk} = 120 \text{ [K]}$
 $T_{tierra} = 283,6 \text{ [K]}$
 $U_2 = -911,7 \text{ [kJ/kg]}$
 $U_v = -456,1 \text{ [kJ/kg]}$
 $V_1 = 0,002366 \text{ [m}^3\text{]}$
 $V_{liquido2} = 146950 \text{ [m}^3\text{]}$
 $V_{vapor1} = 3000 \text{ [m}^3\text{]}$
 $X_1 = 0,00008666$
 $X_l = 0$

$Cond_{22} = 0,1751 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Cond_{24} = 0,00002927 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Cond_4 = 0,06565 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Cond_6 = 0,3913 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Cond_8 = 0,00002927 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Conv_1 = 0,005025 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Conv_3 = 0,005025 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Conv_5 = 0,005025 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Conv_7 = 0,02662 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $Conv_9 = 0,02662 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $e_{espuma} = 0,26 \text{ [m]}$
 $e_{hormigon1} = 0,1 \text{ [m]}$
 $e_{hormigon3} = 0,05 \text{ [m]}$
 $e_{hormigon5} = 0,4 \text{ [m]}$
 $e_{lanacupula} = 0,6 \text{ [m]}$
 $e_{perlita} = 2 \text{ [m]}$
 $e_{tanqueint} = 0,006 \text{ [m]}$
 $h_{BOG} = 37,56 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $H_s = -400,4 \text{ [kJ/kg]}$
 $K_{aluminio} = 205 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $K_{fieltro} = 0,23 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $K_{lana} = 0,037 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $K_{poliuretano} = 0,0253 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $M_2 = 6,210E+07 \text{ [kg]}$
 $M_{liquido2} = 6,210E+07 \text{ [kg]}$
 $m_{vapor1} = 5384 \text{ [kg]}$
 $P_1 = 100000 \text{ [Pa]}$
 $q''_{Base} = 9,259 \text{ [W/m}^2\text{]}$
 $q''_{Cupula} = 10,63 \text{ [W/m}^2\text{]}$
 $q''_{ParedTotal} = 12,01 \text{ [W/m}^2\text{]}$
 $Q_{Balance} = 1,083E+07 \text{ [kJ/día]}$
 $Rad_1 = 1,104 \text{ [kJ]}$
 $Rad_3 = 1,196 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$
 $\rho_l = 422,6 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
 $T_1 = 283,2 \text{ [K]}$
 $T_{11} = 290,3 \text{ [K]}$
 $T_{13} = 119,3 \text{ [K]}$
 $T_{16} = 312,4 \text{ [K]}$
 $T_{18} = 123,5 \text{ [K]}$
 $T_2 = 202,9 \text{ [K]}$
 $T_{22} = 141,3 \text{ [K]}$
 $T_3 = 199,3 \text{ [K]}$
 $T_5 = 118,5 \text{ [K]}$
 $T_7 = 114,6 \text{ [K]}$
 $T_{altoparedTk} = 126 \text{ [K]}$
 $T_{baseTk} = 109 \text{ [K]}$
 $T_{losa} = 278 \text{ [K]}$
 $T_{RadSol} = 315,5 \text{ [K]}$
 $U_1 = -911,7 \text{ [kJ/kg]}$
 $U_l = -911,7 \text{ [kJ/kg]}$
 $V = 150000 \text{ [m}^3\text{]}$
 $V_{liquido1} = 147000 \text{ [m}^3\text{]}$
 $V_v = 0,5572 \text{ [m}^3\text{]}$
 $V_{vapor2} = 3050 \text{ [m}^3\text{]}$
 $X_2 = 0,00008814$
 $X_v = 1$

Arrays Table

e_i	T_i
[m]	[K]

Arrays Table

	e_i	T_i
	[m]	[K]
0	0	283,6
1	0,1	283,2
2	0,36	202,9
3	0,45	199,3
4	0,6	198,7
5	0,86	118,5
6	0,95	114,8
7	1	114,6
8	1,006	114,6
9	0	315,5
10	1,7	312,7
11	1,85	290,3
12	3,85	144,8
13	4,1	119,3
14	4,106	119,3
15	0	315,5
16	1,7	312,4
17	3,7	151,7
18	3,95	123,5
19	3,956	123,5
20	0	315,5
21	0,4	313,6
22	1	141,3
23	1,006	141,3

There are a total of 182 equations in 8 blocks in the Main program.

