



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Ingeniería de los procesos de fabricación

TRABAJO FIN DE GRADO

**Recreación virtual de la generación de hidrógeno verde, así
como su posterior transformación en energía eléctrica en un
vehículo de hidrógeno**

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto

Autor: Claudia Luque Bermúdez

Tutor: Jesús Javier Jiménez Galea

MÁLAGA, enero de 2024



*Recreación virtual de la generación de hidrógeno verde, así como
su posterior transformación en energía eléctrica en un vehículo de hidrógeno*



Agradecimientos

Hace cuatro años comencé, con muchas dudas e incertidumbre, la carrera de Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del producto. Escoger qué carrera estudiar fue una elección muy complicada que condicionaría mi futuro para siempre. En parte, así ha sido. Aquí he encontrado el ámbito en el que combinar la creatividad con la tecnología para dar soluciones a problemas del día a día. Así que en primer lugar, gracias a todos los profesores que me han enseñado a lo largo de mi formación, en especial a mi tutor Jesús Jiménez.

A mis padres, Natividad y Antonio, quienes me han apoyado incondicionalmente en cada paso que he dado y quienes se han esforzado al máximo para regalarme la oportunidad de estudiar lo que quería. Gracias por inculcarme vuestros valores y alegría para ver la vida. Gracias por enseñarme a volar alto.

A mi hermana María, por ser mi pilar fundamental. A mis padrinos, Carmen y Antonio, por quererme incondicionalmente y acompañarme.

Por último, a mi amiga Mónica, por estar en los mejores momentos y en los peores, y a María, Julia y Juan Carlos, por ser mi hogar aquí en Málaga.



*Recreación virtual de la generación de hidrógeno verde, así como
su posterior transformación en energía eléctrica en un vehículo de hidrógeno*





Índice

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL PROYECTO/TRABAJO FIN DE GRADO	3
Agradecimientos	4
Índice de imágenes	8
Abreviaturas y símbolos	13
Resumen	14
Abstract.....	15
Objetivos.....	16
Memoria	17
1. Combustible: el hidrógeno	18
1.1. Descripción y propiedades.....	18
1.2. Producción	20
1.3. El hidrógeno verde.....	22
1.4. El hidrógeno rosa.....	23
1.5. Almacenamiento y distribución.....	24
1.5.1. Almacenamiento del hidrógeno	25
1.5.2. Distribución del hidrógeno:	33
2. Procesos para la obtención de hidrógeno	34
3. Pila de combustible.....	35
3.1. Descripción	35
3.2. Tipos	36
3.2.1. Pilas de combustible alcalinas	36
3.2.2. Pilas de combustible poliméricas	36
3.2.3. Pilas de combustible de ácido fosfórico	36



3.2.4.	Pilas de combustible de carbonatos fundidos	37
3.2.5.	Pilas de combustible de óxidos sólidos	37
3.3.	Partes y funcionamiento de las pilas de combustible poliméricas.....	37
3.3.1.	Partes	37
3.3.2.	Funcionamiento	38
4.	Vehículos de hidrógeno	40
4.1.	Descripción.....	40
4.2.	Funcionamiento	41
4.3.	Actualidad y medio ambiente	42
5.	Proceso de construcción de la recreación	44
5.1.	Software utilizado.....	45
5.2.	Sección 1. Obtención de energía	47
5.3.	Sección 2. Hidrogenera.....	66
5.4.	Sección 3. Construcción del coche	75
5.5.	Sección 4. Pila de combustible	89
6.	Conclusiones.....	104
7.	Lista de referencias	105

Índice de imágenes

Figura 1. Energía nuclear: chimeneas de central nuclear. (Fuente: elaboración propia)	20
Figura 2. Energía solar: placas solares. (Fuente: elaboración propia).....	20
Figura 3. Energía eólica: molinos de viento. (Fuente: elaboración propia)	21
Figura 4. Opciones disponibles para la producción de hidrógeno verde. (Aguado, 2021; Llera y Zabalza, 2011).....	23
Figura 5. Consumo energético requerido para la compresión del hidrógeno (Aguado, 2021).....	26
Figura 6. Tipos de depósitos para el almacenamiento de hidrógeno como hidrógeno comprimido. (Fuente: elaboración propia)	27
Figura 7. Tipo I. (Fuente: elaboración propia).....	27
Figura 8. Tipo II. (Fuente: elaboración propia)	28
Figura 9. Tipo III. (Fuente: elaboración propia).....	28
Figura 10. Tipo IV. (Fuente: elaboración propia)	28
Figura 11. Emisiones de CO ₂ originadas por el transporte en la UE. (AEMA, 2018) ...	43
Figura 12. Chimeneas de central nuclear. Geometría. (Fuente: elaboración propia)	48
Figura 13. Energía nuclear: chimeneas de central nuclear. (Fuente: elaboración propia)	48
Figura 14. Nodos del material de la base de las chimeneas. (Fuente: elaboración propia)	50
Figura 15. Nodos del material de la superficie de las chimeneas. (Fuente: elaboración propia).....	50
Figura 16. Entorno de SolidWorks del modelado del molino para la representación de energía eólica. (Fuente: elaboración propia)	51
Figura 17. Material eólica del molino para la representación de energía eólica. (Fuente: elaboración propia).....	52

Figura 18. Energía eólica: molinos de viento. (Fuente: elaboración propia)	52
Figura 19. Entorno de SolidWorks del modelado de la placa para la representación de energía solar. (Fuente: elaboración propia)	53
Figura 20. Material azul placa para la representación de energía solar. (Fuente: elaboración propia).....	54
Figura 21. Material placa-escuadra para la representación de energía solar. (Fuente: elaboración propia).....	55
Figura 22. Energía solar: placas solares. (Fuente: elaboración propia).....	55
Figura 23. Escenario montañoso. (Fuente: elaboración propia).....	56
Figura 24. Material usado para la montaña. (Fuente: elaboración propia).....	57
Figura 25. Modificador de las características de la luz. (Fuente: elaboración propia)...	58
Figura 26. Vista del entorno renderizado (Fuente: elaboración propia)	58
Figura 27. Línea de tiempo de la cámara. (Fuente: elaboración propia).....	59
Figura 28. Energía nuclear 1. (Fuente: elaboración propia)	59
Figura 29. Energía nuclear 2. (Fuente: elaboración propia)	60
Figura 30. Energía nuclear 3. (Fuente: elaboración propia)	60
Figura 31. Energía nuclear 4. (Fuente: elaboración propia)	60
Figura 32. Energía nuclear 5. (Fuente: elaboración propia)	61
Figura 33. Energía nuclear 6. (Fuente: elaboración propia)	61
Figura 34. Transición por las montañas. (Fuente: elaboración propia)	62
Figura 35. Energía solar 1. (Fuente: elaboración propia)	62
Figura 36. Energía solar 2. (Fuente: elaboración propia)	63
Figura 37. Energía solar 3. (Fuente: elaboración propia)	63
Figura 38. Energía solar 4. (Fuente: elaboración propia)	64
Figura 39. Energía eólica 1. (Fuente: elaboración propia)	64
Figura 40. Energía eólica 2. (Fuente: elaboración propia)	64

Figura 41. Energía eólica 3. (Fuente: elaboración propia)	65
Figura 42. Hidrogenera (Fuente: elaboración propia)	67
Figura 43. Hidrogenera material (Fuente: elaboración propia)	67
Figura 44. Simplificación del centro de repostaje para vehículos. (Fuente: elaboración propia).....	68
Figura 45. Conjunto hidrogenera y centro de repostaje. (Fuente: elaboración propia)..	69
Figura 46. Hidrogenera 1 (Fuente: elaboración propia)	69
Figura 47. Hidrogenera 2. (Fuente: elaboración propia)	70
Figura 48. Hidrogenera 3. (Fuente: elaboración propia)	71
Figura 49. Hidrogenera 4. (Fuente: elaboración propia)	71
Figura 50. Hidrogenera 5. (Fuente: elaboración propia)	72
Figura 51. Centro de repostaje 1. (Fuente: elaboración propia)	72
Figura 52. Centro de repostaje 2. (Fuente: elaboración propia)	73
Figura 53. Centro de repostaje 3. (Fuente: elaboración propia)	73
Figura 54. Centro de repostaje 4. (Fuente: elaboración propia)	74
Figura 55. Centro de repostaje 5. (Fuente: elaboración propia)	74
Figura 56. Estructura simplificada y esquemática de la parte inferior del coche. (Fuente: elaboración propia)	75
Figura 57. Estructura inferior del coche con los elementos necesarios para su funcionamiento. (Fuente: elaboración propia).....	76
Figura 58. Estructura inferior del coche con los elementos necesarios para su funcionamiento. (Fuente: elaboración propia).....	76
Figura 59. Organización de los distintos modelos en Blender. (Fuente: elaboración propia)	77
Figura 60. Nodos del material hormigón para el suelo. (Fuente: elaboración propia) ...	78
Figura 61. Nodos del material para el bajo del coche. (Fuente: elaboración propia).....	78

Figura 62. Nodos del material de los neumáticos. (Fuente: elaboración propia)	79
Figura 63. Material de la batería (Fuente: elaboración propia)	80
Figura 64. Materiales del motor y del transformador. (Fuente: elaboración propia).....	80
Figura 65. Materiales de la pila y de los tanques de H ₂ . (Fuente: elaboración propia)..	81
Figura 66. Estructura del coche y material de las ventanas. (Fuente: elaboración propia)	82
Figura 67. Material del chasis. (Fuente: elaboración propia)	82
Figura 68. Coche 1 (Fuente: elaboración propia)	84
Figura 69. Coche 2 (Fuente: elaboración propia)	84
Figura 70. Coche 3 (Fuente: elaboración propia)	85
Figura 71. Interior del coche (Fuente: elaboración propia)	85
Figura 72. Interior del coche señalando tanques de hidrógeno (Fuente: elaboración propia)	86
Figura 73. Interior del coche señalando pila de combustible (Fuente: elaboración propia)	86
Figura 74. Interior del coche señalando batería. (Fuente: elaboración propia)	87
Figura 75. Interior del coche señalando transformador (Fuente: elaboración propia) ...	87
Figura 76. Interior del coche señalando motor (Fuente: elaboración propia)	88
Figura 77. Entorno de SolidWorks del modelado de la placa bipolar para la representación de la pila de combustible. (Fuente: elaboración propia).....	89
Figura 78. Entorno de SolidWorks del modelado del cátodo, ánodo y membrana para la representación de la pila de combustible. (Fuente: elaboración propia)	90
Figura 79. Ensamblaje de las celdas en Blender. (Fuente: elaboración propia)	90
Figura 80. Celda de pila de combustible en Blender. (Fuente: elaboración propia)	91
Figura 81. Material H ₂ . (Fuente: elaboración propia)	92
Figura 82. Camino de entrada del H ₂ a la celda. (Fuente: elaboración propia).....	92

Figura 83. Línea de tiempo de la secuencia de la celda. (Fuente: elaboración propia)..	93
Figura 84. Movimiento del hidrógeno del ánodo al cátodo. (Fuente: elaboración propia)	93
Figura 85. Movimiento de las partículas de vapor de agua fuera de la pila. (Fuente: elaboración propia).....	94
Figura 86. Entorno de Adobe Premiere Pro con la edición de la secuencia de la pila de combustible. (Fuente: elaboración propia).....	94
Figura 87. Pila de combustible 1. (Fuente: elaboración propia).....	95
Figura 88. Pila de combustible 2. (Fuente: elaboración propia).....	95
Figura 89. Pila de combustible 3. (Fuente: elaboración propia).....	96
Figura 90. Pila de combustible 4. (Fuente: elaboración propia).....	96
Figura 91. Pila de combustible 5. (Fuente: elaboración propia).....	97
Figura 92. Celda 1. (Fuente: elaboración propia).....	98
Figura 93. Celda 2. (Fuente: elaboración propia).....	98
Figura 94. Celda 3. (Fuente: elaboración propia).....	99
Figura 95. Celda 4. (Fuente: elaboración propia).....	100
Figura 96. Celda 5. (Fuente: elaboración propia).....	100
Figura 97. Celda 6. (Fuente: elaboración propia).....	101
Figura 98. Celda 7. (Fuente: elaboración propia).....	102
Figura 99. Celda 8. (Fuente: elaboración propia).....	102
Figura 100. Celda 9. (Fuente: elaboración propia).....	103



Abreviaturas y símbolos

H₂: Hidrógeno

O₂: Oxígeno

mm: milímetros

km: kilómetros

kg: kilogramo

MJ: mega Joule

3D: 3 dimensiones

CAD: Computer- Aided Design

ARN: Ácido Ribonucleido

ADN: Ácido Desoxirribonucleico



Resumen

El presente documento contiene el desarrollo de un proyecto sobre la recreación virtual de la obtención de hidrógeno verde, así como su posterior transformación en energía eléctrica en un vehículo de hidrógeno.

La derivación del transporte a los combustibles alternativos, en especial el hidrógeno, resulta un enfoque innovador frente a la producción de emisiones tóxicas y a la escasez de recursos. Tanto este combustible como los coches de hidrógeno, se hacen cada vez más notables en el mercado.

Para desarrollar esta recreación, se utilizarán los softwares de diseño CAD y animación SolidWorks y Blender, y Adobe Premier Pro para la edición del video.

Este proyecto queda definido por un estudio del combustible, el hidrógeno, así como su producción, almacenamiento y distribución. También formará parte del compendio de información que precede al video la descripción, tipos, partes y funcionamiento de la pila de combustible, y una contextualización de los vehículos de hidrógeno en la actualidad.

Palabras clave: hidrógeno verde, hidrógeno rosa, vehículo de hidrógeno, combustible, pila de combustible.



Abstract

The present document contains the development of a project on the virtual recreation of green hydrogen production, as well as its subsequent transformation into electrical energy in a hydrogen vehicle.

The shift to alternative fuels, especially hydrogen, represents an innovative approach to addressing toxic emissions and resource scarcity in transportation. Both this fuel and hydrogen vehicles are becoming increasingly prominent in the market.

To develop this recreation, CAD design and animation software SolidWorks and Blender will be utilized, along with Adobe Premiere Pro for video editing.

This project is defined by an exploration of the fuel, hydrogen, including its production, storage, and distribution. The accompanying information before the video will also include a description, types, components, and operation of the fuel cell, along with a contextualization of hydrogen vehicles in the present context.

Keywords: Green Hydrogen, Pink Hydrogen, Hydrogen Vehicle, Fuel, Fuel Cell.



Objetivos

Los objetivos marcados en este documento son los que se enumeran a continuación:

1. Elaboración de un video recreando virtualmente el proceso de generación de hidrógeno verde con fuentes de energías renovables, así como su posterior transformación en energía eléctrica en un vehículo de hidrógeno.
2. Creación de un video explicativo e ilustrativo de esta tecnología que pueda usarse con fines didácticos por cualquier persona que durante su formación quiera introducirse en esta área de investigación tan presente en la industria.
3. Recopilación de información sobre el hidrógeno para conocer las principales características de este y comprender mejor la tecnología protagonista en este proyecto.
4. Mejorar el manejo de programas de diseño, animación y edición de video.
5. Aumentar el conocimiento personal sobre este campo.



*Recreación virtual de la generación de hidrógeno verde, así como
su posterior transformación en energía eléctrica en un vehículo de hidrógeno*



Memoria

1. Combustible: el hidrógeno

1.1. Descripción y propiedades

El hidrógeno es un elemento químico, el más abundante del universo, que se representa con el símbolo H. En condiciones normales, lo encontramos como un gas estable de moléculas diatómicas (H_2). Algunas de sus características son: insípido, incoloro, inodoro y no tóxico. Además, tiene la capacidad de liberar energía cuando reacciona con el oxígeno, dato remarcable a la hora de considerarlo como opción de combustible.

Como elemento más abundante del universo, se estima que más del 75% de este está compuesto por hidrógeno, aunque no se pueda encontrar en estado libre en la Tierra.

Algunas de las propiedades físicas del hidrógeno son las siguientes:

- El punto de ebullición es muy bajo. 20 K, (-252°C a 1 bar).
- Poder calorífico elevado 141.86 kJ/g
- Densidad 0.0899 kg/Nm³
- Límite de inflamabilidad 4-75%
- Límite de detonación 18.3-59%
- Coeficiente de difusión 0.61 cm²/s

La gran capacidad de inflamabilidad y detonación del hidrógeno es debido a que la energía de activación es muy baja. Por esto, cualquier contacto con una chispa o superficie caliente puede hacer que prenda. Esto tiene relación directa con la energía almacenada por unidad de masa o volumen, lo que se traduce en necesitar un mayor espacio para almacenar hidrógeno que si hablásemos de gasolina. Por ejemplo, en condiciones atmosféricas, para generar 1580 MJ de energía con gasolina se necesitarían 50 l (48 kg) y con hidrógeno 158 m³ (13.2 kg).

El hidrógeno es un elemento indispensable en la composición del agua (H_2O) y se encuentra presente en una amplia gama de compuestos orgánicos e inorgánicos. Desempeña un papel fundamental en la vida, ya que es un componente esencial de moléculas como el ADN, ARN y las proteínas.

Además de su importancia biológica, el hidrógeno tiene diversas aplicaciones en los ámbitos industrial y tecnológico. Se utiliza como combustible en las células de hidrógeno para generar electricidad de manera eficiente y ecológica. También se emplea en la producción de amoníaco para fertilizantes, en la refinación de petróleo y en la fabricación de una amplia variedad de productos químicos.

En los últimos años, ha surgido un gran interés en el hidrógeno verde, el cual se produce a partir de fuentes renovables como la energía solar o eólica. Este tipo de hidrógeno se considera una fuente de energía limpia y sostenible que puede contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático.

El hidrógeno tiene diversas aplicaciones en diferentes sectores. En el transporte, se utiliza en vehículos de hidrógeno, donde se convierte en electricidad en las células de combustible para impulsar el motor. También se utiliza en la industria química para la fabricación de productos como amoníaco, metanol y productos petroquímicos. Además, el hidrógeno se puede utilizar para obtener energía renovable, ya que puede ser producido cuando hay exceso de energía solar o eólica entre otras y, posteriormente, utilizado para generar electricidad cuando se necesita.

Al usar el H_2 como combustible, no podemos referirnos a él como una fuente de energía puesto que es necesario producirlo. En su lugar, se le denomina vector energético, pues es un medio capaz de almacenar y transportar energía. Otro ejemplo de vector energético que acostumbramos a usar en nuestro día a día es la electricidad.

Aunque el hidrógeno presenta muchas ventajas, también enfrenta desafíos. La producción de hidrógeno a gran escala aún depende en gran medida de los combustibles fósiles, lo que implica emisiones de carbono. Además, el almacenamiento y distribución del hidrógeno a nivel masivo requiere infraestructuras especializadas. Sin embargo, se están realizando esfuerzos para superar estos desafíos y promover el uso de hidrógeno como una fuente de energía limpia y renovable.

1.2. Producción

El hidrógeno se produce a partir de materias primas como el agua, a las que se le aplican una serie de transformaciones en las que se hace uso de alguna fuente de energía primaria, por ejemplo, la energía nuclear o renovables. (Véanse *Figura 1*, *Figura 2*, *Figura 3*)



Figura 1. Energía nuclear: chimeneas de central nuclear. (Fuente: elaboración propia)

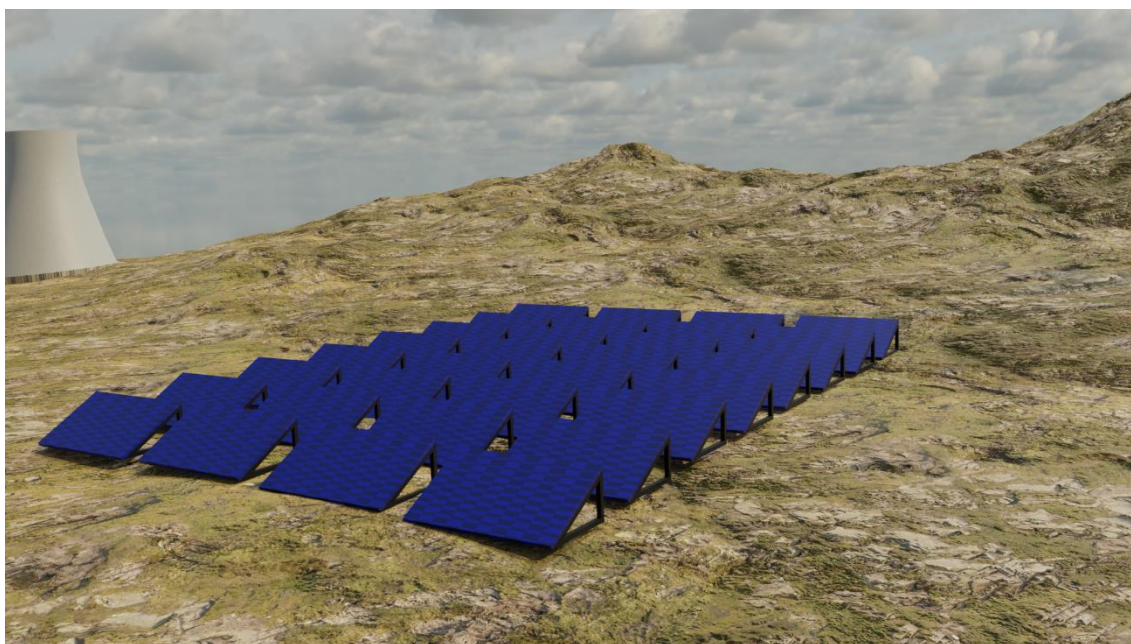


Figura 2. Energía solar: placas solares. (Fuente: elaboración propia)



Figura 3. Energía eólica: molinos de viento. (Fuente: elaboración propia)

El hidrógeno se clasifica en diferentes tipos según su origen y proceso de producción:

- El hidrógeno gris se produce a partir de combustibles fósiles y emite dióxido de carbono.
- El hidrógeno azul se produce a partir de combustibles fósiles, pero el carbono emitido se captura y almacena para reutilizarlo, reduciendo así las emisiones.
- El hidrógeno blanco se encuentra en la naturaleza en forma gaseosa, por ejemplo, en depósitos subterráneos.
- El hidrógeno rosa se obtiene a partir de energía nuclear. Cabe señalar que recientemente la comisión Europea ha reconocido la energía a partir de procesos nucleares como fuente de energía de cero emisiones netas, por lo que podría incluirse en la siguiente categoría (*Ley sobre la industria de cero emisiones netas, 2023*).
- El hidrógeno verde se produce a partir de fuentes renovables y no genera emisiones de carbono.

Aunque el hidrógeno verde ofrece muchas ventajas, todavía enfrenta desafíos significativos. Uno de los principales desafíos es el costo asociado con su producción. En la actualidad, la producción de hidrógeno verde suele ser más costosa que la producción

de hidrógeno a partir de fuentes de combustibles fósiles. Sin embargo, se espera que, con el avance de la tecnología y la economía de escala, los costos disminuyan y el hidrógeno verde se vuelva más competitivo.

1.3. El hidrógeno verde

El hidrógeno verde es un término que se refiere al hidrógeno producido a partir de fuentes de energía renovable, como la energía solar, eólica, hidroeléctrica o biomasa. Esta energía se utiliza para alimentar la electrólisis del agua, un proceso en el que se descompone el agua (H_2O) en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) mediante la aplicación de una corriente eléctrica.

A diferencia del hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles, el hidrógeno verde no emite dióxido de carbono durante su producción y uso, lo que lo convierte en una opción prometedora para abordar los desafíos del cambio climático y la transición hacia una economía baja en carbono.

El hidrógeno verde tiene numerosas aplicaciones en diferentes sectores:

- Transporte: Se puede utilizar como combustible en vehículos de pila de combustible, lo que permite una movilidad más limpia y una reducción de la dependencia de los combustibles fósiles en el sector del transporte.
- Industria: El hidrógeno verde se puede utilizar como fuente de energía en procesos industriales, como la refinación de petróleo, la producción de acero y la fabricación de productos químicos.
- Generación de energía: El hidrógeno verde también se puede utilizar en turbinas de gas o en centrales eléctricas para generar electricidad, lo que permite un suministro de energía más estable y confiable cuando las fuentes de energía renovable no están disponibles.

Existen distintas opciones posibles disponibles para producir hidrógeno a partir de fuentes renovables. En la siguiente figura se muestra un esquema con estas opciones (*Véase Figura 4*).

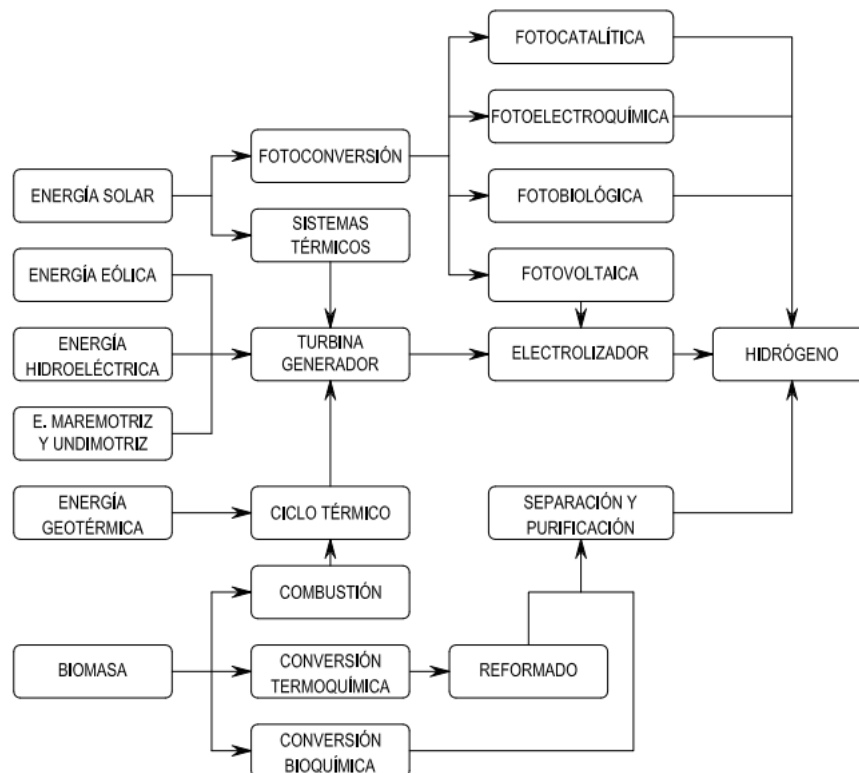


Figura 4. Opciones disponibles para la producción de hidrógeno verde. (Aguado, 2021; Llera y Zabalza, 2011)

1.4. El hidrógeno rosa

Como ya se ha mencionado anteriormente, el hidrógeno rosa es aquel que se obtiene con energía proveniente de centrales nucleares.

