



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

## USO DE MATERIALES COMPUESTOS EN LOS SISTEMAS DE TUBERÍAS EN LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE

Autor: Antonio Juan Manjón-Cabeza Sánchez

Director: Pablo de la Llana Sebastián

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
“Uso de materiales compuestos en los sistemas de tuberías en las plantas de generación  
de hidrógeno verde”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

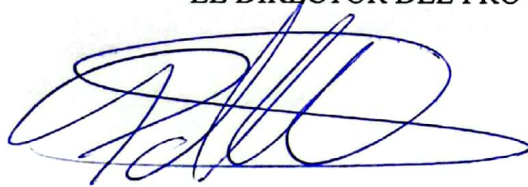


Fdo.: Antonio Juan Manjón-Cabeza Sánchez

Fecha: 16./08./2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Pablo de la Llana Sebastián

Fecha: 16./08./2022



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

## USO DE MATERIALES COMPUESTOS EN LOS SISTEMAS DE TUBERÍAS EN LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE

Autor: Antonio Juan Manjón-Cabeza Sánchez

Director: Pablo de la Llana Sebastián

Madrid

# USO DE MATERIALES COMPUESTOS EN LOS SISTEMAS DE TUBERÍAS EN LAS PLANTAS DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE

**Autor: Manjón-Cabeza Sánchez, Antonio Juan.**

Director: de la Llana Sebastián, Pablo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

Con la realización de este proyecto se ha pretendido realizar una recopilación de toda la información técnica referente a las distintas variantes de tuberías que utilizan tecnología composite: GRE (Epoxi reforzado con fibra de vidrio), GRPU (Poliéster reforzado con fibra de vidrio) y GRVE (Viniléster reforzado con fibra de vidrio); de forma que sirva de guía referencial para los departamentos de ingeniería que tienen el cometido de diseñar las canalizaciones de los diferentes servicios que intervienen en un planta industrial, para que puedan acceder de forma más sencilla a conocer las características y las ventajas que este tipo de tuberías pueden ofrecer, donde y como pueden usarse, cuando su uso es apto, y plantearlas como una opción real para sustituir a las tuberías de acero.

**Palabras clave:** Hidrógeno, Materiales Compuestos, Tuberías

### **Introducción:**

Este proyecto consiste en el estudio del uso de materiales alternativos al acero; concretamente materiales compuestos, para las canalizaciones de los servicios de tuberías que intervienen en una planta de generación de hidrógeno alimentada por fuentes de energía renovables, el cual pretende convertirse en el combustible alternativo a los combustibles fósiles.

El estudio de materiales alternativos al acero en los diferentes servicios, en función del fluido, presiones y temperaturas podría ser utilizado como base para otras plantas de generación a partir de fuentes de energía renovables con servicios similares.

El uso de materiales compuestos en las canalizaciones de estos procesos tendría como objetivo mejorar la inversión inicial y el “Life Cycle Cost” de éstas, al mismo tiempo que contribuiría a la reducción de la huella de CO<sub>2</sub>, debido fundamentalmente al menor aporte

energético que se necesita tanto para la obtención de las materias primas necesarias para su fabricación como en el proceso de producción de dichas tuberías.

### **Descripción del proyecto:**

Este proyecto se basa fundamentalmente en el análisis de los diferentes sistemas de tuberías que intervienen en una planta de generación de hidrógeno verde, e identificar las líneas en las cuales es posible utilizar como alternativa al acero (material a partir del cual están realizados actualmente la gran mayoría de las tuberías) los materiales con tecnología composite, o también llamados PRFV (Plástico reforzado con fibra de vidrio).

Utilizar materiales compuestos como alternativa al acero en las distintas tuberías que intervienen en una planta industrial (aunque este proyecto se centra concretamente en las plantas de generación de hidrógeno verde) supone una gran ventaja en costes durante la vida útil de la tubería; ya que, tal y como se desarrollará en los distintos capítulos que contiene el proyecto, la principal ventaja que presentan las tuberías de PRFV frente a las tuberías de acero es que las tuberías de PRFV son inmunes a la corrosión, tanto interna como externamente (siempre y cuando los parámetros de diseño sean aptos para los parámetros de operación en los cuales va a trabajar la tubería), además de ahorrar en los costes asociados a la fabricación y a la instalación, tal y como se desarrollará a lo largo del proyecto.

### **Resultados:**

Tras la realización del análisis de todas las líneas que contienen los diferentes procesos que intervienen en una planta de generación de hidrógeno verde (proceso de producción, proceso de purificación, proceso de almacenamiento y proceso de refrigeración), se obtiene que, debido a las altas presiones y temperaturas máximas de operación que tienen lugar en ciertos procesos de la planta, se podrían sustituir las tuberías de acero por tuberías de GRE (ya que dentro de los PRFV, es el cual cumple en mayor rango los parámetros fundamentales) principalmente en el proceso de producción y en el proceso de refrigeración de la planta. Para el caso del proceso de purificación y el proceso de almacenamiento, no se podrían utilizar las tuberías de GRE, dado que generalmente se

trabaja únicamente con fluido gaseoso y las presiones de operación son demasiado elevadas, tal y como se desarrollará durante el proyecto.

No obstante, actualmente empresas como NOV FGS y FPI industries están trabajando en un nuevo diseño de tubería PRFV que permita el transporte de hidrógeno gas a altas presiones, la cual se explicará con más detalle a lo largo del proyecto.

### **Conclusiones:**

Como conclusión, mediante la utilización de tuberías de GRP se contribuye enormemente a la reducción de la huella de CO<sub>2</sub> y al mantenimiento del ecosistema en el cual actualmente vivimos; dado que, además de suponer un ahorro en los costes asociados a la inversión inicial, a la fabricación y a la instalación, a las tuberías de PRFV no les afecta la corrosión y garantizan como mínimo una vida útil comprendida entre 25 y 40 años, sin la necesidad de la realización de mantenimientos preventivos y correctivos; por lo que, al consumir menos energía durante su vida útil, las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera se reducen considerablemente.

Por todo lo expuesto anteriormente, la transición hacia el uso de tuberías con tecnología composite en los diferentes entornos que rodean nuestro planeta supondrá un avance hacia un futuro más verde y renovable.

No obstante, actualmente las tuberías de PRFV no pueden utilizarse en todas las líneas que componen el sistema de tuberías de una planta de generación de hidrógeno verde, debido a las condiciones de presión y temperatura de operación necesarias en ciertos tramos del recorrido y del fluido que circula en su interior, tal y como se desarrollará a lo largo del proyecto.

# USE OF COMPOSITE MATERIALS IN THE PIPING SYSTEMS OF GREEN HYDROGEN GENERATION PLANTS

**Author: Manjón-Cabeza Sánchez, Antonio Juan.**

Supervisor: de la Llana Sebastián, Pablo.

Collaborating entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

The aim of this project is to compile all the technical information about the different types of pipes which uses composite technology: GRE (Glass Fiber Reinforced Epoxy), GRPU (Glass Fiber Reinforced Polyester) and GRVE (Glass Fiber Reinforced Vinylester); to become a reference guide for the engineering departments that have the task of designing the piping of the different services involved in an industrial plant, so that they can access in a simpler way to know the characteristics and the advantages that this type of pipes can offer, where and how they can be used, when their use is suitable, and raise them as a real option to replace steel pipes.

**Keywords:** Hydrogen, Composite Materials, Pipes

## Introduction:

This project consists in the study of using alternative materials instead of using steel; specifically composite materials, for the piping services involved in a hydrogen generation plant powered by renewable energy sources, which aims to become the alternative fuel to fossil fuels.

This study of using alternative materials instead of steel in the different services, depending on the fluid, pressures and temperatures could be used as a basis for other renewable energy generation plants with similar services.

The use of composite materials in the piping of these processes would aim to improve the initial investment and the "Life Cycle Cost" of these, while contributing to the reduction of the CO<sub>2</sub> footprint, mainly due to the lower energy input required in the obtainment of the raw materials necessary for their manufacture and in the production process of these pipes.

## **Project description:**

This project is mainly based on the analysis of the different piping systems involved in a green hydrogen generation plant, and to identify the lines in which it is possible to use composite technology materials, or also called GRP (Glass Fiber Reinforced Plastic), as an alternative to steel (the material from which most of the pipes are currently made).

The use of composite materials as an alternative to steel in the different pipes involved in an industrial plant (although this project focuses specifically on green hydrogen generation plants) represents a great advantage during “Life Cycle Cost of the pipe; since, as it will be developed in the different chapters of the project, the main advantage of GRP pipes over steel pipes is that GRP pipes are corrosion free, both internally and externally (as long as the design parameters are suitable for the operating parameters in which the pipe will work), in addition to the cost saving associated with the manufacture and the installation, as will be developed throughout the project.

## **Results:**

After the analysis of all the lines included on the different processes involved in a green hydrogen generation plant (production process, purification process, storage process and refrigeration process), it is obtained that, due to the high pressures and operating temperatures that take place in certain processes of the plant, steel pipes could be replaced by GRE pipes (since within the GRP, GRE is the one that meets a wider range of the fundamental parameters) mainly in the production process and in the refrigeration process of the plant. In the case of the purification process and the storage process, GRE pipes could not be used, since they generally work only with gaseous fluid and the operating pressures are too high, as it will be developed during the project.

However, companies such as NOV FGS and FPI industries are currently working on a new GRP pipe design that allows the transport of hydrogen gas at high pressures, which will be explained in more detail throughout the project.



## **Conclusions:**

In conclusion, the use of GRP pipes contributes enormously in the reduction of the CO<sub>2</sub> footprint and in the maintenance of the ecosystem in which we currently live; since, in addition to the cost savings associated with the initial investment, manufacture and installation, GRP pipes are not affected by corrosion, and it guarantee a useful life time of at least 25 to 40 years, without the need of any preventive and corrective maintenance; therefore, by consuming less energy during their useful life, CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere are considerably reduced.

For all the reasons exposed above, the transition towards the use of composite technology pipes in the different environments surrounding our planet will mean progress towards a greener and more renewable future.

However, at present, GRP pipes cannot be used in all the lines that make up the piping system of a green hydrogen generation plant, due to pressure and temperature conditions required in certain sections of the route and because of the fluid circulating inside it, as it will be developed throughout the project.

## *Índice*

<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO .....	16
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	18
1.3. ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE .....	19
<b>Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN .....</b>	<b>20</b>
2.1. EL HIDRÓGENO Y LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO.....	22
2.1.1. TIPOS DE HIDRÓGENO .....	24
2.2. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE ELECTRÓLISIS DEL AGUA... 26	
<b>Capítulo 3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>31</b>
3.1. INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS TERMOESTABLES Y PROPIEDADES RESPECTO AL ACERO.....	31
3.2. COMPARATIVA ENTRE LOS TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS TERMOESTABLES.....	35
<b>Capítulo 4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....</b>	<b>38</b>
4.1. OBJETIVOS .....	38
4.1.1. CONTRIBUCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA REDUCCIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL Y LOS COSTES DE INSTALACIÓN.....	38
4.1.2. CONTRIBUCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA REDUCCIÓN DEL “LIFE CYCLE COST” DE LA PLANTA.....	46
4.1.3. CONTRIBUCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS A LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA DE CO <sub>2</sub> .....	48
4.2. FASES DE DESARROLLO.....	53
4.2.1. MODELO GENERAL DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE MEDIANTE ELECTRÓLISIS .....	53

4.3.	ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TUBERÍAS COMPOSITE EN LOS SISTEMAS DE TUBERÍAS DE LA PLANTA.....	66
4.3.1.	<i>PROCESO DE PRODUCCIÓN</i> .....	67
4.3.2.	<i>PROCESO DE PURIFICACIÓN</i> .....	70
4.3.3.	<i>PROCESO DE ALMACENAMIENTO</i> .....	72
4.3.4.	<i>PROCESO DE REFRIGERACIÓN</i> .....	73
4.3.5.	<i>CONCLUSIONES</i> .....	74
4.4.	ESTUDIO ECONÓMICO GLOBAL COMPARATIVO ENTRE EL USO DE GRE O ACERO EN LAS TUBERÍAS DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE.....	78
4.4.1.	<i>CARACTERÍSTICAS DE LAS TUBERÍAS A UTILIZAR</i> .....	78
4.4.2.	<i>SUPORTACIÓN</i> .....	80
4.4.3.	<i>COMPARATIVA ENTRE LOS COSTES DE SUMINISTRO DE TUBERÍAS Y FITTINGS</i> <sup>81</sup>	
4.4.4.	<i>COMPARATIVA ENTRE LOS COSTES DE SUMINISTRO DE SUPORTACIÓN</i> .....	83
4.4.5.	<i>COMPARATIVA ENTRE LOS COSTES DE INSTALACIÓN</i> .....	84
4.4.6.	<i>ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE CO<sub>2</sub></i> .....	84
4.4.7.	<i>COMPARATIVA DE RESULTADOS FINALES</i> .....	87
<b>Capítulo 5.</b>	<b><i>BIBLIOGRAFÍA</i></b> .....	<b>88</b>

## *Índice de figuras*

<i>Figura 1. Comparativa entre los precios de producción de los diferentes tipos de hidrógeno (Fuente: Statista 2022).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2. Comparativa entre los métodos de obtención de los diferentes tipos de hidrógeno (Fuente: Río Negro, 2022).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3. Esquema de funcionamiento de una celda electrolítica de un electrolizador alcalino [5].....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4. Esquema de funcionamiento de una celda de combustible de un electrolizador PEM [6].....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 5. Esquema del proceso de producción “Filament winding” (Fuente: Tecnología de los plásticos.blogspot.com).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 6. Comparativa entre los costes de fabricación de diferentes materiales tomando como referencia el acero (valor 1) [18], [20].....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 7. Comparativa entre los costes de instalación en tuberías de acero al carbono y GRE según el diámetro de la tubería [18], [20].....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 8. Comparativa de los costes de material y los costes de instalación para tuberías de diferentes materiales [18], [20]. .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 9. Subprocesos en una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis [33] .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 10. Diagrama esquemático del proceso de producción [34].....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 11. Diagrama esquemático del proceso de purificación [34].....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 12. Diagrama esquemático del proceso de almacenamiento [34].....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 13. Diagrama esquemático del proceso de refrigeración [34].....</i>	<i>64</i>

---

*Figura 14. Composición de la tubería I+D diseñada por el fabricante NOV FGS [39]*  
..... 76

## *Índice de tablas*

<i>Tabla 1. Valores teóricos de energía necesaria y eficiencia de la electrólisis del agua en función de la presión y la temperatura de operación (Fuente: Prince-Richard, 2004)</i>	27
<i>Tabla 2. Parámetros fundamentales de los electrolizadores más usados para la producción de hidrógeno (Fuente: Modificado de H. VENDT, 2008)</i>	30
<i>Tabla 3. Eficiencias obtenidas con electrolizadores alcalinos y electrolizadores PEM (Fuente: Modificado de HOLLADAY, 2009)</i>	30
<i>Tabla 4. Comparativa entre los tipos de materiales compuestos termoestables [15], [23], [24]</i>	37
<i>Tabla 5. Comparativa del precio €/m entre tuberías de diferentes diámetros para diferentes calidades y espesores de acero y GRE [26], [27]</i>	41
<i>Tabla 6. Comparativa entre los pesos de una tubería de GRE y una tubería de acero al carbono [31]</i>	51
<i>Tabla 7. Parámetros máximos de operación en el proceso de producción (Fuente: Elaboración Propia)</i>	58
<i>Tabla 8. Parámetros máximos de operación en el proceso de purificación (Fuente: Elaboración Propia)</i>	61
<i>Tabla 9. Parámetros máximos de operación en el proceso de almacenamiento (Fuente: Elaboración Propia)</i>	63
<i>Tabla 10. Parámetros máximos de operación en el proceso de refrigeración (Fuente: Elaboración propia)</i>	65
<i>Tabla 11. Tabla de viabilidad para las líneas incluidas en el proceso de producción (Fuente: Elaboración Propia)</i>	67

<i>Tabla 12. Tabla de viabilidad para las líneas incluidas en el proceso de purificación (Fuente: Elaboración Propia).....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 13. Tabla de viabilidad para las líneas incluidas en el proceso de almacenamiento (Fuente: Elaboración Propia).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 14. Tabla de viabilidad para las líneas incluidas en el proceso de refrigeración (Fuente: Elaboración Propia).....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 15. Metros de tubería y número de fittings y soportes estimados en las líneas aptas para su uso con GRE cuando se utiliza como material GRE (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 16. Metros de tubería y número de fittings y soportes estimados en las líneas aptas para su uso con GRE cuando se utiliza como material acero inoxidable 316 (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 17. Comparativa entre los pesos de las tuberías de acero inoxidable 316 y las tuberías de GRE en las líneas aptas para su uso con GRE (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 18. Cuadro comparativo entre los costes de las tuberías y fittings de GRE y acero inoxidable 316 SCH 40 para diferentes diámetros (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 19. Cuadro comparativo entre los costes de suministro de suportación de tuberías de GRE y tuberías de acero inoxidable 316 SCH 40 para diferentes diámetros (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 20. Cuadro comparativo entre los costes de instalación estimados para tuberías de GRE y tuberías de acero inoxidable 316 SCH 40 (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 21. Estimación sobre la energía total requerida y las emisiones totales de CO<sub>2</sub> para la fabricación de 1 km de tubería de GRE o de acero inoxidable 316 SCH 40 (Fuente: Elaboración propia).....</i>	<i>85</i>

*Tabla 22. Comparativa entre los camiones necesarios y las emisiones de CO<sub>2</sub> para tuberías de acero y tuberías de GRE (Fuente: Elaboración propia)..... 86*

*Tabla 23. Comparativa entre los costes totales si se utiliza GRE o acero inoxidable 316 en las líneas aptas para ello (Fuente: Elaboración propia)..... 87*



# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## *1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO*

Este proyecto busca ofrecer nuevas alternativas al uso de materiales metálicos en tuberías en el actual sector energético e industrial.

La finalidad de este proyecto consiste en analizar y exponer alternativas válidas respecto al uso de materiales metálicos en los sistemas de tuberías, basadas en el uso de materiales compuestos fundamentalmente en el diseño y especificación de las tuberías que actúan en los diferentes servicios principales de una planta de generación de H<sub>2</sub>.

Se estudiará además el impacto económico referido a los costes de instalación que tienen los sistemas de tuberías producidos a partir de materiales compuestos, lo cual, como se desarrollará a lo largo del proyecto, podría ser un incentivo para la inversión inicial y la mejora del “Life Cycle Cost” de los diferentes servicios que contiene una planta de generación de H<sub>2</sub>; además de incentivar el estudio de los costes de mantenimiento de estas plantas causados por paradas para reparación y/o sustitución de líneas de tuberías por deterioro de las mismas.