Block	Rel. Res.	Abs. Res.	Equation
0	0,000E+00	0,000E+00	T_losa=278
0	0,000E+00	0,000E+00	T_tierra=283,58
0	0,000E+00	0,000E+00	T_RadSol=315,5
0	0,000E+00	0,000E+00	T_baseTk=109
0	0,000E+00	0,000E+00	T_baseParedTk=116
0	0,000E+00	0,000E+00	T_paredTk=120
0	0,000E+00	0,000E+00	T_altoparedTk=126
0	0,000E+00	0,000E+00	T_cupulaTk=133
0	0,000E+00	0,000E+00	e_hormigon1=0,1
0	0,000E+00	0,000E+00	e_hormigon2=0,15
0	0,000E+00	0,000E+00	e_hormigon3=0,05
0	0,000E+00	0,000E+00	e_hormigon4=1,7
0	0,000E+00	0,000E+00	e_hormigon5=0,4
0	0,000E+00	0,000E+00	e_hormigon6=0,6
0	0,000E+00	0,000E+00	e_espuma=0,26
0	0,000E+00	0,000E+00	e_filtro=0,09
0	0,000E+00	0,000E+00	e_tanqueint=0,006
0	0,000E+00	0,000E+00	e_perlita=2
0	0,000E+00	0,000E+00	e_poliuretano=0,15
0	0,000E+00	0,000E+00	e_lanapared=0,25
0	0,000E+00	0,000E+00	e_lanacupula=0,6
0	0,000E+00	0,000E+00	k_hormigon=2,285
0	0,000E+00	0,000E+00	k_espuma=0,03
0	0,000E+00	0,000E+00	k_filtro=0,23
0	0,000E+00	0,000E+00	k_aluminio=205
0	0,000E+00	0,000E+00	k_perlita=0,052
0	0,000E+00	0,000E+00	k_lana=0,037
0	0,000E+00	0,000E+00	k_poliuretano=0,0253
0	0,000E+00	0,000E+00	h_aire=16

```

0 0,000E+00 0,000E+00 h_gnl=199
0 0,000E+00 0,000E+00 h_BOG=37,56
0 0,000E+00 0,000E+00 emi_hormigon=0,93
0 0,000E+00 0,000E+00 coe_SB=0,00000005670373
0 0,000E+00 0,000E+00 e[0]=0
0 0,000E+00 0,000E+00 e[9]=0
0 0,000E+00 0,000E+00 e[15]=0
0 0,000E+00 0,000E+00 e[20]=0
0 0,000E+00 0,000E+00 V=150000
0 0,000E+00 0,000E+00 P1=100000
0 0,000E+00 0,000E+00 X_v=1
0 0,000E+00 0,000E+00 X_l=0
0 0,000E+00 0,000E+00 A_base=(37)*(37)*3,1416
0 0,000E+00 0,000E+00 A_basepared=2*3,1416*37*5
0 0,000E+00 0,000E+00 A_pared=2*3,1416*37*(37,436-5)
0 0,000E+00 0,000E+00 A_altopared=2*3,1416*37*(41,7-37,436)
0 0,000E+00 0,000E+00 A_cupula=A_base
0 0,000E+00 0,000E+00 A_Total=A_pared+A_altopared+A_basepared+A_base+A_cupula
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_1=e_hormigon1/(k_hormigon)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_2=e_espuma/(k_espuma)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_3=e_filtro/(k_filtro)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_4=e_hormigon2/(k_hormigon)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_5=Cond_2
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_6=Cond_3
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_7=e_hormigon3/(k_hormigon)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_8=e_tanqueint/(k_aluminio)
0 0,000E+00 0,000E+00 Conv_1=(1/h_gnl)
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_Base=(T_losa-T_baseTk)/(Cond_1+Cond_2+Cond_3+Cond_4+Cond_5+Cond_6+Cond_7+Cond_8+
0 0,000E+00 0,000E+00 Conv_2=(1/h_aire)
0 0,000E+00 0,000E+00 Rad_1=1/(emi_hormigon*coe_SB*((T_RadSol^2-T_baseparedTK^2)*(T_RadSol-T_baseparedTK)))
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_9=e_hormigon4/(k_hormigon)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_10=e_poliuretano/(k_poliuretano)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_11=e_perlita/(k_perlita)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_12=e_lanapared/(k_lana)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_13=e_tanqueint/(k_aluminio)
0 0,000E+00 0,000E+00 Conv_3=(1/h_gnl)
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_BasePared=(T_RadSol-T_baseParedTk)/(1/((Conv_2+Rad_1))+Cond_9+Cond_10+Cond_11+Cond_1
0 0,000E+00 0,000E+00 Conv_4=(1/h_aire)
0 0,000E+00 0,000E+00 Rad_2=1/(emi_hormigon*coe_SB*((T_RadSol^2-T_paredTK^2)*(T_RadSol-T_paredTK)))
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_14=e_hormigon4/(k_hormigon)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_15=e_perlita/(k_perlita)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_16=e_lanapared/(k_lana)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_17=e_tanqueint/(k_aluminio)
0 0,000E+00 0,000E+00 Conv_5=(1/h_gnl)
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_Pared=(T_RadSol-T_paredTk)/(1/((Conv_4+Rad_2))+Cond_14+Cond_15+Cond_16+Cond_17+Conv_
0 0,000E+00 0,000E+00 Conv_6=(1/h_aire)
0 0,000E+00 0,000E+00 Rad_3=1/(emi_hormigon*coe_SB*((T_RadSol^2-T_altoparedTK^2)*(T_RadSol-T_altoparedTK)))
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_18=e_hormigon4/(k_hormigon)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_19=e_perlita/(k_perlita)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_20=e_lanapared/(k_lana)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_21=e_tanqueint/(k_aluminio)
0 0,000E+00 0,000E+00 Conv_7=(1/h_BOG)
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_AltoPared=(T_RadSol-T_altoparedTk)/(1/((Conv_6+Rad_3))+Cond_18+Cond_19+Cond_20+Cond_21+
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_ParedTotal=q"_BasePared+q"_Pared+q"_AltoPared
0 0,000E+00 0,000E+00 Conv_8=(1/h_aire)
0 0,000E+00 0,000E+00 Rad_4=1/(emi_hormigon*coe_SB*((T_RadSol^2-T_cupulaTK^2)*(T_RadSol-T_cupulaTK)))
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_22=e_hormigon5/(k_hormigon)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_23=e_lanacupula/(k_lana)
0 0,000E+00 0,000E+00 Cond_24=e_tanqueint/(k_aluminio)
0 0,000E+00 0,000E+00 Conv_9=(1/h_BOG)