La energía nuclear funciona con uranio-235 y se basa en el proceso de fisión nuclear. El uranio-235 (U-235) es un isótopo del uranio que es fisiónable, lo que significa que puede dividirse en fragmentos más pequeños cuando es bombardeado por neutrones. Este proceso de fisión libera una gran cantidad de energía en forma de calor y radiación.

El ciclo de vida típico de un reactor nuclear que utiliza uranio-235 para generar energía incluye los siguientes pasos:

- Extracción y Enrichamiento:

El uranio natural se extrae de la tierra y generalmente contiene alrededor del 0.7% de U-235 y el resto es uranio-238 (U-238).

Para utilizar el uranio en un reactor nuclear, se debe aumentar la proporción de U-235 mediante un proceso llamado enriquecimiento. Esto se hace para que el material sea más propenso a la fisión nuclear.

- Fisión Nuclear

En el núcleo de un reactor nuclear, el U-235 se bombardea con neutrones.

Cuando un átomo de U-235 absorbe un neutrón, se vuelve inestable y se divide en dos átomos más pequeños, liberando energía y liberando varios neutrones adicionales.

- Reacciones en Cadena

Los neutrones liberados durante la fisión pueden colisionar con otros átomos de U-235, provocando más fisión en un proceso llamado reacción en cadena.

Esta reacción en cadena controlada es mantenida por el diseño del reactor y controladores como barras de control que regulan la cantidad de neutrones presentes.

- Generación de Calor

La energía liberada durante las reacciones de fisión se convierte en calor. Este calor se utiliza para calentar agua y producir vapor.

- Generación de Electricidad

El vapor generado impulsa turbinas conectadas a generadores, produciendo electricidad.

La tecnología de fisión nuclear ha sido utilizada en centrales nucleares para generar electricidad a gran escala. Es importante destacar que la fisión nuclear también puede tener aplicaciones militares, por lo que la gestión segura y controlada de los materiales nucleares es fundamental para prevenir la proliferación nuclear y garantizar la seguridad.

1.5. Almacenamiento y distribución

El hidrógeno es un vector energético versátil, lo que significa que puede almacenarse y transportarse fácilmente. Se puede comprimir, licuar o almacenar en forma de hidratos,

lo que facilita su distribución y uso en diversos sectores, como el transporte, la industria y la generación de energía.

Es importante destacar que, independientemente del método de almacenamiento y distribución, la seguridad es una consideración clave debido a la naturaleza altamente inflamable del hidrógeno. Se deben implantar protocolos y medidas de seguridad adecuadas en todas las etapas, desde la producción hasta el consumo para garantizar su manipulación segura y minimizar los riesgos potenciales.

Debido a las propiedades del hidrógeno que se han tratado en apartados anteriores, el almacenamiento del hidrógeno para transportarlo en un automóvil supone todo un reto. Sobre todo, si se quiere hacer a bajo coste, de manera ligera, con seguridad y con una densidad energética aceptable. Para lograr unos 500 km aproximadamente, con un automóvil con pila de combustible, necesitaríamos almacenar unos 5 kg de hidrógeno (*Asensio, 2007*).

1.5.1. Almacenamiento del hidrógeno

El hidrógeno es un vector energético cuya energía específica es muy elevada y que a su vez, presenta una baja densidad comparado con otros combustibles (es el gas menos denso). Debido a esto, para proporcionar energía a procesos en los que la demanda es alta, se necesitan volúmenes de hidrógeno muy altos. Este problema se hace ver sobre todo en su aplicación en el transporte.

Ante esto, se proponen tres alternativas para su almacenamiento:

- Almacenamiento en forma de hidrógeno comprimido

El almacenamiento en forma de hidrógeno comprimido es el más habitual en la actualidad, sin embargo, este almacenamiento requiere un aumento del consumo de la energía necesaria para presurizar el hidrógeno. La relación entre el coste de energía necesaria para comprimir el hidrógeno y la presión de este aumenta exponencialmente y no linealmente, por lo que resulta más interesante trabajar con presiones más altas.

Una forma de valorar el coste necesario para la energía de compresión del hidrógeno es expresarla en forma de porcentaje sobre el total contenido en el hidrógeno almacenado. En la *Figura 5* se muestra cómo el consumo energético necesario para comprimir el

hidrógeno está entre los límites teóricos de un proceso adiabático de compresión y uno isotermo. En la práctica, los valores se sitúan en la zona intermedia ([Llorca, 2010](#)).

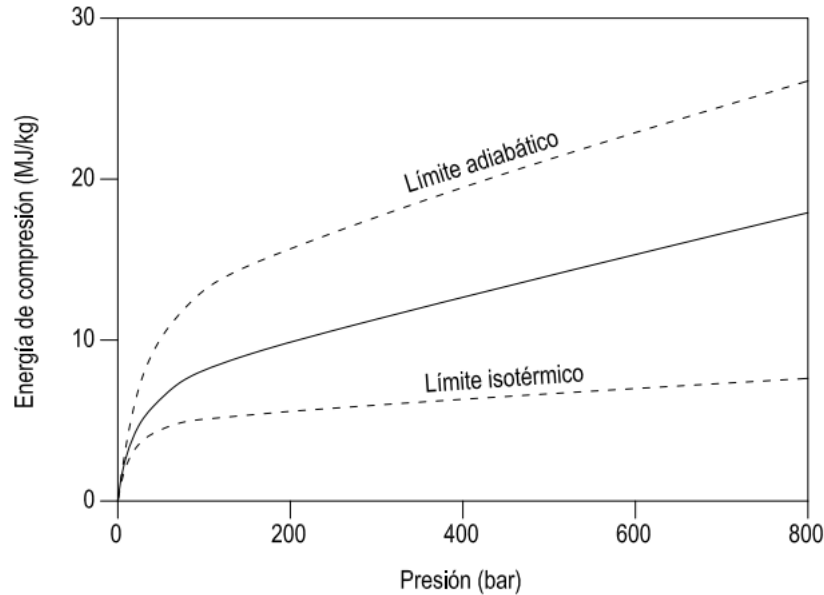


Figura 5. Consumo energético requerido para la compresión del hidrógeno ([Aguado, 2021](#)).

Una vez el hidrógeno se ha comprimido, se almacena en cilindros o tanques. Normalmente son cilindros con casquetes esféricos en los extremos. En uno de estos extremos se añaden válvulas que permiten regular el flujo saliente o entrante del hidrógeno.

La presión puede variar, pero comúnmente se almacena a 350 a 700 bar. Este método es adecuado para aplicaciones de movilidad, como automóviles de pila de combustible y autobuses.

Hasta el momento se han desarrollado cuatro tipos de tanques funcionales para el almacenamiento y transporte de hidrógeno, conocidos como Tipo I, Tipo II, Tipo III y Tipo IV ([Santiago, 2017](#); [Aguado, 2021](#)).

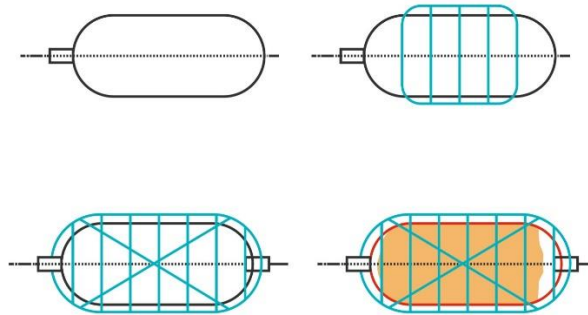


Figura 6. Tipos de depósitos para el almacenamiento de hidrógeno como hidrógeno comprimido. (Fuente: elaboración propia)

○ Tipo I

Depósito sin costuras de acero o aluminio. Trabajan a presiones máximas de 175 bar para los de aluminio y 200 bar para los de acero. Son tanques muy pesados pero económicos para almacenar hidrógeno en determinadas aplicaciones estacionarias como laboratorios.



Figura 7. Tipo I. (Fuente: elaboración propia)

○ Tipo II

Depósito sin costuras, de acero o aluminio y reforzado con fibra de carbono o vidrio para reforzar la dirección de las paredes del cilindro. Trabajan con presiones entre 700 y 1000 bar. Al igual que los tipo I, son tanques pesados por lo que no son viables para automoción, aunque sí para aplicaciones estacionarias. Dado que este tipo de taques soporta altas presiones, se suelen emplear en las hidrogeneras.

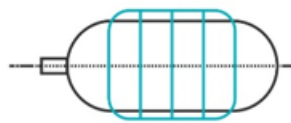


Figura 8. Tipo II. (Fuente: elaboración propia)

○ Tipo III

Depósito de acero o aluminio, con forro metálico interno con o sin costuras para evitar fugas de hidrógeno por difusión. Todo está cubierto por varias capas de material compuesto dispuesto en varias direcciones. También se suelen reforzar con fibra de carbono. Soportan hasta 700 bar. Son tanques menos pesados ya que el sustituir el grosor de las paredes metálicas por capas de materiales compuesto hace que disminuya el peso.

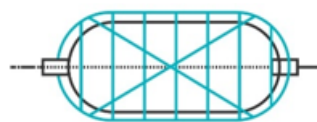


Figura 9. Tipo III. (Fuente: elaboración propia)

○ Tipo IV

Depósito con forro de material plástico (polietileno de alta densidad) para evitar fugas de hidrógeno por difusión. Está reforzado por fibras de carbono cubriendo todo el plástico. Las fibras de carbono son las encargadas de soportar las cargas estructurales. En la parte exterior, lleva un recubrimiento de fibra de vidrio para proteger la superficie externa. Soportan hasta 700 bar de presión. Los tanques tipo IV son los menos pesados, pero también los más caros. Estos son los que se emplean mayormente en automoción. Por ejemplo, el modelo Toyota Mirai lleva dos depósitos de este tipo con capacidad de 122.4L.

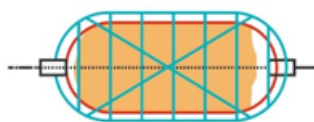


Figura 10. Tipo IV. (Fuente: elaboración propia)

Respecto al peso de los depósitos, este varía según fabricante, pero aproximadamente podemos decir que un depósito de 100 litros de acero o aluminio y presión 200 bares pesa unos 100 kg, uno metálico inoxidable parcialmente embobinado con fibra de carbono y presión 350 bares pesa unos 65 kg y uno totalmente embobinado con fibra de carbono y presión 700 bares pesa unos 30 kg ([Aguado, 2021](#)). Por eso, los últimos son los más utilizados en el sector automovilístico.

Actualmente, el almacenamiento de hidrógeno de forma eficiente, segura y en la que se maximicen las capacidades gravimétricas y volumétricas está en constante investigación y sigue siendo un gran reto en los laboratorios. Las altas temperaturas a las que se puede ver sometido en el ambiente o durante el repostaje, pueden elevar la presión de almacenamiento hasta un 10% y, como otros gases almacenados a presiones altas, es muy peligroso debido a su capacidad explosiva. Teniendo en cuenta este peligro, los depósitos se someten a varias pruebas de fugas y presentan un excelente historial de seguridad.

- Almacenamiento en forma de hidrógeno líquido

El hidrógeno se enfría a temperaturas muy bajas (-253°C) para convertirse en un líquido altamente denso y alcanzar esta temperatura añade bastante complejidad al proceso. Aun así, esta forma de almacenar hidrógeno consigue reducir su volumen mucho más que como hidrógeno comprimido, solucionando los problemas relacionados con el tamaño y peso de los depósitos.

Esta forma de almacenamiento es adecuada para transportar grandes cantidades de hidrógeno en depósitos, sin embargo, requiere sistemas de aislamiento eficientes y puede tener pérdidas por evaporación. Los depósitos que se utilizan son los llamados Dewar, que son depósitos aislados mediante vacío, y los tanques de doble capa con un fluido intermedio criogénico.

En cuanto a la geometría, la mayoría de los depósitos son esféricos, ya que así es menor la superficie involucrada en la transferencia de calor para un volumen concreto. El material utilizado para el armazón es acero inoxidable o incluso una aleación de aluminio resistente a la corrosión con espesor superior a 2 mm. También lleva una capa de aluminio y fibra de vidrio como aislamiento térmico.

Uno de los problemas de almacenar hidrógeno en forma hidrógeno líquido está relacionado con la temperatura nombrada anteriormente, ya que resulta imposible conseguir un aislamiento térmico completo y por tanto, el calor que se transfiere desde el ambiente hace que parte del hidrógeno se evapore y aumente la presión del depósito (Llera, 2011).

También está el riesgo de lesión por contacto con las superficies frías de los depósitos o con el hidrógeno líquido o sus vapores.

- Almacenamiento como parte de un compuesto sólido

Se están investigando materiales sólidos como hidruros metálicos, hidruros no metálicos como láminas de litio y materiales porosos para almacenar hidrógeno a temperatura ambiente y liberarlo cuando sea necesario. El hidrógeno forma parte de la composición molecular del compuesto.

- Hidruros metálicos

Los sistemas de retención de hidrógeno en forma sólida mediante el uso de hidruros metálicos se fundamentan en la capacidad de ciertos metales, bajo condiciones de elevada presión, para absorber hidrógeno y formar hidruros metálicos. Posteriormente, para liberar el hidrógeno absorbido, es necesario calentarlas a bajas presiones. Mediante la integración del hidrógeno en la composición química del metal, se elimina la necesidad de operar a altas presiones o temperaturas extremadamente bajas, por lo que se considera un método de almacenamiento altamente seguro.

Las aleaciones más comunes suelen ser de magnesio, níquel, hierro y titanio. En el contexto de este sistema de almacenamiento, es crucial señalar que el proceso debe ser completamente reversible y estable frente al oxígeno y la humedad ambiental. Además, debe ser capaz de soportar múltiples ciclos de carga y descarga, siendo relevante prestar atención al tiempo necesario para la carga de hidrógeno en el depósito y a la rapidez de respuesta cuando se requiere el hidrógeno en una aplicación específica.

Por otro lado, existen diferencias entre los hidruros metálicos de alta temperatura, que a pesar de precisar un mayor consumo térmico, su coste es menor y almacenan más hidrógeno, y los de baja temperatura, que requieren presurización para evitar la pérdida

de hidrógeno por condicionantes externos. En algunos casos, se combinan hidruros metálicos de baja y alta temperatura para minimizar sus desventajas.

El peso y la pureza del hidrógeno son factores cruciales en los sistemas de almacenamiento de hidruros metálicos. Estos materiales suelen tener gran peso y costo, a pesar de no almacenar más de un 8 % de hidrógeno en peso (*Llera y Zabalza, 2011; Llorca, 2010*). La pureza del hidrógeno cargado resulta determinante para evitar la contaminación, principalmente por oxígeno y agua, ya que estos impiden el posterior enlace químico con el hidrógeno. Otra limitación de los hidruros metálicos es su estructura en forma de granos o polvo, lo que los hace sensibles al desgaste, reduce su rendimiento y puede ocasionar problemas de seguridad.

Una alternativa a los hidruros anteriores para la generación de hidrógeno es el uso de compuestos de sodio, potasio o litio que reaccionan con el agua para liberar hidrógeno sin necesidad de calor externo para la desorción. El hidróxido de sodio es el compuesto más utilizado. Para almacenar el hidruro y poder transportarlo fácilmente, se utiliza un proceso similar al de fabricar briquetas y después, se recubre con un revestimiento impermeable. Para liberar el hidrógeno, se sumerge en agua, liberándose hidrógeno gaseoso a 9 bares aproximadamente (*Llera y Zabalza, 2011*). Sin embargo, presenta complicaciones mecánicas en el corte de las briquetas y en la recuperación de residuos.

- Hidruros no metálicos

Con el fin de superar la limitación que supone el elevado peso de los hidruros metálicos, se han desarrollado sistemas alternativos de almacenamiento con elementos químicos menos pesados, capaces de crear enlaces iónicos o covalentes. Su ventaja radica en un mayor almacenamiento de hidrógeno; sin embargo, en estos procesos, el ciclo de carga y descarga se complica, es decir, no siempre son reversibles.

- Materiales porosos

Aunque aún menos explorados, los materiales carbonosos, como el carbón activo, nanotubos de carbono y nanofibras de grafito, representan una alternativa para el almacenamiento de hidrógeno. En estos materiales se aprovechan los microporos y la gran área superficial para almacenar el gas. La adsorción de hidrógeno en estos materiales se realiza a través de fuerzas electrostáticas, una interacción débil que facilita una carga y descarga rápida. La cantidad de hidrógeno adsorbida en estos materiales depende de la presión aplicada a una temperatura específica y del tamaño y cantidad de los poros. Sin embargo, los resultados experimentales hasta ahora han mostrado variabilidad, con porcentajes de hidrógeno adsorbido que fluctúan entre el 1 % y el 10 % de su peso ([Llorca, 2010](#)).

- Almacenamiento en hidratos

El hidrógeno se puede almacenar en forma de hidratos, que son estructuras cristalinas de moléculas de agua que capturan moléculas de hidrógeno en su interior. Esta tecnología está en desarrollo y se considera prometedora para almacenar hidrógeno a temperaturas y presiones más moderadas.

Comparativa entre los distintos sistemas de almacenamiento

La medición de valores, como la capacidad gravimétrica o el porcentaje en masa, de las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno no resulta suficiente para evaluarlas correctamente. Para calcular la capacidad de almacenamiento de un material, la masa de hidrógeno almacenado se debe dividir por la suma de la masa del hidrógeno y la masa del material que lo contiene. En contraste, en el cálculo de la capacidad de almacenamiento de un sistema debe incluirse además la masa del recipiente de almacenamiento, resultando en valores significativamente menores. Por otra parte, el parámetro de la capacidad volumétrica se define como la masa de hidrógeno almacenado por unidad de volumen, y es de gran utilidad. El mejor método de almacenamiento se evaluará según se acerque a

valores elevados de densidad, a la capacidad de reversibilidad y a su bajo coste y alta seguridad.

Aunque actualmente el hidrógeno licuado y algunos hidruros pueden parecer más ventajosos en términos de gravimetría y volumetría, existen diversas limitaciones que afectan considerablemente su rendimiento. Para evaluar los sistemas de almacenamiento, también deben ser considerados factores como el tiempo de llenado y vaciado, la eficiencia energética, las pérdidas por fugas, el control de temperatura y/o presión, la capacidad de adaptación a los espacios, así como otras consideraciones económicas y de seguridad.

1.5.2. Distribución del hidrógeno:

- Transporte por tuberías: El hidrógeno se puede distribuir a través de una red de tuberías, de manera similar al gas natural. Sin embargo, para hacerlo seguro y eficiente, es necesario usar materiales adecuados y evitar la propagación de fugas, ya que el hidrógeno tiene la capacidad de hacer que ciertos materiales se vuelvan más frágiles.
- Transporte en cilindros o tanques móviles: El hidrógeno se puede transportar en cilindros o tanques móviles por carretera, ferrocarril o barco para abastecer estaciones de servicio, industrias y otras instalaciones.
- Transporte en forma líquida: Para distancias más largas o para exportar grandes cantidades de hidrógeno, se puede utilizar el transporte en forma líquida en buques criogénicos.
- Generación in situ: En algunos casos, especialmente en aplicaciones industriales, el hidrógeno puede generarse in situ, es decir, producirse directamente en el lugar donde se va a utilizar, lo que puede evitar algunos problemas logísticos asociados con el almacenamiento y transporte a larga distancia.

2. Procesos para la obtención de hidrógeno

El hidrógeno se puede producir de varias formas, por ejemplo, el método más antiguo es calentar carbón a temperaturas mayores de 900°C.

Dentro de los métodos más comunes destacamos la obtención a partir de combustibles fósiles como el petróleo o la reforma de gas natural, refinados como el diésel o la gasolina, o biocombustibles como el etanol y el metanol.

La reforma de gas natural (un hidrocarburo ligero) es el método más utilizado a nivel industrial, donde el gas natural reacciona con vapor de agua para producir hidrógeno y monóxido de carbono. Se llama reforma a la reacción catalítica de una mezcla de hidrocarburos y vapor de agua a alta temperatura para formar hidrógeno, bióxido de carbono y monóxido de carbono.

La gasificación de biomasa consiste en sumergir una célula fotovoltaica en agua y realizar una electrólisis.

La electrólisis del agua es uno de los procedimientos más limpios para obtener hidrógeno. Este proceso utiliza electricidad para descomponer el agua en sus elementos constituyentes: hidrógeno y oxígeno.

El inconveniente de este método es que para producir las grandes cantidades de hidrógeno que demanda la industria, serían necesarias grandes cantidades de electricidad. Para no contradecir el primer principio de la termodinámica, la energía eléctrica que se emplea será siempre mayor que la que se obtenga en una pila de combustible. Por lo tanto, la energía que se utilice en la electrólisis debería ser de origen renovable, pues de no ser así, el proceso no sería rentable. (*Hortal, 2012*).

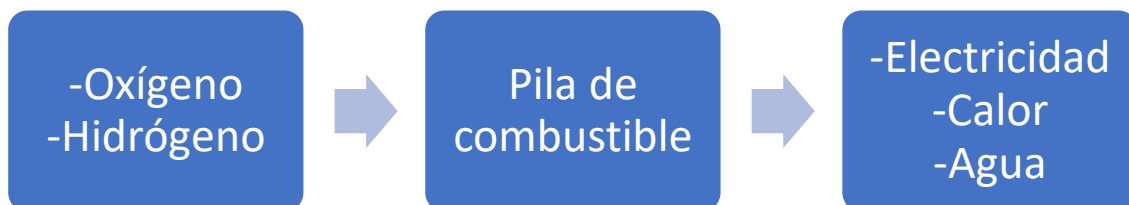
El lugar donde tienen lugar estos procesos de obtención de hidrógeno se denomina hidrogenera.

3. Pila de combustible

3.1. Descripción

Una pila de combustible, también conocida como celda de combustible, es un dispositivo electroquímico que convierte energía de manera similar a una batería. Sin embargo, se distingue de esta última en su capacidad para reabastecerse continuamente de los reactivos consumidos. En otras palabras, genera electricidad a partir de una fuente externa de combustible y oxígeno, a diferencia de la limitada capacidad de almacenamiento de energía de una batería. Además, a diferencia de una batería, en una celda de combustible, los electrodos son catalíticos y permanecen relativamente estables, en contraste con los electrodos de una batería que reaccionan y cambian según su nivel de carga.

Los reactivos utilizados normalmente en una celda de combustible de hidrógeno en el ánodo y en el cátodo son hidrógeno y oxígeno respectivamente. Por otro lado, las baterías convencionales consumen reactivos sólidos y, una vez agotadas, deben ser desechadas o recargadas mediante electricidad. De la reacción producida en una pila de combustible obtenemos electricidad, calor y agua.



Su origen se remonta a principios del siglo XIX, cuando el ingeniero aficionado William Robert Grove llevó a cabo un experimento en el que unía en serie de cuatro celdas electroquímicas, componiéndose cada una por un electrodo con hidrógeno u otro con oxígeno, y a su vez, separados por un electrólito. Con esto, Grove comprobó que la reacción de oxidación del hidrógeno en el cátodo combinada con la reacción de reducción del oxígeno en el ánodo generaba una corriente eléctrica útil para generar hidrógeno.

3.2. Tipos

El nombre de los distintos tipos de pilas de combustible lo determina el material por el que está compuesto su electrólito.

3.2.1. Pilas de combustible alcalinas

Las pilas de combustible alcalinas, AFC por sus siglas en inglés (Alkaline Fuel Cell), han sido utilizadas principalmente en misiones espaciales. Su temperatura de funcionamiento oscila entre 65°C y 90°C, aunque puede alcanzar los 200°C con un electrólito altamente concentrado y bajo presión. Su eficiencia puede alcanzar hasta el 70% ([Hortal, 2012](#)).

Los reactivos son H_2/O_2 . El catalizador es platino y el combustible es hidrógeno.

3.2.2. Pilas de combustible poliméricas

- Pilas de membrana de intercambio de protones

Las PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) funcionan a temperaturas inferiores a los 100°C y tienen un rendimiento del 50%. Gracias a su rápida capacidad de arranque a plena potencia, permiten suministrar energía a vehículos o instalaciones pequeñas. Los reactivos son H_2/O_2 .

- Pilas de combustible de metanol

Las pilas de combustible de metanol, DMFC por sus siglas en inglés (Direct Methanol Fuel Cell) utiliza metanol como combustible y una membrana de polímero como electrólito. Los reactivos son CH_3OH/O_2 .

Se utilizan en pilas para teléfonos móviles y otros dispositivos alimentados con baterías químicas.

3.2.3. Pilas de combustible de ácido fosfórico

Las PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) son unas de las más avanzadas en cuanto a términos de desarrollo y comercialización. Su temperatura de funcionamiento oscila entre 180°C y 200°C. Se pueden utilizar en instalaciones medianas y para la cogeneración. El electrólito es el ácido fosfórico concentrado entre el 95 y 98%. Tiene un rendimiento superior al 40% ([Hortal, 2012](#)).

3.2.4. Pilas de combustible de carbonatos fundidos

Las MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) se utilizan para suministrar energía a instalaciones de gran tamaño. Su temperatura de funcionamiento oscila entre 600°C y 700°C. Tienen un rendimiento entre el 60% en las plantas de generación de energía y puede alcanzar el 80% utilizando el calor residual en otras aplicaciones. Los reactivos son H_2/O_2 y el catalizador el níquel (*Hortal, 2012*).