Asimismo, la idea de utilizar materiales compuestos en las líneas que componen los sistemas de tuberías incorporados en una planta industrial (concretamente en una planta de generación de hidrógeno verde), persigue mejorar la eficiencia de las propias plantas, debido a que los materiales compuestos tienen un menor peso y una gran resistencia a la corrosión, por lo que se reducirían en gran parte los costes de instalación, así como los costes de mantenimiento de la propia planta.

Además, se pretende contribuir drásticamente a la reducción de la huella de CO<sub>2</sub> mediante la utilización de materiales compuestos en los sistemas de tuberías localizados en las plantas industriales, concretamente aquellas destinadas a la producción de hidrógeno verde; tal y como se desarrollará en el apartado “4.1.3 Contribución de los materiales compuestos a la reducción de la huella de CO<sub>2</sub>”

## ***1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO***

En concordancia con lo expuesto en los anteriores apartados, se enumeran a continuación los principales objetivos de la realización de este proyecto:

- Ofrecer una alternativa, la cual sea técnicamente viable, basada en la utilización de materiales compuestos respecto a la utilización de aceros, para reducir la inversión inicial y los costes de instalación de las canalizaciones necesarias en una planta de generación de H<sub>2</sub>.

Este análisis sería extrapolable a servicios similares en otras plantas industriales.

- Ofrecer una alternativa, la cual sea técnicamente viable, basada en la utilización de materiales compuestos respecto a la utilización de aceros, que reduzca el “Life Cycle Cost” en lo relativo a mantenimiento correctivo y preventivo de las canalizaciones necesarias en una planta de generación de H<sub>2</sub>.

Este análisis sería extrapolable a servicios similares en otras plantas industriales.

- Ofrecer a la industria alternativas, las cuales sean técnicamente viables, de materiales diferentes al acero para las canalizaciones, que, al mismo tiempo, complementándose con los objetivos anteriores, reduzcan la huella de CO<sub>2</sub>.

### ***1.3. ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE***

Este proyecto se relaciona con varios objetivos de desarrollo sostenible, concretamente con los relacionados con la energía asequible y no contaminante, las ciudades y comunidades sostenibles y la acción por el clima principalmente.

Respecto al ODS relacionado con la energía asequible y no contaminante, este proyecto pretende contribuir a mejorar los costes de instalación y mantenimiento de plantas de generación de H<sub>2</sub> incentivando las inversiones necesarias para las mismas.

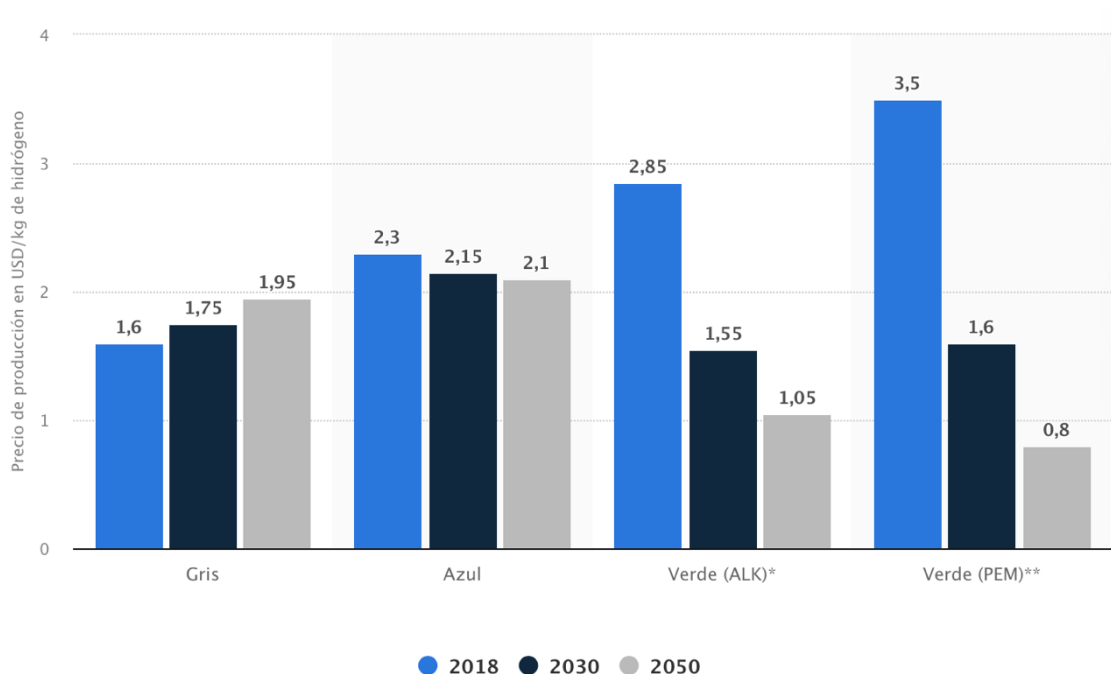
Por otro lado, con el uso de materiales compuestos estamos reduciendo la huella de CO<sub>2</sub> en nuestra atmósfera. Concretamente, tal y como se expondrá más adelante, la tubería de material compuesto puede desafiar a los sistemas de tuberías metálicas en el entorno ecológico actual debido a los menores requisitos de energía necesarios para la fabricación y el menor uso de energía durante la vida útil de las tuberías.

Frente al calentamiento global, se expondrá como con el uso de tuberías de material compuesto en comparación con las tuberías de acero al carbono, se reduce la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y, por lo tanto, las convierte en una alternativa que merece ser analizada; y este análisis será mi meta en este proyecto.

## Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

A pesar de que en la actualidad se esté estudiando la producción de hidrógeno a partir de energías renovables como vector energético del futuro y elemento medioambientalmente sostenible, la realidad actual muestra que todavía la mayor parte del hidrógeno generado se obtiene a partir de combustibles fósiles (aproximadamente un 95%), puesto que actualmente la generación de H<sub>2</sub> verde tiene un elevado coste de producción comparado con la producción de H<sub>2</sub> a partir de combustibles fósiles (hidrógeno gris y azul), tal y como se puede observar en la *Figura 1*, ya que actualmente la energía procedente de fuentes renovables es más cara de generar <sup>[1]</sup>.

El coste de producción del hidrógeno verde está determinado principalmente por el precio de la electricidad renovable y el precio del electrolizador.



*Figura 1. Comparativa entre los precios de producción de los diferentes tipos de hidrógeno (Fuente: Statista 2022)*

La *Figura 1* muestra que, en los próximos años, se estima que el coste de producción de hidrógeno verde será menor que el coste de producción del hidrógeno gris y del hidrógeno azul.

Para ello, se espera una reducción del coste de los electrolizadores, el aumento de su eficiencia, el aumento de su vida útil y la disponibilidad de electricidad renovable a coste bajo.

Además, los sistemas de tuberías de las actuales plantas de generación de hidrógeno están realizados a partir de materiales metálicos (generalmente acero), y el hecho de utilizar dichos materiales metálicos conllevan a una pérdida de eficiencia de la propia planta a medio plazo debido a fugas, como consecuencia de la corrosión y pérdidas de las propiedades del material de las tuberías con el paso del tiempo, y es por ello que es recomendable la utilización de materiales compuestos en la fabricación de tuberías, ya que tienen una mayor vida útil que los materiales metálicos y un menor coste de instalación y mantenimiento; tal y como se expondrá en el apartado “4.1.2 Contribución de los materiales compuestos en la reducción del “Life Cycle Cost” de la planta”.

Por las razones expuestas anteriormente, el uso de materiales compuestos en la industria en general (renovable, química, petroquímica, etc.) está cada vez más extendido.

No obstante, el uso de materiales compuestos en los sistemas de transporte que intervienen en una planta de generación de hidrógeno por tuberías es complejo, siendo necesario tanto un completo análisis químico del fluido a transportar como de la presión y temperatura necesarias para especificar el material compuesto que cumpla las especificaciones de diseño del sistema.

## ***2.1. EL HIDRÓGENO Y LA ECONOMÍA DEL HIDRÓGENO***

Se conoce como vector energético a un portador de energía producido a partir de fuentes primarias. Los vectores energéticos son una parte imprescindible de los sistemas energéticos, ya que son un medio de almacenar y transportar la energía para su uso en el momento en que se necesite y en la forma adecuada, como es el caso del hidrógeno, la electricidad, generada de muy diversas fuentes, o la gasolina, producida a partir del petróleo.

El hidrógeno es un vector energético, debido a que las moléculas de hidrógeno ( $H_2$ ) no se encuentran de forma natural en la Tierra, y para generarlas se requiere una materia prima, como otras moléculas que contengan hidrógeno (como por ejemplo agua), y energía primaria para obtenerla a través de procesos adecuados.

La mayor parte de la energía que consumimos hoy en día proviene del carbón, del petróleo o del gas natural; pero la tendencia que existe actualmente de aumentar el porcentaje de electricidad a partir de fuente renovables supone que será necesario otro mecanismo para poder ajustar la demanda y la producción de electricidad, de donde surge el interés actual por el almacenamiento de energía, y donde el hidrógeno representa una posibilidad con unos puntos fuertes muy característicos. De tal forma que se plantea que las nuevas formas de obtener y gestionar la energía estén relacionadas con el hidrógeno y las pilas de combustible, en lo que se ha denominado “economía del hidrógeno”.

Se espera un gran aumento de la generación renovable hacia el año 2030, donde el hidrógeno presenta un papel muy importante. En línea con los objetivos fundamentales del marco del clima y energía para 2030 de la Comisión Europea, se estima un 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, al menos un 27% de cuota de energías renovables y al menos un 27% de mejora de la eficiencia energética.

Las principales ventajas que presenta el hidrógeno como portador de energía y de las pilas de combustible como dispositivos de conversión de energía son:

- La molécula de hidrógeno está entre las moléculas más simples; además, es relativamente estable.
- El hidrógeno tiene el contenido de energía por unidad de masa más alto que cualquier otro combustible.
- Su molécula es la más ligera y la más pequeña: en caso de fuga, se dispersaría rápidamente en la atmósfera.
- Permite la combustión a elevadas relaciones de compresión en máquinas de combustión interna.
- Cuando se combina con oxígeno en las pilas de combustible electroquímicas, el hidrógeno produce electricidad directamente, rebasando los límites de eficiencia obtenidos en máquinas y ciclos termodinámicos.

Sin embargo, el hidrógeno también presenta una serie de particularidades que explican por qué hasta la fecha se ha preferido la utilización de combustibles fósiles:

- Energía muy baja por unidad de volumen como gas o como líquido. Para incrementar su densidad energética por unidad de volumen, el hidrógeno suele almacenarse en forma de gas a presión, líquido criogénico o sólido.
- Los contenedores destinados a su almacenaje resultan voluminosos y pesados.
- La temperatura de licuefacción que presenta el hidrógeno es extremadamente baja (-253°C), por lo que la obtención de hidrógeno líquido requiere un proceso muy complejo y caro energéticamente.
- El hidrógeno no es tóxico y no es contaminante, pero requiere de tecnología específica para ser detectado, puesto que es incoloro, inodoro y su llama al aire es casi invisible.

Como conclusiones de este capítulo, conviene destacar que la excesiva dependencia energética de las fuentes de energía fósiles, emisoras de gases de efecto invernadero y, en cualquier caso, agotables, obliga a replantear el sistema energético global a medio plazo, para comenzar una era posterior a los combustibles fósiles entre 2030 y 2050 <sup>[1]</sup>.



Además, debido a lo anteriormente expuesto, se concluye que el hidrógeno tiene un excelente potencial para convertirse en una alternativa a los vectores energéticos más utilizados en la actualidad.

### 2.1.1. TIPOS DE HIDRÓGENO

Existen diferentes tipos de hidrógeno, según el método utilizado para su obtención <sup>[2], [3]</sup>:

- Hidrógeno blanco: Este tipo de hidrógeno hace referencia al hidrógeno que se encuentra en la naturaleza, generalmente en estado gaseoso. En algunas ocasiones se puede encontrar en depósitos subterráneos.
- Hidrógeno gris: Este tipo de hidrógeno se obtiene a partir del reformado de gas natural. Actualmente es el más abundante y el más barato de producir, aunque se prevé que el coste aumente debido al precio de los derechos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Para producir una tonelada de H<sub>2</sub> gris se emiten de 9 a 12 toneladas de CO<sub>2</sub>.
- Hidrógeno azul: Este tipo de hidrógeno se genera también a partir del reformado de gas natural, con la diferencia de que parte o el total de las emisiones de CO<sub>2</sub> se evitan mediante un sistema de captura de carbono. Después, ese CO<sub>2</sub> puede ser utilizado para fabricar combustibles sintéticos, por ejemplo.
- Hidrógeno marrón: Este tipo de hidrógeno es igual que el gris, pero con la diferencia de que éste utiliza lignito (carbón marrón) en lugar de utilizar gas natural.
- Hidrógeno turquesa: Este tipo de hidrógeno se genera mediante la pirólisis del metal fundido, alimentado a través de gas natural. En el proceso, el gas natural pasa a través de un metal fundido, y libera hidrógeno y carbono sólido, por lo que se evitan emisiones contaminantes de CO<sub>2</sub>.

- Hidrógeno rosa / magenta: Este tipo de hidrógeno es el que se obtiene mediante electrólisis del agua alimentada a través de energía nuclear.
- Hidrógeno amarillo: Este tipo de hidrógeno es aquel en el que la electricidad utilizada para la electrólisis procede de fuentes mixtas, desde energías renovables hasta combustibles fósiles.

El hidrógeno verde que se obtiene a partir de energía solar también se considera hidrógeno amarillo.

- Hidrógeno verde: Este tipo de hidrógeno sería aquel que se obtiene a partir de la electrólisis del agua utilizando electricidad procedente de fuentes renovables. En su proceso de obtención no se emite CO<sub>2</sub>, y por ello se posiciona como una solución eficaz para favorecer la descarbonización de todos los sectores.

Otra variedad del hidrógeno verde es el producido a partir de biogás aprovechando los residuos de ganadería, agricultura y/o urbanos.

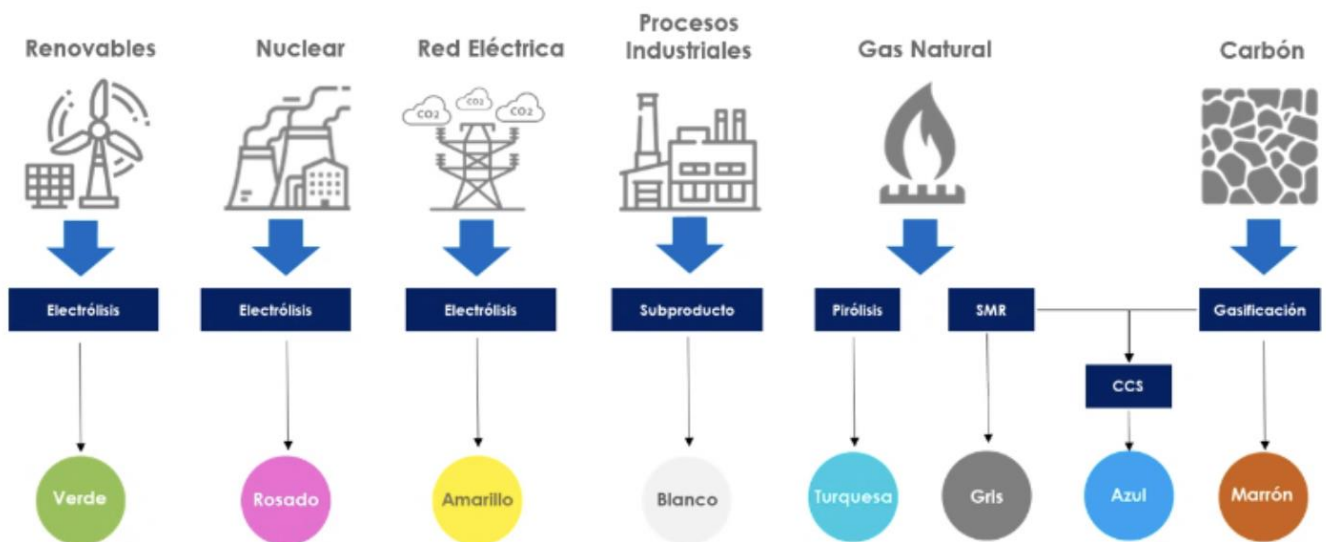


Figura 2. Comparativa entre los métodos de obtención de los diferentes tipos de hidrógeno (Fuente: Río Negro, 2022)

## ***2.2. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO MEDIANTE ELECTRÓLISIS DEL AGUA***

Existen multitud de métodos de producción de hidrógeno a partir de energías renovables, pero este proyecto se centra en la producción de hidrógeno a través de la electrólisis del agua. El hidrógeno obtenido será denominado “hidrógeno verde” siempre y cuando el origen de la electricidad que se utilice en el proceso sea de origen renovable (eólica, hidráulica, fotovoltaica, etc.).

La obtención de hidrógeno a través de la electrólisis del agua es el proceso de producción más desarrollado en la actualidad y con más perspectivas de futuro. Actualmente, los electrolizadores se alimentan principalmente de energía procedente de parques eólicos, plantas solares fotovoltaicas y de centrales hidráulicas.

Hoy en día, como se ha mencionado anteriormente, la obtención de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua es el proceso más prometedor para la obtención de hidrógeno renovable; para el cual existen dos tecnologías diferentes, clasificadas en función del tipo de electrolito que utilizan en el proceso:

Un electrolizador es un dispositivo que permite producir hidrógeno a través de un proceso químico (electrólisis) capaz de separar las moléculas de hidrógeno y oxígeno de las que se compone el agua mediante la utilización de electricidad. Los enlaces entre las moléculas de hidrógeno y las moléculas de oxígeno en el agua son muy estables, y es por ello la necesidad de aportar una gran cantidad de energía eléctrica para que dicha división se produzca (286.45 kJ/mol a 25°C). Una forma de paliar esta situación se centra en elevar la temperatura de trabajo; ya que, a temperaturas bajas, con agua en estado líquido, prácticamente toda la energía que es necesaria aportar para la separación debe realizarse en forma de electricidad; pero conforme se eleva la temperatura, aunque la energía total necesaria también aumente ligeramente, es posible sustituir parte de la electricidad por calor. Es por ello que la electrólisis suele realizarse a elevadas temperaturas, ya que pueden aprovecharse fuentes de calor residual procedentes de otros procesos.

En términos de presión, si la presión de operación del electrolizador es elevada, se evitan costes adicionales de compresión del hidrógeno, en los que es necesario incurrir en su almacenamiento.

En cuanto a la relación temperatura-presión en un electrolizador, resulta más eficiente operar a altas presiones y bajas temperaturas que operar a bajas presiones y altas temperaturas, tal y como se puede observar en la *Tabla 1* <sup>[1]</sup>.