```

```

0 0,000E+00 0,000E+00 q"_Cupula=(T_RadSol-T_cupulaTk)/(1/((Conv_8+Rad_4))+Cond_22+Cond_23+Cond_24+Conv_9)
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_Total=q"_Base+q"_ParedTotal+q"_Cupula
0 0,000E+00 0,000E+00 Q_Total=((q"_base*A_base)+(q"_basepared*A_basepared)+(q"_pared*A_Pared)+(q"_Altopared*A_altopa
0 2,904E-17 -2,689E-16 q"_Base=-k_hormigon*((T_1-T_tierra)/e_hormigon1)
0 9,368E-20 8,674E-19 q"_Base=-k_espuma*((T_2-T_1)/e_espuma)
0 1,780E-18 -1,648E-17 q"_Base=-k_fieltro*((T_3-T_2)/e_fieltro)
0 6,183E-18 -5,725E-17 q"_Base=-k_hormigon*((T_4-T_3)/e_hormigon2)
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_Base=-k_espuma*((T_5-T_4)/e_espuma)
0 9,368E-20 8,674E-19 q"_Base=-k_fieltro*((T_6-T_5)/e_fieltro)
0 5,152E-18 4,770E-17 q"_Base=-k_hormigon*((T_7-T_6)/e_hormigon3)
0 1,517E-15 -1,404E-14 q"_Base=-k_aluminio*((T_8-T_7)/e_tanqueint)
0 0,000E+00 0,000E+00 T[0]=T_tierra
0 0,000E+00 0,000E+00 e[1]=e_hormigon1
0 0,000E+00 0,000E+00 T[1]=T_1
0 0,000E+00 0,000E+00 e[2]=e_espuma+e_hormigon1
0 0,000E+00 0,000E+00 T[2]=T_2
0 0,000E+00 0,000E+00 e[3]=e_fieltro+e_espuma+e_hormigon1
0 0,000E+00 0,000E+00 T[3]=T_3
0 0,000E+00 0,000E+00 e[4]=e_hormigon2+e_fieltro+e_espuma+e_hormigon1
0 0,000E+00 0,000E+00 T[4]=T_4
0 0,000E+00 0,000E+00 e[5]=e_espuma+e_hormigon2+e_fieltro+e_espuma+e_hormigon1
0 0,000E+00 0,000E+00 T[5]=T_5
0 0,000E+00 0,000E+00 e[6]=e_fieltro+e_espuma+e_hormigon2+e_fieltro+e_espuma+e_hormigon1
0 0,000E+00 0,000E+00 T[6]=T_6
0 0,000E+00 0,000E+00 e[7]=e_hormigon3+e_fieltro+e_espuma+e_hormigon2+e_fieltro+e_espuma+e_hormigon1
0 0,000E+00 0,000E+00 T[7]=T_7
0 0,000E+00 0,000E+00 e[8]=e_tanqueint+e_hormigon3+e_fieltro+e_espuma+e_hormigon2+e_fieltro+e_espuma+e_hormigon1
0 0,000E+00 0,000E+00 T[8]=T_8
0 3,383E-18 -1,279E-17 q"_BasePared=-k_hormigon*((T_10-T_Radsol)/e_hormigon4)