3.2.5. Pilas de combustible de óxidos sólidos

Las SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) son las que funcionan a temperaturas más altas, entre 900°C y 1000°C, lo que mejora considerablemente las reacciones cinéticas. Esto también evita la necesidad de utilizar como catalizadores metales raros. Por otro lado, estas células tardan más tiempo en ponerse en marcha y debido a las altas temperaturas requieren de un muy buen aislamiento y de materiales resistentes a estas temperaturas. Se utilizan para la generación de energía estacionaria con una eficacia del 60% (*Hortal, 2012*).

3.3. Partes y funcionamiento de las pilas de combustible poliméricas

3.3.1. Partes

En la construcción de celdas de combustible, al igual que con las baterías, es esencial conectar las celdas individuales para formar una pila y lograr niveles de tensión notables. Esto se debe a que una sola celda solo produce aproximadamente 0,7 V de voltaje aprovechable (*Llera y Zabala, 2011*). Los componentes fundamentales incluyen electrodos (ánodo y cátodo), electrólito (responsable del transporte de iones en reacciones redox), matriz (contiene el electrólito, innecesaria cuando es sólido) y placa bipolar (actúa como colector de corriente y distribuidor de gases).

Los electrodos porosos desempeñan diversas funciones, como proveer puntos activos para las reacciones gas/líquido, conducir iones dentro y fuera de la interfaz de tres fases y servir como barrera física entre la fase gaseosa y el electrólito. En pilas de baja temperatura, la función catalítica de los electrodos es más crucial. La permeabilidad adecuada de los electrodos porosos al electrólito y a los gases es esencial para evitar el exceso de "inundación" o "secado".

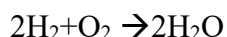
Además, el electrólito no solo transporta reactantes al electrodo, sino que también conduce carga iónica, completando el circuito eléctrico, y actúa como barrera física para evitar la mezcla directa de corrientes de gas combustible y oxidante.

La matriz, con poros más pequeños que los electrodos, retiene el electrólito por capilaridad, evitando que se escape de la celda a través de los poros de los electrodos.

Las placas bipolares, además de actuar como colectores de corriente, sirven como separadores entre celdas, evitando el contacto directo entre combustible y oxidante de celdas adyacentes. También distribuyen reactivos sobre los electrodos y evacúan el agua producida en la reacción. Como idea clave, son las encargadas de distribuir el combustible y el oxígeno por la superficie activa, de unir el cátodo de una celda con el ánodo de otra y de proporcionar conducción eléctrica. Estas placas, hechas comúnmente de grafito, deben ser resistentes, garantizar la estanqueidad y poseer alta conductividad térmica y eléctrica, baja permeabilidad a los gases y resistencia a la corrosión.

3.3.2. Funcionamiento

La reacción global que tiene lugar en el interior de la pila de combustible combina hidrógeno y oxígeno para formar agua:



A diferencia del proceso de combustión convencional en las pilas de combustible, en este caso, el comburente y el combustible no se encuentran en contacto directo. La oxidación del combustible ocurre en el ánodo, mientras que en el cátodo, el oxidante consume los iones positivos del electrólito junto con los electrones generados en el ánodo, que se mueven gracias a la diferencia de potencial creada entre los dos electrodos.

Los componentes básicos de una pila de combustible incluyen los electrodos, donde el cátodo funciona como el polo positivo y el ánodo como el polo negativo; el electrólito, que tiene la responsabilidad de transportar los iones generados en las reacciones redox.

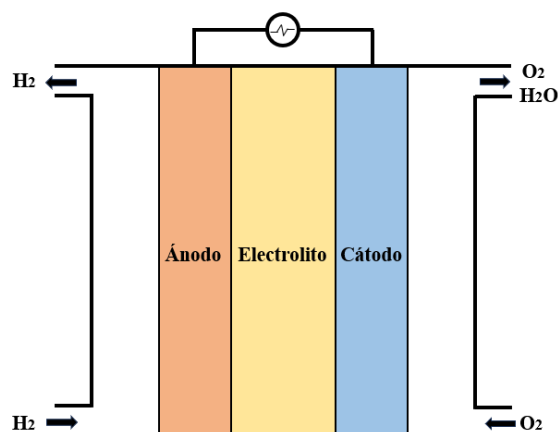


Ilustración 1. Celda de la pila de combustible (Fuente: elaboración propia a partir de Appice)

En el funcionamiento de la pila, los gases combustibles y oxidantes fluyen hacia el electrolito, los oxidantes atraviesan el cátodo, y los combustibles lo hacen a través del ánodo. Esto da lugar a las reacciones nombradas anteriormente: oxidación en el ánodo y reducción en el cátodo. Los iones resultantes pasan de un electrodo a otro por el electrolito y los electrones que se han generado circulan por un circuito en el que tiene lugar el trabajo eléctrico.

La cantidad de electrolito presente en la membrana es un factor crítico. Un exceso de electrolito dificulta el acceso de los gases a los sitios reactivos donde se encuentra el catalizador, mientras que una cantidad insuficiente de electrolito limita el transporte de los iones hacia donde ocurre la reacción.

4. Vehículos de hidrógeno

4.1. Descripción

Los automóviles y otros vehículos que utilizan pilas de hidrógeno necesitan diversos componentes para operar eficientemente, asegurando la seguridad y el rendimiento necesario para circular en carreteras. Los principales elementos que constituyen cualquier vehículo de hidrógeno son los siguientes:

- Pila de combustible: responsable de generar energía mediante la reacción química de H_2 con el O_2 para propulsar el vehículo.
- Tanques de hidrógeno: lugar de almacenamiento del hidrógeno a alta presión necesario para alimentar la pila de combustible.
- Batería: encargada de almacenar la energía eléctrica excedente de la regeneración del vehículo y liberarla cuando sea necesario durante la conducción, por ejemplo, durante la aceleración.
- Motor eléctrico: tiene la función de propulsar el vehículo cuando una corriente eléctrica específica fluye a través de él, pudiendo actuar como generador para recargar la batería.
- Sistema de recarga: el sistema que suministra hidrógeno para recargar los depósitos del vehículo.

En los vehículos actuales con celdas de combustible de hidrógeno, se requiere presurizar el hidrógeno hasta 700 bares en tanques especialmente diseñados. Actualmente, se utiliza hidrógeno presurizado a 700 bares en automóviles y a 350 bares en furgonetas, camiones, autobuses, etc. (*Hiperbaric, 2024*). Sin embargo, en las hidrogeneras, es posible encontrar hidrógeno incluso a 1000 bares, lo que implica que los tanques que almacenan el hidrógeno en estas condiciones deben ser especialmente reforzados y resistentes. Estos tanques deben soportar altas tensiones y un gran número de ciclos de carga y descarga, lo que implica la necesidad de utilizar materiales que sean menos susceptibles a la fragilización por hidrógeno.

Debido al pequeño tamaño de las moléculas de hidrógeno, pueden permear a través de diferentes materiales, lo cual debe ser considerado en el diseño de los tanques. Además,

se deben tomar en cuenta los problemas de seguridad que puedan surgir por posibles fugas o en caso de accidentes.

4.2. Funcionamiento

A diferencia de un vehículo eléctrico convencional, el que utiliza una pila de combustible no se recarga a través de un enchufe, sino que cuenta con tanques de hidrógeno que se combinan con oxígeno para impulsar el vehículo.

El proceso electroquímico que resulta de la mezcla de oxígeno e hidrógeno tiene lugar en la pila de combustible, generando energía eléctrica y agua. Mientras la electricidad generada se almacena en la batería para alimentar el motor eléctrico, el agua residual se expulsa en forma de vapor. De hecho, los automóviles de hidrógeno emiten únicamente vapor de agua a través del sistema de escape.

El procedimiento detallado y esquematizado es el siguiente:

1. El hidrógeno de los tanques alimenta la pila de combustible.
2. Se introduce aire (oxígeno) en las celdas que forman la pila de combustible.
3. Ocurre una reacción entre estos dos gases (O_2 del aire y H_2), y se produce electricidad y agua.
4. La electricidad generada suministra energía a los motores directamente, y, además, carga la batería. Entre la batería y el motor, la corriente pasa por un transformador ya que la electricidad que se obtiene de la pila y que se almacena en la batería es corriente continua y el motor necesita corriente alterna.
5. El agua excedente se expulsa a través del sistema de escape.

El repostaje de estos vehículos es muy similar al de los vehículos de combustible tradicionales: se hace con una manguera sellada al depósito.

4.3. Actualidad y medio ambiente

Actualmente, todas las destacadas marcas del sector automotriz han diseñado un vehículo prototipo que opera a través de pilas de hidrógeno. En algunos casos, también están participando en la creación y desarrollo de prototipos de camiones como el Nikola Tre. Algunos de los modelos de coches de hidrógeno son:

- Honda FCX Clarity (2008)
- Mazda RX8 (gasolina+hidrógeno)
- Hyundai ix35 Fuel Cell (2013)
- Hyundai Nexso
- Toyota Mirai
- BMW ix5 Hydrogen

El almacenaje del hidrógeno es uno de los grandes problemas de la utilización de este elemento como combustible, y puede resumirse en dos ideas: seguridad y capacidad. El hidrógeno siempre ha encerrado riesgos debido a su naturaleza explosiva y combustible que se incrementa al someterse a la presión de los recipientes en los que se guarda en esta gaseoso. Respecto a la capacidad, un automóvil necesita de depósitos grandes para dotarle de cierta autonomía, añadiendo peso y riesgo al vehículo.

También cabe destacar que el coste de fabricación de las pilas de combustible descenderá bastante en los próximos años. Por ejemplo, en los últimos 8 años, las pilas de Litio han bajado a la décima parte de su precio.

En cuanto a las emisiones de CO₂ emitidas durante la producción de hidrógeno y el impacto medioambiental de un vehículo a base de hidrógeno, las emisiones se reducen si el hidrógeno es obtenido de fuentes renovables y utilizado en pilas de combustible. Se consigue reducir las emisiones contaminantes gracias a la mayor eficiencia de la pila de combustible sobre el motor de combustión interna alternativo.

Según la agencia europea del medio ambiente, dos tercios del CO₂ que se emite, viene del sector del transporte por carretera, y el 38% corresponde a transporte de mercancías y vehículos pesados (*AEMA, 2018*). Es por esto por lo que las marcas automovilísticas están apostando de manera más que justificada por nuevas tecnologías en la propulsión de vehículos.

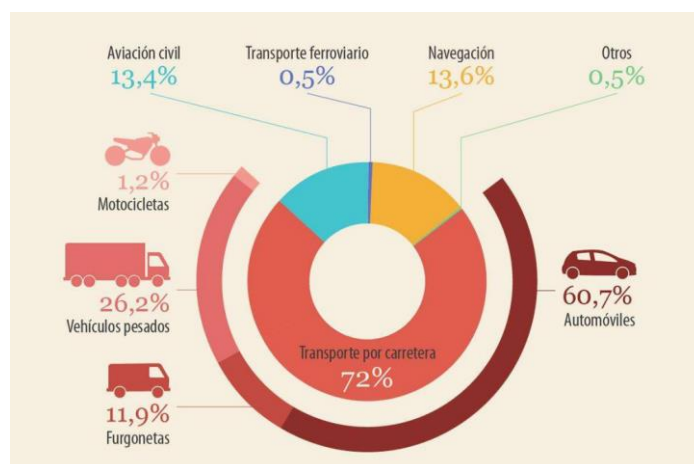


Figura 11. Emisiones de CO₂ originadas por el transporte en la UE. (AEMA, 2018)

Al igual que otras tecnologías con bajas emisiones como los vehículos eléctricos, los que funcionan con la pila de hidrógeno tienen los mismos requisitos operativos, pero ofrecen mayor autonomía, de 400 a 600 km, (Otero, 2018) y tiempos de repostaje muy bajos, 5 minutos aproximadamente.

El desafío para la implementación de esta tecnología radica en la infraestructura de suministro y repostaje de combustible, lo que implica considerables inversiones y la adopción de medidas políticas y financieras para, en 2025, alcanzar a la construcción de al menos 100 estaciones de hidrógeno en Europa, aumentando a más de 10,000 para 2030, según lo contemplado en el Consejo del Hidrógeno de la Unión Europea (Hydrogen Council, 2020). En España hay 12 hidrogeneras (2 abiertas al público, 7 privadas y 3 en construcción). Están en Albacete, Sevilla, Huesca, Zaragoza, Barcelona, Valencia, Madrid y Puertollano (Ciudad Real), donde se encuentra el Centro Nacional del Hidrógeno. Esta central de Puertollano produce hidrógeno verde.

Es imperativo tomar medidas que impulsen la adquisición de vehículos de este tipo, además de llevar a cabo una planificación y colaboración eficientes para instalar estaciones de servicio, aprovechando los recursos disponibles, como la red de gas. La coordinación a niveles nacional y europeo es esencial para garantizar que estas medidas reflejen la madurez y consolidación de esta tecnología.

5. Proceso de construcción de la recreación

La creación de un video a partir de secuencias e infografía obtenidas por elaboración propia es un complejo y tedioso proceso en el que es necesaria una gran capacidad creativa para desarrollar la idea del video y ejecutarlo. A la hora de elaborar un recurso visual como este, hay que tener en cuenta la priorización del detalle en el modelado. Esto hace referencia a la necesidad de simplificar formas y conjuntos para intentar el ahorro computacional en componentes poco relevantes para el entendimiento del proceso que se pretende ilustrar.

A continuación, se explica el proceso de modelado, animación y edición de la infografía que acompaña la memoria y del video en el que se recrea la obtención de hidrógeno verde, así como su posterior transformación en energía eléctrica en un vehículo de hidrógeno.

Se va a trabajar en todo momento con formas orgánicas simplificadas y una gama de colores neutra para armonizar el resultado final y que al público receptor le sea más fácil entender el proceso que se pretende explicar con esta recreación.

5.1. Software utilizado

Se han utilizado los siguientes programas:

- Blender: modelado, animación y renderizado

Blender es software gratuito y de código abierto con un conjunto de herramientas para la creación 3D.

Este programa permite crear imágenes fijas, visualizaciones 3D, efectos visuales y animaciones. Incluso permite la edición de video desde dentro del mismo programa.

Es una aplicación multiplataforma, es decir, se puede usar con distintos sistemas operativos. En este caso, se va a trabajar con Windows.

Una de las ventajas de Blender respecto a otros programas son sus requisitos de almacenamiento y memoria. Estos son relativamente bajos si los comparamos con otros programas de estilo.

Blender permite realizar una amplia gama de tareas por lo que al intentar comprender los conceptos del programa y su interfaz por primera vez, puede resultar un poco desalentador. Ante esto, en internet y en la propia web de Blender se encuentran disponibles manuales de libre acceso y gratuitos con cursos de manejo del programa.

La complejidad a la que enfrenta un usuario nuevo al enfrentarse a Blender por primera vez es su jerga. Un conjunto de palabras asociadas a las tecnologías que se emplean durante el uso del programa. Algunos de los términos que más sorprenden son mapas UV, sombreadores, materiales, subdivs o frames.

- SolidWorks: modelado y dimensionado

SolidWorks es un software perteneciente al sector CAD, diseño asistido por ordenador, que está disponible para usar en el sistema operativo de Windows.

SolidWorks ofrece al usuario una gran cantidad de recursos para el desarrollo de producto que dan a este la opción de crear, simular, diseñar, fabricar, gestionar los datos del proceso y publicarlos.

Otra gran ventaja de este programa es que permite la exportación de archivos con extensiones compatibles con el ya mencionado Blender, por ejemplo, .step.

Para esta recreación, se va a trabajar en el entorno de diseño CAD 3D, el cuál cuenta con una gran cantidad de complementos para el modelado de piezas sólidas, superficies o chapas.

- Adobe Premiere Pro: edición de video

Adobe Premiere Pro es uno de los softwares de edición de videos líder en el sector televisivo, de películas o web.

Una de sus ventajas es que cuenta con una interfaz que puede ser personalizada por el usuario según quiera centrarse en la edición, el color de las imágenes, los efectos, el audio o los títulos.

Permite trabajar con varias secuencias de tiempo que a su vez se pueden jerarquizar para tratarlas con más facilidad y rapidez.

5.2. Sección 1. Obtención de energía

Para comenzar con la recreación, se va a ver una muestra de algunas de las fuentes de energías renovables que se usan para la obtención de energía para producir hidrógeno verde. El hidrógeno verde es, como ya se ha mencionado anteriormente, el obtenido a partir de energía proveniente de fuentes renovables. Estas son la energía solar, representada por un conjunto de placas solares fotovoltaicas, y la energía eólica, representada por molinos de viento de tres aspas.

También van a aparecer dos torres de refrigeración pertenecientes a una central nuclear que se muestran en representación de la energía nuclear. Aunque el hidrógeno obtenido a partir de energía nuclear es el hidrógeno rosa y no el verde, este se ha querido tener en cuenta dentro de esta primera parte ya que la Comisión Europea ha emitido recientemente una Ley sobre emisiones netas que considera a la energía nuclear como una energía renovable.

Para representar la obtención de energía del hidrógeno, ha sido necesario crear una muestra representativa de una instalación de placas solares, unas torres de refrigeración de una planta de obtención de energía nuclear y un modelo simplificado de molinos de viento para la obtención de energía eólica.

Los sólidos que forman el conjunto representativo de la energía nuclear se han modelado directamente desde Blender al ser una forma orgánica (Véase [Figura 12](#)). Estas chimeneas por las cuales sale vapor de agua aparecerán en los primeros fotogramas de la recreación final.

Se han ubicado en uno de los extremos del escenario montañoso sobre el que se está ensamblando esta recreación para más tarde, al ejecutar el movimiento que realizará la cámara, no existan problemas de interferencias entre el modelo y esta.

A la derecha de las chimeneas se pueden ver unas naves auxiliares para el mantenimiento del interior de las torres de refrigeración.

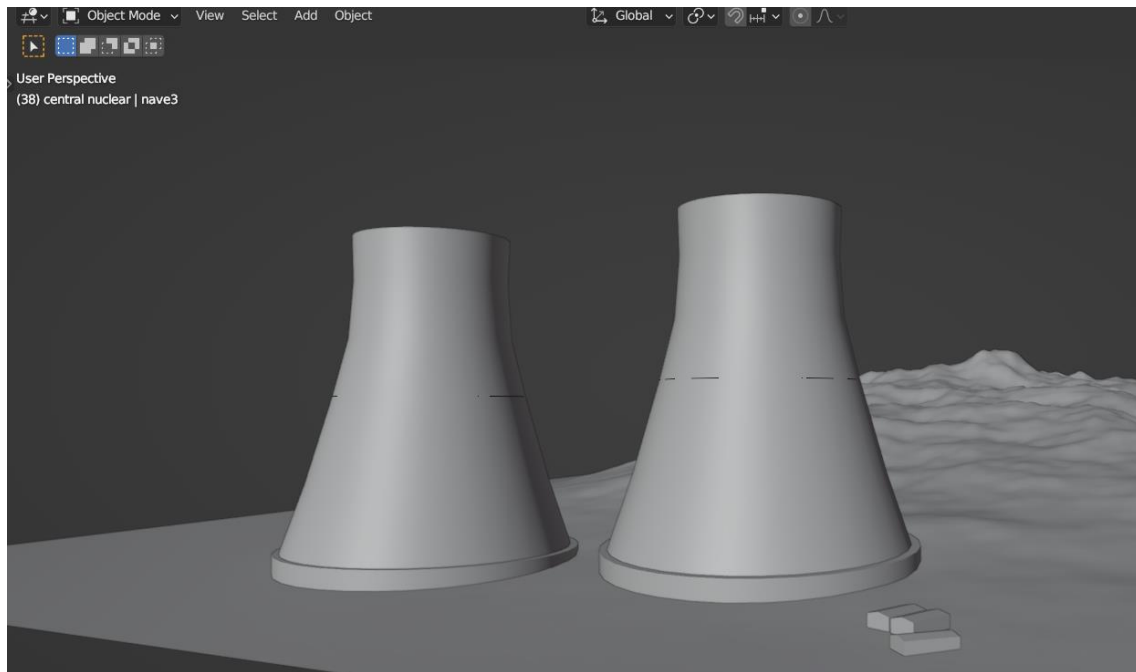


Figura 12. Chimeneas de central nuclear. Geometría. (Fuente: elaboración propia)

Una vez se ha terminado la geometría de las chimeneas y de las naves, se procede al texturizado de la superficie de las chimeneas (Figura 13) de estas para dotarlas de un aspecto más realista.



Figura 13. Energía nuclear: chimeneas de central nuclear. (Fuente: elaboración propia)

Para la cerca que rodea la chimenea, se ha creado un material laminado simulando paneles de hormigón (*Figura 14*).

Esto se consigue añadiendo en el nodo del color base del material una imagen rayada y escalándola hasta que coincida con el efecto que queremos conseguir. También se añaden los correspondientes nodos que controlan la refracción que va a tener el material o el reflejo que va a proyectar.

Aquí ya comienzan a aparecer los conocidos nodos de materiales de Blender. Los nodos son un conjunto de puntos de conexión virtuales entre los distintos ajustes que se le pueden dar a un material. Por ejemplo, el color, la rugosidad, el reflejo, el índice de refracción, la saturación, el ruido, las manchas, las imperfecciones. Uno de los nodos más útiles para la creación de texturas realistas es el de insertar imágenes como color base de un elemento.

Para la superficie de la chimenea, el material creado simula un cemento grisáceo (*Figura 15*).

Esta textura se consigue aplicando el tono gris como base (base color). Para ello y superponiendo un vector de ruido blanco para conseguir un efecto más realista y que no sea una superficie lisa sin rugosidad. Este efecto se caracteriza por el grano de mínimo que aporta al color, generando en su superficie una absorción de la luz más irregular y, por tanto, más semejante a la que el ojo humano está acostumbrado a ver en la realidad.

El bump controla la intensidad del ruido blanco.

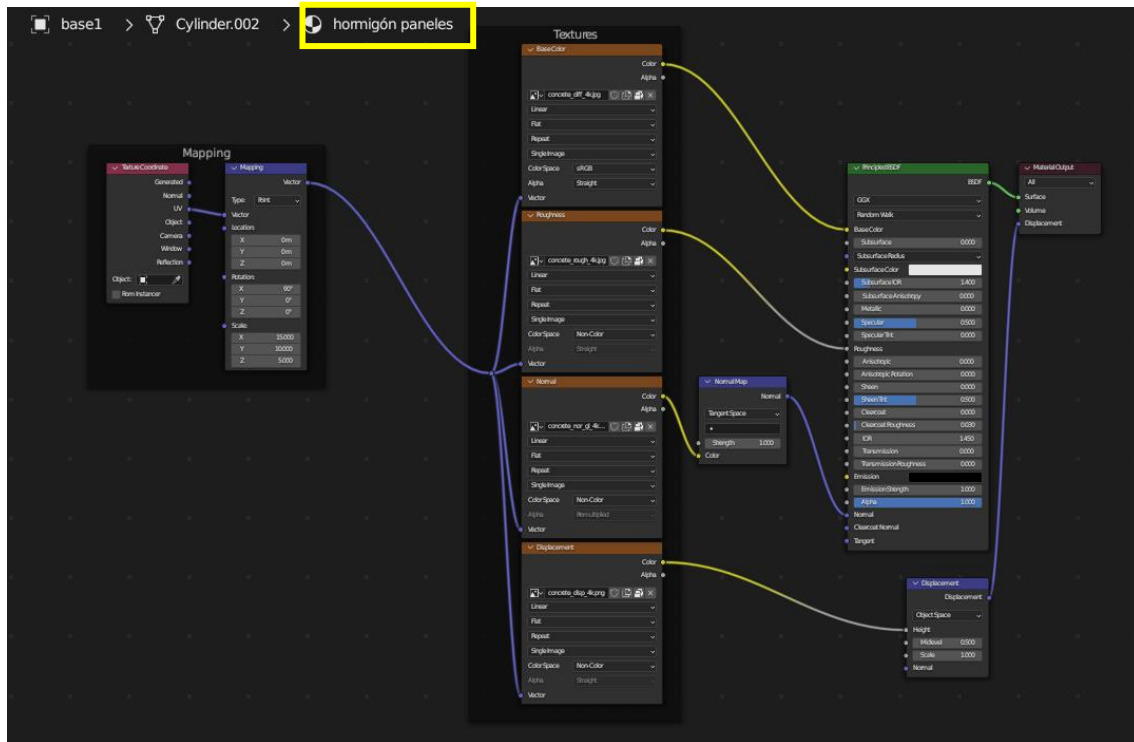


Figura 14. Nodos del material de la base de las chimeneas. (Fuente: elaboración propia)

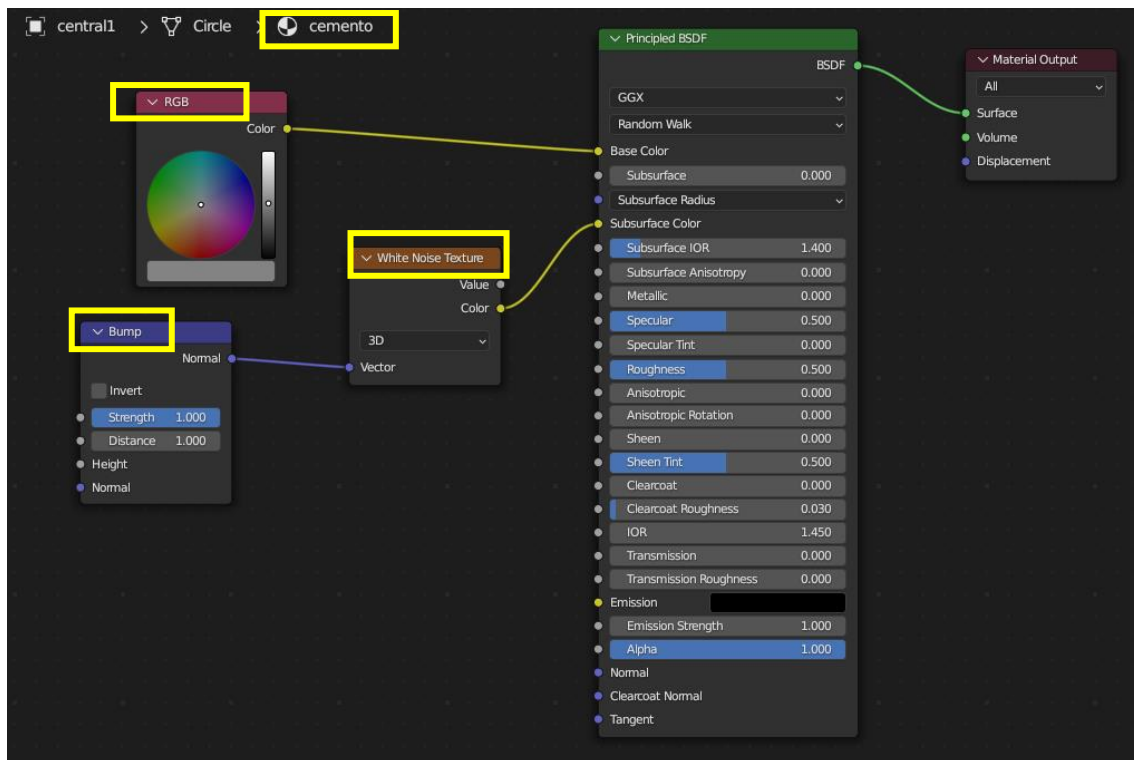


Figura 15. Nodos del material de la superficie de las chimeneas. (Fuente: elaboración propia)

Los molinos que representan la energía eólica se han construido desde SolidWorks (*Figura 16*) ya que, al ser una geometría más específica, es más preciso su modelado. Una vez terminado, se exporta el objeto en .step para poder trabajar con él en Blender.