P (bar)	T (°C)	Valores técnicos de :			
		Electricidad necesaria (GJ/GJ H <sub>2</sub> )	Calor necesario (GJ/GJ H <sub>2</sub> )	Energía total necesaria (GJ/GJ H <sub>2</sub> )	Eficiencia global (%)
1	25	0,98	0,20	1,18	84,60
1	1.000	0,74	0,63	1,37	73,10
400	25	1,07	0,20	1,27	78,60

*Tabla 1. Valores teóricos de energía necesaria y eficiencia de la electrólisis del agua en función de la presión y la temperatura de operación (Fuente: Prince-Richard, 2004)*

Un electrolizador consiste en un apilamiento de electrodos conductores separados por una membrana, a los cuales se les aplica un voltaje y una intensidad elevados. Esto provoca una corriente eléctrica en el agua que hace que se descomponga en sus componentes: hidrógeno y oxígeno. El sistema completo también incluye bombas, electrónica de potencia, separadores de gases y otros componentes auxiliares, como los tanques de almacenamiento <sup>[4]</sup>.

El oxígeno generado en paralelo se libera a la atmósfera o puede almacenarse para su uso posterior en algunos casos. El hidrógeno generado se almacena como gas comprimido o se licúa para su uso en industrias o en pilas de combustible de hidrógeno.

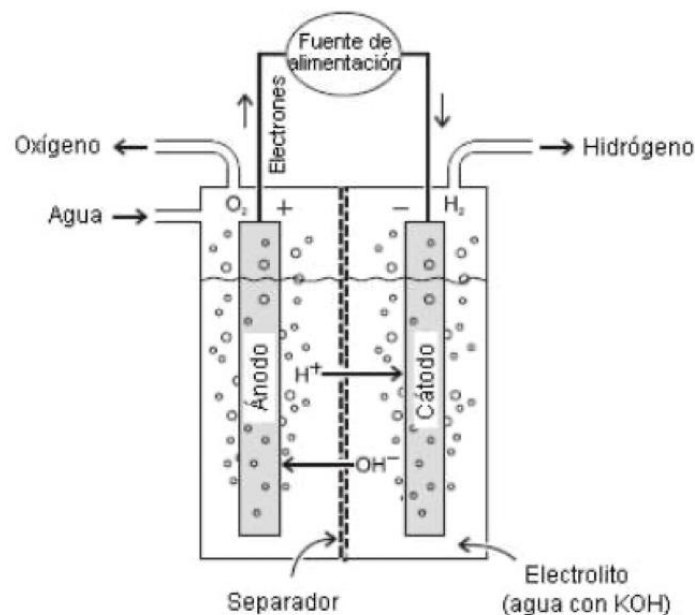
- *Electrolizadores alcalinos:*

Los electrolizadores alcalinos utilizan un electrolito líquido, como puede ser el hidróxido de potasio (KOH) o el hidróxido de sodio (NaOH), y agua. El hidrógeno se produce en una celda que consta de un ánodo, un cátodo y una membrana. Las celdas se suelen montar en serie para producir más hidrógeno y oxígeno a la vez. Cuando se aplica corriente a la pila de celdas de electrólisis, los iones de hidróxido se mueven a través del electrolito desde el cátodo hasta el ánodo de cada célula, generándose

burbujas de gas hidrógeno en el lado del cátodo del electrolizador y de gas oxígeno en el lado del ánodo del electrolizador [4].

Estos electrolizadores producen hidrógeno con una pureza mínima del 99.8%, y con unos tamaños de electrolizador que pueden ir desde los pocos kilovatios hasta unidades que alcanzan potencias superiores a 3.5 MW [1].

En la *Figura 3* se ilustra el funcionamiento de una celda electrolítica de un electrolizador alcalino:



*Figura 3. Esquema de funcionamiento de una celda electrolítica de un electrolizador alcalino [5]*

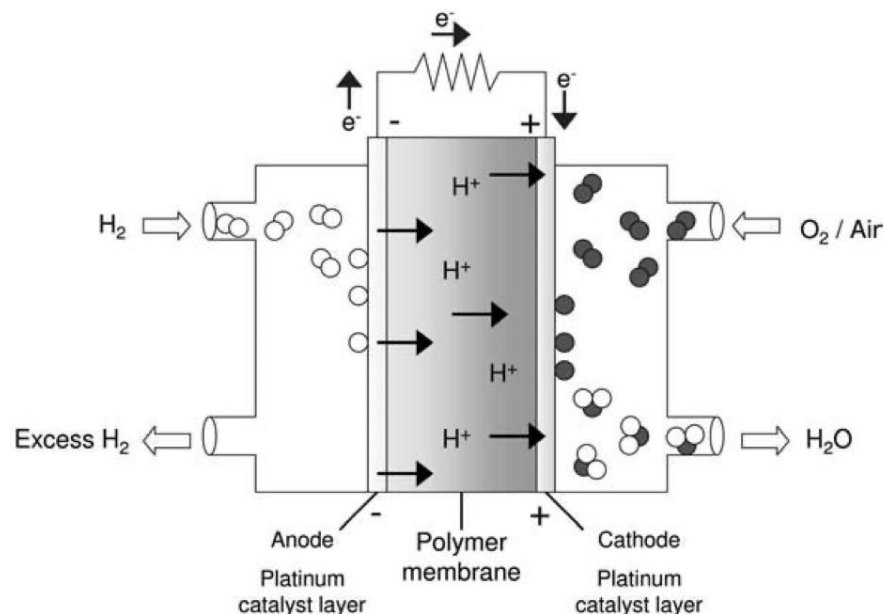
- *Electrolizadores de membrana polimérica (PEM):*

Los electrolizadores PEM utilizan una membrana de intercambio de protones y un electrolito polimérico sólido. Cuando se aplica corriente a la pila, el agua se divide en hidrógeno y en oxígeno, y los protones del hidrógeno pasan a través de la membrana para formar gas de hidrógeno en el lado del cátodo. Dentro de los diferentes tipos de electrolizadores, son los más populares, ya que son los que producen el hidrógeno de mayor pureza y además son fáciles de refrigerar; además, son los más adecuados para acoplarse a la variabilidad de energías renovables [4].

Sin embargo, dichos electrolizadores son más caros, ya que utilizan metales preciosos como catalizadores.

Estos electrolizadores producen hidrógeno con una pureza del 99.9998%, pero el rango de potencia actual de los mismos se limita hasta pocas centenas de kilovatios; aunque existen anuncios de equipos comerciales de 1MW de potencia unitaria [1].

En la *Figura 4* se ilustra el funcionamiento de una celda de combustible de un electrolizador PEM:



*Figura 4. Esquema de funcionamiento de una celda de combustible de un electrolizador PEM [6]*

Para finalizar, se muestra en la *Tabla 2* los parámetros que caracterizan a los electrolizadores más usados actualmente para la producción de hidrógeno:

<b>TIPO</b> <b>Ítems</b>	<b>ALCALINO</b>	<b>POLÍMERO ELECTROLITO</b>
<b>Portado de carga</b>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>
<b>Reactante</b>	Agua	Agua
<b>Electrolito</b>	Hidróxido de sodio o potasio	Polímero
<b>Los electrodos</b>	Níquel	Grafito con Pt, polímero
<b>Temperatura</b>	80 °C	80°C

*Tabla 2. Parámetros fundamentales de los electrolizadores más usados para la producción de hidrógeno (Fuente: Modificado de H. VENDT, 2008)*

Haciendo referencia a las eficiencias energéticas que presentan dichos electrolizadores en la actualidad, se muestra en la *Tabla 3* una comparativa aproximada de las eficiencias obtenidas a través de electrolizadores alcalinos y a través de electrolizadores PEM:

<b>TECNOLOGÍA</b>	<b>EFICIENCIA</b>
Electrolizador Alcalino	50-60%
Electrolizador PEM	55-70%

*Tabla 3. Eficiencias obtenidas con electrolizadores alcalinos y electrolizadores PEM (Fuente: Modificado de HOLLADAY, 2009)*

## Capítulo 3. REFERENCIAL TEÓRICO

### ***3.1. INTRODUCCIÓN A LOS MATERIALES COMPUESTOS TERMOESTABLES Y PROPIEDADES RESPECTO AL ACERO***

Las tuberías de GRP (Glass Reinforced Plastic), o también denominadas tuberías de FRP (Fiber Glass Reinforced Plastic) o PRFV (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio), o simplemente tuberías composite, están formadas principalmente por resina termoestable reforzada con fibra de vidrio. La resina líquida se combina con el refuerzo de las fibras de vidrio, y mediante un proceso de curado, se forma lo que se denomina laminado. Existen diferentes tipos de resinas que, combinadas con el refuerzo de las fibras de vidrio, proporcionan propiedades específicas a la tubería de GRP <sup>[7]</sup>.

El tipo de resina utilizada para la fabricación de la tubería de GRP será seleccionada en función de las especificaciones de diseño requeridas para el sistema de tuberías y los requerimientos acerca de los costes del proyecto. Los tipos que se estudiarán en este análisis en función de la resina utilizada en su fabricación son <sup>[8]</sup>:

- GRPU: Tuberías de poliéster reforzadas con fibra de vidrio.
- GRVE: Tuberías de viniléster reforzadas con fibra de vidrio.
- GRE: Tuberías de epoxi reforzadas con fibra de vidrio.

El proceso de fabricación a partir del cual se realizan las tuberías que se analizarán en este proyecto se denomina “Filament Winding”.



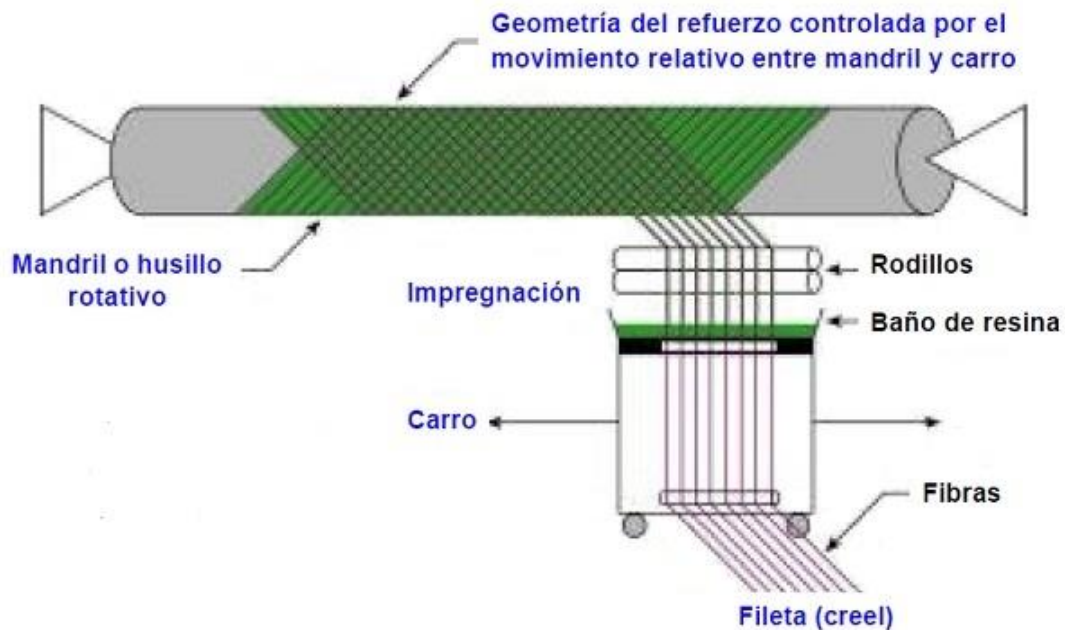


Figura 5. Esquema del proceso de producción "Filament winding" (Fuente: Tecnología de los plásticos.blogspot.com)

En este proceso, sobre un mandril de acero giratorio se comienza el laminado aplicando una capa rica en resina, denominada "liner", la cual será la que estará en contacto directo con el fluido. A partir de esta capa, comienza la construcción del laminado por enrollamiento, la cual se hace a partir de hilos de fibra de vidrio impregnados en resina, las cuales se van enrollando en el mandril de un extremo a otro. La dirección en la cual se encuentren orientadas las fibras definirá las propiedades mecánicas del diseño y las tensiones que deberá soportar la tubería de GRP final <sup>[9]</sup>.

Las tuberías de composite se utilizan principalmente debido a su alta resistencia a la corrosión y a la erosión en diversas aplicaciones, como: procesos químicos, transporte de líquidos corrosivos, desalinización, refrigeración de equipos, etc.

El establecimiento de programas de mantenimiento preventivo y las constantes reparaciones que requieren los sistemas de tuberías de acero forman parte de la propia vida del acero. La vida útil de las tuberías de acero se ve a menudo reducida a causa de la corrosión externa y/o interna, incluso aunque su diseño contenga un sobreespesor para reducir la corrosión. Este hecho se traduce directamente en un coste para el cliente durante el período de vida de la instalación <sup>[10]</sup>.

Las principales propiedades que aportan las tuberías de GRP respecto a las tuberías de acero son:

- Muy alta resistencia a la corrosión <sup>[11], [12], [13]</sup>.
- Sin requerir de ningún tipo de tratamiento o protección interna y/o externa, está diseñada para una vida útil comprendida aproximadamente entre 25 y 40 años dependiendo del tipo de resina utilizada, muy superior a las tuberías de acero <sup>[14]</sup>.
- Son inertes a la corrosión interna producida por productos químicos agresivos, ácidos, disolventes, residuos, bacterias, crudo, etc <sup>[8]</sup>.
- Resistentes a la abrasión y al desgaste <sup>[8]</sup>.
- Las tuberías de GRP no son susceptibles a sufrir fragilización por hidrógeno. Las características del laminado no permiten la entrada de átomos de hidrógeno. Dicho hecho obliga al sobrediseño de las tuberías de acero destinadas al transporte de hidrógeno, para que, con un espesor de pared extra al requerido, se consiga retrasar en parte el efecto del fenómeno de la corrosión <sup>[7]</sup>.
- Resistente a condiciones atmosféricas, incluidas el agua y la humedad <sup>[8]</sup>.
- Baja conductividad térmica, por lo que la necesidad de incluir aislamiento térmico se reduce considerablemente <sup>[15], [16], [17]</sup>.
- La superficie interior lisa de las tuberías de GRP reducen las pérdidas de presión, por lo que se precisa un menor consumo de energía para el bombeo <sup>[15], [18]</sup>.

- El coeficiente de flujo Hazen Williams en las tuberías de GRP es aproximadamente 150 y se mantiene constante durante toda la vida útil de la misma; en comparación con las tuberías de acero, las cuales tienen un valor comprendido entre 90 y 110, cuyo valor va disminuyendo con el deterioro interno de su superficie con el paso del tiempo.

El coeficiente de Hazen Williams indica, para un diámetro de tubería constante, la influencia de la rugosidad de dicha tubería en parámetros como la velocidad y el caudal del fluido que transporta <sup>[15], [18]</sup>.

- Por las propias características que le confiere el laminado, y en consecuencia con todo lo anterior, no necesita ningún tipo de mantenimiento durante la vida útil para la que está diseñada <sup>[10], [19]</sup>.
- Peso ligero, aproximadamente 1/5 del peso de una tubería de acero equivalente <sup>[18], [20]</sup>.
- Fácil de manejar <sup>[20]</sup>.
- Bajo coste de transporte, debido a su peso ligero <sup>[18], [20]</sup>.
- Bajo coste de instalación, debido al no requerimiento de maquinaria pesada, dado su peso ligero <sup>[21], [22]</sup>.
- No requiere la aplicación de ensayos no destructivos (END's) durante su instalación, únicamente se requiere del control de calidad cuando se realizan las uniones pegadas o laminadas y durante el tiempo de curado de las mismas. No obstante, sí se requiere una prueba hidráulica final, el cual será el único END utilizado <sup>[20]</sup>.

### **3.2. COMPARATIVA ENTRE LOS TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS TERMOESTABLES**

A continuación, en la *Tabla 4* se expone una comparativa entre las tres variantes de tuberías de composite termoestables (GRP). Dicha comparativa se encuentra fundamentada en las principales diferencias mecánicas, químicas y comerciales que presentan cada variante de GRP. Son las diferencias que presenta cada variante la que determinará el uso de cada una en función de <sup>[8]</sup>:

- Las especificaciones técnicas requeridas por el sistema de tuberías para cumplir correctamente con el servicio para el cual ha sido diseñado.
- El análisis del coste total: inversión inicial + “Life Cycle Cost”.
- La importancia que la dirección técnica y comercial del proyecto asigne a cada una de las tres variantes en su matriz de decisión.

Debido a las características, composición química de los fluidos, temperaturas y presiones en los servicios involucrados en un esquema general de una planta de generación de hidrógeno verde (como la que se evalúa en este proyecto), se seleccionará, dentro de las diferentes variantes de GRP anteriormente descritas, a la tubería de GRE como la más adecuada para los diferentes servicios, ya que es la que cubre técnicamente el mayor rango en cada uno de los parámetros decisivos para determinar su utilización como alternativa al acero.