0 1,147E-19 -4,337E-19 q"_BasePared=-k_poliuretano*((T_11-T_10)/e_poliuretano)
0 5,734E-20 -2,168E-19 q"_BasePared=-k_perlita*((T_12-T_11)/e_perlita)
0 5,734E-20 2,168E-19 q"_BasePared=-k_lana*((T_13-T_12)/e_lanapared)
0 1,279E-14 4,837E-14 q"_BasePared=-k_aluminio*((T_14-T_13)/e_tanqueint)
0 0,000E+00 0,000E+00 T[9]=T_radsol
0 0,000E+00 0,000E+00 e[10]=e_hormigon4
0 0,000E+00 0,000E+00 T[10]=T_10
0 0,000E+00 0,000E+00 e[11]=e_poliuretano+e_hormigon4
0 0,000E+00 0,000E+00 T[11]=T_11
0 0,000E+00 0,000E+00 e[12]=e_perlita+e_poliuretano+e_hormigon4
0 0,000E+00 0,000E+00 T[12]=T_12
0 0,000E+00 0,000E+00 e[13]=e_lanapared+e_perlita+e_poliuretano+e_hormigon4
0 0,000E+00 0,000E+00 T[13]=T_13
0 0,000E+00 0,000E+00 e[14]=e_tanqueint+e_lanapared+e_perlita+e_poliuretano+e_hormigon4
0 0,000E+00 0,000E+00 T[14]=T_14
0 2,076E-19 -8,674E-19 q"_Pared=-k_hormigon*((T_16-T_Radsol)/e_hormigon4)
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_Pared=-k_perlita*((T_17-T_16)/e_perlita)
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_Pared=-k_lana*((T_18-T_17)/e_lanapared)
0 8,391E-15 3,505E-14 q"_Pared=-k_aluminio*((T_19-T_18)/e_tanqueint)
0 0,000E+00 0,000E+00 T[15]=T_radsol
0 0,000E+00 0,000E+00 e[16]=e_hormigon4
0 0,000E+00 0,000E+00 T[16]=T_16
0 0,000E+00 0,000E+00 e[17]=e_perlita+e_hormigon4
0 0,000E+00 0,000E+00 T[17]=T_17
0 0,000E+00 0,000E+00 e[18]=e_lanapared+e_perlita+e_hormigon4
0 0,000E+00 0,000E+00 T[18]=T_18
0 0,000E+00 0,000E+00 e[19]=e_tanqueint+e_lanapared+e_perlita+e_hormigon4
0 0,000E+00 0,000E+00 T[19]=T_19
0 5,549E-18 -5,898E-17 q"_Cupula=-k_hormigon*((T_21-T_Radsol)/e_hormigon5)
0 0,000E+00 0,000E+00 q"_Cupula=-k_lana*((T_22-T_21)/e_lanacupula)
0 2,215E-14 -2,354E-13 q"_Cupula=-k_aluminio*((T_23-T_22)/e_tanqueint)

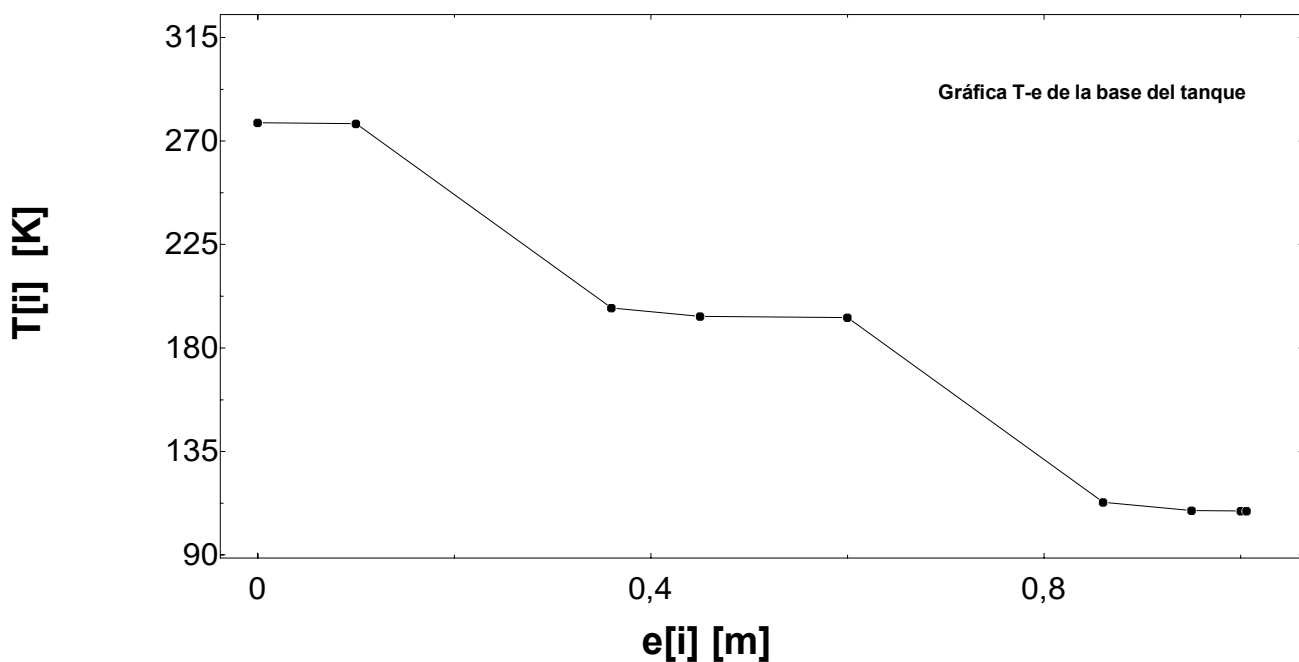
```