En la *Figura 16* se pueden ver las operaciones realizadas para el modelado del molino. La hélice se ha extruido a partir de un croquis y se ha hecho una matriz radial para el resto.

El molino se ha añadido repetidas veces y se le ha asignado un material grisáceo llamado eólica (*Figura 17*). Este material se ha editado desde el editor general de materiales en el entorno Shading de Blender.

El resultado final se ve en la *Figura 18*. Una vista general de 5 molinos de viento.

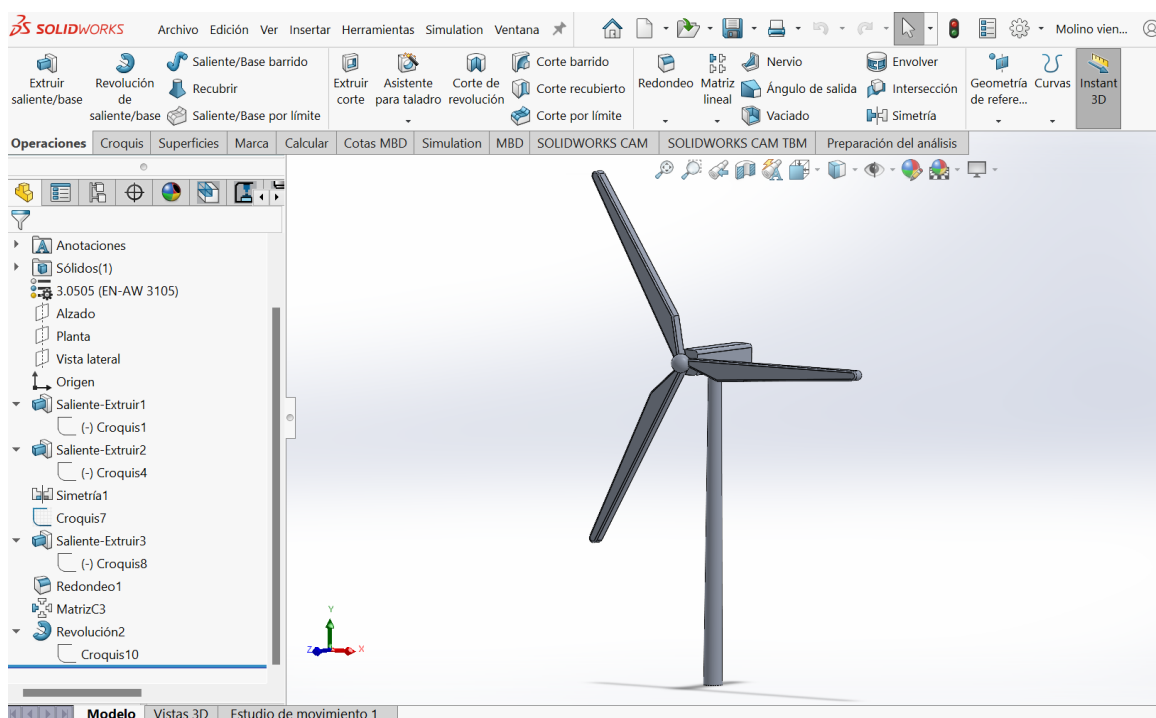


Figura 16. Entorno de SolidWorks del modelado del molino para la representación de energía eólica. (Fuente: elaboración propia)

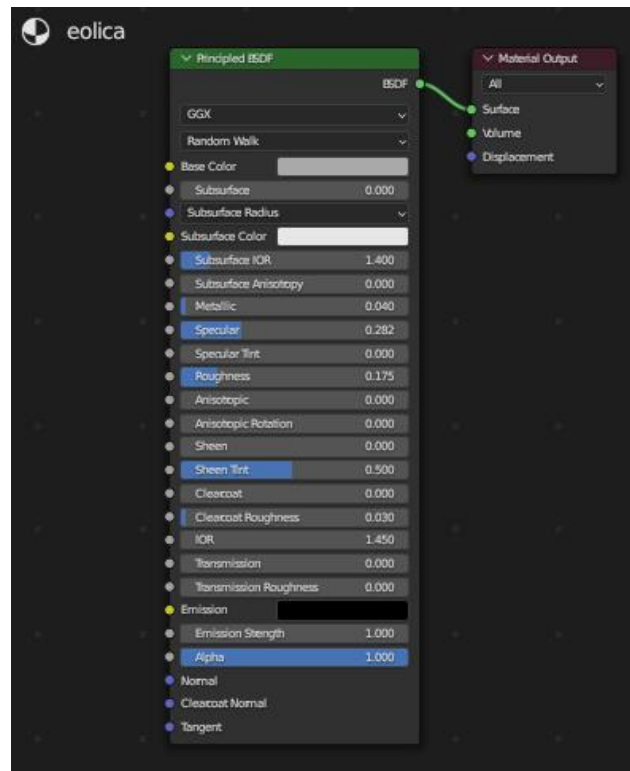


Figura 17. Material eólica del molino para la representación de energía eólica. (Fuente: elaboración propia)



Figura 18. Energía eólica: molinos de viento. (Fuente: elaboración propia)

Por último, para representar la energía solar, se ha creado un conjunto simplificado de placas solares.

El ensamblaje de la placa solar a las escuadras que la sostienen se ha modelado en SolidWorks. (Figura 19) El ensamble lo componen dos piezas: la placa superior y dos escuadras.

Al igual que en los molinos de viento, se ha exportado a Blender con el formato de extensión compatible.

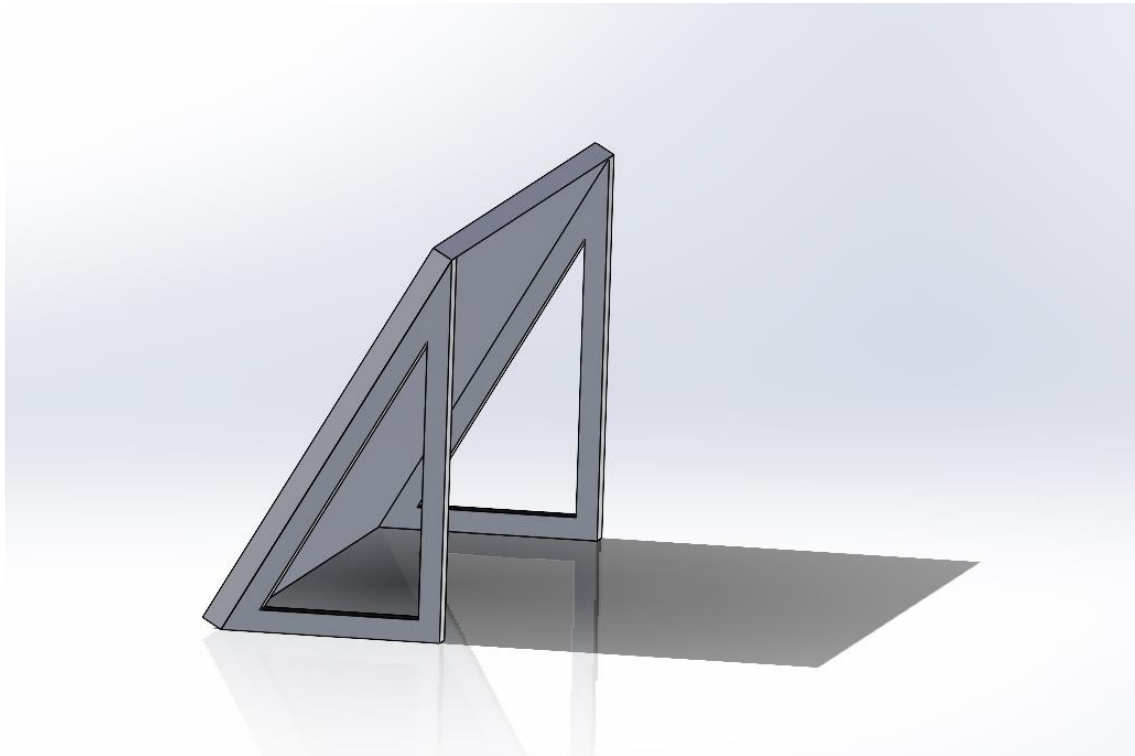


Figura 19. Entorno de SolidWorks del modelado de la placa para la representación de energía solar. (Fuente: elaboración propia)

Cada placa solar lleva dos materiales. El “Azul placa” para la parte superior y el “placa-escuadra” para las escuadras.

El primero (Figura 20) se ha conseguido usando como color base un nodo Checker Texture, que permite crear un patrón de dos colores a la escala que se desee. En este caso se han utilizado dos tonos de azul oscuro característicos de las placas fotovoltaicas.

El segundo (Figura 21) es un material metálico oscuro.

El resultado final puede verse en la Figura 22. Un plano general visto desde arriba en el que se distinguen todas las placas y que durante el video se verán desde otros ángulos.

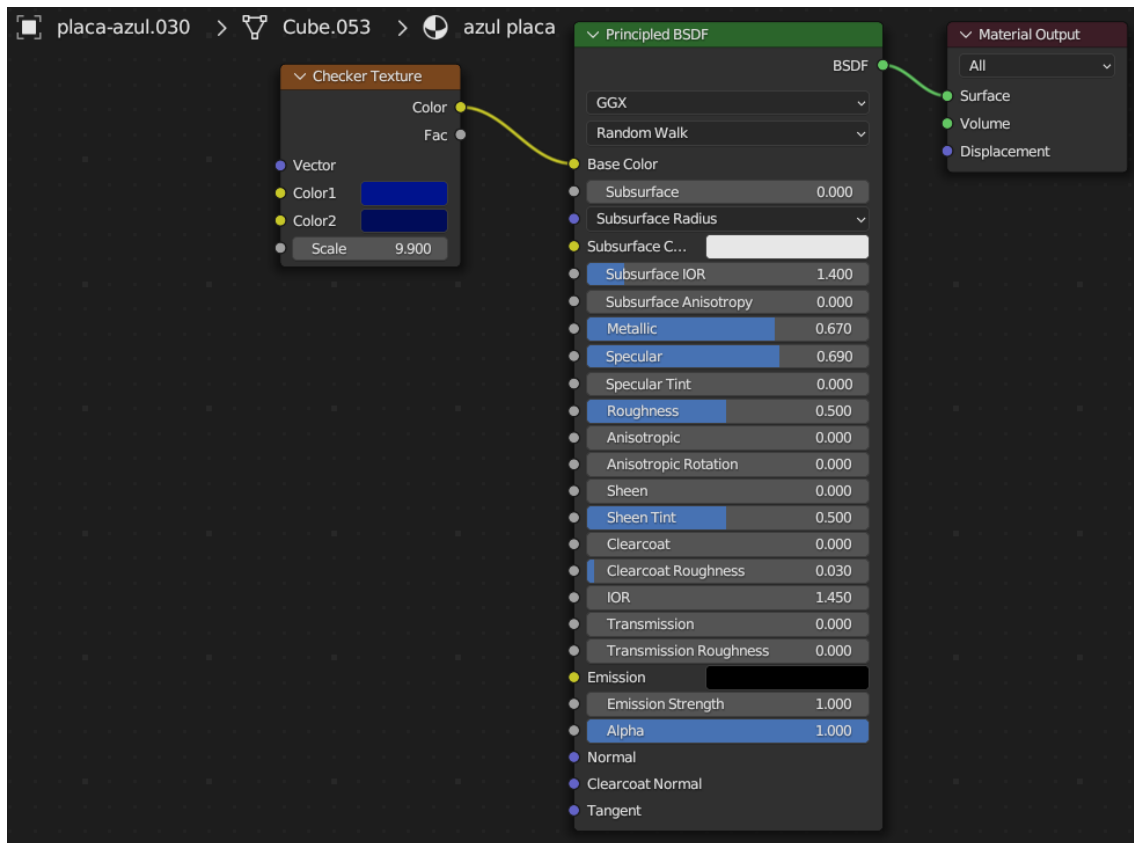


Figura 20. Material azul placa para la representación de energía solar. (Fuente: elaboración propia)

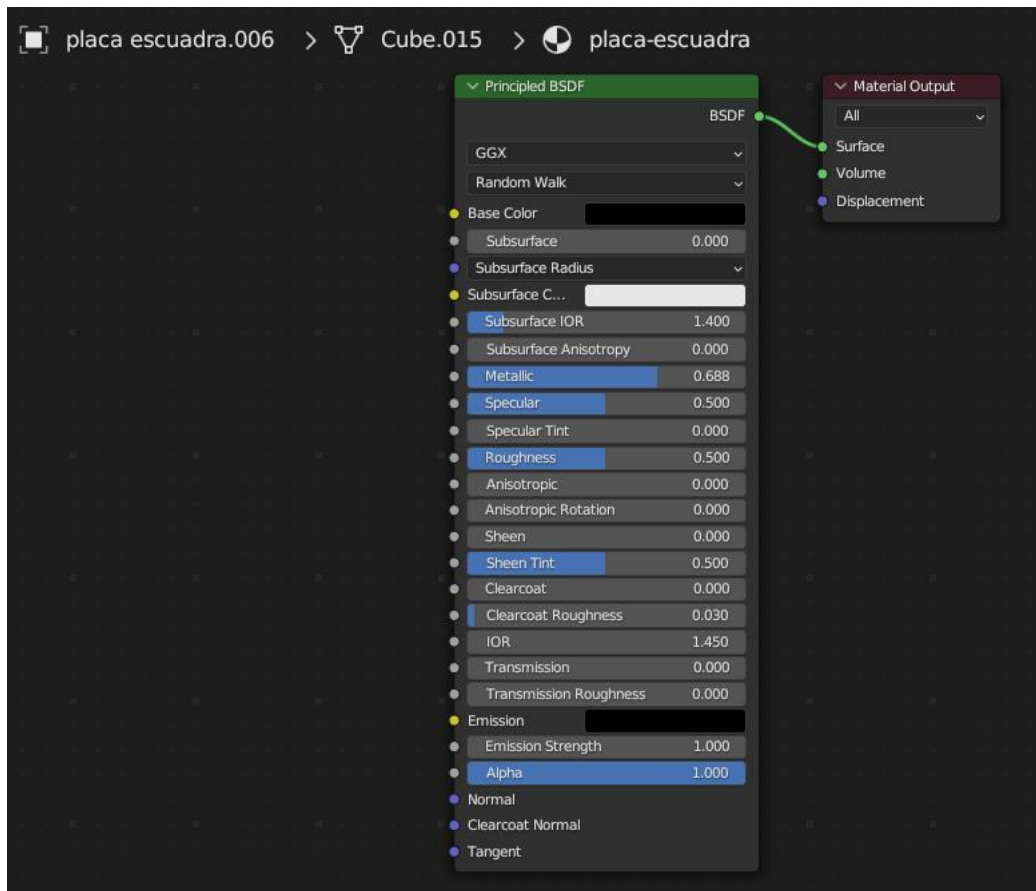


Figura 21. Material placa-escuadra para la representación de energía solar: (Fuente: elaboración propia)

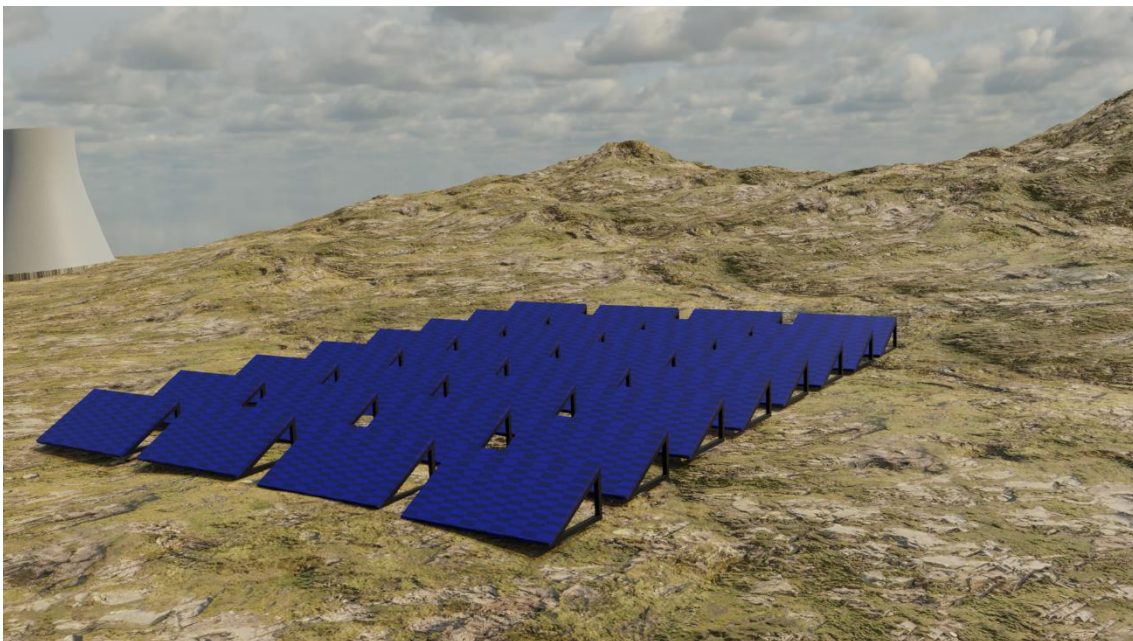


Figura 22. Energía solar: placas solares. (Fuente: elaboración propia)

Todas las representaciones de energías renovables modeladas se han insertado en un escenario montañoso creado en Blender (*Figura 23*). En la recreación se parte de una vista panorámica que recorre ambas representaciones de energía renovable hasta una vista general que deriva en una transición hacia el cielo. Esto servirá para insertar la siguiente sección de manera más fluida.

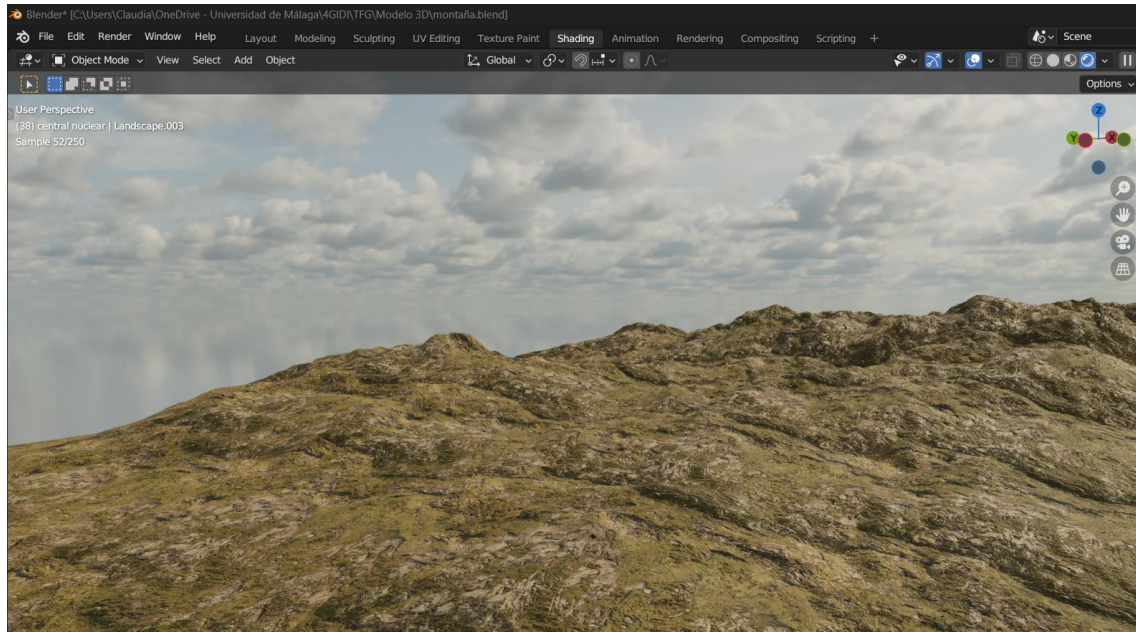


Figura 23. Escenario montañoso. (Fuente: elaboración propia)

Para la textura de la montaña se ha elegido un aspecto rocoso. En la *Figura 24* se pueden ver los nodos que conforman esta textura.

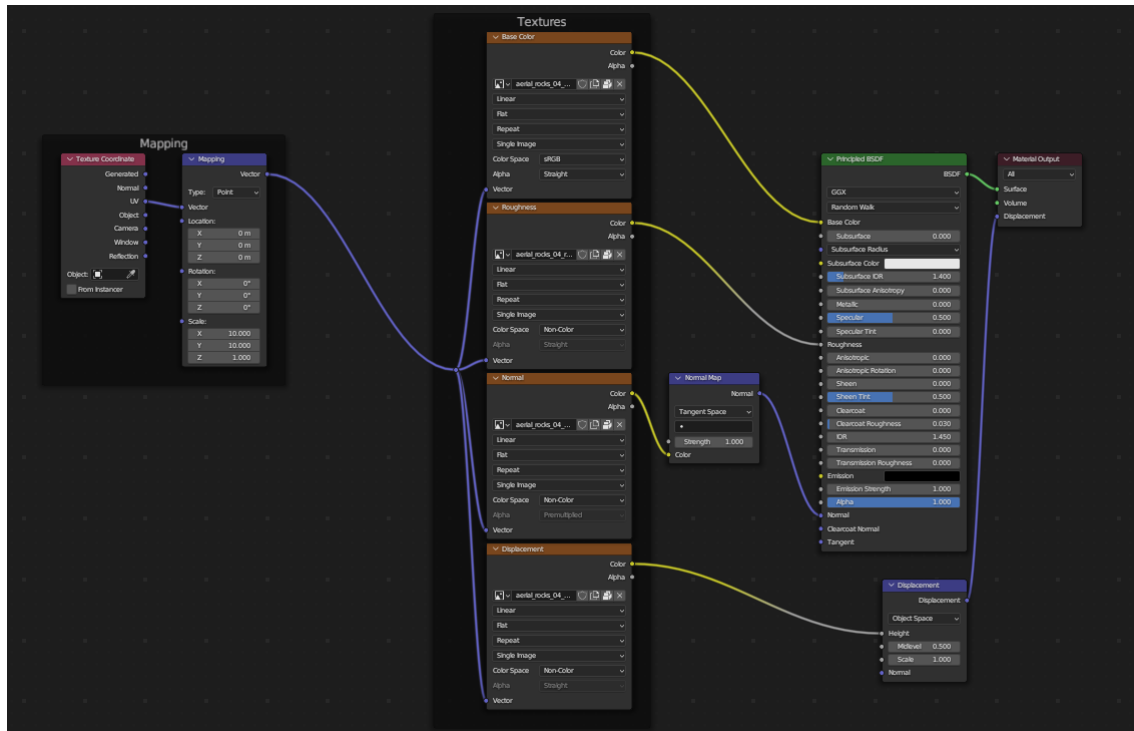


Figura 24. Material usado para la montaña. (Fuente: elaboración propia)

Para el material de la montaña se han añadido varios archivos para indicar la rugosidad, el color base, el color de la superficie, la escala de la textura y el reflejo del material en sí.

Una vez explicados el modelado y los materiales del entorno, se procede a añadir la iluminación.

Para conseguir un efecto más uniforme se ha utilizado una iluminación del ambiente que surge del fondo, en este caso del cielo.

Además de esto, se han añadido puntos de luz cálidos cerca de los modelos para lograr simular un día más agradable. La intensidad de la luz se controla desde un modificador.

(Figura 25)

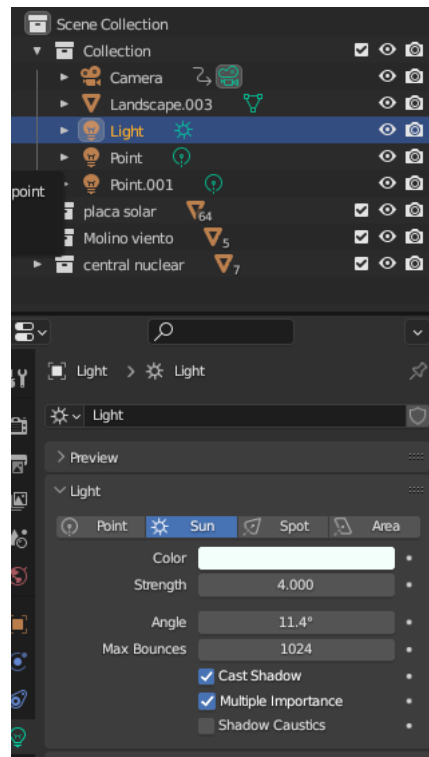


Figura 25. Modificador de las características de la luz. (Fuente: elaboración propia).