		<b>TUBERÍAS FRP SEGÚN EL SISTEMA DE RESINAS USADO EN LA FABRICACIÓN</b>		
<b>UNID.</b>		<b>EPOXI (GRE)</b>	<b>POLIESTER (GRPU)</b>	<b>VINILESTER (GRVE)</b>
PRESION INTERNA	bar	min.PN10 -max. PN50	min. PN1- max. PN32	min.PN1-max. PN20
PRESION EXTERNA	-	SOPORTA MÁS PRESIÓN EXTERNA CON MENOR ESPESOR DE PARED QUE UNA TUBERÍA COMPARABLE EN GRPU /GRV DE FORMA QIE ALIGERA SU PESO	SEGUN ESPESOR DE PARED	SEGÚN ESPESOR DE PARED
RESISTENCIA AL FUEGO	-	FIRE RESISTANCE según ISO 14692 PARTE 2 ANEXO E IMO 753/18 L3	<b>NO</b>	<b>NO</b>
RESISTENCIA A TRACCIÓN	MPa	65-80	50-70	60-75
MÓDULO DE ELASTICIDAD	MPa	100-150	90-100	100-115
ELONGACIÓN	%	2-5	1,5	1,7
RESISTENCIA A LA CIZALLADURA	MPa	30-50	10-20	20-30
TEMPERATURA DE DISTORSIÓN	°C	180	60-80	70-90
TEMPERATURA MÁXIMA PERMITIDA	°C	110-120	50-70	60-70
TENSIÓN HIDROSTÁTICA DE DISEÑO	N/mm2	63-80	15-35	45-50
REDUCCIÓN DE RÍGIDEZ EN 50 AÑOS	%	10	40	25
CONTRACCIÓN	%	1-2	7	7
RESISTENCIA QUÍMICA		ALTA (AGUA/QUIMICOS) Ver Chemical Resistance Guide <sup>[35]</sup> Para Gas application consultar al fabricante	BAJA (GENERALMENTE AGUA)	ALTA (AGUA/QUIMICOS)
ESTABILIDAD QUÍMICA		100% ESTABLE (INERTE TRAS CURADO)	ACTIVIDAD MOLECULAR TRAS CURADO EN AMBIENTE (DEGRADACION)	ACTIVIDAD MOLECULAR TRAS CURADO EN AMBIENTE (DEGRADACION)
RESISTENCIA A ABRASIÓN PARA PARTÍCULAS SÓLIDAS		BUENA	MENOR QUE GRE	MENOR QUE GRE
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA		0,29 W/m K	0,29 W/m K	0,29 W/m K

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	MUY BAJA	MUY BAJA	MUY BAJA
PESO	1/5 DEL ACERO	LIGERO pero mayor que GRE a igual requisito de presión externa e interna pues requiere mayor espesor de pared	LIGERO pero mayor que GRE a igual requisito de presión externa e interna pues requiere mayor espesor de pared
VANOS SOPORTACION/INSTALACION	IGUAL QUE EL ACERO A PARTIR DE 6-8"	MAYOR QUE GRE Y GRV	MAYOR QUE GRE
APLICACIONES PRINCIPALES	INDUSTRIA: CONDUCCIÓN DE AGUAS / AGUAS RESIDUALES MARINA & OFFSHORE  AGUA SALADA, AGUAS DE PROCESOS CONTAMINADAS, HIDROCARBUROS, SALMUERA, LODOS, REFRIGERACIÓN CON AGUA SALADA Ver referencia de aplicaciones G3040 Aplicaciones para gas: Consultar al fabricante	INDUSTRIA: CONDUCCION AGUA / AGUAS RESIDUALES  TRATAMIENTO AGUA Consultar a fabricante	INDUSTRIA: CONDUCCION AGUA / AGUAS RESIDUALES  TRATAMIENTO AGUAS DE PROCESO Consultar a fabricante
DIAMETROS	DN25 - DN1200	DN25 -DN3000	DN25 -DN3000
COSTES DE MATERIAL DE TUBERÍA	MAYOR QUE GRPU	EL MENOR	MAYOR QUE GRPU Y MENOR QUE GRE
COSTES INSTALACION	20-35% MENOR QUE ACERO DEPENDIENDO DEL TIPO DE ACERO	MAYOR QUE GRE DEBIDO A: -MENORES VANOS DE SOPORTACION REQUERIDOS -A PARTIR DE LOS DIAMETROS DONDE USEN UNIONES LAMINADAS EL TIEMPO DE UNION Y CURADO ES MAYOR	MAYOR QUE GRE DEBIDO A: -MENORES VANOS DE SOPORTACION REQUERIDOS -A PARTIR DE LOS DIAMETROS DONDE USEN UNIONES LAMINADAS EL TIEMPO DE UNION Y CURADO ES MAYOR
VIDA UTIL MÍNIMA ESTIMADA POR FABRICANTES	40 AÑOS	25 AÑOS	25 AÑOS

Tabla 4. Comparativa entre los tipos de materiales compuestos termoestables [15], [23], [24].

## **Capítulo 4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

### **4.1. OBJETIVOS**

#### **4.1.1. CONTRIBUCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA REDUCCIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL Y LOS COSTES DE INSTALACIÓN**

En este apartado se va a analizar la influencia que tiene el uso de materiales compuestos en la reducción de la inversión inicial y en la reducción de los costes de instalación en una planta de generación de hidrógeno verde.

Como se puede observar en la comparativa realizada en el apartado “3.2. *Comparativa entre los tipos de materiales compuestos termoestables*”, cuando se analizan las propiedades mecánicas, físicas y químicas de las tres variantes de GRP (GRE, GRPU y GRVE) se obtiene que la variante de GRP que cubre técnicamente mejor la mayoría de parámetros fundamentales para utilizar como alternativa al acero es la tubería de GRE; y es por ello que centraremos el análisis de la contribución a la reducción de costes de la inversión inicial requerida para el suministro e instalación de sistemas de tuberías en las plantas industriales (concretamente en las plantas de generación de hidrógeno verde), en la tubería de GRE.

Debido a las altas fluctuaciones que están ocurriendo en los últimos años en el coste de las materias primas y en los costes de transporte, se basará este análisis en datos teóricos contrastados proporcionados por proveedores y empresas instaladoras.

En el análisis de la inversión inicial referente a los sistemas de tuberías involucrados en una planta industrial (concretamente en una planta de generación de hidrógeno verde), habría que tener en cuenta tres aspectos fundamentales:

- *Coste a partir del diseño:* Hace referencia al coste asociado al diámetro de tubería seleccionado para cumplir con las necesidades hidráulicas del sistema.
- *Coste del suministro de tuberías:* Hace referencia al coste asociado a la adquisición de las tuberías necesarias para el sistema de tuberías a implementar.
- *Coste de prefabricación e instalación:* Hace referencia al coste asociado a la prefabricación de las tuberías y a su posterior instalación.

#### **4.1.1.1. COSTE A PARTIR DEL DISEÑO**

Las propiedades mecánicas que proporcionan las tuberías de GRE, junto con la superficie interior lisa que aportan con un coeficiente de Hazen-Williams de 150, la cual no se deteriora con el tiempo dado a que a las tuberías de GRP no les afecta la corrosión (tal y como se expuso en el apartado “3.1. *Introducción a los materiales compuestos termoestables y propiedades respecto al acero*”) desemboca en una importante reducción de las pérdidas de presión debidas al deterioro de la pared interna de la tubería, reduciendo por tanto los costes de bombeo y, permitiendo en algunas ocasiones tras un recálculo hidráulico del sistema, diseñar con tuberías de GRE de menor diámetro que su equivalente en acero; y en consecuencia, de menor coste, cumpliendo con las necesidades hidráulicas y funcionales que requiere el sistema de tuberías <sup>[7], [18], [20]</sup>.



#### **4.1.1.2. COSTE DEL SUMINISTRO DE TUBERÍA**

A nivel general, el coste de las tuberías y accesorios de GRE es mayor que el coste de las tuberías y accesorios de acero al carbono en todo su rango de espesores; no obstante, como se puede observar en la *Tabla 5*, actualmente los precios para las tuberías de GRE son más baratos que ciertas tuberías de acero al carbono (como es el caso del acero Schedule 80 (XS)) para ciertos diámetros de tubería (a partir de 4” para el caso del acero al carbono Schedule 80 (XS)). Esto es debido principalmente a las altas fluctuaciones que están ocurriendo en los últimos años en el coste de las materias primas, como se expuso anteriormente.

Sin embargo, cuando las especificaciones del sistema requieren del uso de otros tipos de aceros de mayor calidad y espesor, los cuales ofrezcan mayor resistencia externa e interna a la corrosión en condiciones de temperatura y presión especificadas según el fluido para el cual se encuentre diseñado, es cuando las tuberías de GRP se convierten en la mejor opción respecto al coste de suministro de materiales; ya que, conforme aumenta el diámetro requerido para un mismo espesor de tubería, la diferencia entre el coste de la tubería de acero correspondiente y el coste de la tubería de GRE aumenta, tanto más cuanto mayor es el diámetro requerido <sup>[25], [26], [27]</sup>.

Como se puede observar en la *Tabla 5*, conforme aumenta la calidad del acero requerida (acero inoxidable, acero dúplex, etc.) mayor es la diferencia entre el coste de la tubería de acero correspondiente y el coste de la tubería de GRE equivalente.

	ACERO AL CARBONO SCH40 (STD)	ACERO AL CARBONO SCH80 (XS)	GRE	ACERO INOX.316 SCH40	ACERO INOX.316 SCH80
TUBERIA 2" €/METRO LINEAL- PN30	12,06	16,6	24,51	60,45	83,24
TUBERIA 4" €/METRO LINEAL- PN30	35,35	49,06	45,6	178,82	252,88
TUBERIA 8" €/METRO LINEAL- PN30	109,09	167,06	115,14	490,73	745,85
TUBERIA 16" €/METRO LINEAL- PN30	288,42	382,28	268,66	785,24	1016,21

Tabla 5. Comparativa del precio €/m entre tuberías de diferentes diámetros para diferentes calidades y espesores de acero y GRE [26], [27].

#### 4.1.1.3. **COSTE DE PREFABRICACIÓN E INSTALACIÓN**

El coste de prefabricación e instalación de los sistemas de tuberías de GRE es siempre menor que el coste del mismo sistema de tuberías equivalente en acero, debido a los puntos que se desarrollan a continuación <sup>[21], [22]</sup>:

- *Uniones de tuberías:*

Este punto hace referencia a que la mano de obra necesaria para el corte, preparación de extremos y soldadura en la tubería de acero es mayor que la mano de obra necesaria para el corte, mecanizado, preparación de extremos y realización de uniones adhesivas en las tuberías de GRE.

Cabe destacar que dicha diferencia es cada vez mayor conforme aumenta la complejidad de la soldadura de los aceros.

- *Elementos de maniobra y maquinaria necesaria para el transporte y manejo de tuberías:*

Este punto hace referencia a que el peso de una tubería de GRE es aproximadamente 1/5-1/6 veces el peso de la tubería equivalente en acero; por tanto, se requiere de un menor número de elementos de maniobra y de maquinaria necesaria para el transporte de las tuberías, lo que supone un ahorro en coste respecto al uso de tuberías de acero. Cabe destacar que conforme aumenta el diámetro y el espesor de la tubería (y por tanto el peso), la diferencia de costes en elementos de maniobra y maquinaria necesaria para el transporte entre el uso de tuberías de acero y el uso de tuberías de GRE aumenta notablemente.

No obstante, resulta importante destacar que las tuberías de GRE requieren de mayor atención durante su descarga y durante su manejo en obra, debido a que la resistencia que presentan frente a impactos es menor que la resistencia frente a impactos que presentan las tuberías de acero.

- *Control de calidad de las uniones:*

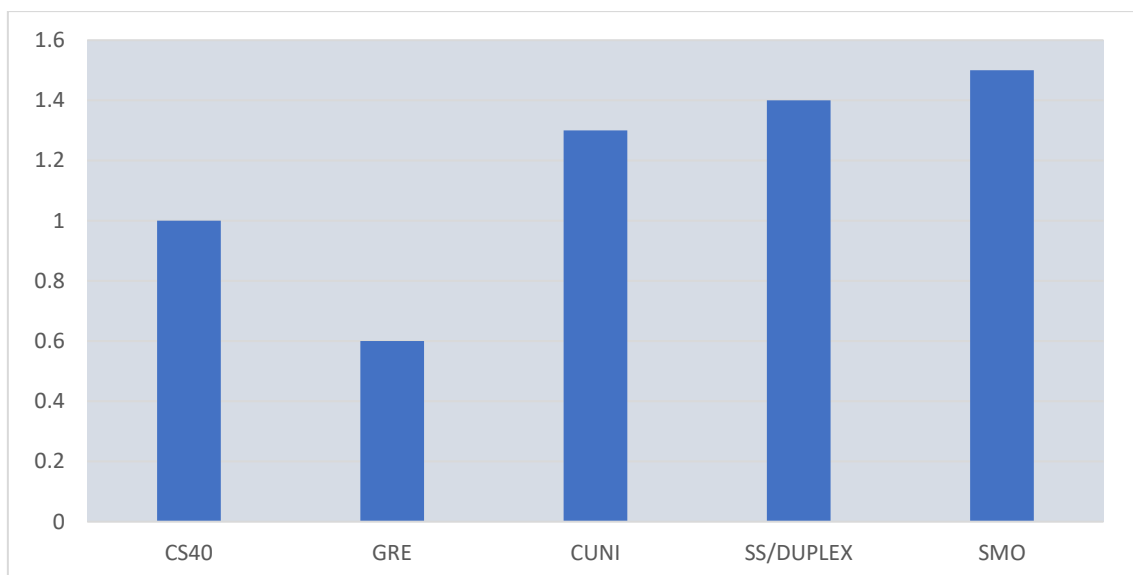
Para el caso de las tuberías de acero, para verificar la calidad de las soldaduras se utilizan ensayos no destructivos “END”, los cuales representan un coste referente a mano de obra; ya que, dependiendo del END a utilizar (líquidos penetrantes, ultrasonidos, radiología industrial, etc.), se requerirá de operarios de mayor o menor cualificación.

Para el caso de las tuberías de GRE, una vez se ha realizado la unión adhesiva mediante personal certificado por el fabricante de la misma, según requerimiento de la norma ISO 14692 para tuberías plásticas, sólo se requiere de inspección visual, sin la necesidad de la aplicación de END, contrario a lo que ocurre en las tuberías de acero <sup>[28]</sup>.

Según los fabricantes de GRE consultados (NOV FGS y FPI industries), actualmente no existe un END con un rango de repetibilidad apto para determinar si una unión adhesiva fue realizada correctamente o no.

No obstante, se ofrece como alternativa para comprobar la calidad de la unión adhesiva la realización de una prueba de presión hidráulica no destructiva para verificar que no existen fugas en las uniones.

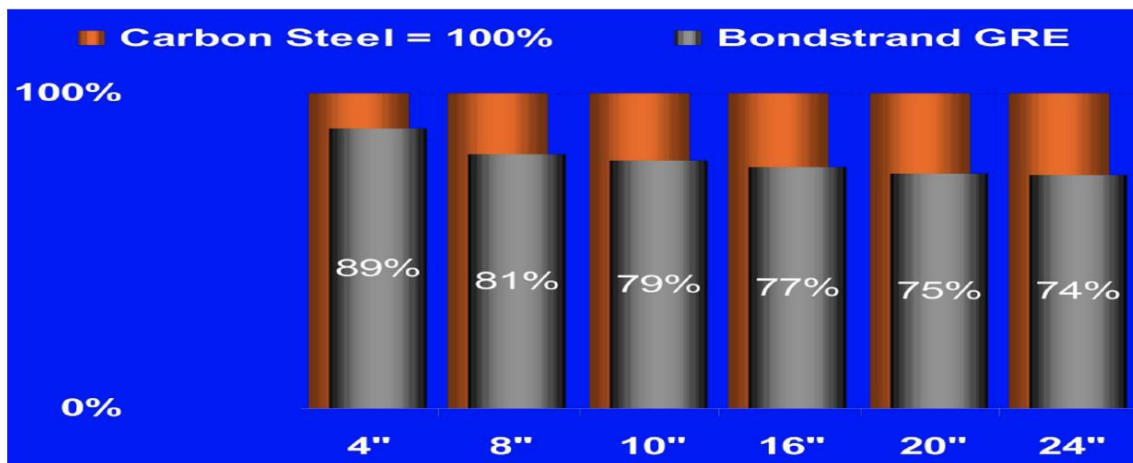
A continuación, se muestran dos gráficas: una gráfica que muestra una comparativa entre los costes de fabricación de tuberías con diferentes materiales (*Figura 6*); y una segunda gráfica que muestra una comparativa entre los costes de instalación de las tuberías de acero al carbono y las tuberías de GRE (*Figura 7*).



*Figura 6. Comparativa entre los costes de fabricación de diferentes materiales tomando como referencia el acero (valor 1) [18], [20].*

En la *Figura 6* se puede apreciar que los costes de fabricación para una tubería de GRE son menores que los costes de fabricación asociados a los diferentes materiales expuestos en el diagrama; además, se puede apreciar como aumentan los costes de fabricación conforme aumenta la calidad del acero a emplear.

Esto es debido a, como se mencionó previamente en este apartado, las diferencias entre los costes de mano de obra asociados a las uniones soldadas en las tuberías de acero y a las uniones adhesivas en las tuberías de GRE; ya que las uniones soldadas requieren un mayor número de verificaciones para comprobar la calidad de la unión; además, durante la fabricación de tuberías de acero se consume más energía respecto a la fabricación de tuberías de GRE, lo cual también contribuye a que los costes de fabricación asociados a las tuberías de acero sean superiores a los costes de fabricación asociados a las tuberías de GRE.



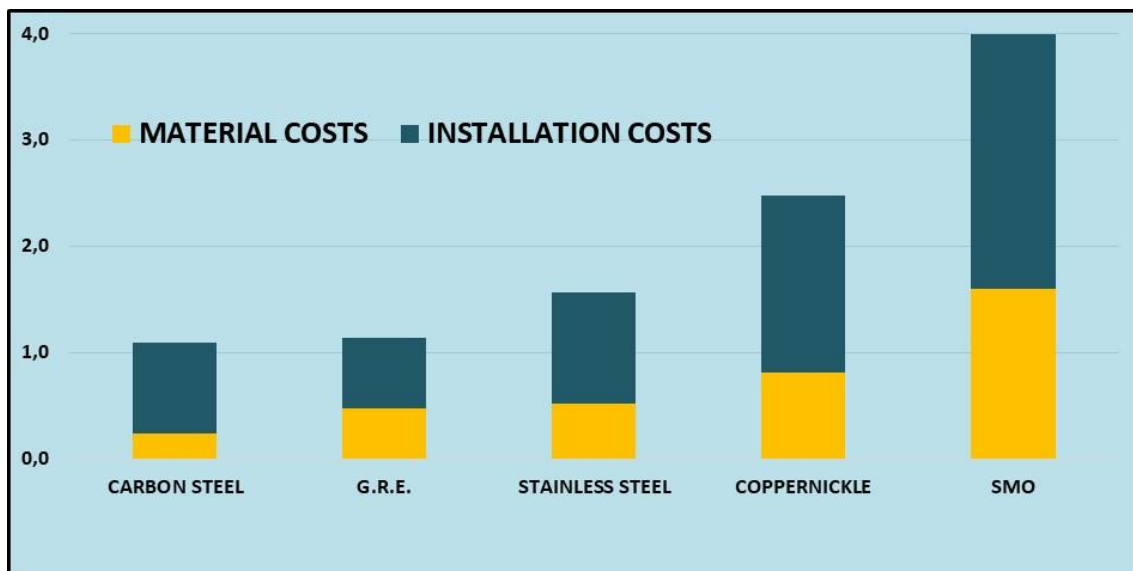
*Figura 7. Comparativa entre los costes de instalación en tuberías de acero al carbono y GRE según el diámetro de la tubería [18], [20].*

En la *Figura 7* se puede apreciar una comparativa entre los costes de instalación de las tuberías de acero al carbono y los costes de instalación de las tuberías de GRE.