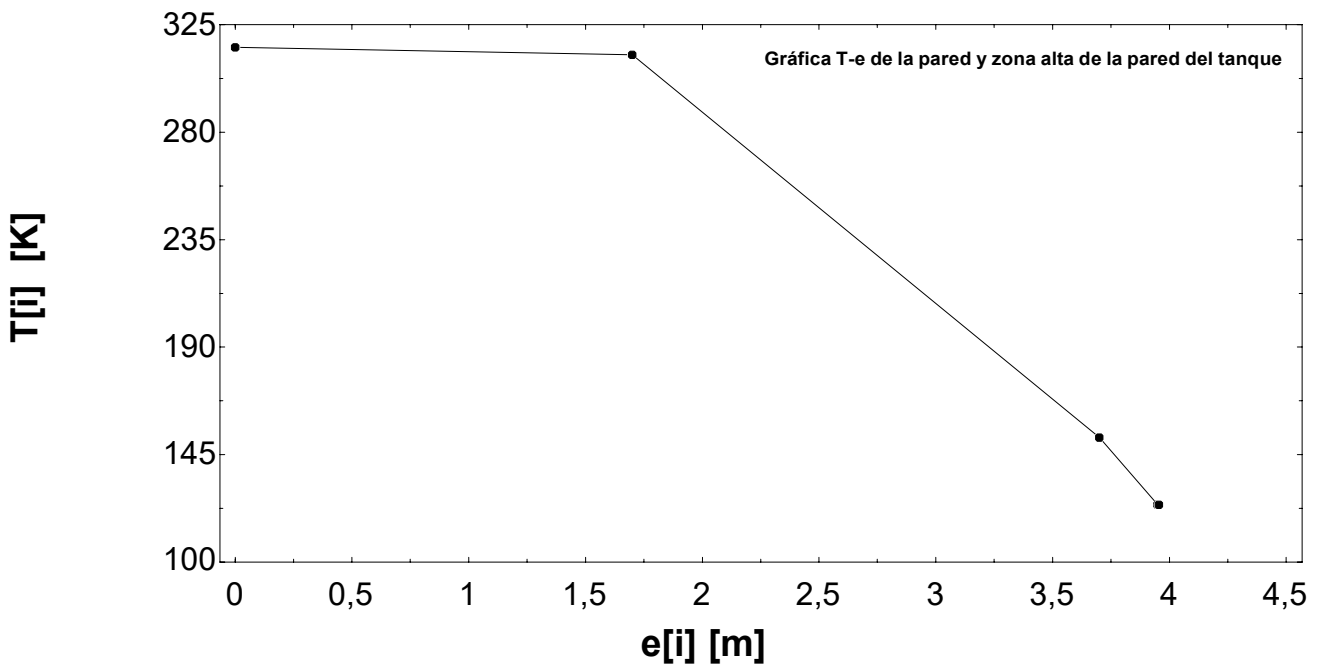
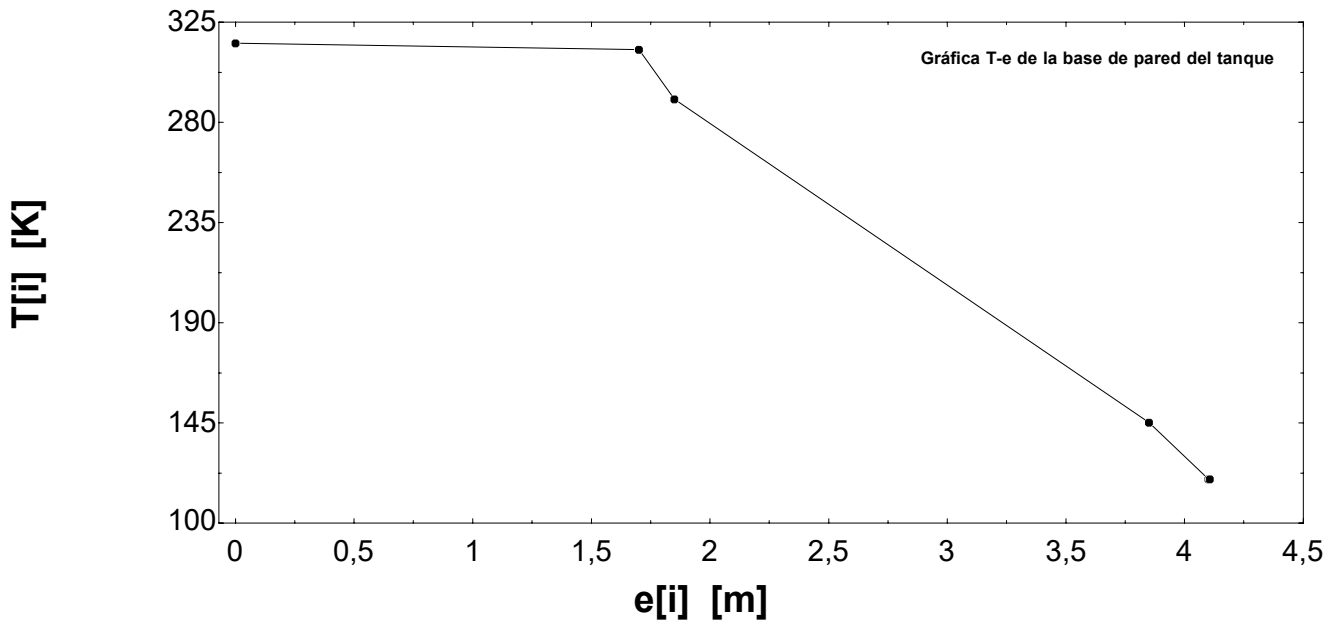
```

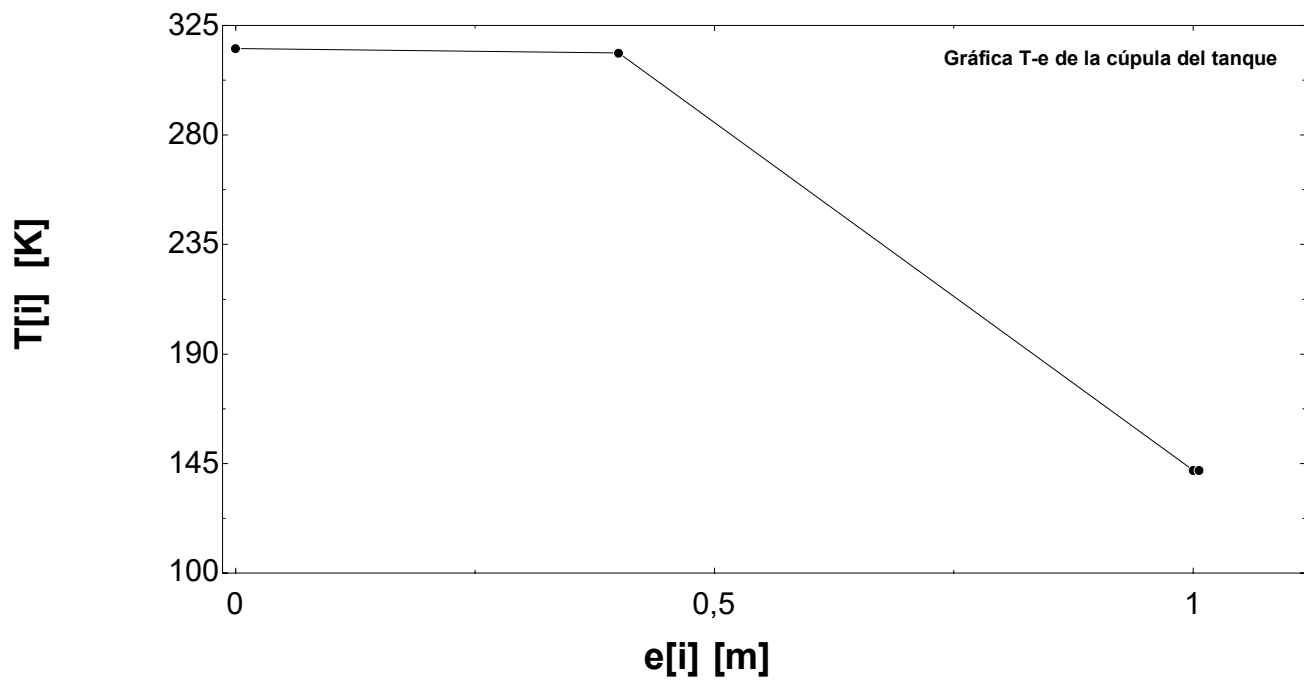
0  0,000E+00  0,000E+00  T[20]=T_radsol
0  0,000E+00  0,000E+00  e[21]=e_hormigon5
0  0,000E+00  0,000E+00  T[21]=T_21
0  0,000E+00  0,000E+00  e[22]=e_lanacupula+e_hormigon5
0  0,000E+00  0,000E+00  T[22]=T_22
0  0,000E+00  0,000E+00  e[23]=e_tanqueint+e_lanacupula+e_hormigon5
0  0,000E+00  0,000E+00  T[23]=T_23
0  0,000E+00  0,000E+00  V_liquido1=V*0,98
0  0,000E+00  0,000E+00  V_l=VOLUME(Methane;P=P1;X=X_l)
0  0,000E+00  0,000E+00  rho_l=DENSITY(Methane;X=X_l;P=P1)
0  0,000E+00  0,000E+00  V_vapor1=V-V_liquido1
0  0,000E+00  0,000E+00  V_v=VOLUME(Methane;P=P1;X=X_v)
0  0,000E+00  0,000E+00  rho_v=DENSITY(Methane;X=X_v;P=P1)
0  0,000E+00  0,000E+00  Q_Balance=Q_Total*24*3600
0  0,000E+00  0,000E+00  U_l=INTENERGY(Methane;P=P1;X=X_l)