Según si la luz es tipo punto o tipo angular, se puede editar el radio del haz de luz, la apertura del ángulo de la luz (al igual que la tulipa de una lámpara), o la potencia en vatios.

Una vez se tiene definida la iluminación, nos aseguramos de que es correcta con un renderizado rápido del entorno desde la propia interfaz de modelado. (Figura 26)

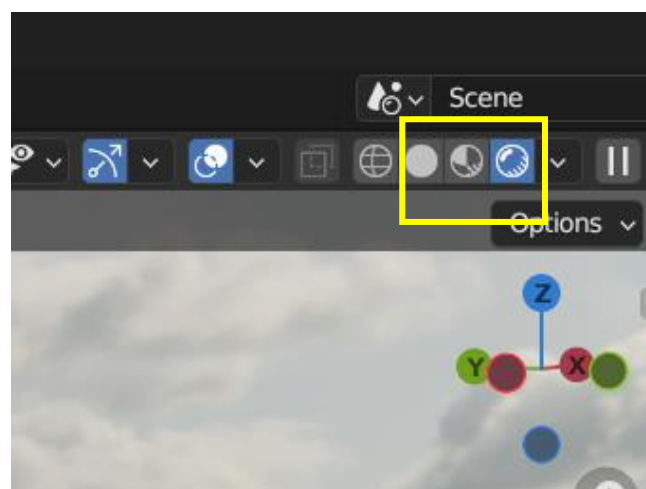


Figura 26. Vista del entorno renderizado (Fuente: elaboración propia)

Para la animación, se ha guardado la posición y rotación de la cámara en diferentes puntos de la línea de tiempo que corresponde con el instante en el que se pretende que se esta se mueva y con el encuadre que se pretende que haga.

Estos ajustes se ven en la interfaz en forma de cuadrados pequeños sobre una regla en la que se indica la longitud de cada frame. (Figura 27) Este es proceso muy tedioso ya que solo se consigue un buen resultado a base de prueba y error.

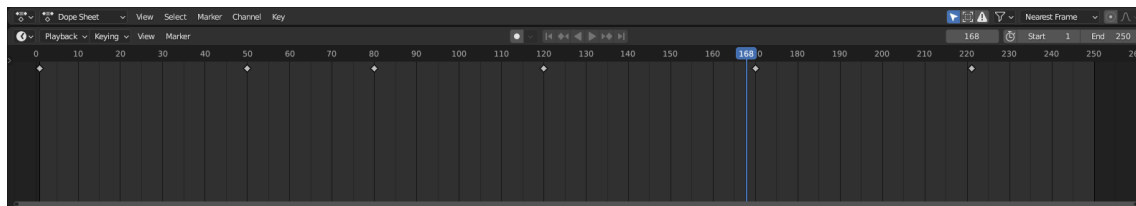


Figura 27. Línea de tiempo de la cámara. (Fuente: elaboración propia)

A continuación, se muestran, en orden de aparición, algunos clips del video renderizado desde Blender que forma parte de la primera secuencia de la recreación final.

Se comienza con la representación de la energía nuclear con un elemento característico de las centrales: las torres de refrigeración. (Figura 28) La cámara va a ir transitando hacia la derecha (figura 29 y figura 30) hasta quedar centrada entre las dos torres (figura 31).



Figura 28. Energía nuclear 1. (Fuente: elaboración propia)



Figura 29.Energía nuclear 2. (Fuente: elaboración propia)



Figura 30.Energía nuclear 3. (Fuente: elaboración propia)

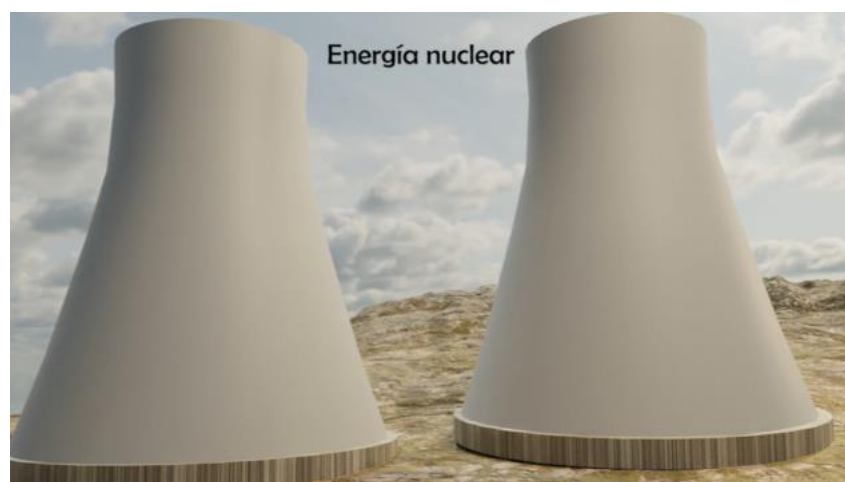


Figura 31.Energía nuclear 4. (Fuente: elaboración propia)

Poco a poco, la cámara va acabando su giro hasta llegar a la derecha del conjunto *(figura 32)* donde ya se puede ver la representación simplificada de las naves auxiliares para el mantenimiento del interior de las torres de refrigeración. *(figura 33)*.

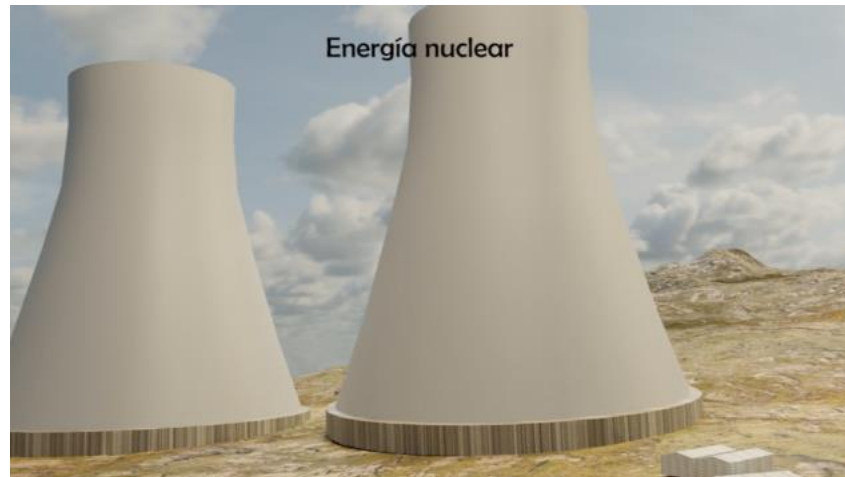


Figura 32. Energía nuclear 5. (Fuente: elaboración propia)

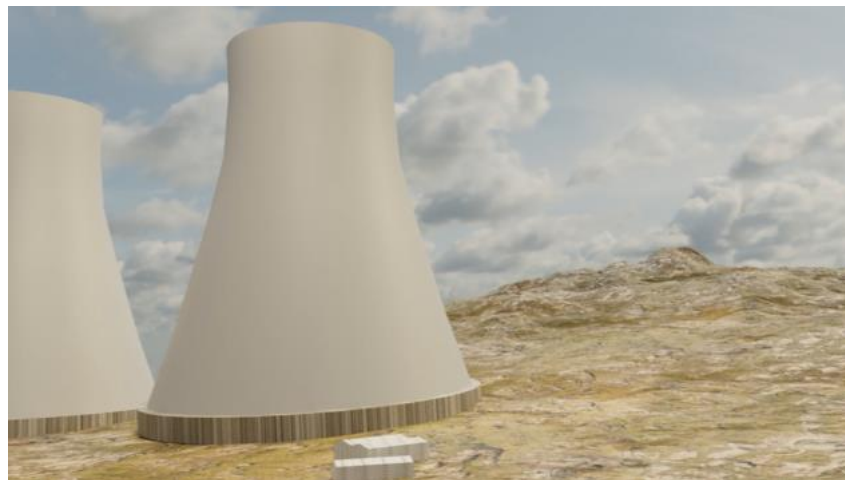


Figura 33. Energía nuclear 6. (Fuente: elaboración propia)

Una vez terminado el recorrido por esta energía, se ve un plano de transición de la montaña sobre la que están ensamblados los conjuntos *(figura 34)* y sobre el que la cámara se desliza para llegar al segundo conjunto: la energía solar *(figura 35)*.



Figura 34. Transición por las montañas. (Fuente: elaboración propia)

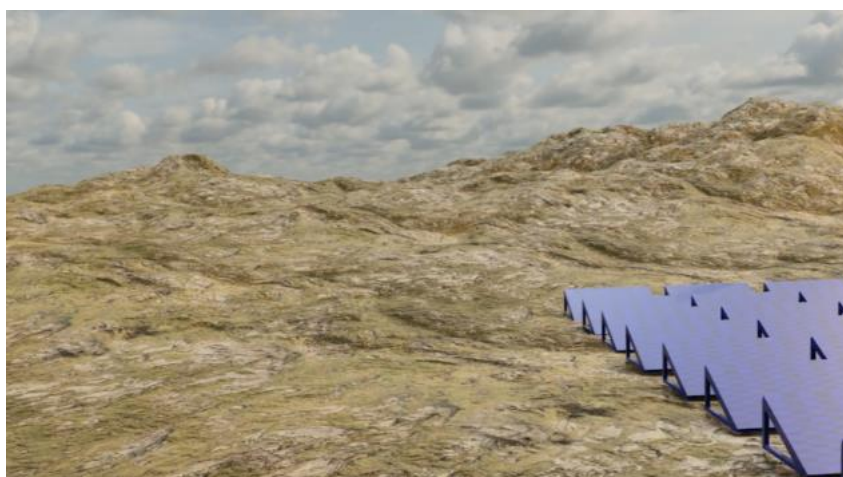


Figura 35. Energía solar 1. (Fuente: elaboración propia)

Una vez localizada la cámara sobre el conjunto de placas fotovoltaicas (*figura 36*), se indica mediante una animación que aparece progresivamente. Esta animación la forman un par de líneas amarillas que hacen referencia al sol sobre las placas, fuente de producción de la energía. (*Figura 37*)

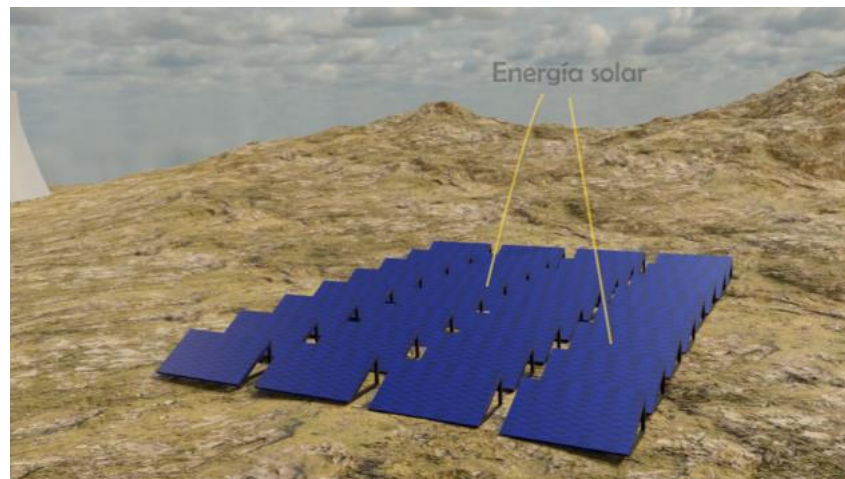


Figura 36. Energía solar 2. (Fuente: elaboración propia)

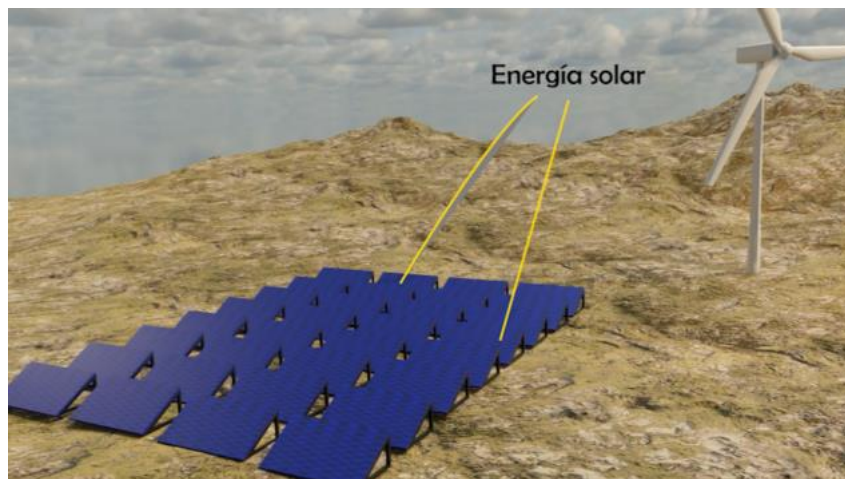


Figura 37. Energía solar 3. (Fuente: elaboración propia)

Ya terminados los planos sobre el conjunto de placas representativas de la energía solar, la cámara sigue su recorrido hacia la derecha (*figura 38*) para encontrarse con el conjunto de molinos que simboliza la energía eólica (*figura 39*).

Una vez más, vuelve a parecer una animación en forma de texto en la que se puede leer “energía eólica” (*figura 40*).

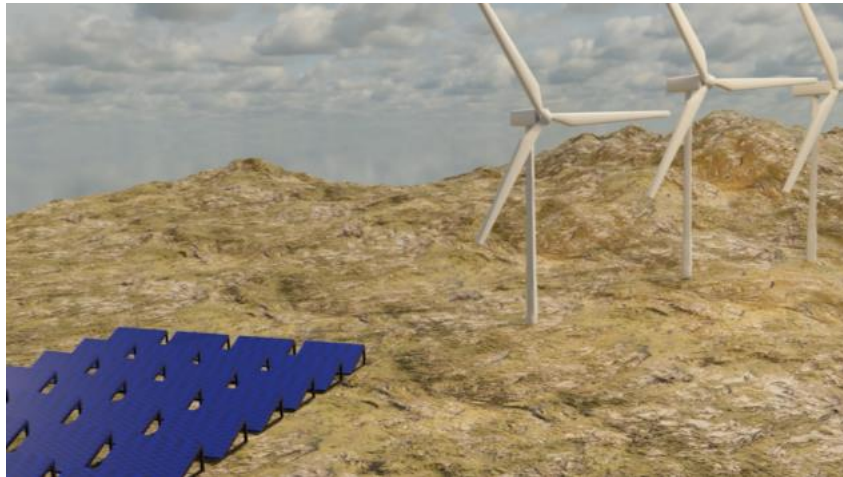


Figura 38. Energía solar 4. (Fuente: elaboración propia)

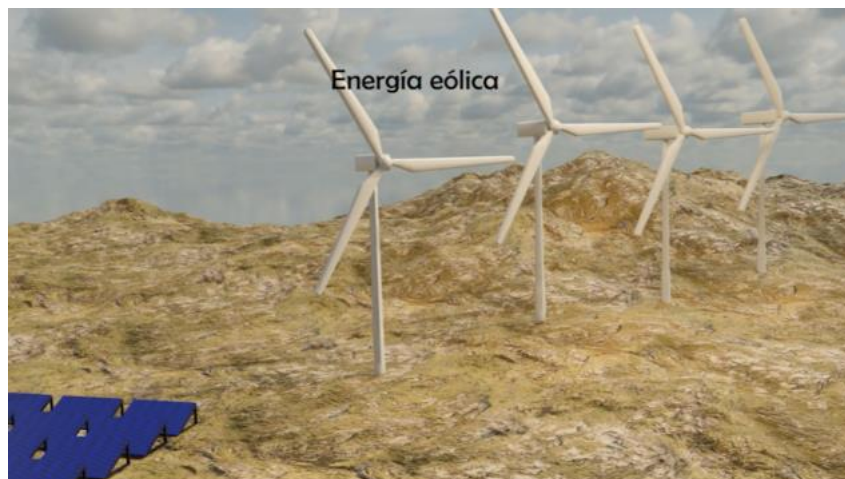


Figura 39. Energía eólica 1. (Fuente: elaboración propia)

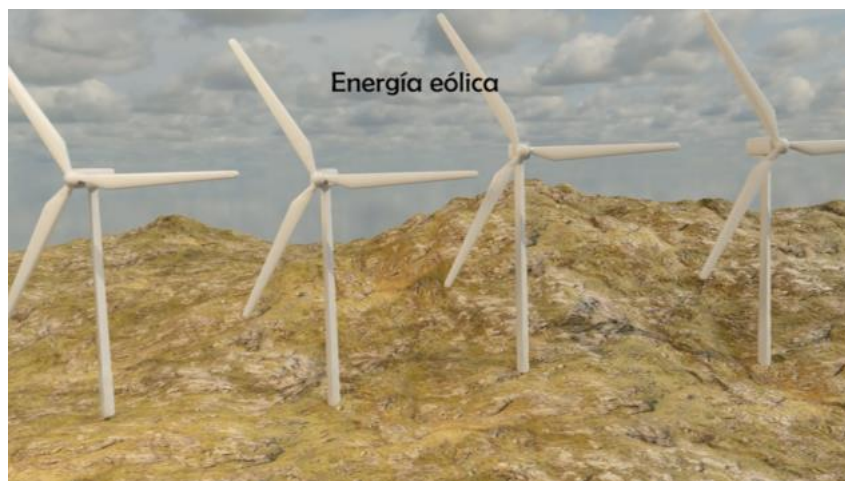


Figura 40. Energía eólica 2. (Fuente: elaboración propia)

La secuencia sobre las fuentes de obtención de energía para producir hidrógeno acaba con la localización de la cámara a la derecha del conjunto de molinos.

Desde esta perspectiva se pueden distinguir las aspas alrededor del eje, además de ver al fondo las placas solares y las torres de refrigeración que han ido apareciendo durante los segundos anteriores (*figura 41*).



Figura 41. Energía eólica 3. (Fuente: elaboración propia)

5.3. Sección 2. Hidrogenera

En la segunda parte de la recreación, se ha representado la infraestructura de una hidrogenera.

La composición por completo de esta sección se ha hecho en Blender ya que son geometrías simples que este software permite modelar perfectamente.

La hidrogenera es el lugar donde se encuentra el electrolizador encargado de transformar la energía eléctrica que llega desde las fuentes renovables en este caso, a hidrógeno. La estructura de este edificio se ha simplificado en una geometría poliédrica principal con algunos contenedores en su lateral y tanques de almacenamiento de hidrógeno al fondo. (Véase [figura 42](#)).

En la hidrogenera se han aplicado materiales distintos en varias caras:

- Un material claro para la mayoría de la fachada ([figura 43](#))
- Un material verde oscuro para los contenedores
- Un material rayado para los detalles

Algo curioso de este entorno es que el texto también es un objeto modelado al igual que puede serlo un cubo o cilindro. Esto es una gran ventaja ya que facilita la inclusión de texto en los modelos y el poder aplicarles los mismos materiales que al resto de componentes de la escena y que así se integre todo mejor y sea más agradable visualmente.

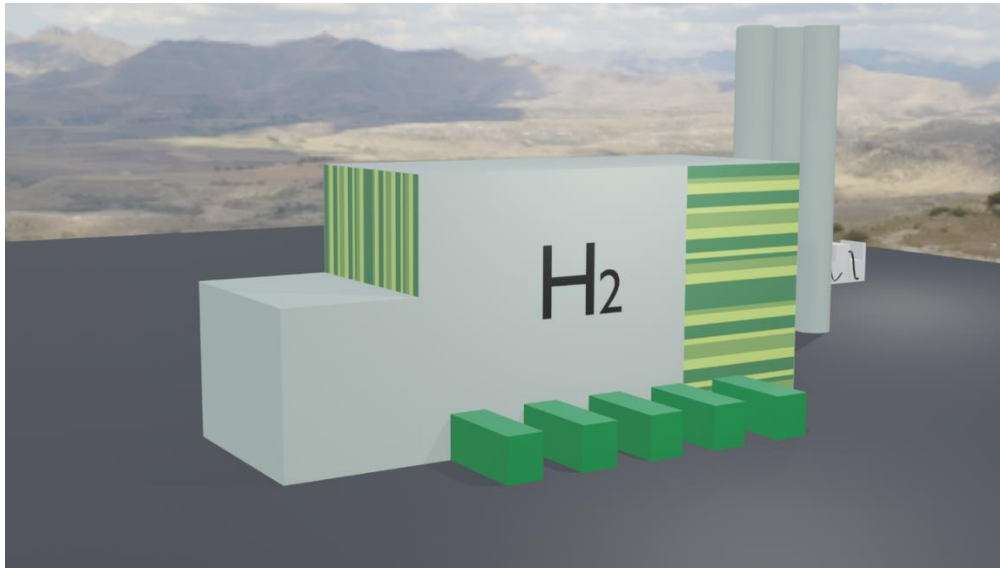


Figura 42. Hidrogenera (Fuente: elaboración propia)

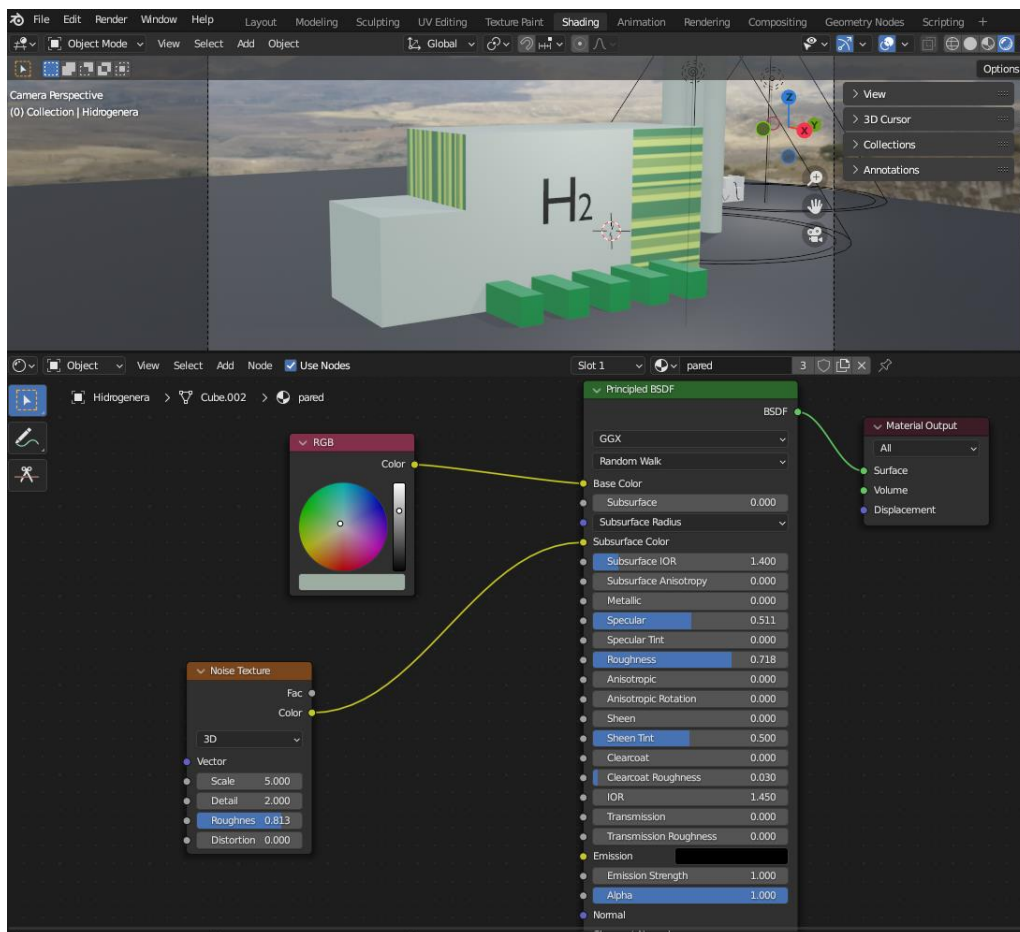


Figura 43. Hidrogenera material (Fuente: elaboración propia)

También se ha añadido un pequeño centro de repostaje a modo esquemático. Este elemento se coloca con el fin de indicar que parte del hidrógeno producido en las hidrogeneras es para el repostaje de vehículos. (*Figura 44*)

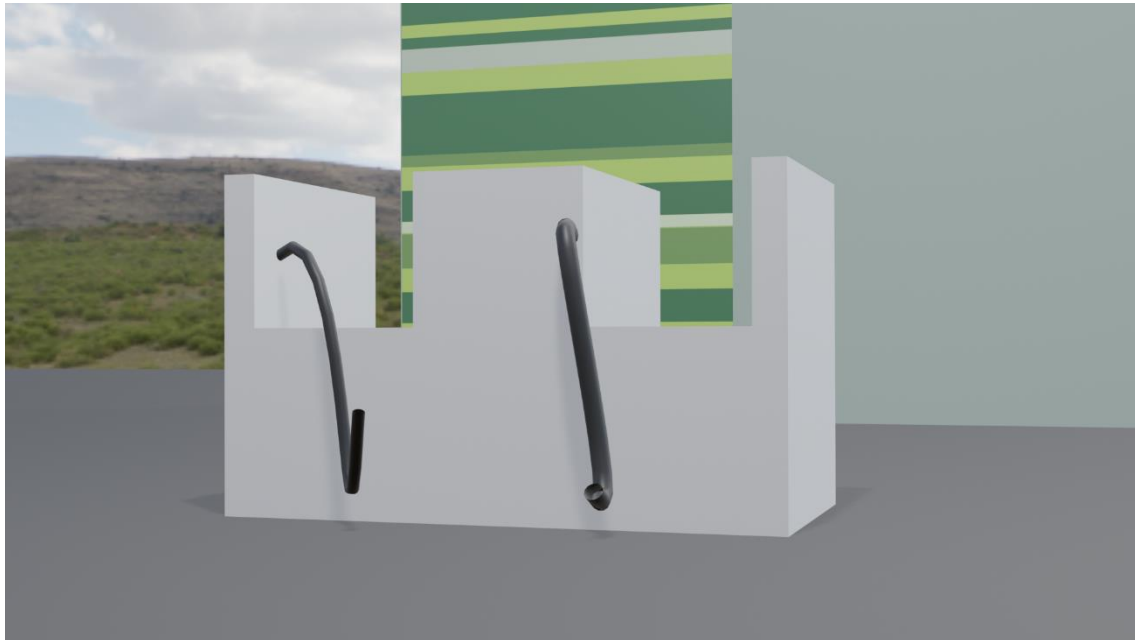


Figura 44. Simplificación del centro de repostaje para vehículos. (Fuente: elaboración propia)

Todos los elementos de esta sección se ensamblan sobre una superficie lisa oscura que aporta contraste con los objetos protagonistas y los realza. Al utilizar un color liso, se consigue un entorno más armonioso y en concordancia con la estética de los elementos que conforman la escena.