Como se puede observar, conforme aumenta el diámetro de la tubería a emplear, los costes de instalación de las tuberías de GRE van disminuyendo; esto es debido a que a partir de tuberías de diámetro comprendido entre 6-8” el span de suportación se iguala al de las tuberías de acero, y por tanto los costes asociados a la instalación se reducen; ya que, aunque en sí la suportación necesaria para las tuberías de GRE es ligeramente superior, como las tuberías de GRE son más livianas que las tuberías de acero, se requiere de menor maquinaria para el transporte y la colocación de las tuberías, lo cual supone también un ahorro en costes considerable [29].

El span de suportación es la distancia comprendida entre dos soportes consecutivos en una tubería.

Por último, como conclusión, se ilustra en la *Figura 8* un gráfico general comparativo del coste de material y del coste de instalación entre tuberías de diferentes materiales (acero al carbono, acero inoxidable, CuNi y SMO) y tuberías de GRE.



*Figura 8. Comparativa de los costes de material y los costes de instalación para tuberías de diferentes materiales [18], [20].*

Si realizamos una comparativa entre el acero al carbono y el GRE, se puede apreciar como el coste de material asociado al GRE es mayor que el coste de material asociado al acero al carbono; sin embargo, el coste de instalación asociado a las tuberías de GRE es menor que el coste de instalación asociado a las tuberías de acero. Por tanto, se puede apreciar en el diagrama como el coste total entre las tuberías de acero al carbono y las tuberías de GRE es muy similar.

No obstante, conforme aumenta la calidad del acero a emplear, los costes de material y los costes de instalación asociados a dicho material aumentan respecto al caso de las tuberías de acero al carbono, obteniéndose finalmente un coste total superior al obtenido con tuberías de GRE.

#### **4.1.2. CONTRIBUCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS EN LA REDUCCIÓN DEL “LIFE CYCLE COST” DE LA PLANTA**

Como se mencionó en el capítulo “4.1.1 *Contribución de los materiales compuestos en la reducción de la inversión inicial y los costes de instalación*”, dentro de las diferentes variantes de GRP, centraremos este análisis concretamente en las tuberías de GRE.

La instalación de tuberías de GRE contribuyen en gran medida a la reducción del “Life Cycle Cost” de los propios sistemas de tuberías, y en definitiva de la planta industrial.

Para ello, tenemos que referirnos nuevamente a las propiedades mecánicas, físicas y químicas que presentan intrínsecamente las tuberías realizadas a partir de GRE, lo cual permite que la tubería no se vea afectada, ni de forma interna ni de forma externa, por la corrosión. No obstante, cabe recalcar que las tuberías de GRE no se ven afectadas por la corrosión siempre y cuando el resultado final sea fruto de un estudio de diseño en el cual se hayan verificado que las propiedades que la tubería va a ofrecer son aptas para las especificaciones funcionales y de diseño requeridas por el servicio en el cual se van a instalar.

Los parámetros fundamentales que condicionan el diseño de una tubería de GRE son: la presión y la temperatura máxima de operación, la compatibilidad química entre el material compuesto de la tubería y el fluido que transportan, y el correcto diseño de la suportación (tras la realización de un análisis de flexibilidad y cargas, tanto en tipo como en número de soportes requeridos).

Si dichos parámetros se cumplen, los fabricantes de tuberías de GRE garantizan como mínimo 40 años de un correcto funcionamiento del sistema, sin la necesidad de ningún tipo de mantenimiento preventivo <sup>[14], [30]</sup>.

Esto implica que, durante el tiempo en servicio u operación de estas líneas, siempre y cuando las condiciones para las cuales fueron diseñadas no se vean alteradas, dichas líneas no requerirán ningún tipo de intervención o mantenimiento.

Si se comparan las tuberías de GRE con las tuberías de acero, en éstas, el establecimiento de programas de mantenimiento preventivo y las periódicas reparaciones que requieren debido a la disminución del espesor de la pared de la tubería generadas por la corrosión interna y/o externa hasta el punto de la posible aparición de fugas, provocan que el coste asociado a la reparación/reemplazo del material, junto con el coste asociado a la mano de obra necesaria para la desinstalación de la tubería dañada y para la instalación de la nueva tubería, añadiendo además el coste asociado a las pérdidas provocadas por la interrupción del servicio que ofrece el sistema, hacen que el “Life Cycle Cost” de la instalación aumente considerablemente <sup>[10]</sup>.

En el mejor de los casos, el cual ocurrirá cuando se utilicen aceros de alta calidad (aceros inoxidables de tipo dúplex), será necesario como mínimo un reemplazo de la tubería cada 20 años (para aceros de menor calidad, será necesario un reemplazo como mínimo cada 10 años), sin tener en cuenta todas las actuaciones correctivas, en áreas o puntos concretos, que serán necesarias realizar durante el período de vida útil de la tubería, debidas a la pérdida del espesor de la pared de la tubería provocadas por la corrosión interna y/o externa <sup>[31], [32]</sup>.



### **4.1.3. CONTRIBUCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS A LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA DE CO<sub>2</sub>**

Como se mencionó en el capítulo “4.1.1 *Contribución de los materiales compuestos en la reducción de la inversión inicial y los costes de instalación*”, dentro de las diferentes variantes de GRP, centraremos este análisis concretamente en las tuberías de GRE.

Las tuberías de GRE pueden competir con las tuberías realizadas a partir de materiales metálicos en el entorno ecológico actual, debido a los menores requisitos de energía que las tuberías de GRE necesitan durante la fabricación y durante la vida útil de la misma.

Haciendo referencia al calentamiento global, el uso de tuberías de GRE, en comparación con las tuberías de acero al carbono, reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y, por lo tanto, convierte a las tuberías de GRE en una opción a tener en cuenta, ya que aportan un valor añadido al objetivo de desarrollo sostenible de la industria.

Tanto en las industrias destinadas a la fabricación de tuberías como en el uso de la tubería durante la vida útil de la misma se consume energía. Las tuberías presentan un papel muy importante en la vida cotidiana de las personas: transportando agua potable, transportando aguas residuales para su posterior depuración, etc. Las tuberías también se utilizan industrialmente para transportar petróleo, gas natural, productos químicos y materias primas industriales; por tanto, el diseño de tuberías juega un papel igualmente importante en el mantenimiento de un entorno ecológico.

Para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a largo plazo, y por tanto reducir los efectos nocivos que el CO<sub>2</sub> genera, es necesario buscar fuentes de energía alternativas. No obstante, realizar un cambio hacia dichas fuentes de energía conlleva un tiempo considerable, ya que la tecnología necesaria para ello se encuentra actualmente en fases de desarrollo. Mientras tanto, las empresas deben cumplir con la parte de ayudar a dicha transición, volviéndose cada vez más ecológicas, dentro de las posibles limitaciones que se puedan encontrar.

La eficiencia energética se puede aplicar en todos los ámbitos, y la fabricación de tuberías no es una excepción.

Se podría llegar a pensar que una tubería fabricada a partir de un material natural, como es el caso del hierro, generaría un menor impacto en el ambiente; sin embargo, está comprobado que las tuberías fabricadas de acero generan un mayor impacto ambiental respecto a las fabricadas con GRE, además de tener una vida útil menor a la del GRE; por tanto, el GRE es una alternativa eficaz para reducir el impacto ambiental, desde la perspectiva de la industria <sup>[31], [32]</sup>.

Las cuatro principales ventajas respecto a la contribución a la reducción de la huella de CO<sub>2</sub> que presentan las tuberías fabricadas a partir de GRE frente a las tuberías fabricadas a partir de aceros son <sup>[31], [32]</sup>:

- La energía requerida para la fabricación de las tuberías.
- La energía requerida por la tubería durante la vida útil de la misma.
- El peso de las tuberías: entre 1/5-1/6 más livianas que la tubería de acero equivalente.
- La vida útil de la tubería: las tuberías de GRE presentan una vida útil de 40 años como mínimo, mientras que para el mejor caso de una tubería de acero (tuberías de acero de alta calidad: dúplex) presentan una vida útil de aproximadamente 20 años (teniendo en cuenta mantenimientos correctivos y preventivos durante la vida útil de la misma).

#### **4.1.3.1. ENERGÍA REQUERIDA PARA LA FABRICACIÓN DE LAS TUBERÍAS**

Si se toma como referencia una tubería de 1 km de longitud, la energía requerida para fabricar dicha tubería a partir de GRE es un 31% menor que la energía requerida para fabricar dicha tubería a partir de acero al carbono <sup>[31], [32]</sup>.

La mayoría de los sistemas de tuberías que se encuentran actualmente en operación están fabricados a partir de acero al carbono, por lo que requieren de una gran cantidad de energía para su fabricación. Dichas tuberías se fabrican a partir de la conformación y de la soldadura de chapas de acero, donde la fabricación de las propias chapas de acero también conlleva un alto consumo de energía.

En contraposición, las tuberías de GRE están formadas por fibra de vidrio impregnada en resina catalizada, las cuales van enrollándose gracias a la ayuda de un mandril giratorio. La orientación de enrollamiento de las fibras de vidrio le confiere a la tubería la resistencia mecánica (mayor en la dirección de orientación de la fibra), mientras que la resina termoestable (epoxi) aporta las propiedades físicas y químicas al producto acabado.

#### **4.1.3.2. ENERGÍA REQUERIDA POR LA TUBERÍA DURANTE SU VIDA ÚTIL**

Los sistemas de tuberías de GRE pueden aportar cerca de un 65% de ahorro energético calculado para un tiempo en servicio de 20 años, debido principalmente a su superficie interior lisa (coeficiente de Hazen-Williams de 150), la cual no se deteriora durante la vida útil de la misma, frente a la superficie interior de las tuberías de acero (coeficiente de Hazen-Williams entre 90-110), la cual se va deteriorando durante la vida útil de la tubería debido a la corrosión interna, provocando además una disminución del coeficiente de Hazen-Williams durante la vida útil de la misma <sup>[31], [32]</sup>.

Por tanto, se requiere de menor energía de bombeo en las tuberías de GRE; ya que, para conseguir las mismas condiciones de operación en una tubería de acero, se necesitaría de mayor energía de bombeo, dado que el coeficiente de Hazen-Williams que presentan las tuberías de acero es menor.

#### 4.1.3.3. PESO DE LAS TUBERÍAS

Como se ha mencionado en anteriores apartados y como se muestra en la *Tabla 6*, las tuberías de GRE son más ligeras que su equivalente en acero; por tanto, las emisiones de CO<sub>2</sub> que generan durante su transporte son menores que las que generaría su equivalente en acero. En el caso de transporte por camión, las emisiones de CO<sub>2</sub> pueden reducirse hasta en un 77% <sup>[31], [32]</sup>.

	<b>GRE</b>	<b>CS Pipe</b>
<b>Pipe Size (inch)</b>	12	12
<b>Pressure Rating (bar)</b>	20	20
O.D. (mm)	328.6	323.9
I.D. (mm)	313.9	303.2
Wall Thickness (mm)	6.8	10.3
Length (m)	11.89	11.89
Weight (kg)	213.3	946.9
Weight (kg/m)	17.9	79.6

*Tabla 6. Comparativa entre los pesos de una tubería de GRE y una tubería de acero al carbono [31]*

#### **4.1.3.4. VIDA ÚTIL DE LAS TUBERÍAS**

Debido a la no necesidad de mantenimiento preventivo y correctivo causado por la no afección de la tubería por la corrosión, conlleva a que no sea necesario el reemplazo/repación de la tubería durante la vida útil de la misma; a diferencia de las tuberías de acero, donde, en el mejor de los casos, y dependiendo del fluido y de las condiciones de operación, deben reemplazarse al menos una vez cada 20 años (con el consumo de energía asociado a la fabricación, transporte, montaje, etc.).

## **4.2. FASES DE DESARROLLO**

### **4.2.1. MODELO GENERAL DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE MEDIANTE ELECTRÓLISIS**

El esquema general de una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis consta principalmente de cuatro subprocesos: el proceso de producción, el proceso de purificación, el proceso de almacenamiento y el proceso de refrigeración.

El proceso de producción es la etapa en la cual el hidrógeno es producido, para su correcto funcionamiento será necesario: el agua destilada, el electrolito (el cual dependerá del tipo de electrolizador utilizado) y la energía eléctrica que alimenta al electrolizador.

En cuanto a los electrolizadores se refiere, en este proyecto se van a evaluar dos tipos de electrolizadores: electrolizadores alcalinos y electrolizadores PEM (Proton Exchange Membrane).

Los electrolizadores alcalinos utilizan un electrolito líquido, como puede ser el hidróxido de sodio (KOH); y en el caso de los electrolizadores PEM, se utiliza un electrolito polimérico sólido, el cual es una fina membrana sólida conductora de iones.

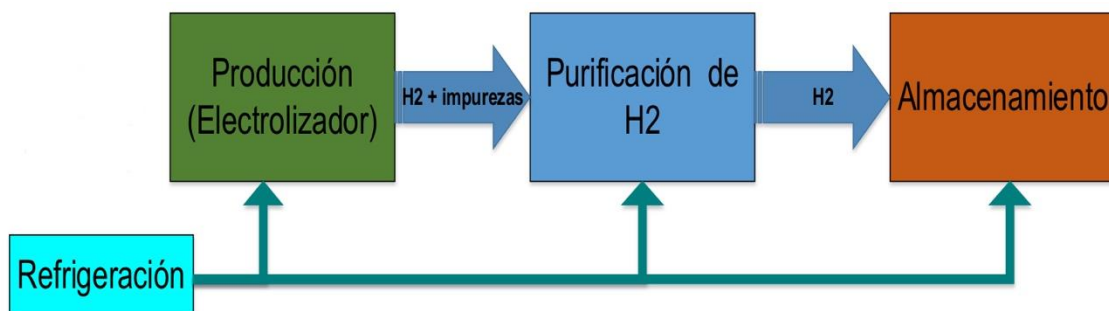
Cabe destacar que los electrolizadores tipo PEM son los más adecuados para acoplarse a la variabilidad de las energías renovables, son compactos y obtienen un hidrógeno de mayor pureza que los electrolizadores tipo alcalino.

El proceso de purificación es la segunda etapa, en la cual se hace pasar el hidrógeno obtenido por un proceso de limpieza que retira las posibles impurezas que pudiese contener, además de retirar el agua, el electrolito (en el caso de utilizar electrolito líquido) y el oxígeno restante.

La tercera etapa es el proceso de almacenamiento, en la cual el hidrógeno seco y purificado obtenido en el proceso de purificación es sometido a un proceso de compresión, con el objetivo de aumentar la presión de dicho hidrógeno para poder almacenarlo de forma más eficiente en tanques de alta presión.

Por último, se encuentra el proceso de refrigeración, el cual se encarga de mantener una temperatura de operación adecuada de todo el sistema completo, con el fin de obtener una mayor eficiencia de la propia planta <sup>[33]</sup>.

En la *Figura 9*, se muestra un esquema visual sobre los procesos que contiene una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis.

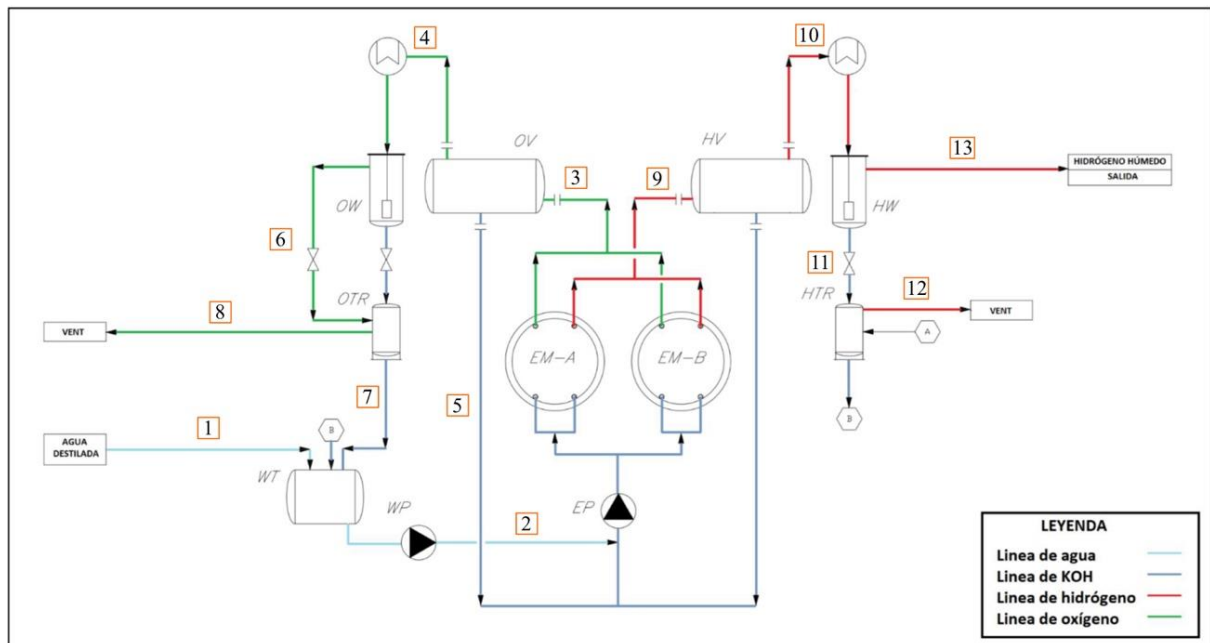


*Figura 9. Subprocesos en una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis [33]*

*Nota:* Se van a evaluar los siguientes procesos para el caso de electrolizadores tipo alcalino, dado que la composición química de los fluidos que circulan por las líneas de tuberías es más compleja respecto al caso de electrolizadores tipo PEM; no obstante, dicho análisis será extrapolable a los electrolizadores tipo PEM. Para el caso de electrolizadores PEM, no aplicará el electrolito líquido (KOH) mencionado posteriormente.

#### 4.2.1.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN

En la *Figura 10*, se muestra un diagrama esquemático del proceso de producción de una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis:



*Figura 10. Diagrama esquemático del proceso de producción [34]*

El esquema utilizado para referenciar el proceso de producción contiene las siguientes líneas <sup>[33]</sup>:

- Línea 1: Es la línea que traslada el agua destilada hacia el tanque de almacenamiento de agua (WT), el cual almacena el agua residual procedente de los procesos de tratamientos de gases y lo mezcla con dicha agua destilada para luego ser bombeado hacia los electrolizadores.
- Línea 2: Es la línea que traslada el agua destilada + electrolito líquido (KOH) desde el tanque de almacenamiento (WT) hacia los dos electrolizadores (EM-A, EM-B).



Dicha fase líquida es impulsada mediante una bomba (WP) hacia dichos electrolizadores.

Es en dichos electrolizadores donde se utiliza la energía procedente de fuentes renovables como la energía de alimentación, y es gracias a ello que obtenemos al final del proceso el llamado “Hidrógeno verde”.