0  0,000E+00  0,000E+00  U_v=INTENERGY(Methane;P=P1;X=X_v)
0  0,000E+00  0,000E+00  H_s=ENTHALPY(Methane;P=P1;X=1)
0  0,000E+00  0,000E+00  BOG_MAX=0,0005*V
0  0,000E+00  0,000E+00  M_liquido1=V_liquido1*rho_l
0  0,000E+00  0,000E+00  M_vapor1=V_vapor1*rho_v
0  0,000E+00  0,000E+00  M_1=M_liquido1+M_vapor1
0  0,000E+00  0,000E+00  X_1=m_vapor1/M_1
0  0,000E+00  0,000E+00  U_1=INTENERGY(Methane;P=P1;X=X_1)
1  1,031E-09  1,117E-02  Q_Balance=(M_2*U_2)-(M_1*U_1)+(M_s*H_s)
1  9,072E-11  -1,360E-05  M_2=V/(V_l+X_2*(V_v-V_l))
1  3,162E-15  -2,882E-12  U_2=U_l+X_2*(U_v-U_l)
1  4,543E-18  -9,592E-14  M_s=M_1-M_2
2  0,000E+00  0,000E+00  X_2=M_vapor2/M_2
3  0,000E+00  0,000E+00  V=(M_liquido2*V_l)+(M_vapor2*V_v)
4  0,000E+00  0,000E+00  V_vapor2=M_vapor2*V_v
5  0,000E+00  0,000E+00  V_liquido2=V-V_vapor2
6  0,000E+00  0,000E+00  Incremento_Vapor=V_vapor2-V_vapor1
7  0,000E+00  0,000E+00  BOG_Generado=(Incremento_Vapor/V)*100