En el video, se usa como transición entre la presente secuencia de la hidrogenera y la siguiente del vehículo y sus partes.

Como se puede observar en la *Figura 45*, se ha hecho uso de varias cámaras y puntos de luz para el renderizado del video.

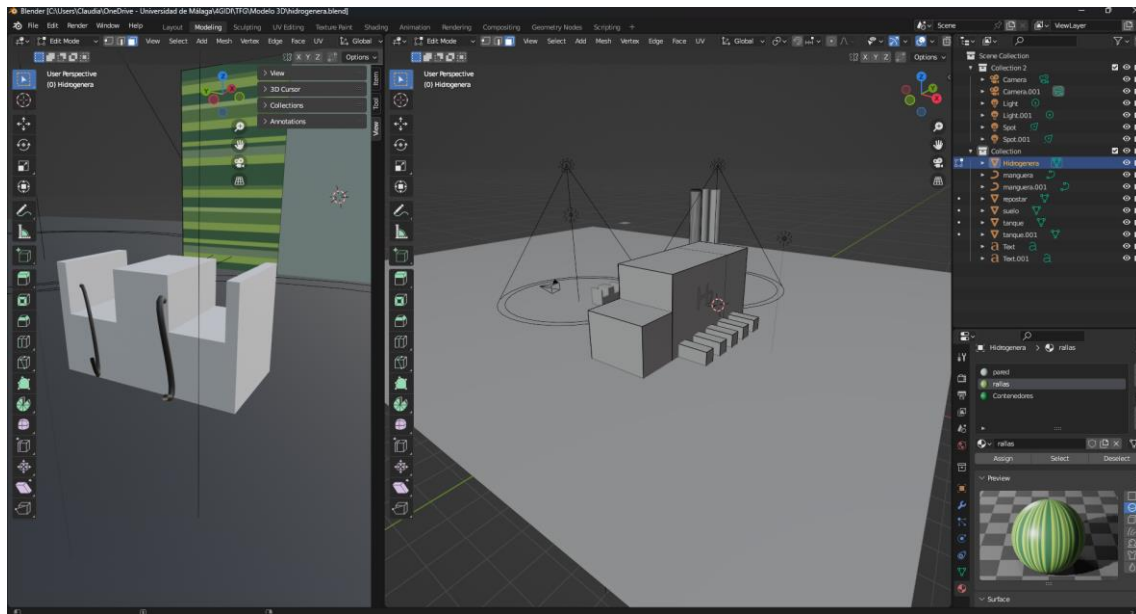


Figura 45. Conjunto hidrogena y centro de repostaje. (Fuente: elaboración propia)

A continuación, se muestran algunos clips de esta secuencia del video, donde se pasa de una vista general de la hidrogena (figura 46), a una panorámica alrededor de esta que conecta con un plano detalle del centro de repostaje.

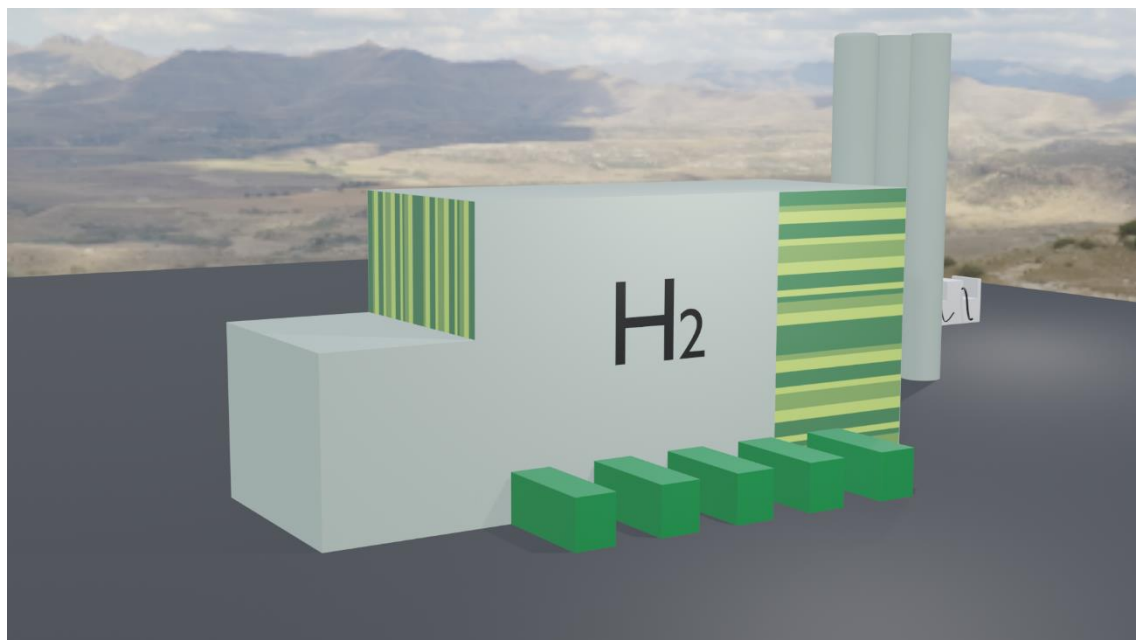


Figura 46. Hidrogena 1 (Fuente: elaboración propia)

El movimiento de la cámara comienza hacia la derecha para mostrar un plano frontal del conjunto de hidrogenera y tanques de almacenamiento (*figura 47*). Desde aquí se puede leer la inscripción de la pared “H₂”.

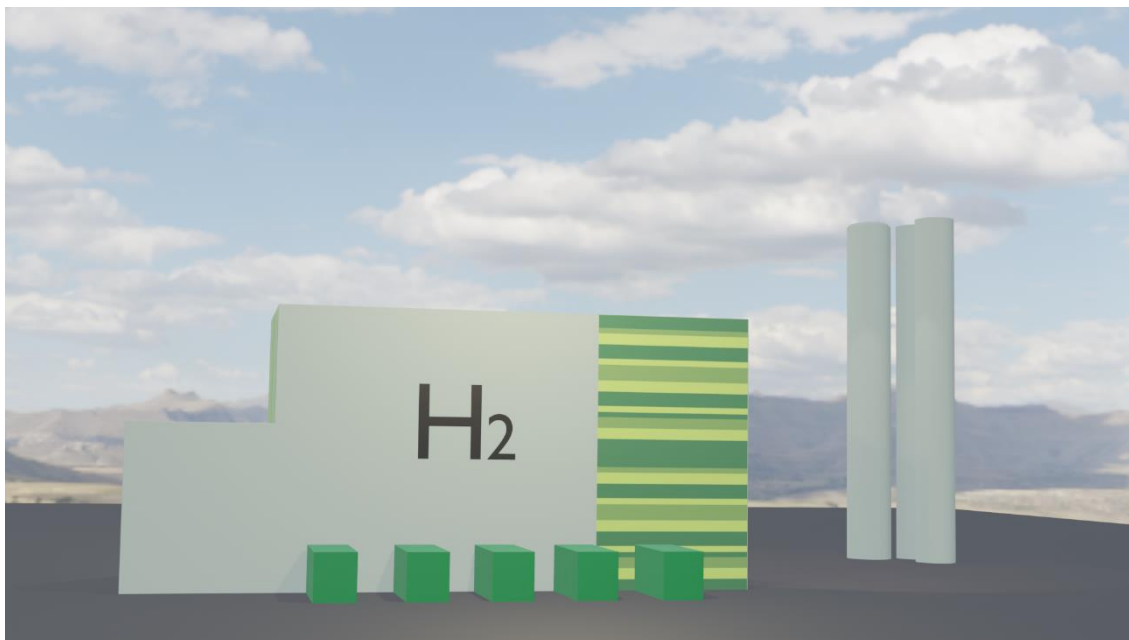


Figura 47. Hidrogenera 2. (Fuente: elaboración propia)

El siguiente plano ya comienza a rodear el edificio (*figura 48*) para transitar hacia un plano en el que los tanques entran al encuadre por el lateral derecho y se puede distinguir en la pantalla el centro de repostaje a lo lejos (*figura 49*). En la *figura 50* los tanques se ven centrados en el encuadre.

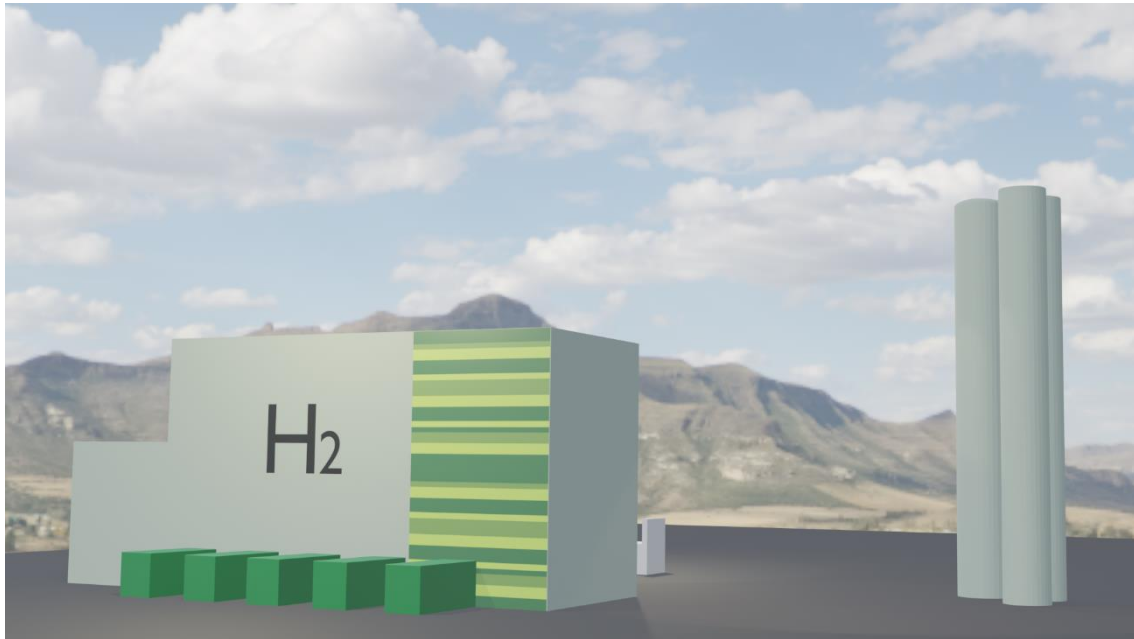


Figura 48. Hidrogenera 3. (Fuente: elaboración propia)

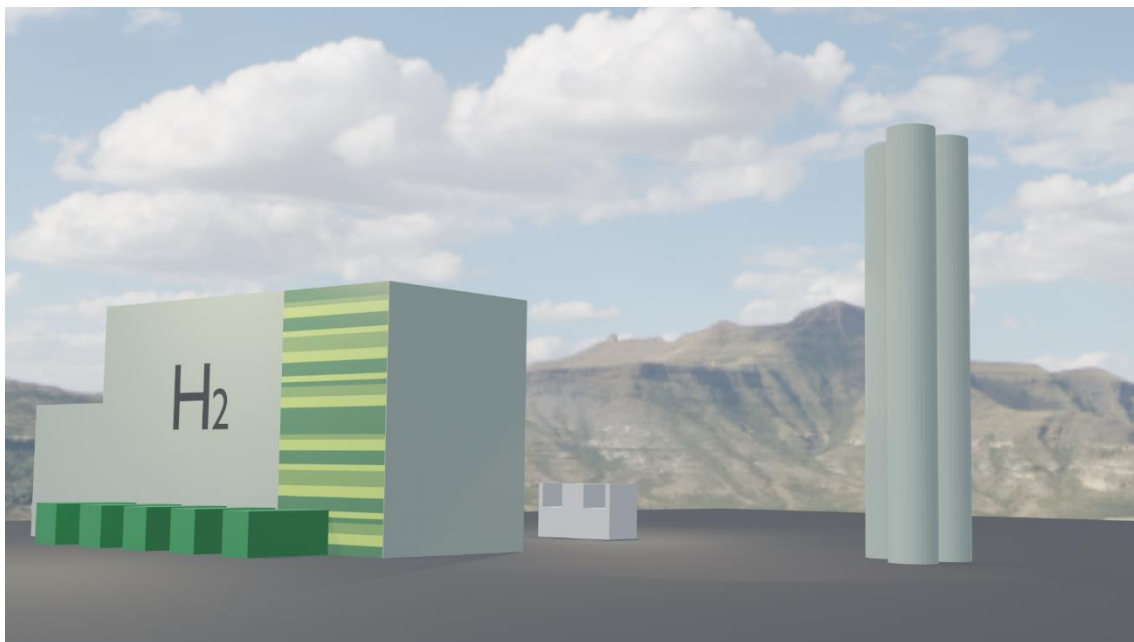


Figura 49. Hidrogenera 4. (Fuente: elaboración propia)

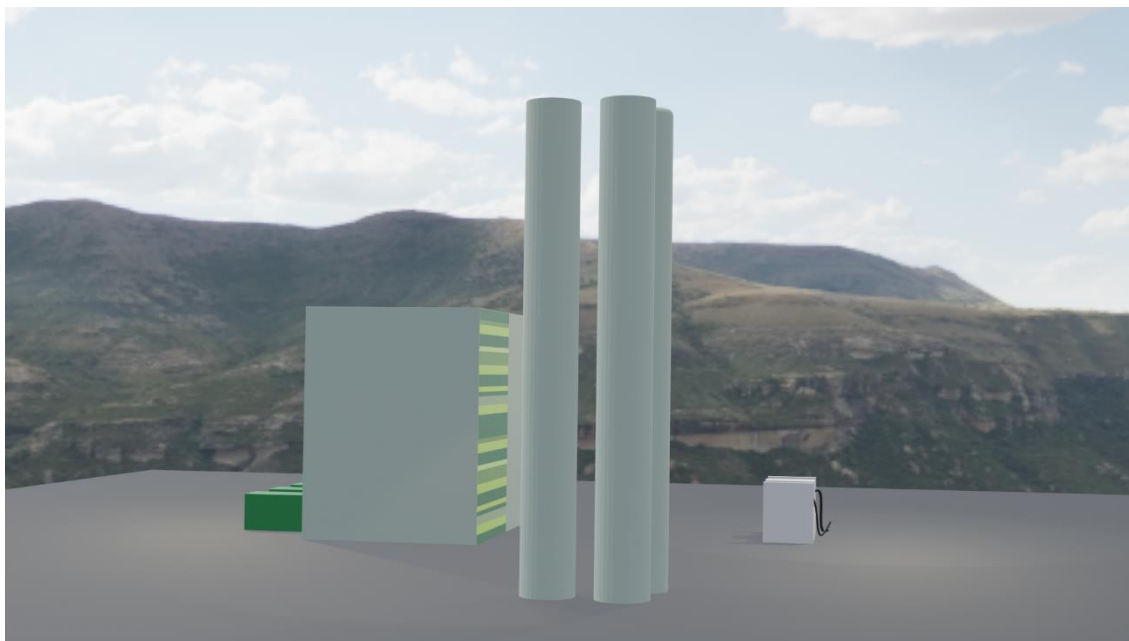


Figura 50. Hidrogenera 5. (Fuente: elaboración propia)

A continuación, se hace un cambio de cámara para centrarse en el centro de repostaje. (Figura 51). Esta nueva cámara se aleja del encuadre anterior para dejar espacio al coche que se acerca al centro a repostar. En la figura 52 se ve cómo empieza a aparecer por la izquierda de la pantalla.

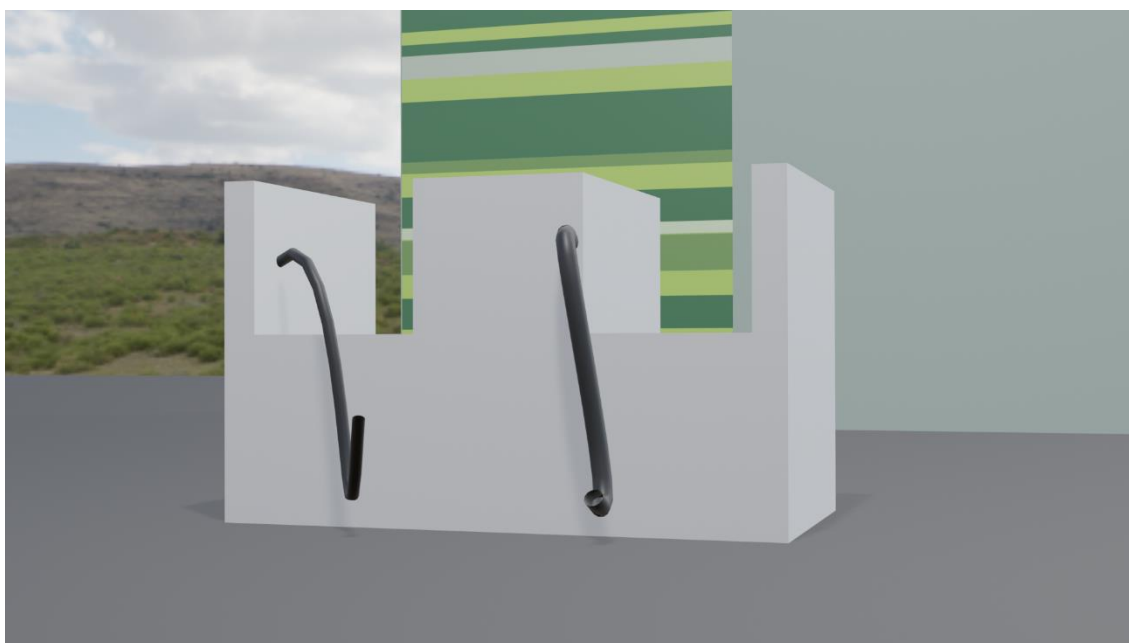


Figura 51. Centro de repostaje 1. (Fuente: elaboración propia)

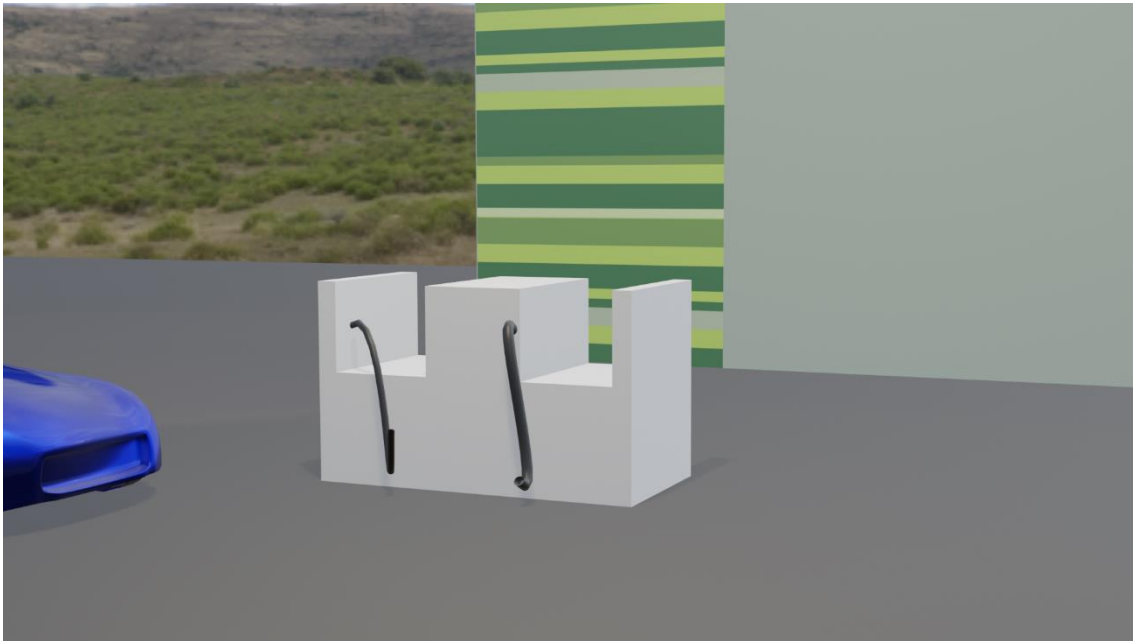


Figura 52. Centro de repostaje 2. (Fuente: elaboración propia)

En la [figura 53](#) se distingue cómo se para frente a este para llenar el tanque de hidrógeno. Este repostaje tarda unos 5 minutos aproximadamente, aunque en el video se va a pasar más rápido.

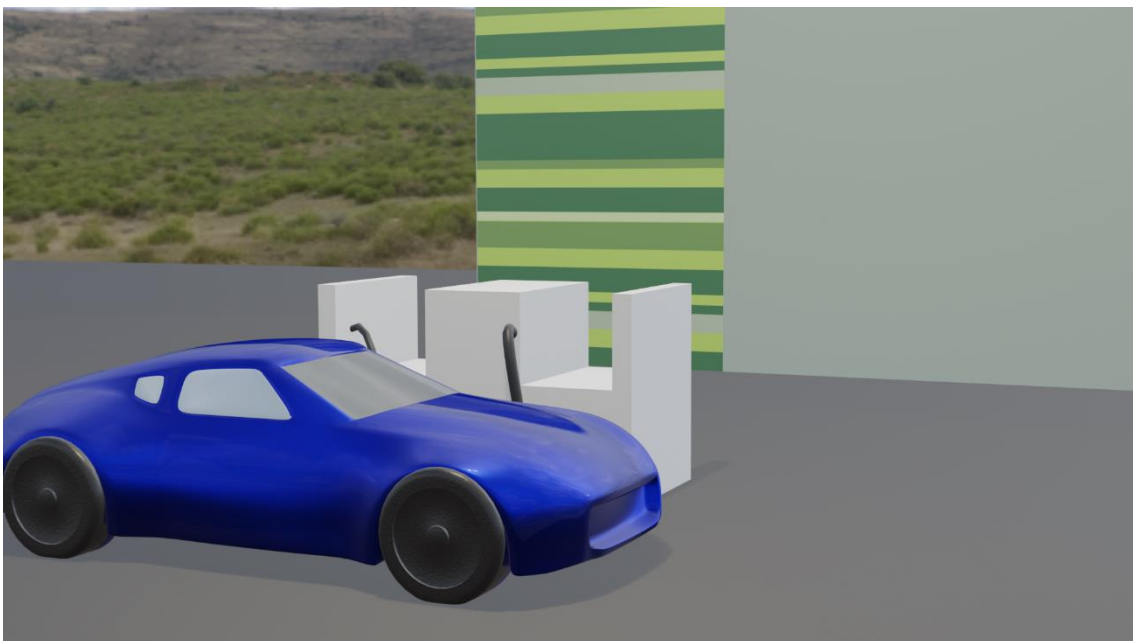


Figura 53. Centro de repostaje 3. (Fuente: elaboración propia)

Por último, el coche comienza a moverse (*figura 54 y figura 55*) hacia la derecha de la pantalla para alejarse de la escena y transitar a la siguiente secuencia en la que se verá con más detalle.