- Línea 3: Es la línea de oxígeno, y es aquella que sale de ambos electrolizadores (EM-A, EM-B) hacia el separador horizontal de gas (OV), el cual se utiliza con el objetivo de separar la fase gaseosa (oxígeno) de la fase líquida (agua + electrolito).
- Línea 4: Es la línea que sale del separador horizontal de gas (OV) hacia el separador vertical de gas (OW), cuya función es separar de la fase gaseosa el líquido saturado restante.
- Línea 5: Es la línea de recirculación de la fase líquida (agua + electrolito) hacia los dos electrolizadores (EM-A, EM-B), con el fin de reutilizar parte del agua + electrolito de nuevo en el proceso.

Con el objetivo de facilitar la reutilización de dicha fase líquida, se introduce una bomba (EP) para que la mezcla de la fase líquida procedente del tanque de almacenamiento (WT) y la fase líquida procedente de la recirculación se realice de forma eficiente.

- Línea 6: Es la línea que sale del separador vertical de gas (OW) hacia el tanque de alivio (OTR), el cual tiene la función de almacenar el agua restante del proceso y el residuo de electrolito, para después conectarla al tanque de almacenamiento (WT) y así realimentar el proceso.

- Línea 7: Es la línea que conecta el tanque de alivio (OTR) con el tanque de almacenamiento (WT), con el objetivo de realimentar el proceso, tal y como se mencionó en el punto anterior.
- Línea 8: Es la línea que expulsa el oxígeno gaseoso hacia la atmósfera.
- Línea 9: Es la línea de hidrógeno, y es aquella que sale de ambos electrolizadores (EM-A, EM-B) hacia el separador horizontal de gas (HV), el cual se utiliza con el objetivo de separar la fase gaseosa (hidrógeno) de la fase líquida (agua + electrolito).
- Línea 10: Es la línea que sale del separador horizontal de gas (HV) hacia el separador vertical de gas (HW), cuya función es separar de la fase gaseosa el líquido saturado restante.
- Línea 11: Es la línea que sale del separador vertical de gas (HW) hacia el tanque de alivio (HTR), el cual tiene la función de almacenar el agua restante del proceso y el residuo de electrolito.
- Línea 12: Es la línea que expulsa el oxígeno gaseoso hacia la atmósfera.
- Línea 13: Es la línea que traslada el hidrógeno obtenido en el proceso de producción hacia el tanque de presión (HD-A), el cual se detallará en el proceso de purificación.

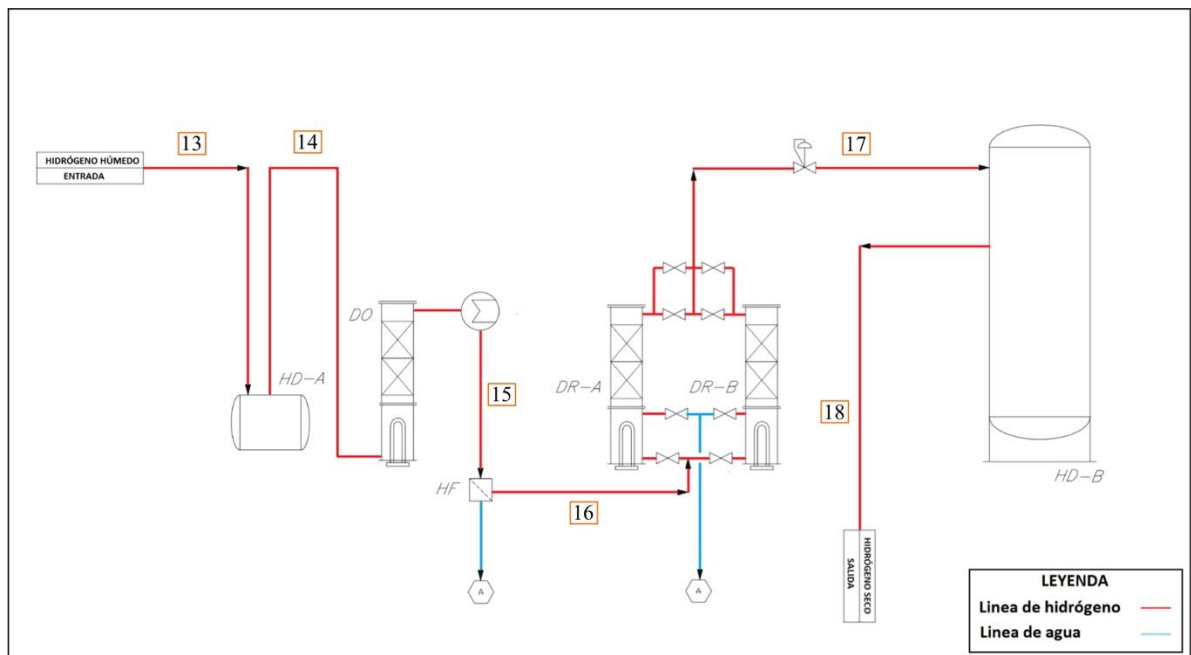
En la *Tabla 7*, se muestran las temperaturas y presiones máximas de operación para las líneas utilizadas en el proceso de producción de una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis:

PRODUCCIÓN				
LÍNEA		TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (bar)	COMPOSICIÓN
1	AGUA DESTILADA-WT	25	1	H <sub>2</sub> O
2	WT- (EM-A; EM-B)	35	30	H <sub>2</sub> O+KOH
3	(EM-A; EM-B)-OV	80	30	H <sub>2</sub> O+KOH+O <sub>2</sub>
4	OV-OW	80	30	H <sub>2</sub> O (vapor)+KOH+O <sub>2</sub>
5	(OV; HV) - (EM-A; EM-B)	80	30	H <sub>2</sub> O+KOH
6	OW-OTR	35	1	H <sub>2</sub> O+KOH+O <sub>2</sub>
7	OTR-WT	35	1	H <sub>2</sub> O+KOH
8	OTR-VENT	35	1	O <sub>2</sub>
9	(EM-A; EM-B)-HV	80	30	H <sub>2</sub> O+KOH+H <sub>2</sub>
10	HV-HW	80	30	H <sub>2</sub> O (vapor)+KOH+O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>
11	HW-HTR	35	1	H <sub>2</sub> O+KOH+H <sub>2</sub>
12	HTR-VENT	35	1	H <sub>2</sub>
13	HW-(HD-A)	35	30	H <sub>2</sub> O+O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>

*Tabla 7. Parámetros máximos de operación en el proceso de producción (Fuente: Elaboración Propia)*

#### 4.2.1.2. PROCESO DE PURIFICACIÓN

En la *Figura 11*, se muestra un diagrama esquemático del proceso de purificación de una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis:



*Figura 11. Diagrama esquemático del proceso de purificación [34]*

El esquema utilizado para referenciar el proceso de purificación contiene las siguientes líneas <sup>[33]</sup>:

- **Línea 13:** Tal y como se mencionó en el proceso de producción, es la línea que traslada el hidrógeno con impurezas hacia el tanque de presión (HD-A), el cual lo almacena y estabiliza la presión antes de enviar el flujo de hidrógeno hacia el reactor de-oxidante (DO).

- Línea 14: Es la línea que traslada el flujo de hidrógeno desde el tanque de presión (HD-A) hacia el reactor de-oxidante (DO), el cual se utiliza con el objetivo de eliminar el oxígeno que acompaña al flujo de hidrógeno.  
En el reactor de-oxidante (DO) tiene lugar un proceso de reacción de una pequeña fracción de oxígeno con una cantidad estequiométrica de hidrógeno, generando agua, que luego será condensada y eliminada en el filtro de hidrógeno (HF).
- Línea 15: Es la línea que traslada el flujo de hidrógeno desde el reactor de-oxidante (DO) hacia el filtro de hidrógeno (HF), el cual se encarga de retirar la humedad del hidrógeno saturado.
- Línea 16: Es la línea que traslada el flujo de hidrógeno desde el filtro de hidrógeno (HF) hacia los secadores (DR-A, DR-B), los cuales se utilizan con el fin de secar el hidrógeno.
- Línea 17: Es la línea que traslada el hidrógeno seco desde los secadores (DR-A, DR-B) hacia un tanque de presión de almacenamiento de hidrógeno (HD-B).
- Línea 18: Es la línea que traslada el hidrógeno seco procedente del tanque de presión de almacenamiento de hidrógeno (HD-B) hacia la etapa de compresión (1ST-C, 2ST-C), la cual se detallará en el proceso de almacenamiento.

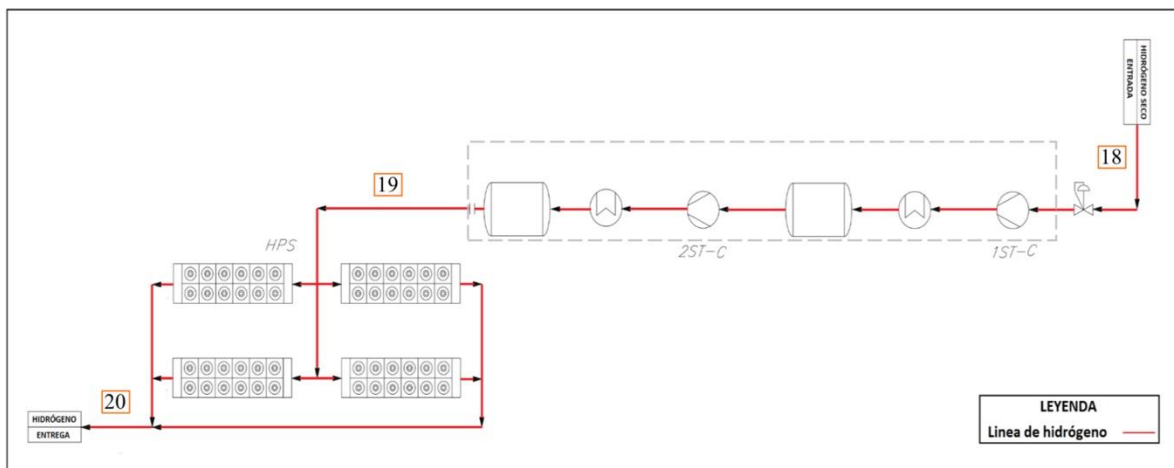
En la *Tabla 8*, se muestran las temperaturas y presiones máximas de operación para las líneas utilizadas en el proceso de purificación de una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis:

PURIFICACIÓN				
	LÍNEA	TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (bar)	COMPOSICIÓN
14	(HD-A)-DO	35	30	O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>
15	DO-HF	50	30	H <sub>2</sub> O+H <sub>2</sub>
16	HF - (DR-A; DR-B)	35	30	H <sub>2</sub>
17	(DR-A; DR-B)-(HD-B)	85	30	H <sub>2</sub> (seco)
18	(HD-B) - (1ST-C)	85	30	H <sub>2</sub> (seco)

*Tabla 8. Parámetros máximos de operación en el proceso de purificación (Fuente: Elaboración Propia)*

#### 4.2.1.3. PROCESO DE ALMACENAMIENTO

En la *Figura 12*, se muestra un diagrama esquemático del proceso de almacenamiento de una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis:



*Figura 12. Diagrama esquemático del proceso de almacenamiento [34]*

El esquema utilizado para referenciar el proceso de almacenamiento contiene las siguientes líneas <sup>[33]</sup>:

- Línea 18: Tal y como se mencionó en el proceso de purificación, es la línea que traslada el hidrógeno seco procedente del tanque de presión de almacenamiento de hidrógeno (HD-B) hacia la etapa de compresión (1ST-C, 2ST-C), la cual se utiliza con el objetivo de aumentar la presión del hidrógeno antes de su almacenamiento en los tanques de alta presión (HPS), con el fin de obtener una mayor eficiencia de almacenaje.
- Línea 19: Es la línea que traslada el hidrógeno a alta presión procedente de la etapa de compresión (1ST-C, 2ST-C) hacia los tanques de almacenamiento de alta presión (HPS).

- Línea 20: Es la línea que conecta los tanques de almacenamiento de alta presión (HPS) con el punto de entrega del hidrógeno, para su posterior uso.

En la *Tabla 9*, se muestran las temperaturas y presiones máximas de operación para las líneas utilizadas en el proceso de almacenamiento de una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis:

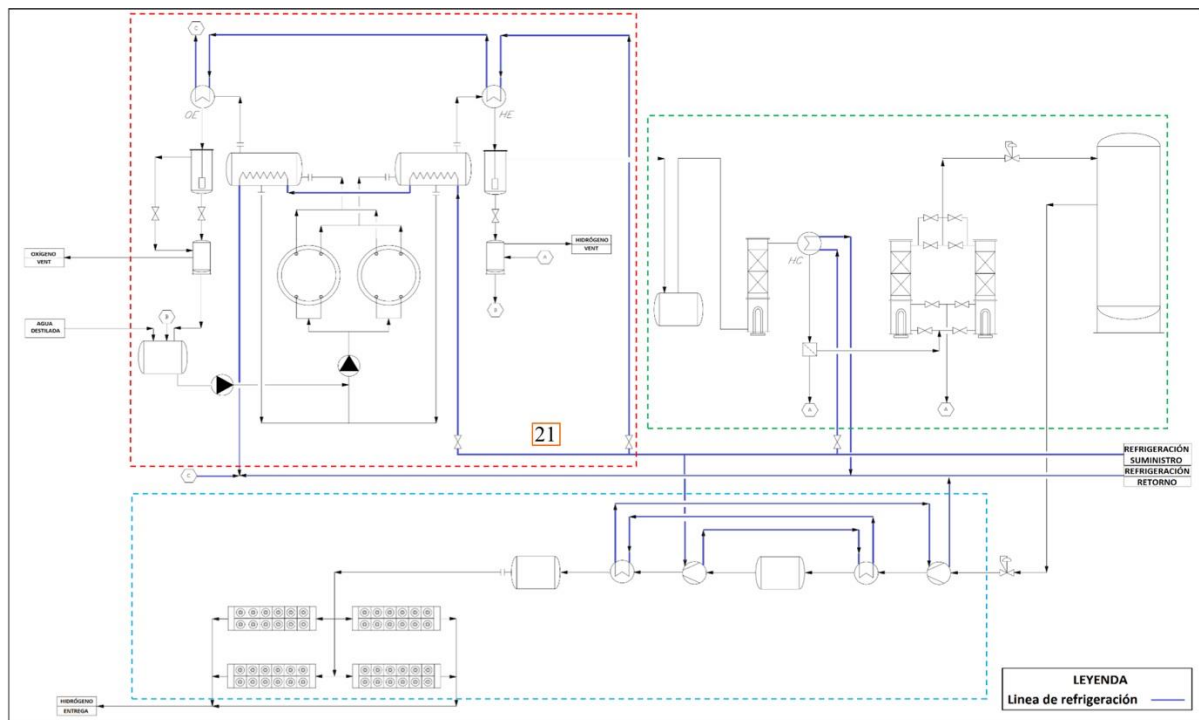
ALMACENAMIENTO				
LÍNEA		TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (bar)	COMPOSICIÓN
18	(HD-B) - (1ST-C)	85	30	H2(seco)
19	(1ST-C)-HPS	85	350	H2(seco)
20	HPS-H2(entrega)	35	350	H2(seco)

*Tabla 9. Parámetros máximos de operación en el proceso de almacenamiento (Fuente: Elaboración Propia)*



#### 4.2.1.4. PROCESO DE REFRIGERACIÓN

En la *Figura 13*, se muestra un diagrama esquemático del proceso de refrigeración de una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis:



*Figura 13. Diagrama esquemático del proceso de refrigeración [34]*

El esquema utilizado para referenciar el proceso de refrigeración contiene la siguiente línea <sup>[33]</sup>:

- Línea 21: La línea de refrigeración es aquella que se encarga de asegurar que la temperatura durante el funcionamiento de la planta se mantiene en los niveles idóneos, para obtener la máxima eficiencia de la planta.

En la *Tabla 10*, se muestran las temperaturas y presiones máximas de operación para las líneas utilizadas en el proceso de refrigeración de una planta de generación de hidrógeno verde mediante electrólisis:

REFRIGERACIÓN			
LÍNEA	TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (bar)	COMPOSICIÓN
21   R. SUMINISTRO-R. RETORNO	35	5	H2O

*Tabla 10. Parámetros máximos de operación en el proceso de refrigeración (Fuente: Elaboración propia)*

### ***4.3. ESTUDIO DE VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DE TUBERÍAS COMPOSITE EN LOS SISTEMAS DE TUBERÍAS DE LA PLANTA***

En las tablas que se anexan en cada uno de los siguientes apartados, se han analizado todas las líneas que intervienen en cada proceso (producción, refrigeración, almacenamiento y purificación), indicando las líneas que serían aptas para su uso con GRE e indicando las líneas que no serían aptas para su uso con GRE, sustituyendo a las tuberías metálicas que son mayormente utilizadas en los procesos de una planta de generación de hidrógeno verde, como pueden ser tuberías de acero inoxidable o tuberías de acero inoxidable dúplex (los cuales son de una calidad superior).

Las conclusiones obtenidas para cada línea de servicio se basan principalmente al comportamiento que presentan las tuberías de GRE frente la combinación de los siguientes parámetros de trabajo:

- Temperatura de operación.
- Presión de operación.
- Composición química del fluido que transporta la tubería.

El análisis de este comportamiento se ha basado en el estudio de la “Chemical Corrosion Guide” de los distintos fabricantes, para analizar así la compatibilidad de la composición de la tubería correspondiente con el fluido que transportaría en el rango de temperaturas y presiones que el servicio específico requiera; además, resulta de gran importancia tener en consideración las recomendaciones que el departamento de ingeniería de aplicación de los distintos fabricantes consultados nos ofrece, para aquellas líneas en las cuales se produzca una combinación de los parámetros de trabajo anteriormente especificados la cual no aparezca tipificado en la “Chemical Corrosion Guide” [35].

### 4.3.1. PROCESO DE PRODUCCIÓN

A continuación, en la *Tabla 11* se adjuntan los parámetros de trabajo en los cuales opera cada línea del proceso de producción, junto con la evaluación referente a la aptitud de la línea para la utilización de GRE.