```

Variables shown in bold font are determined by the equation(s) in each block.









UNIVERSIDADE DA CORUÑA



MÁSTER EN ENXEÑARÍA MARIÑA

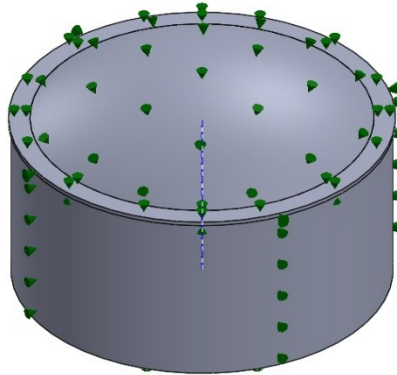
ANEXO II

ANÁLISIS TÉRMICO DEL TANQUE

SOLID WORKS

JOSÉ MIGUEL MAHÍA PRADOS

Información de modelo



Nombre del modelo: Tanque de Regasificación
Configuración actual: Predeterminado

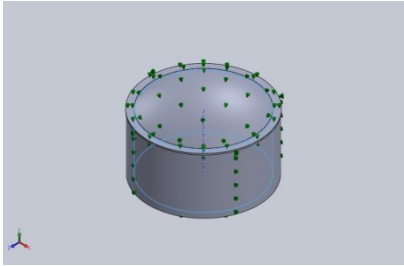
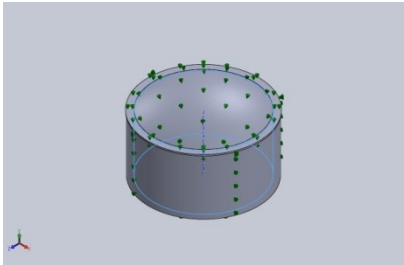
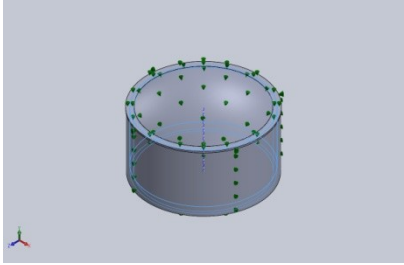
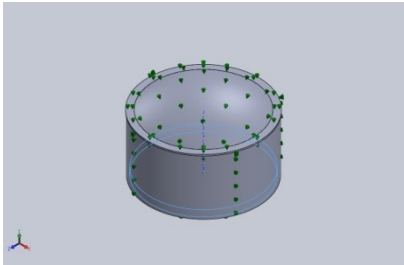
Propiedades de estudio

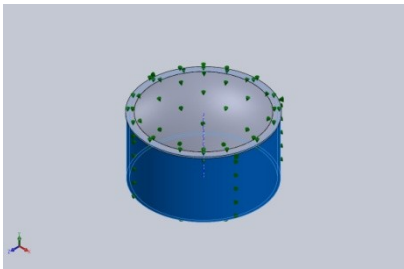
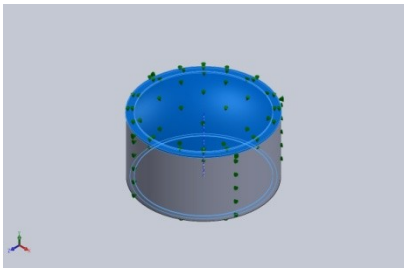
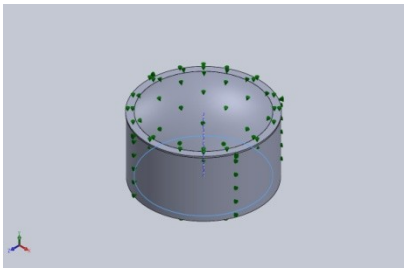
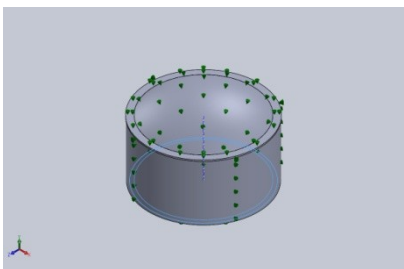
Nombre de estudio	Análisis de transferencia de calor
Tipo de análisis	Térmico (Estado estable)
Tipo de malla	Malla sólida
Tipo de solver	FFEPlus
Tipo de solución	Estado estable