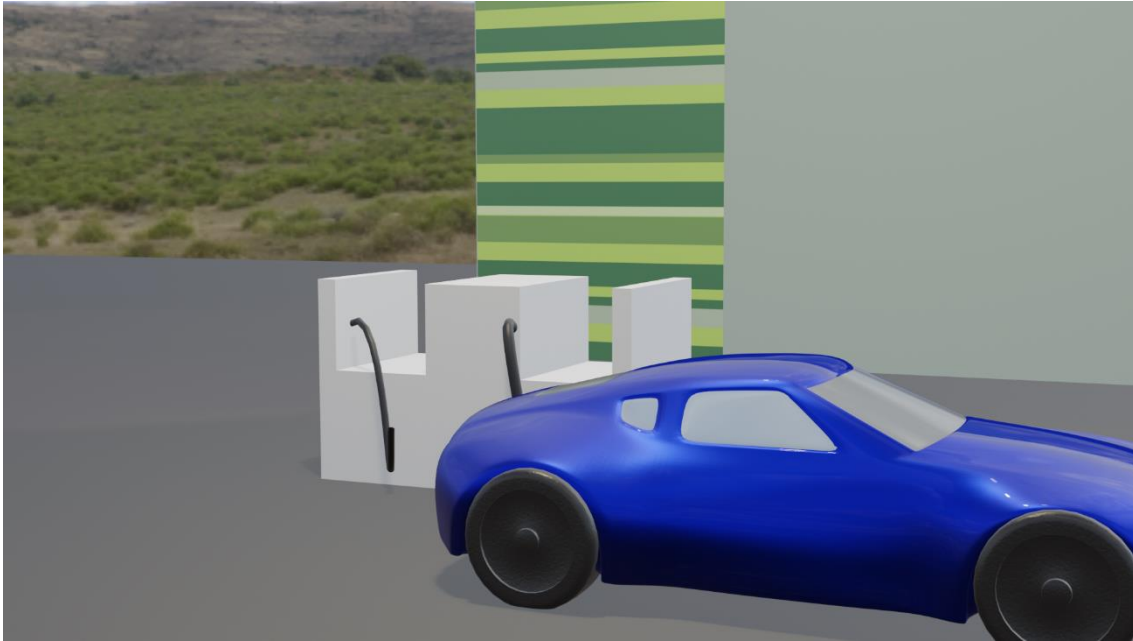


Figura 54. Centro de repostaje 4. (Fuente: elaboración propia)

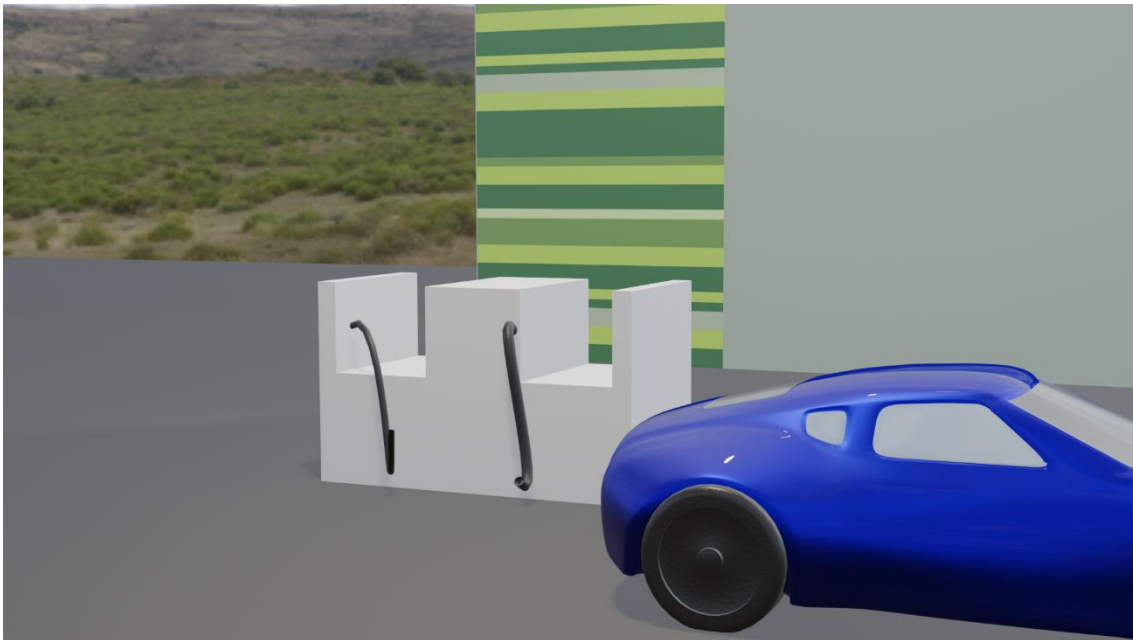


Figura 55. Centro de repostaje 5. (Fuente: elaboración propia)

5.4. Sección 3. Construcción del coche

En la tercera sección del documento, se detalla la construcción del automóvil. La elección estratégica ha recaído en la representación de una estructura simplificada y esquemática del vehículo, con el propósito de otorgar protagonismo a los diversos elementos que inciden en su funcionamiento, al mismo tiempo que se facilita el ahorro computacional durante el proceso de renderizado. Para respaldar esta meta de resaltar los elementos constitutivos del interior del automóvil, se han seleccionado colores llamativos y diferenciados para cada una de las partes.

Entre las partes representadas se encuentran la batería, los tanques de H₂, el motor, el transformador y la pila de combustible. La animación de este conjunto inicia desde un plano en el cual se destacan estas partes ubicadas en el interior del vehículo. Este enfoque busca ofrecer una comprensión visual clara y focalizada de la estructura interna del automóvil, promoviendo así una apreciación más detallada de los elementos esenciales que conforman su funcionamiento integral.

La estructura de la parte inferior del coche (*figura 56, figura 57 y figura 58*) se ha construido con un plano curvo y el conjunto de ruedas que van sobre los ejes.



Figura 56. Estructura simplificada y esquemática de la parte inferior del coche. (Fuente: elaboración propia)



Figura 57. Estructura inferior del coche con los elementos necesarios para su funcionamiento. (Fuente: elaboración propia)



Figura 58. Estructura inferior del coche con los elementos necesarios para su funcionamiento. (Fuente: elaboración propia)

Para facilitar la comprensión de la estructura de esta escena, se adjunta la organización que se ha seguido para agrupar los distintos elementos según la fase a la que pertenecía. (Figura 59)

Se pueden distinguir, de arriba abajo, las ruedas, los bajos, los tanques, la batería, la pila de combustible, el transformador y el motor simplificado.

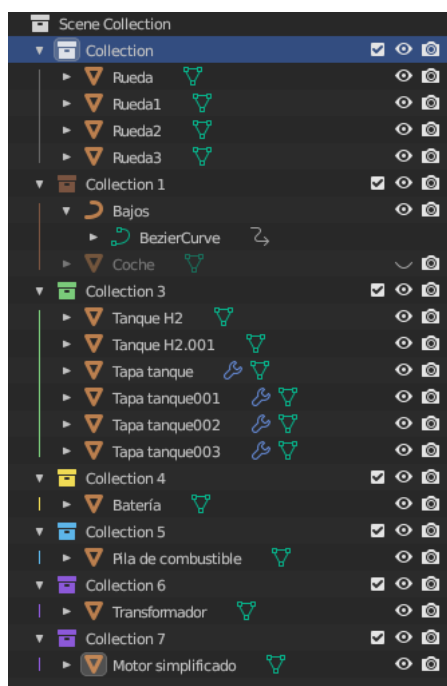


Figura 59. Organización de los distintos modelos en Blender. (Fuente: elaboración propia)

En cuanto a materiales, el suelo sobre el que se posiciona el coche se asemeja al asfalto (figura 60) y se ha construido con una textura con nodos en los que se han usado distintos archivos para el color base, la rugosidad, la escala, la refracción.

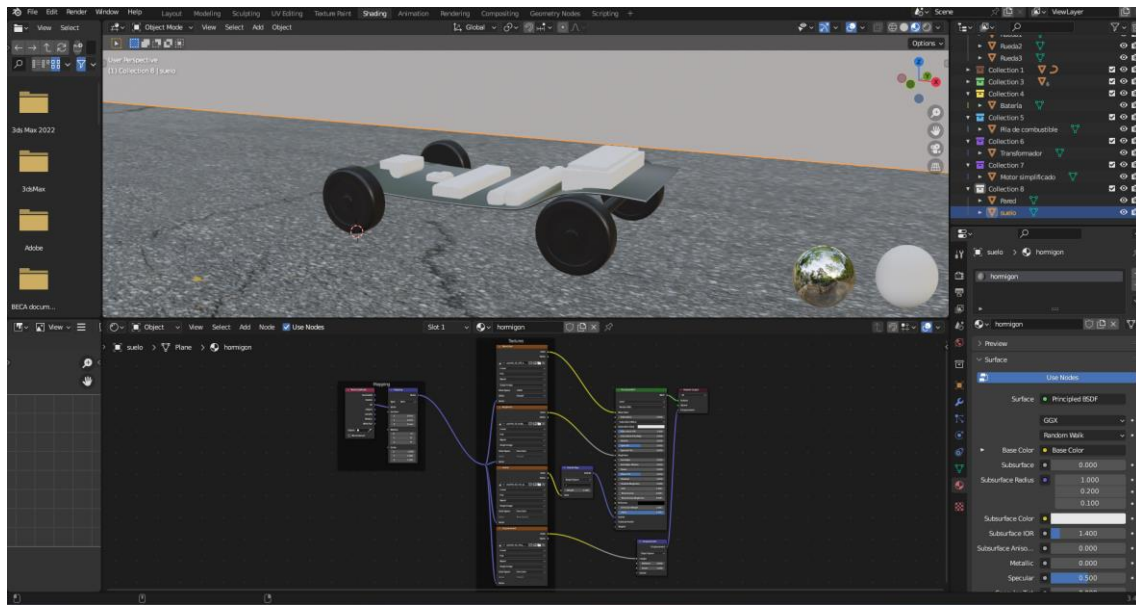


Figura 60. Nodos del material hormigón para el suelo. (Fuente: elaboración propia)

El bajo del coche tiene un aspecto metalizado algo desgastado que hace referencia a las irregularidades que suelen ser características de esta parte del coche y que corresponden con cavidades para distintos elementos encargados del funcionamiento de este.

Se ha usado un nodo de ruido que se ha regulado con la herramienta ColorRamp. (Figura 61)

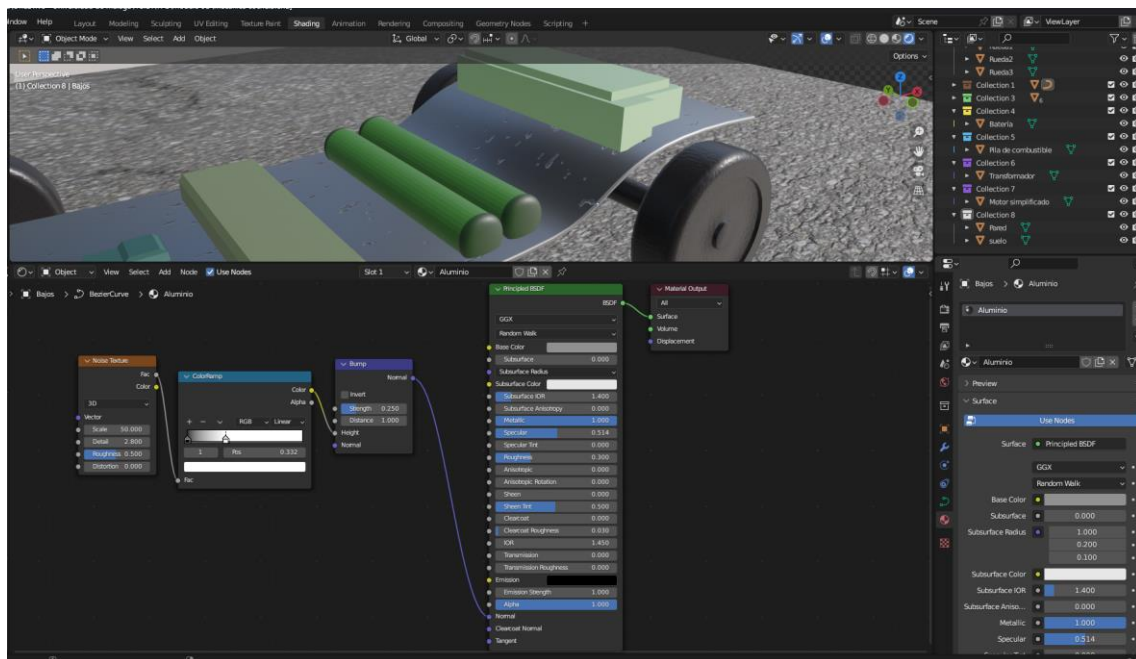


Figura 61. Nodos del material para el bajo del coche. (Fuente: elaboración propia)

Para los neumáticos se ha creado un material de aspecto gomoso y color oscuro. (Figura 62)

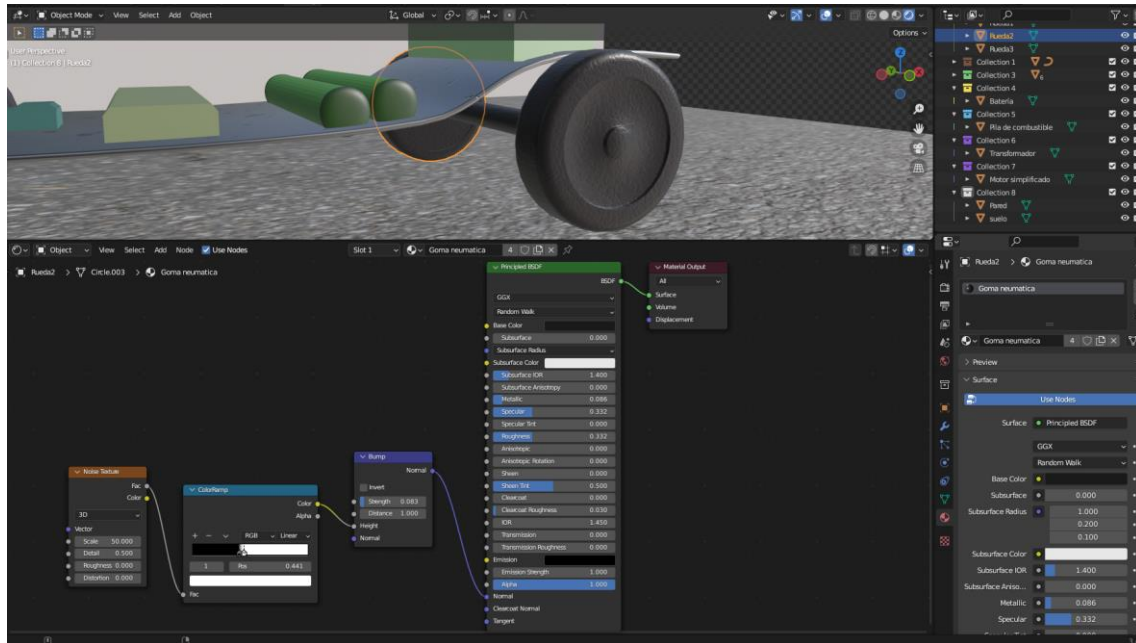


Figura 62. Nodos del material de los neumáticos. (Fuente: elaboración propia)

Para el resto de elementos se han creado materiales base con distintos ajuste de color en la base. En la figura 63 se ve el material de la batería, en la figura 64 el material del motor y del transformador, y en la figura 65 los materiales de la pila de los tanques de H₂.

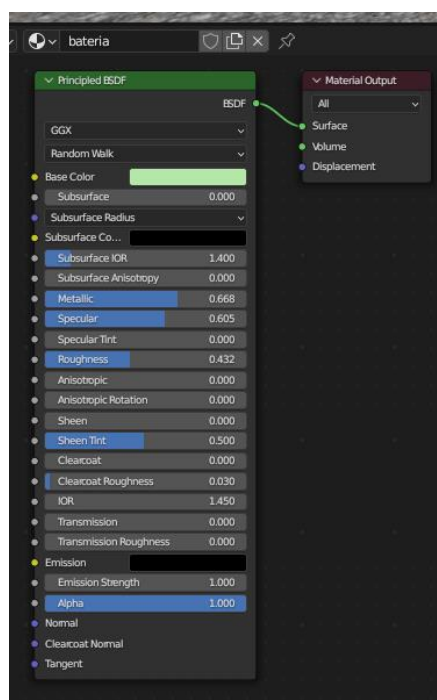


Figura 63. Maaterial de la batería (Fuente: elaboración propia)

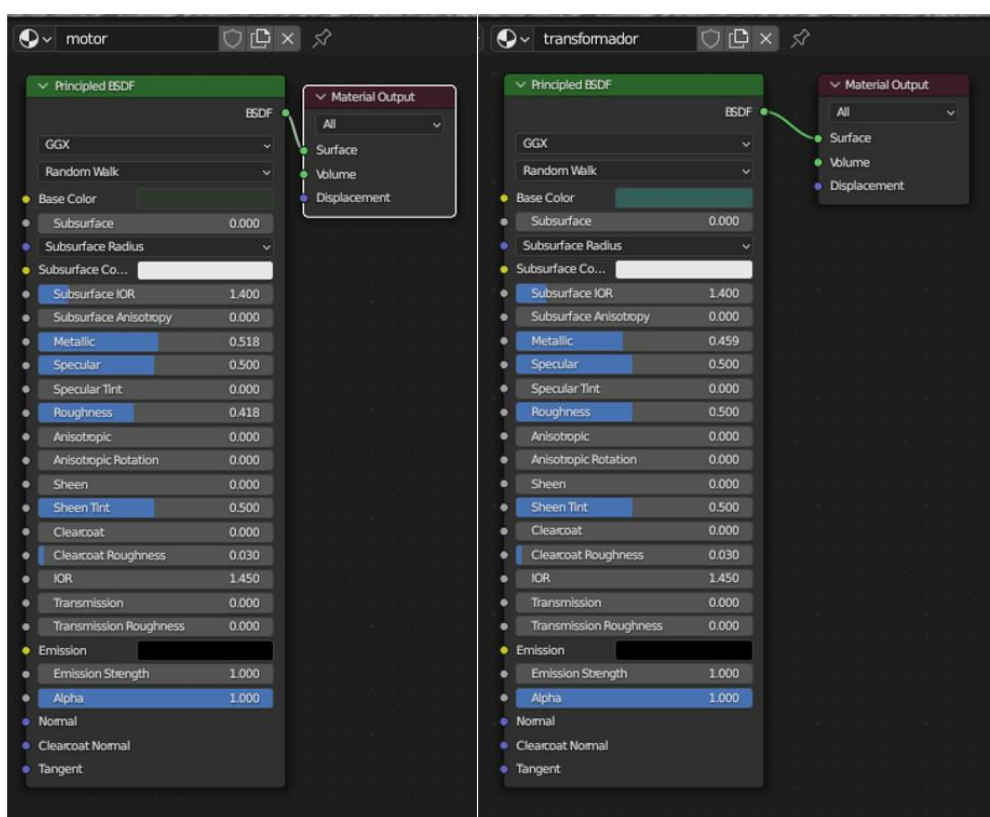


Figura 64. Materiales del motor y del transformador. (Fuente: elaboración propia)

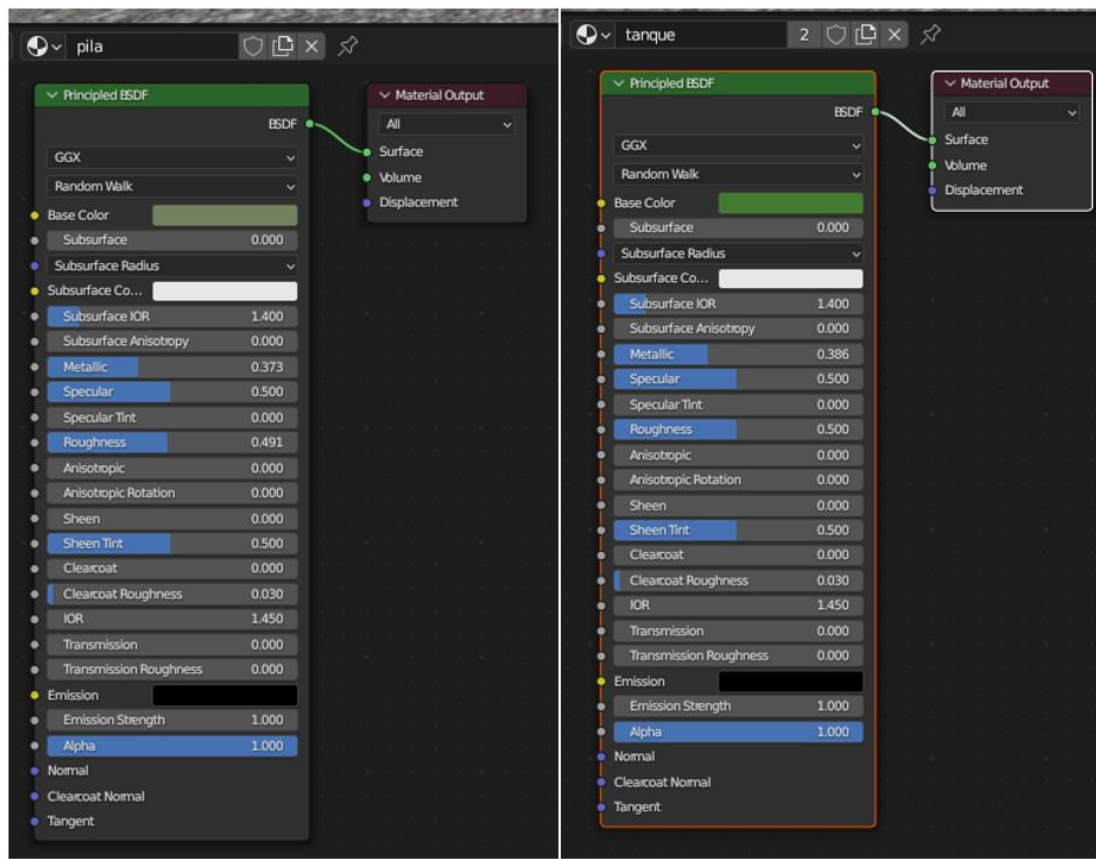


Figura 65. Materiales de la pila y de los tanques de H₂. (Fuente: elaboración propia)

Una vez explicado el desglose del interior del automóvil, se procede a mostrar la estructura exterior del coche. (Figura 66)

Se ha modelado a partir de superficies en SolidWorks y usando vistas proyectadas de un automóvil.

Las superficies esbozadas se han exportado a Blender y se han terminado de rellenar las caras y de darle un aspecto orgánico.

Se le ha aplicado un material azul para el exterior (figura 67), cristal para las ventanas y el mismo material neumático para las ruedas.

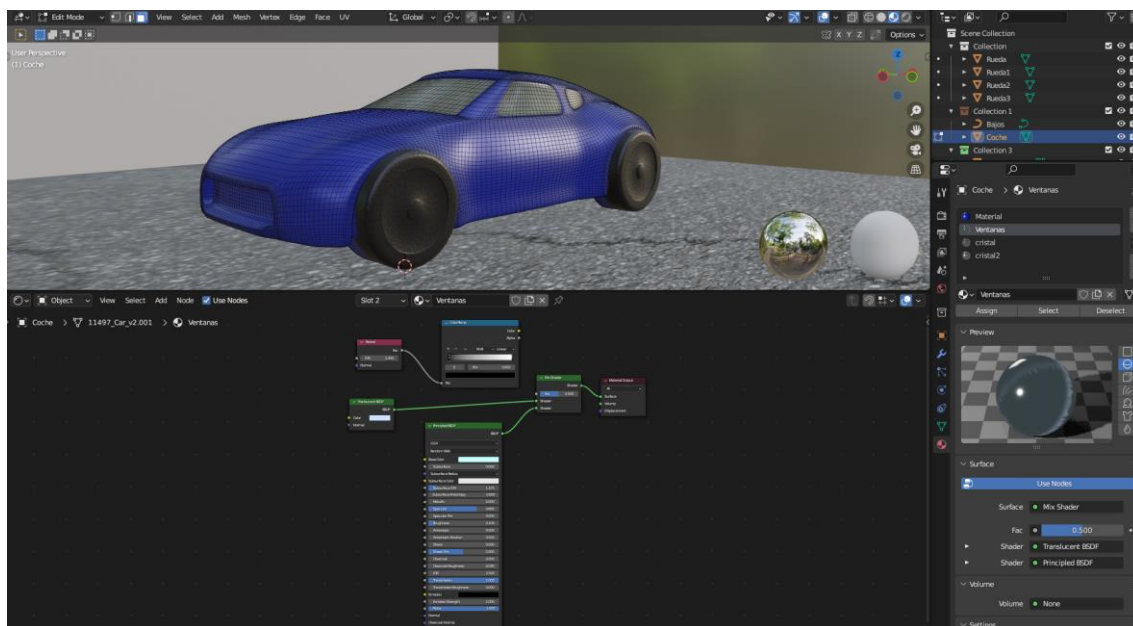


Figura 66. Estructura del coche y material de las ventanas. (Fuente: elaboración propia)



Figura 67. Material del chasis. (Fuente: elaboración propia)

En el video se puede ver cómo la cámara comienza estática mientras que el coche, que venía de la secuencia anterior, aparece por el lateral derecho de la pantalla (*figura 68*). Se hace una vista general del coche completo (*figura 69*).

Tras colocar la cámara mostrando una vista superior del coche (*figura 70*), el exterior del coche desaparece para dar paso al interior (*figura 71*).

Ya con este plano esquemático, se recorren cada una de las partes centrándose en el recorrido que hace la energía por el interior del vehículo.

Se sigue la sucesión que se ha explicado antes en el funcionamiento de los vehículos de hidrógeno:

El proceso electroquímico que resulta de la mezcla de oxígeno e hidrógeno tiene lugar en la pila de combustible, generando energía eléctrica y agua. Mientras la electricidad generada se almacena en la batería para alimentar el motor eléctrico, el agua residual se expulsa en forma de vapor. De hecho, los automóviles de hidrógeno emiten únicamente vapor de agua a través del sistema de escape.

El procedimiento detallado y esquematizado es el siguiente:

1. El hidrógeno de los tanques (*figura 72*) alimenta la pila de combustible.
2. Se introduce aire (oxígeno) en las celdas que forman la pila de combustible (*figura 73*).
3. Ocurre una reacción entre estos dos gases (O_2 del aire y H_2), y se produce electricidad y agua.