PRODUCCIÓN					
LINEA		TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (bar)	COMPOSICIÓN QUÍMICA	TUBERÍA DE GRE APTA PARA SU USO
1	AD-WT	25	1	H <sub>2</sub> O	SI
2	WT-(EM-A;EM-B)	35	30	H <sub>2</sub> O+KOH	SI
3	(EM-A;EM-B)-OV	80	30	H <sub>2</sub> O+KOH+O <sub>2</sub>	NO
4	OV-OW	80	30	H <sub>2</sub> O (vapor)+KOH+O <sub>2</sub>	NO
5	(OV;HV)-(EM-A;EM-B)	80	30	H <sub>2</sub> O+KOH	NO
6	OW-OTR	35	1	H <sub>2</sub> O+KOH+O <sub>2</sub>	SI
7	OTR-WT	35	1	H <sub>2</sub> O+KOH	SI
8	OTR-VENT	35	1	O <sub>2</sub>	SI
9	(EM-A;EM-B)-HV	80	30	H <sub>2</sub> O+KOH+H <sub>2</sub>	NO
10	HV-HW	80	30	H <sub>2</sub> O (vapor)+KOH+O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>	NO
11	HW-HTR	35	1	H <sub>2</sub> O+KOH+H <sub>2</sub>	SI
12	HTR-VENT	35	1	H <sub>2</sub>	SI
13	HW-(HD-A)	35	30	H <sub>2</sub> O+O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>	NO

*Tabla 11. Tabla de viabilidad para las líneas incluidas en el proceso de producción (Fuente:*

*Elaboración Propia)*

- Línea 1: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O únicamente, y dado que la temperatura máxima de operación es de 25°C, se concluye que esta línea sí es apta para el uso de GRE.
- Línea 2: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O y KOH, pero dado que la temperatura máxima de operación es de 35°C, se concluye que esta línea sí es apta para el uso de GRE.

- Línea 3: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O, KOH y O<sub>2</sub>. La temperatura máxima de operación es de 80°C; pero dado a que la línea transporta KOH, y la “Chemical Corrosion Guide” indica que la temperatura máxima de operación que admite el GRE para el transporte de KOH es de 66°C; y que, además, la presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de O<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.
- Línea 4: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O vapor, KOH y O<sub>2</sub>. La temperatura máxima de operación es de 80°C; pero dado a que la línea transporta KOH, y la “Chemical Corrosion Guide” indica que la temperatura máxima de operación que admite el GRE para el transporte de KOH es de 66°C; y que, además, la presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de O<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.
- Línea 5: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O y KOH. La temperatura máxima de operación es de 80°C; pero dado a que la línea transporta KOH, y la “Chemical Corrosion Guide” indica que la temperatura máxima de operación que admite el GRE para el transporte de KOH es de 66°C, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.  
Sin embargo, esta línea sí es apta para el uso de GRE en el caso de utilizar electrolizadores tipo PEM, ya que éstos no utilizan electrolito líquido (KOH) y las tuberías de GRE si admiten el transporte de H<sub>2</sub>O a 80 °C.
- Línea 6: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O, KOH y O<sub>2</sub>, pero dado que la temperatura máxima de operación es de 35°C, se concluye que esta línea sí es apta para el uso de GRE.
- Línea 7: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O y KOH, pero dado que la temperatura máxima de operación es de 35°C, se concluye que esta línea sí es apta para el uso de GRE.
- Línea 8: Esta línea transporta O<sub>2</sub>, y dado que la presión máxima de operación es de 1 bar, se concluye que esta línea sí es apta para el uso de GRE.

- Línea 9: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O, KOH y H<sub>2</sub>. La temperatura máxima de operación es de 80°C; pero dado a que la línea transporta KOH, y la “Chemical Corrosion Guide” indica que la temperatura máxima de operación que admite el GRE para el transporte de KOH es de 66°C; y que, además, la presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de H<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.
- Línea 10: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O vapor, KOH, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. La temperatura máxima de operación es de 80°C; pero dado a que la línea transporta KOH, y la “Chemical Corrosion Guide” indica que la temperatura máxima de operación que admite el GRE para el transporte de KOH es de 66°C; y que, además, la presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de O<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.
- Línea 11: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O, KOH y H<sub>2</sub>; pero como tanto la temperatura máxima de operación (35°C) como la presión máxima de operación (1 bar) son inferiores a las temperaturas y presiones máximas de operación que admiten las tuberías de GRE, se concluye que esta línea sí es apta para el uso de GRE.
- Línea 12: Esta línea transporta H<sub>2</sub>, y dado que la presión máxima de operación es de 1 bar, se concluye que esta línea sí es apta para el uso de GRE.
- Línea 13: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. La presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de O<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>; por tanto, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.

### 4.3.2. PROCESO DE PURIFICACIÓN

A continuación, en la *Tabla 12* se adjuntan los parámetros de trabajo en los cuales opera cada línea del proceso de purificación, junto con la evaluación referente a la aptitud de la línea para la utilización de GRE.

PURIFICACIÓN				
LINEA	TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (bar)	COMPOSICIÓN QUÍMICA	TUBERÍA DE GRE APTA PARA SU USO
14	(HD-A)-DO	35	O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>	NO
15	DO-HF	50	H <sub>2</sub> O+H <sub>2</sub>	NO
16	HF-(DR-A;DR-B)	35	H <sub>2</sub>	NO
17	(DR-A;DR-B)-(HD-B)	85	H <sub>2</sub> (seco)	NO
18	(HD-B)-(1ST-C)	85	H <sub>2</sub> (seco)	NO

*Tabla 12. Tabla de viabilidad para las líneas incluidas en el proceso de purificación (Fuente: Elaboración Propia)*

- *Línea 14:* Esta línea transporta O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>; pero como la presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.
- *Línea 15:* Esta línea transporta H<sub>2</sub>O y H<sub>2</sub>; pero como la presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de H<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.

- Línea 16: Esta línea transporta H<sub>2</sub>; pero como la presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de H<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.
- Línea 17: Esta línea transporta H<sub>2</sub> seco; pero como la presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de H<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.
- Línea 18: Esta línea transporta H<sub>2</sub> seco; pero como la presión máxima de operación es de 30 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta excesivo para el transporte de H<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.

Cuando se transporta un gas presurizado por el interior de una tubería de GRE, dicho gas aplica mucha energía en la pared de la tubería; es decir, le aplica mucha energía a la matriz composite a partir de la cual se encuentra compuesta. Este hecho, debido a las propiedades físicas del compuesto, podría dañar la estructura del laminado.

No obstante, cabe destacar que existen unas tuberías enrollables denominadas “Thermo-Plastic Composite piping”, las cuales se podría decir que son una combinación entre la tecnología GRP (Glass fiber Reinforced Plastic) y los termoplásticos, que sí soportarían las presiones expuestas en la *Tabla 12*; de hecho, dichas tuberías soportan por especificación hasta 172 bares, pero actualmente sólo se encuentra codificada por la norma ASME B31.12 para el transporte de hidrógeno a través de líneas enterradas, pero no aéreas, las cuales representan el caso que nos ocupa <sup>[36], [37], [38]</sup>.



### 4.3.3. PROCESO DE ALMACENAMIENTO

A continuación, en la *Tabla 13* se adjuntan los parámetros de trabajo en los cuales opera cada línea del proceso de almacenamiento, junto con la evaluación referente a la aptitud de la línea para la utilización de GRE.

ALMACENAMIENTO					
	LÍNEA	TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (bar)	COMPOSICIÓN QUÍMICA	TUBERÍA DE GRE APTA PARA SU USO
19	(1ST-C)-HPS	85	350	H2(seco)	NO
20	HPS-H2(entrega)	35	350	H2(seco)	NO

*Tabla 13. Tabla de viabilidad para las líneas incluidas en el proceso de almacenamiento (Fuente: Elaboración Propia)*

- Línea 19: Esta línea transporta H<sub>2</sub> seco; pero como la presión máxima de operación es de 350 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta muy excesivo para el transporte de H<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.
- Línea 20: Esta línea transporta H<sub>2</sub> seco; pero como la presión máxima de operación es de 350 bar, la cual tras consultar con los fabricantes resulta muy excesivo para el transporte de H<sub>2</sub>, se concluye que esta línea no es apta para el uso de GRE.

#### 4.3.4. PROCESO DE REFRIGERACIÓN

A continuación, en la *Tabla 14* se adjuntan los parámetros de trabajo en los cuales opera cada línea del proceso de refrigeración, junto con la evaluación referente a la aptitud de la línea para la utilización de GRE.

REFRIGERACIÓN				
LINEA	TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN (°C)	PRESIÓN MÁXIMA DE OPERACIÓN (bar)	COMPOSICIÓN QUÍMICA	TUBERÍA DE GRE APTA PARA SU USO
21	35	5	H <sub>2</sub> O	SI

*Tabla 14. Tabla de viabilidad para las líneas incluidas en el proceso de refrigeración (Fuente: Elaboración Propia)*

- Línea 21: Esta línea transporta H<sub>2</sub>O únicamente, y dado que la temperatura máxima de operación es de 35°C, se concluye que esta línea sí es apta para el uso de GRE.

#### **4.3.5. CONCLUSIONES**

Como conclusión final para este análisis de viabilidad, es importante resaltar el uso de tuberías de GRP; concretamente el uso de tuberías de GRE, ya que son las que cumplen en mayor rango los parámetros de trabajo fundamentales para el correcto funcionamiento del servicio (temperatura, presión y resistencia química) dentro de la familia de los GRP, en algunas líneas que intervienen en los sistemas de tuberías necesarios para el correcto desempeño de una planta de generación de hidrógeno verde. No obstante, como se mencionó al principio del proyecto, dicho análisis es extrapolable tanto a otras plantas industriales como a otras líneas consideradas dentro de los servicios generales de una planta, como pueden ser las líneas contraincendios y las líneas de drenaje.

Sin embargo, resulta importante destacar que actualmente no es técnicamente viable utilizar GRE en todas las líneas que componen el sistema de tuberías de una planta de generación de hidrógeno verde, por lo que es necesario la utilización de acero en ciertas líneas.

Respecto al uso de tuberías de GRE para el transporte de oxígeno, los fabricantes no recomiendan su uso cuando el gas que circula por el interior de la tubería se encuentra a presiones superiores a aproximadamente 5 bar para tuberías aéreas y aproximadamente 10 bar para tuberías enterradas; además, no es recomendable su uso para el transporte de oxígeno cuando la temperatura máxima de operación es superior a 93°C.

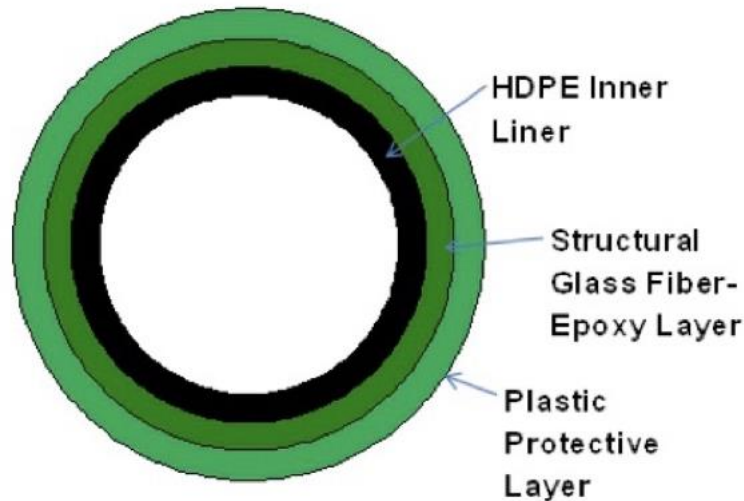
Respecto al uso de tuberías de GRE para el transporte de hidrógeno gaseoso, los fabricantes no recomiendan su uso a presiones elevadas, debido a que el hidrógeno es un gas inflamable.

Haciendo referencia a lo expuesto en los últimos dos párrafos, es principalmente posible el uso de tuberías de GRE en la parte relacionada con el proceso de producción y el proceso de refrigeración de la planta de generación de hidrógeno verde, pero generalmente no es posible en la parte relacionada con el proceso de purificación y de almacenamiento, ya que en dichos procesos la presión de operación es elevada para su uso con tuberías de GRE, ya que el fluido que circula por su interior es gaseoso (e inflamable para el caso del hidrógeno).

Sin embargo, es importante resaltar que algunos fabricantes han estado trabajando en su línea I+D para obtener un diseño de tubería el cual entre dentro del marco de la norma ASME B31.12 “Hydrogen Piping and Pipelines”; la cual, basada en tecnología composite y termoplástica, logra minimizar el fenómeno de fragilización del hidrógeno sobre la pared de la tubería respecto al fenómeno de fragilización que ocurriría en su equivalente en acero. Las tuberías de acero preparadas para minimizar las pérdidas provocadas por la fragilización del hidrógeno sobre la pared de la tubería (las cuales son las más utilizadas hoy en día para el transporte de hidrógeno) requieren un alto espesor de pared y un alto peso, obteniendo como consecuencia altos costes asociados al suministro y a la instalación de las mismas <sup>[38]</sup>.

Como ejemplo de aplicación, se referencia un diseño de tubería I+D realizado por el fabricante NOV FGS junto con el “U.S Department of Energy – Full Cell Technology Office” y el “U.S Department of Transportation” <sup>[39],[40]</sup>.

Como se puede observar en la *Figura 14*, se trata de una tubería que combina una pared estructural de GRP con un encamisado interno de HDPE con una capa de polímero plástico exterior.



*Figura 14. Composición de la tubería I+D diseñada por el fabricante NOV FGS [39]*

Esta tubería especial de GRP ha sido sometida a diferentes tests de validación, de durabilidad mecánica y de compatibilidad frente a la exposición al hidrógeno; como pueden ser: tests de flexibilidad, tests de compresión (según la norma ASTM D2412), tests de presión de rotura (según la norma ASTM D1599), tests de fuerza axial del liner interior, de la matriz de resina y de los filamentos de vidrio, tests de elongación, estudio del módulo de elasticidad obtenido tras la exposición, estudios de predicción del nivel de fugas de hidrógeno en dicha tubería a través de la permeación inducida en la pared de la misma y del posible cracking de la matriz de polímero, etc <sup>[41], [42]</sup>.

Actualmente, esta tubería de GRP enrollable se encuentra codificada por la norma ASME B31.12 para poder ser utilizada en líneas de transporte de hidrógeno enterradas (no aéreas) de alta presión, permitiendo una presión máxima de operación de 172 bares a una temperatura de operación comprendida entre -29°C y 60 °C <sup>[38]</sup>.

La aceptación de la tecnología composite que aportan los GRP se está expandiendo a medida que nuevas investigaciones y DOE's (Design Of Experiments) están demostrando las capacidades que ofrece este tipo de material. La tecnología GRP ofrece una alternativa libre de corrosión, con mayor seguridad y facilidad de instalación que las tuberías de acero no pueden ofrecer.

Por último y no menos importante, mediante la utilización de tuberías de GRP se contribuye enormemente a la reducción de la huella de CO<sub>2</sub> y al mantenimiento del ecosistema en el cual actualmente vivimos.

#### ***4.4. ESTUDIO ECONÓMICO GLOBAL COMPARATIVO ENTRE EL USO DE GRE O ACERO EN LAS TUBERÍAS DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN DE HIDRÓGENO VERDE***

En este apartado se van a analizar las principales diferencias (en cuanto a costes se refiere) entre el uso de tuberías de GRE y el uso de tuberías de acero en las líneas que componen una planta de generación de hidrógeno verde de 6 MW, que a su vez sean aptas para su uso con GRE; tal y como se expuso en el apartado “4.3. *Estudio de viabilidad de la implementación de tuberías composite en los sistemas de tuberías de la planta*”

##### **4.4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS TUBERÍAS A UTILIZAR**

Para el estudio económico a realizar, se han utilizado como referencia los siguientes materiales, cuyas características han sido descritas con anterioridad a lo largo del proyecto:

- Tuberías y fittings de GRE tipo BONDSTRAND serie 2400.
- Tuberías y fittings de acero inoxidable tipo 316 SCH 40.

A continuación, se muestra en la *Tabla 15* y en la *Tabla 16*, los metros de tubería estimados para las líneas aptas para su uso con GRE en la planta analizada en este proyecto, además del número de fittings y el número de soportes necesarios por cada línea dependiendo del material a utilizar:

GRE	TUBERIA(m) DN200	CODO (un.)DN200	TEE (un.)DN200	BRIDA (un.)DN200	SOPORTE (un.)DN200
LINEA 1	6	1	0	2	1
LINEA 2	13	5	3	9	3
LINEA 5	52	2	1	2	10
TUBERIA(m) DN100 CODO (un.)DN100 TEE (un.)DN100 BRIDA (un.)DN100 SOPORTE (un.)DN100					
LINEAS 6, 7 y 8	45	4	0	12	12
LINEAS 11 y 12	6	0	0	5	2
TUBERIA(m) DN250 CODO (un.)DN250 TEE (un.)DN250 BRIDA (un.)DN250 SOPORTE (un.)DN250					
LINEA 21	350	15	4	30	51

Tabla 15. Metros de tubería y número de fittings y soportes estimados en las líneas aptas para su uso con GRE cuando se utiliza como material GRE (Fuente: Elaboración propia)

ACERO INOX. 316	TUBERIA(m) DN200	CODO (un.)DN200	TEE (un.)DN200	BRIDA (un.)DN200	SOPORTE (un.)DN200
LINEA 1	6	1	0	2	1
LINEA 2	13	5	3	9	2
LINEA 5	52	2	1	2	9
TUBERIA(m) DN100 CODO (un.)DN100 TEE (un.)DN100 BRIDA (un.)DN100 SOPORTE (un.)DN100					
LINEAS 6, 7 y 8	45	4	0	12	10
LINEAS 11 y 12	6	0	0	5	1
TUBERIA(m) DN250 CODO (un.)DN250 TEE (un.)DN250 BRIDA (un.)DN250 SOPORTE (un.)DN250					
LINEA 21	350	15	4	30	51

Tabla 16. Metros de tubería y número de fittings y soportes estimados en las líneas aptas para su uso con GRE cuando se utiliza como material acero inoxidable 316 (Fuente: Elaboración propia)



Adicionalmente, en la *Tabla 17* se muestran los pesos de las diferentes tuberías dependiendo del diámetro nominal de la misma y del material a utilizar, además del total de kg equivalente según los metros estimados en la *Tabla 15* y en la *Tabla 16* <sup>[45], [46]</sup>:

	PESO ACERO Kg/m	PESO GRE Kg/m	METROS	Kg ACERO	Kg GRE
DN100	16,32	1,9	51	832,32	96,90
DN200	43,13	6,8	71	3.062,23	482,80
DN250	60,31	10,7	350	21.108,50	3.745,00
			<b>TOTAL</b>	<b>25.003,05</b>	<b>4.324,70</b>

*Tabla 17. Comparativa entre los pesos de las tuberías de acero inoxidable 316 y las tuberías de GRE en las líneas aptas para su uso con GRE (Fuente: Elaboración propia)*

#### 4.4.2. SUPORTACIÓN

En este subapartado se indica el span de suportación necesario para las distintas líneas que componen los sistemas de tuberías de una planta de generación de hidrógeno verde.

El span de suportación hace referencia a la distancia que tiene que existir entre dos soportes consecutivos para que la suportación de la tubería sea la idónea.

Dicho span de suportación varía dependiendo del material a partir del cual se encuentra fabricada la tubería y del diámetro nominal de dicha tubería.