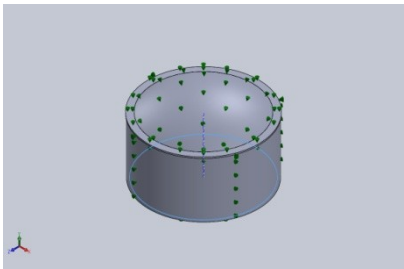
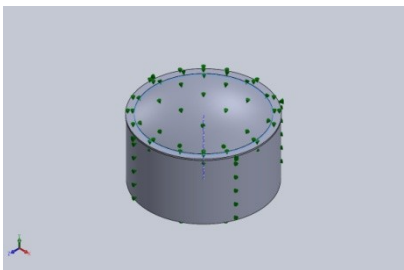
Unidades

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

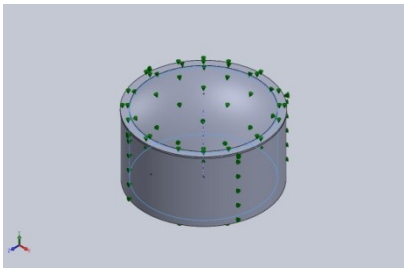
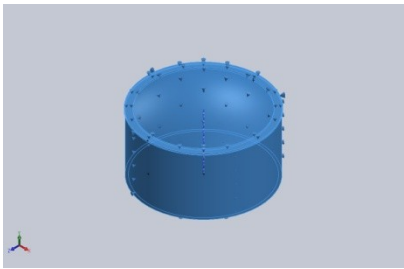
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: 3.0205 (EN-AW 1200)</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 204 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 940 J/(kg.K)</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje Tanques-1/Pieza1 - Aluminio-1),</p> <p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje de fondo-4/Pieza0 - Tanque-1),</p> <p>Sólido 1(Cúpula2)(Pieza 1 - Cúpula Aluminio-1)</p>
	<p>Nombre: Lana</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 0,037 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 700 J/(kg.K)</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje Tanques-1/Pieza2 - Manto-1)</p>
	<p>Nombre: Perlita</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 0,052 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 837 J/(kg.K)</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje Tanques-1/Pieza3 - Perlita-1),</p> <p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje Tanques-1/Pieza4 - Perlita suprapoliuretano-1)</p>
	<p>Nombre: Poliuretano</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 0,0253 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 1.200 J/(kg.K)</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje Tanques-1/Pieza4 - Poliuretano-1)</p>

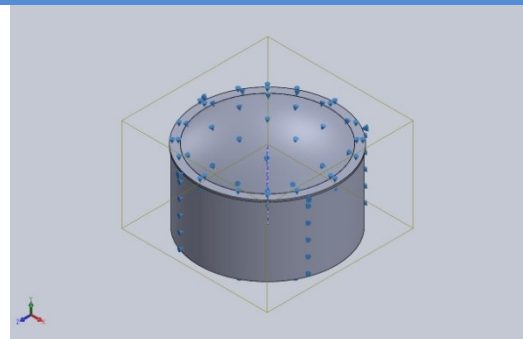
	<p>Nombre: Hormigon</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 2,285 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 1.050 J/(kg.K)</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje Tanques-1/Pieza5 - Hormigon-1)</p>
	<p>Nombre: Hormigon</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 2,285 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 1.500 J/(kg.K)</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje de fondo-4/Pieza1 - Hormigón-1), Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje de fondo-4/Pieza4 - Hormigon nivel-2), Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje de fondo-4/Pieza5 - Hormigón-2), Sólido 1(Cúpula2)(Pieza 3 - Cúpula hormigón-2), Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Pieza 4 - Anillo de hormigón-1)</p>
	<p>Nombre: FVidrio</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 0,03 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 840 J/(kg.K)</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje de fondo-4/Pieza2 - Vidrio-1)</p>
	<p>Nombre: Filtro</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 0,09 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 1.386 J/(kg.K)</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje de fondo-4/Pieza3 - Filtro-1), Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje de fondo-4/Pieza7 - Filtro-2), Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje de fondo-4/Pieza8 - Hormigón de nivel-2)</p>

	<p>Nombre: FVidrio</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 0,03 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 1.386 J/(kg.K)</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Ensamblaje de fondo-4/Pieza6 - Vidrio-2)</p>
	<p>Nombre: Lana</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Conductividad térmica: 0,037 W/(m.K)</p> <p>Calor específico: 1.386 J/(kg.K)</p> <p>Densidad: 1.020 kg/m³</p>	<p>Sólido 1(Cúpula2)(Pieza 2 - Cúpula fibra-1)</p>

Cargas térmicas

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Temperatura-1		<p>Entidades: 3 cara(s)</p> <p>Temperatura: -164 Celsius</p>
Convección-1		<p>Entidades: 6 cara(s)</p> <p>Coefficiente de convección: 25 W/(m².K)</p> <p>Temperatura ambiente: 315,5 Kelvin</p>

Información de interacción

Interacción	Imagen de interacción	Propiedades de interacción
Interacción global		<p>Tipo: Unión rígida</p> <p>Componentes: 1 componente(s)</p> <p>Opciones: Mallado independiente</p>

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura de combinado
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	16 Puntos
Tamaño máximo de elemento	8.576,83 mm
Tamaño mínimo del elemento	8.576,83 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	24786
Número total de elementos	11441
Cociente máximo de aspecto	27.982
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	1,08
El porcentaje de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	79,8
Porcentaje de elementos distorsionados	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:09



Resultados del estudio