Respecto a las tuberías de GRE, el span de suportación es el siguiente <sup>[29]</sup>:

- Tuberías de GRE DN100: 3.8 m
- Tuberías de GRE DN200: 5.3 m
- Tuberías de GRE DN250: 6.9 m

Respecto a las tuberías de acero inoxidable 316, el span de suportación es el siguiente [43], [44].

- Tuberías de acero inoxidable 316 DN100: 4.26 m
- Tuberías de acero inoxidable 316 DN200: 5.79 m
- Tuberías de acero inoxidable 316 DN250: 6.71 m

Como se puede observar, conforme aumenta el diámetro nominal de la tubería, el span de suportación para las tuberías de GRE comienza a ser similar al span de suportación de las tuberías de acero; tal y como se explicó en el apartado “4.1.1.3. *Coste de prefabricación e instalación*”.

#### **4.4.3. COMPARATIVA ENTRE LOS COSTES DE SUMINISTRO DE TUBERÍAS Y FITTINGS**

A continuación, en la *Tabla 18*, se muestra un cuadro comparativo entre los costes totales de las diferentes tuberías y fittings de GRE y de sus equivalentes en acero inoxidable 316 SCH 40 para las líneas en las cuales es posible el uso de GRE [47], [48].

En dicho cuadro también se indica el número de metros necesarios de cada tubería dependiendo del diámetro, ya sea DN100, DN200 o DN250; el número de fittings necesarios en cada caso y el coste euro/metro de cada tipo de tubería.

Para la realización de dicho cuadro comparativo, se ha realizado una estimación de los metros de tubería y fittings necesarios en las líneas en las cuales es posible el uso de GRE, lo cual se muestra en la *Tabla 15* y en la *Tabla 16*.

LISTA DE MATERIALES	DIÁMETRO	CANTIDAD METROS/UNIDAD	COSTE (€) /METRO/UNIDAD DE ACERO INOX. 316 SCH 40	COSTE(€)METRO/UNIDAD GRE BONDSTRAND NOV	COSTE (€)TOTAL INOX 316	COSTE TOTAL (€) GRE BONDSTRAND
TUBERÍA	DN100	51	178,82	45,6	9.119,82	2.325,60
CODO	DN100	4	85,56	115,99	342,24	463,96
TEE	DN100	0	262,3	246,9	0,00	0,00
BRIDA	DN100	17	60	70,96	1.020,00	1.206,32
TUBERÍA	DN200	71	490,73	115,14	34.841,83	8.174,94
CODO	DN200	8	373	385,3	2.984,00	3.082,40
TEE	DN200	4	408	744,23	1.632,00	2.976,92
BRIDA	DN200	13	230	205,77	2.990,00	2.675,01
TUBERÍA	DN250	350	504,5	124,45	176.575,00	43.557,50
CODO	DN250	15	576	423,32	8.640,00	6.349,80
TEE	DN250	4	582	820,32	2.328,00	3.281,28
BRIDA	DN250	30	150	184,39	4500	5.531,70
<b>TOTAL</b>					<b>244.972,89€</b>	<b>79.625,43 €</b>

*Tabla 18. Cuadro comparativo entre los costes de las tuberías y fittings de GRE y acero inoxidable 316 SCH 40 para diferentes diámetros (Fuente: Elaboración propia)*

Como se puede apreciar, en cuanto al coste de suministro de las tuberías y los fittings se refiere, el GRE presenta una gran ventaja frente al acero inoxidable 316 SCH 40; ya que, aunque los fittings realizados a partir de GRE tienen un coste más elevado que los realizados a partir de acero inoxidable 316 SCH 40, el coste de las tuberías de GRE es sustancialmente menor que el coste de la misma tubería en su equivalente en acero; por lo que el coste total si se utiliza GRE es muy inferior respecto al coste total si se utiliza acero inoxidable 316 SCH 40, obteniéndose en este caso un ahorro en costes estimado del 68%.

#### 4.4.4. COMPARATIVA ENTRE LOS COSTES DE SUMINISTRO DE SUPORTACIÓN

A continuación, en la *Tabla 19*, se muestra un cuadro comparativo que indica el coste total de la suportación necesaria en las líneas que son aptas para el uso de GRE, dependiendo si dicha línea se encuentra realizada a partir de GRE o a partir de acero inoxidable 316 SCH 40 <sup>[47]</sup>, <sup>[48]</sup>.

Cabe destacar que la cantidad de soportes que necesitan las líneas va en función del material a partir del cual se encuentra fabricado y del diámetro nominal de la tubería a utilizar.

SOPORTES	DIÁMETRO	CANTIDAD ESTIMADA DE SOPORTES PARA TUBERÍA DE ACERO 316	CANTIDAD ESTIMADA DE SOPORTES PARA TUBERÍA DE GRE BONDSTRAND	COSTE UNIDAD SOPORTE PARA TUBERIA DE ACERO INOX. 316 SCH 40	COSTE UNIDAD SOPORTE PARA TUBERIA DE GRE BONDSTRAND	COSTE TOTAL INOX 316	COSTE TOTAL GRE BONDSTRAND
SOPORTES	DN100	11	14	215,5	205,26	2.370,50	2.873,64
SOPORTES	DN200	12	14	313,93	298,99	3.767,16	4.185,86
SOPORTES	DN250	51	51	434,95	414,24	22.182,45	21.126,24
<b>TOTAL</b>						<b>28.320,11€</b>	<b>28.185,74 €</b>

*Tabla 19. Cuadro comparativo entre los costes de suministro de suportación de tuberías de GRE y tuberías de acero inoxidable 316 SCH 40 para diferentes diámetros (Fuente: Elaboración propia)*

Por tanto, como se puede apreciar, en cuanto al coste de suministro de suportación se refiere, el coste total de suportación de las tuberías de GRE es muy similar al coste total de las tuberías de acero inoxidable 316 SCH 40, siendo el de las tuberías de GRE ligeramente inferior, produciéndose un ahorro en costes estimado del 0.4%.

#### 4.4.5. COMPARATIVA ENTRE LOS COSTES DE INSTALACIÓN

En cuanto a los costes de instalación se refiere, el hecho de utilizar GRE en las líneas aptas para su uso genera un ahorro en costes estimado del 21% respecto al uso de su equivalente en acero, tal y como se puede observar en la *Tabla 20* <sup>[47], [48]</sup>.

<b>COSTE €/m instalado líneas GRE</b>	<b>COSTE €/m instalado líneas acero</b>	<b>METROS TOTALES INSTALADOS</b>	<b>COSTE € INSTALACIÓN TUBERIA DE GRE</b>	<b>COSTE € INSTALACIÓN TUBERIA DE ACERO</b>
80,16	102,61	472	<b>37.835,52</b>	<b>48.431,92</b>

*Tabla 20. Cuadro comparativo entre los costes de instalación estimados para tuberías de GRE y tuberías de acero inoxidable 316 SCH 40 (Fuente: Elaboración propia)*

#### 4.4.6. ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE CO<sub>2</sub>

A continuación, en la *Tabla 21*, se muestra una estimación de la energía total requerida y de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> necesarias en la fabricación de las tuberías de GRE y en la fabricación de las tuberías de acero inoxidable 316 SCH 40 DN300 a partir de las materias primas que la componen <sup>[32], [49]</sup>.

	ACERO	GRE
TONELADAS DE TUBERÍA A FABRICAR	25,00	4,32
ENERGIA (GJ) REQUERIDA PARA PRODUCCION DE 1 tn	7,07	5,40
ENERGÍA TOTAL (GJ) CONSUMIDA PARA PRODUCCION	176,75	23,35
EMISIONES DE CO <sub>2</sub> (Tn) DURANTE PRODUCCION DE 1 tn	1,71	1,17
TOTAL EMISIONES DE CO <sub>2</sub> (tn) DURANTE PRODUCCION	42,75	5,06
IMPUESTO (€) MEDIO APLICADO POR EMISION tn de CO <sub>2</sub> (12€/tn)	513,00	60,72

*Tabla 21. Estimación sobre la energía total requerida y las emisiones totales de CO<sub>2</sub> para la fabricación de 1 km de tubería de GRE o de acero inoxidable 316 SCH 40 (Fuente: Elaboración propia)*

Como se puede observar, en cuanto a las emisiones totales de CO<sub>2</sub> necesarias en la fabricación de las tuberías se refiere, las tuberías de GRE generan una emisión de CO<sub>2</sub> menor respecto a las tuberías de acero inoxidable 316 SCH 40, concretamente supone una reducción de aproximadamente el 88% de emisiones.

Dicha reducción es tan elevada debido a la gran diferencia entre los pesos de las tuberías de GRE y las tuberías de acero para fabricar el mismo número de metros de tubería; ya que como se puede observar en la *Tabla 21*, aunque la diferencia de emisiones para una misma tonelada de CO<sub>2</sub> sea del 31%, como el acero es mucho más pesado que el GRE, dicha diferencia aumenta, obteniéndose finalmente una reducción del 88% de emisiones.

Tal y como se ha expuesto anteriormente a lo largo del proyecto, el GRE tiene una vida útil mínima de aproximadamente 40 años y no necesita mantenimiento durante dicha vida útil; mientras que las tuberías de acero inoxidable 316 tienen una vida útil de como máximo 20 años, durante la cual sí necesita mantenimientos correctivos y preventivos, lo cual supone un aumento de la energía total requerida y, por tanto, un aumento de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> por parte del acero.

No obstante, dicho aumento es difícil de cuantificar, ya que intervienen muchos factores externos, como puede ser el clima, las condiciones del fluido que transporta la tubería, etc.

Además, una idea a destacar es que, como se ha mencionado a lo largo del proyecto, el acero es más pesado que el GRE; concretamente el peso de una tubería de GRE es aproximadamente 1/6 del peso de una tubería de acero inoxidable 316 SCH 40. Esta idea es importante porque el peso influye directamente en la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> cuando se transporta dicha tubería.

A continuación, en la *Tabla 22* se muestra el número de camiones necesarios para el transporte de las tuberías (el cual dependerá del peso máximo admitido por el camión) y la cantidad de CO<sub>2</sub> que emitiría dicho camión <sup>[50]</sup>:

	ACERO	GRE
Nº CAMIONES NECESARIOS PARA TRANSPORTE	2	1
EMISIONES CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /Km)	1,33	0,663

*Tabla 22. Comparativa entre los camiones necesarios y las emisiones de CO<sub>2</sub> para tuberías de acero y tuberías de GRE (Fuente: Elaboración propia)*

Para este análisis, se ha tomado como referencia un camión diésel de 12 m con capacidad de transportar como máximo 18 toneladas.

#### 4.4.7. COMPARATIVA DE RESULTADOS FINALES

A continuación, en la *Tabla 23* se muestra un resumen de las conclusiones a las que se ha llegado después de la realización del estudio económico:

	ACERO	GRE	% AHORRO
TOTAL SUMINISTRO DE TUBERÍA (€)	244.972,89	79.625,43	68%
TOTAL INSTALACIÓN (€)	48.431,92	37.835,52	21%
TOTAL SUMINISTRO DE SUPORTACION (€)	28.320,11	28.185,74	0,40%
TOTAL ENERGIA (kWh) CONSUMIDA PARA FABRICACIÓN (€)	18.166,11	2.399,88	86%
TOTAL IMPUESTOS POR EMISIONES DE CO <sub>2</sub> (€)	513,00	60,72	88%
<b>TOTAL AHORRO USO GRE: 56%</b>			

*Tabla 23. Comparativa entre los costes totales si se utiliza GRE o acero inoxidable 316 en las líneas aptas para ello (Fuente: Elaboración propia)*

Por tanto, tal y como se puede observar, el uso del GRE en las líneas aptas para ello supondría un ahorro en coste del 56% respecto al uso del acero inoxidable 316 SCH 40 en la planta.

Esto supone una ventaja a tener en cuenta en futuros proyectos de ingeniería, ya que el hecho de incluir GRE en las líneas en las que sea posible supondrá un ahorro en costes considerable, ya que además hay que tener en cuenta que las tuberías de GRE no necesitan costes adicionales de mantenimiento durante su vida útil, mientras que las tuberías de acero sí lo requieren.

Además, es importante resaltar la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera que contribuirán hacia la transición a un futuro más verde.



## Capítulo 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CIEMAT. *Hacia una economía del hidrógeno en España*. 2019
- [2] GOOD NEW ENERGY. *Del gris al verde, los colores del hidrógeno*. 30 Septiembre 2021.
- [3] XATAKA. *Que es exactamente el hidrógeno verde*. 26 Abril 2021.
- [4] IBERDROLA. *¿Qué es un electrolizador y por qué es clave para el suministro de hidrógeno verde? (s.a.)*
- [5] REYES VELIZ, O; TRUJILLO RODRIGUEZ, R. *Generación de energía eléctrica a partir de hidrógeno obtenido por medio de electrólisis*. 2016
- [6] G. A. OLAH, A. GOEPPERT, G. K. SURYA PRAKASH, *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy*.
- [7] PADMANABHAN, P.O. *What every engineer should know about composite*. (s.a.).
- [8] PIPESPAIN S.L. Comparison Polyester, Vinylester and Epoxy used in glass fiber reinforced pipe systems. Process & Quality department. 2014
- [9] AMERON INTERNATIONAL/NOV FGS. *Chemical and industrial piping systems [Brochure]*. Febrero 2013.
- [10] AMERON INTERNATIONAL/NOV FGS. *Tuberías de fibra de vidrio BONDSTRAND y CENTRON para la transmisión de líquidos y gas [Brochure: FP980A]*. (s.a).
- [11] AMIBLU. *Glass Reinforced Plastic [Brochure]*. Octubre 2019.
- [12] FPI FUTURE PIPE INDUSTRIES. *Fiberstrong product information [Brochure]*. Noviembre 2018.

- [13] AMERON INTERNATIONAL. *Fiber glass composite pipe [Brochure: FP872]*. Febrero 2001.
- [14] NOV FGS. *Bondstrand Composite Products for offshore wind turbine installation vessel [Brochure]*. 2021
- [15] PIPESPAIN S.L. *Comparison matriz Composite pipes [Technical Webinar]*. March 2021.
- [16] FPI FUTURE PIPE INDUSTRIES. *Engineering Guide [Brochure:WS TCD 00 (E) rev1]*. Mayo 2010.
- [17] FPI FUTURE PIPE INDUSTRIES. *Wavistrong engineering guide [Brochure]*. Marzo 2009.
- [18] AMERON INTERNATIONAL. *Technical Workshop*. Noviembre 2011.
- [19] AMERON INTERNATIONAL/NOV FGS. *Tuberías de resinas fenólicas y de epoxi reforzadas con fibra de vidrio [Brochure: FP565A]*. Septiembre 1999.
- [20] PIPESPAIN S.L. *Technical Webinar GRE Pipe Systems*. Marzo 2021.
- [21] NOV FGS. *Installation Guide [Brochure:INS2402-FP1043B]*. Noviembre 2012.
- [22] FPI FUTURE PIPE INDUSTRIES. *Installation Guide [Brochure:WS TCD (E) rev1]*. Enero 2013.
- [23] AMERON INTERNATIONAL. *Advantages of epoxy versus polyester and vinylester in marine enviroments. The Netherlands 2014*.
- [24] AMERON INTERNATIONAL. *Advantages of GRE versus GRPU. Development and Process Engineering*. Septiembre 2001.
- [25] WESCO Acero Inoxidables. *Product Data tubería SCH10, SCH40, SH80. Website*.

- [26] GRUPO CUÑADO. Tarifa/m. Mayo 2022
- [27] PIPESPAIN S.L. Tarifa/m. Mayo 2022
- [28] INTERNATIONAL STANDARD – ISO 14692. *Petroleum and natural gas industries – Glass reinforced plastics (GRP) piping. Second edition. Agosto 2017.*
- [29] NOV FGS. *Bondstrand 2400 series Product Data Chemical & Industry [Brochure:CI2400 ENG]. Marzo 2016.*
- [30] NOV FGS. *Bondstrand Composite Products for offshore wind substations turbine installation vessel [Brochure]. 2021*
- [31] NOV FGS. *GRE Piping System The Greener Choice. A comparison study by Allen Chiu, Rocky Friedrich and Blake Herbert. 2021.*
- [32] NOV FGS. *GRE Pipe.Green Energy that Powers the World. A pipe comparison Carbon Footprint Study by Blake Herbert, Allen Chiu, Rocky Friedrich.4 Abril 2021.*
- [33] AMBROCIO QUISPE, A. *Análisis del dimensionamiento de una planta piloto de producción de hidrógeno.* Proyecto fin de carrera, 2016.
- [34] NITIDOR, H. *Installation, use and maintenance manual-pressurized water electrolyser.* Septiembre 2013.
- [35] NOV FGS. *Chemical Resistance Guide. ENG1030. February 2015.*
- [36] FPI FUTURE PIPE INDUSTRIES. *High Pressure spoolable pipe Flexstrong.* Website
- [37] NOV FGS. *Fiberspar spoolable Fiber Glass pipe.* Website
- [38] AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS – ASME CODE B31.12. *Hydrogen piping and pipelines. ASME code for pressure piping. 15 Abril de 2014.*

- [39] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. *Test results about Composite Technology for Hydrogen Pipelines*. Barton Smith, Barbara Frame, Lawrence Anovitz, Timothy Armstrong. 20 Agosto 2008.
- [40] US DEPARTMENT OF ENERGY- OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. *Webinar: Lowering Cost of Hydrogen Pipelines through Use of Fiber Reinforced Polymers and Modern Steels*. Neha Rustagi and Eric Parker. 27 Septiembre 2017.
- [41] ASTM D1599. *Standard test method for resistance to short-time hydraulic failure pressure of plastic pipe, tubing, and fittings*. 16 Agosto 2017.
- [42] ASTM D2412. *Standard test method for determination of external loading characteristics of plastic pipe by parallel-plate loading*.
- [43] FACTOR 4 INGENIEROS CONSULTORES S.L. *Características de tuberías- Distancia entre soportes de tubería de acero*.
- [44] MATADOR. *Diseño mecánico y FIME UNPRG*. 2009.
- [45] PIPESPAIN S.L. *Peso de tuberías de GRE*. Marzo 2019.
- [46] HASTINIK S.A. *Aceros inoxidable y aleaciones especiales - catálogo general*. s.a.
- [47] PIPESPAIN S.L. *Presupuesto estimado para tubería de GRE*. Julio 2022.
- [48] CUÑADO S.A.U. *Presupuesto estimado de tubería de acero inoxidable 316*. Julio 2022.
- [49] WIKIPEDIA. *Impuesto sobre el carbono en Europa*. Enero 2022
- [50] OFICINA CATALANA CAMBIO CLIMÁTICO. *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero*. Marzo 2011.