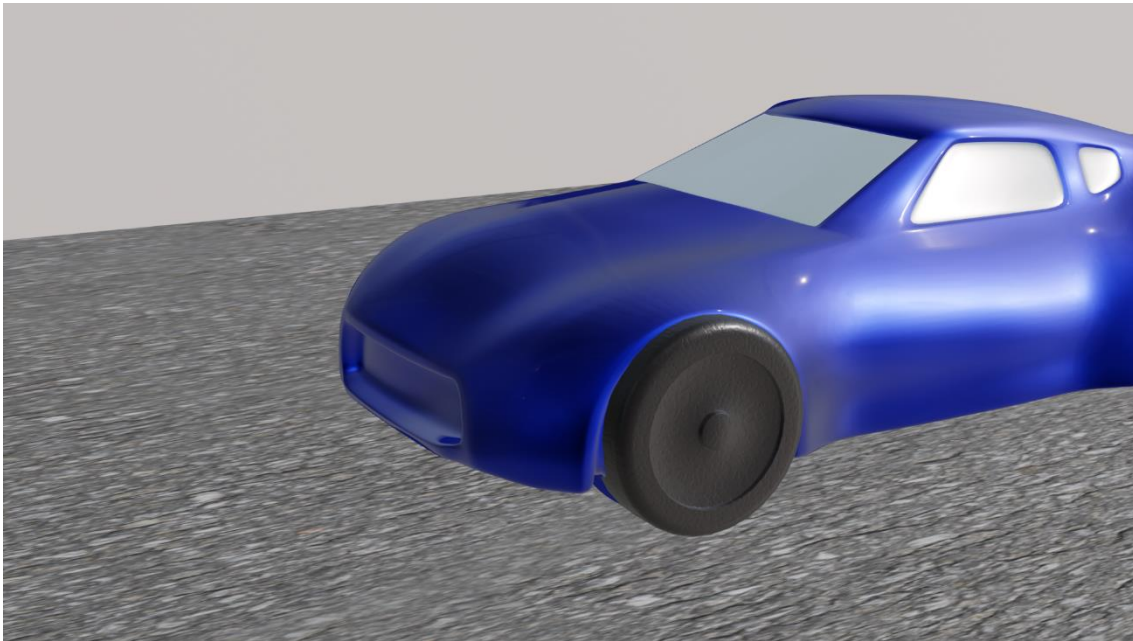


Figura 68. Coche 1 (Fuente: elaboración propia)

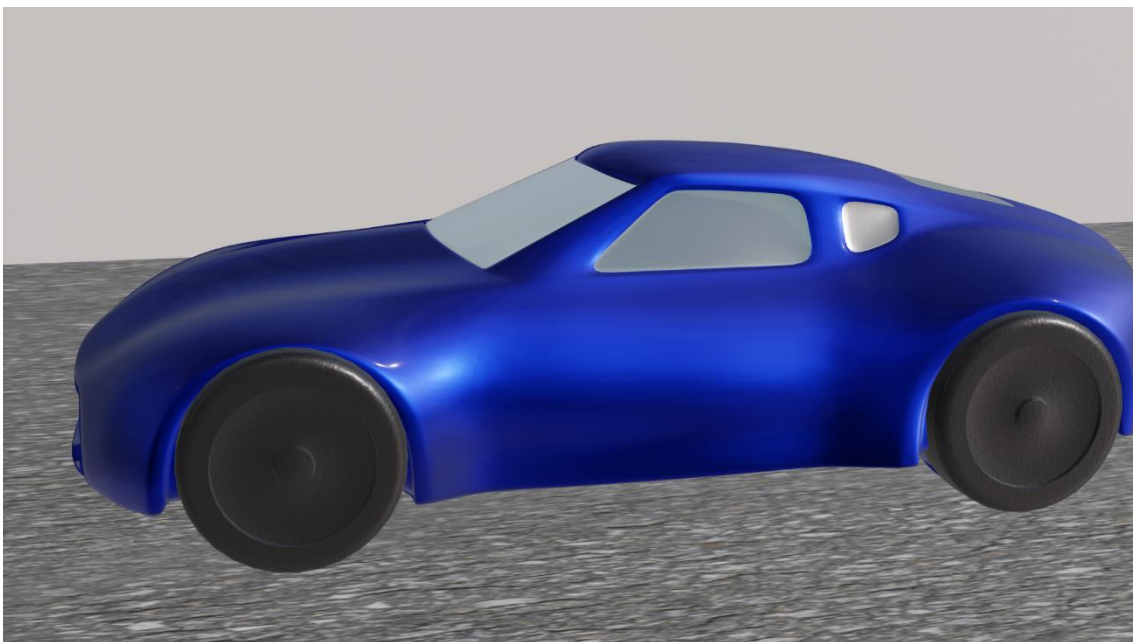


Figura 69. Coche 2 (Fuente: elaboración propia)

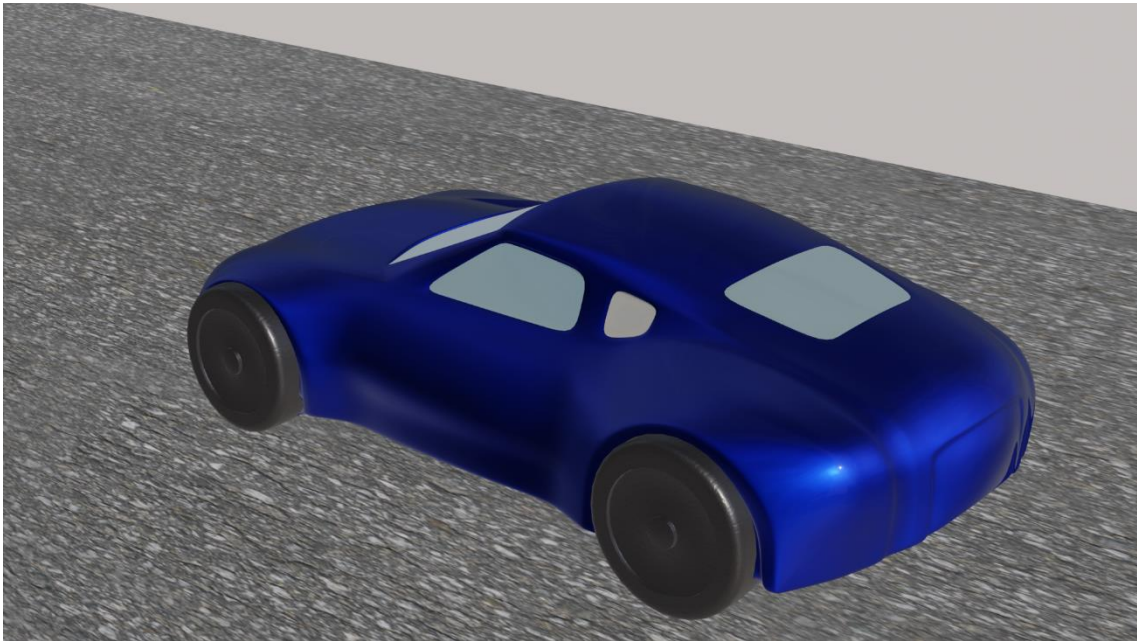


Figura 70. Coche 3 (Fuente: elaboración propia)

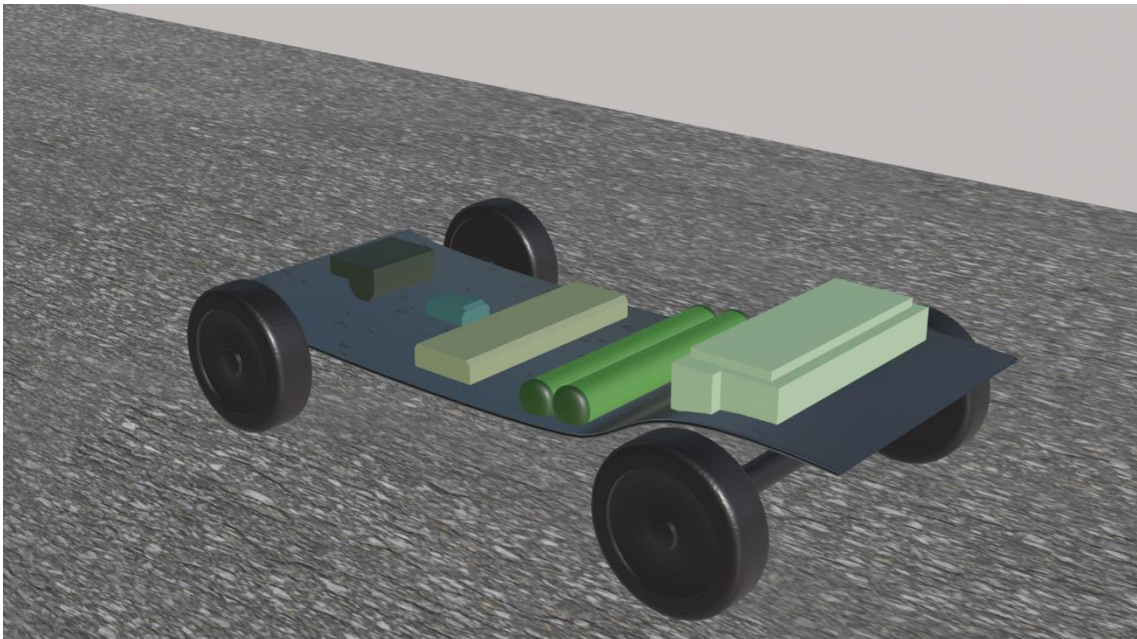


Figura 71. Interior del coche (Fuente: elaboración propia)



Figura 72. Interior del coche señalando tanques de hidrógeno (Fuente: elaboración propia)

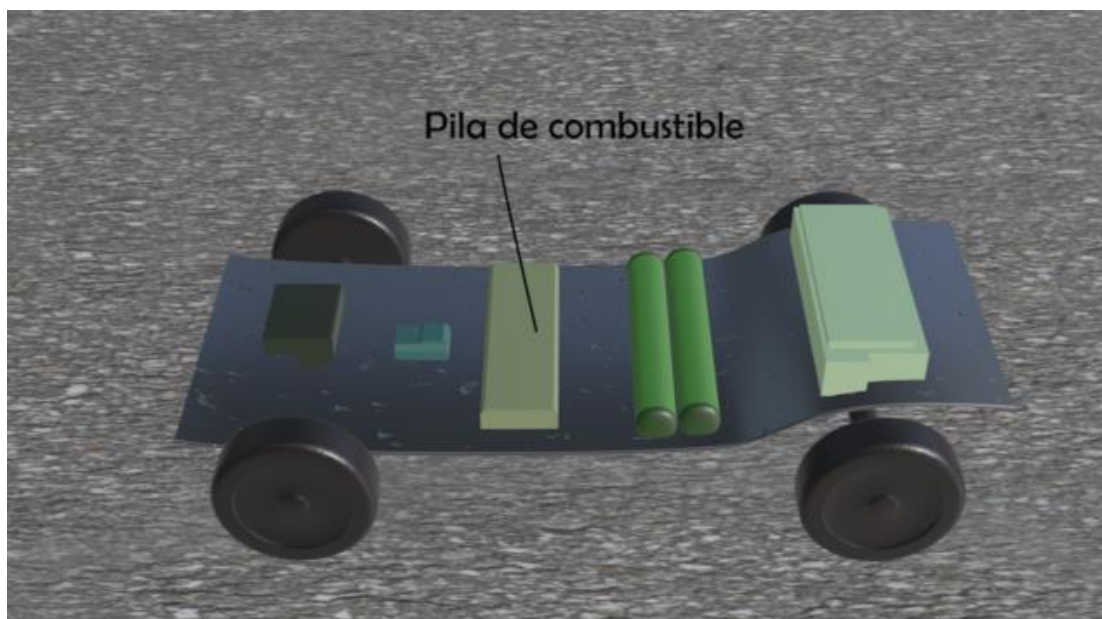


Figura 73. Interior del coche señalando pila de combustible (Fuente: elaboración propia)

4. La electricidad generada suministra energía a los motores directamente ([figura 75](#)), y, además, carga la batería electricidad generada carga la batería ([figura 74](#)). Entre la batería y el motor, la corriente pasa por un transformador ya que la electricidad que se obtiene de la pila y que se almacena en la batería es corriente continua y el motor ([figura 76](#)) necesita corriente alterna.

5. El agua excedente se expulsa a través del sistema de escape.

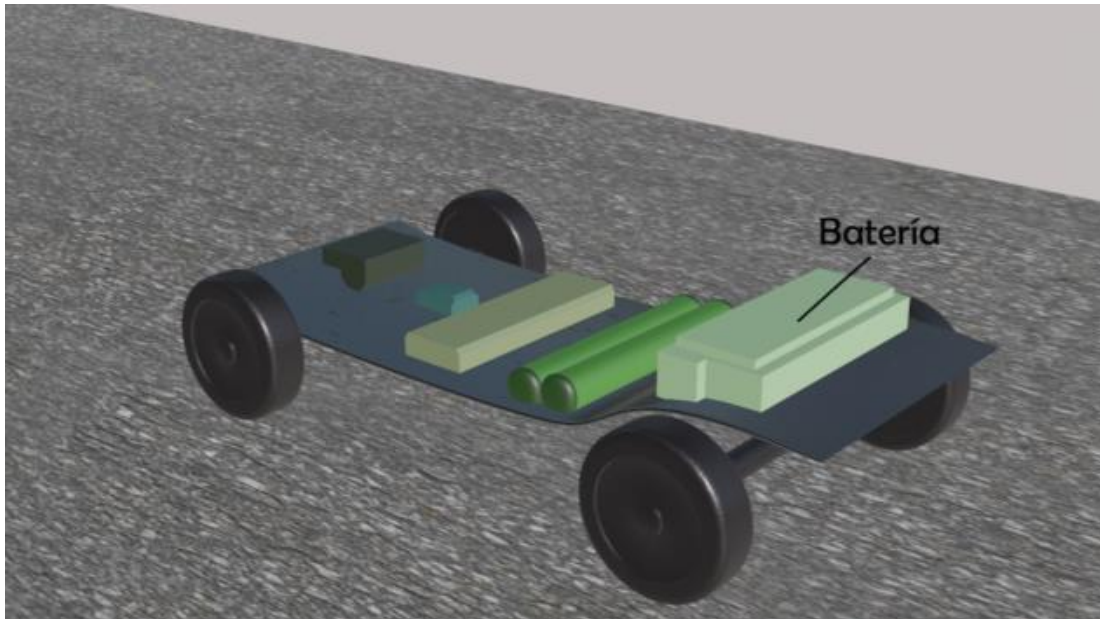


Figura 74. Interior del coche señalando batería. (Fuente: elaboración propia)

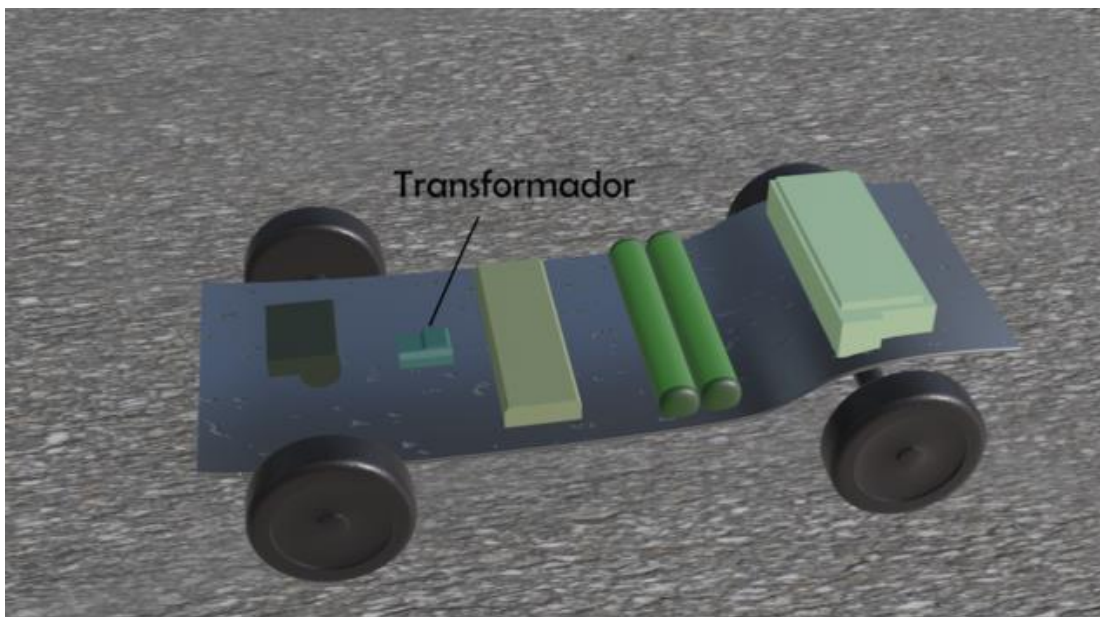


Figura 75. Interior del coche señalando transformador (Fuente: elaboración propia)

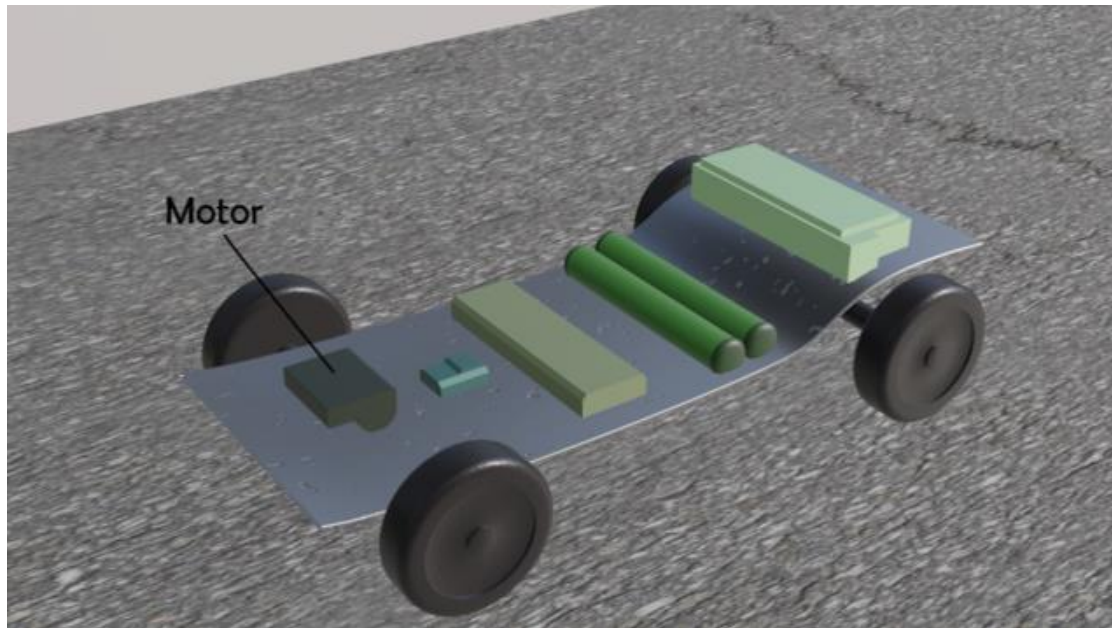


Figura 76. Interior del coche señalando motor (Fuente: elaboración propia)

5.5. Sección 4. Pila de combustible

Para explicar el proceso de obtención de energía eléctrica se ha recreado una pila de combustible. Como ya se ha explicado anteriormente, la pila de hidrógeno está formada por varias celdas. Las partes de la celda son la placa bipolar, el ánodo, el cátodo y la membrana polimérica electrolítica.

Las placas bipolares, encargadas de distribuir el combustible, en este caso el hidrógeno, y el oxígeno por toda la superficie activa, de han construido en SolidWorks. Se pueden apreciar los raíles o ranuras en la [Figura 28](#).

Para el cátodo, ánodo y membrana, se ha utilizado la pieza de la [Figura 29](#).

Más tarde, estas piezas se han exportado en el formato de extensión adecuado y se ha cambiado de programa a Blender para seguir ensamblando.

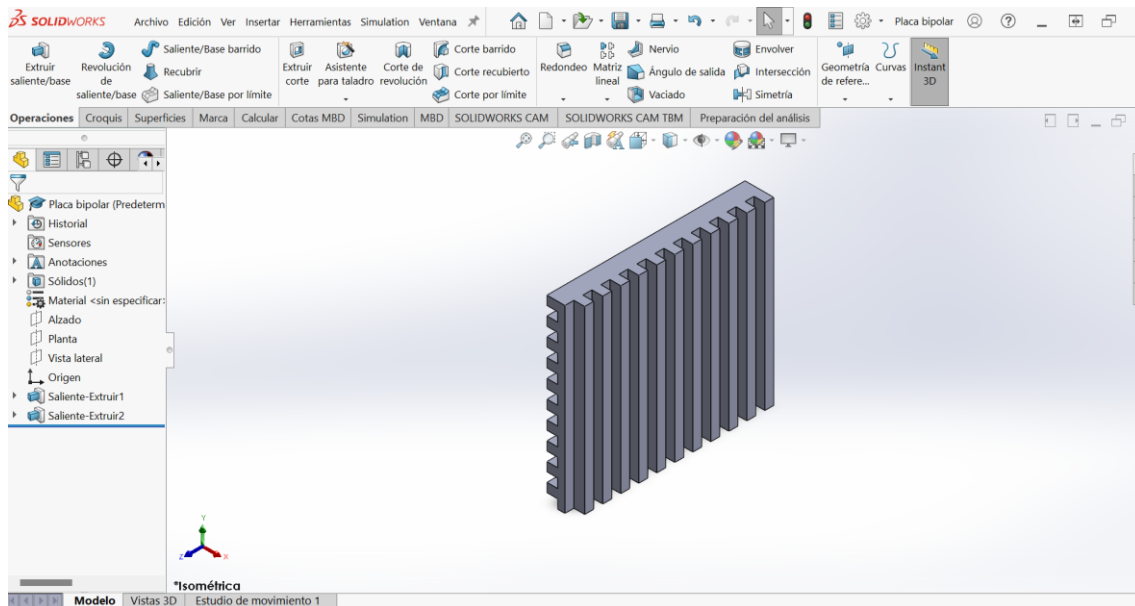


Figura 77. Entorno de SolidWorks del modelado de la placa bipolar para la representación de la pila de combustible.
(Fuente: elaboración propia)

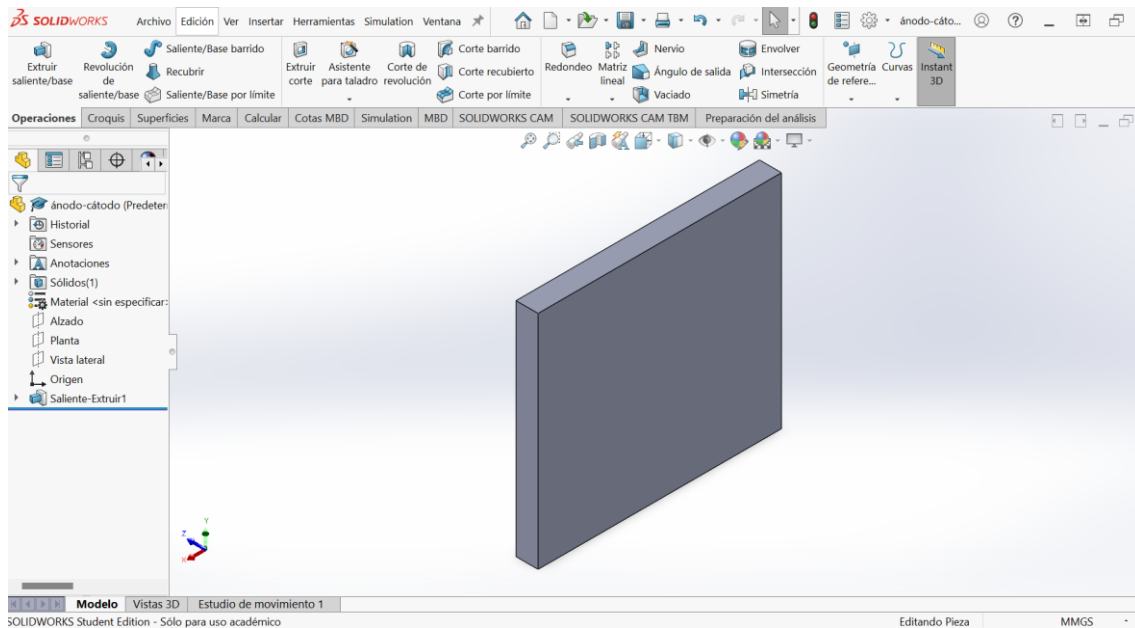


Figura 78. Entorno de SolidWorks del modelado del cátodo, ánodo y membrana para la representación de la pila de combustible. (Fuente: elaboración propia)

Las celdas se han alineado correctamente para formar la pila de combustible. En la [Figura 30](#) se puede ver una muestra de ello. La animación partirá de un barrido de cámara en el que se verá la pila al completo.

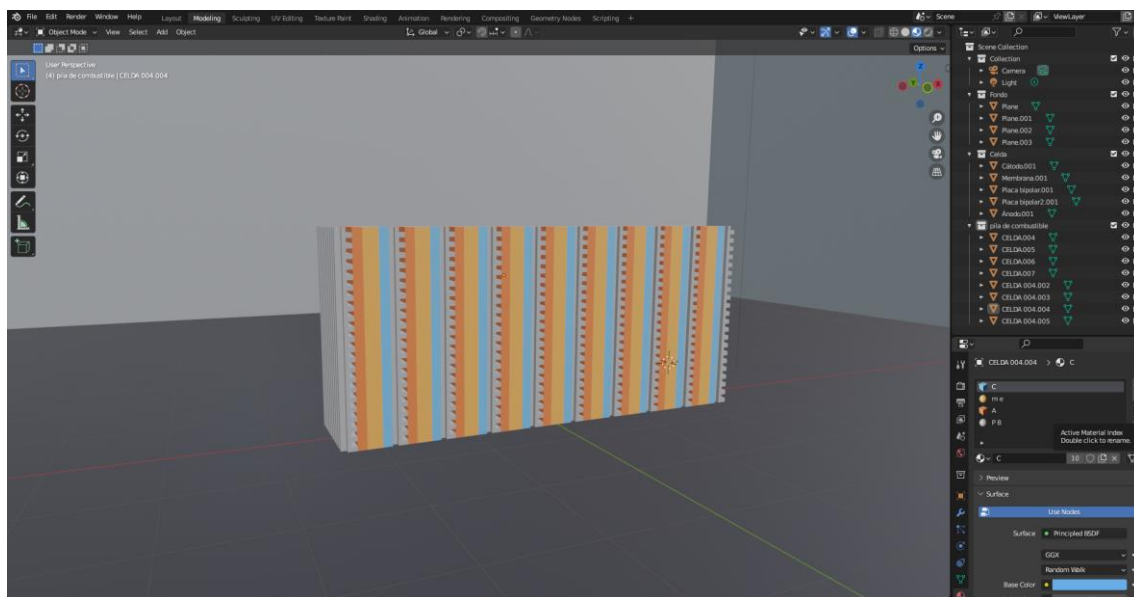


Figura 79. Ensamblaje de las celdas en Blender. (Fuente: elaboración propia)

En el primer clip dentro de la secuencia de la celda unitaria, desaparecerán las celdas de los extremos para dejar una única en el centro (Figura 31), que más tarde se explotará para dar espacio a la animación del hidrógeno y del oxígeno. Los gases se han recreado como partículas esféricas donde gracias a distintos materiales (“H₂”, “O₂” y “H₂O”) (Figura 32) se distingue perfectamente el camino que recorren de un lado a otro de la celda.

En el segundo clip se observa cómo las partículas positivas del hidrógeno pasan, a través de la membrana, desde el ánodo hasta el cátodo, a la vez que los electrones circulan por un circuito en el que tiene lugar el trabajo eléctrico.

En el tercer clip, el hidrógeno se une con el oxígeno y forma vapor de agua que es expulsado.

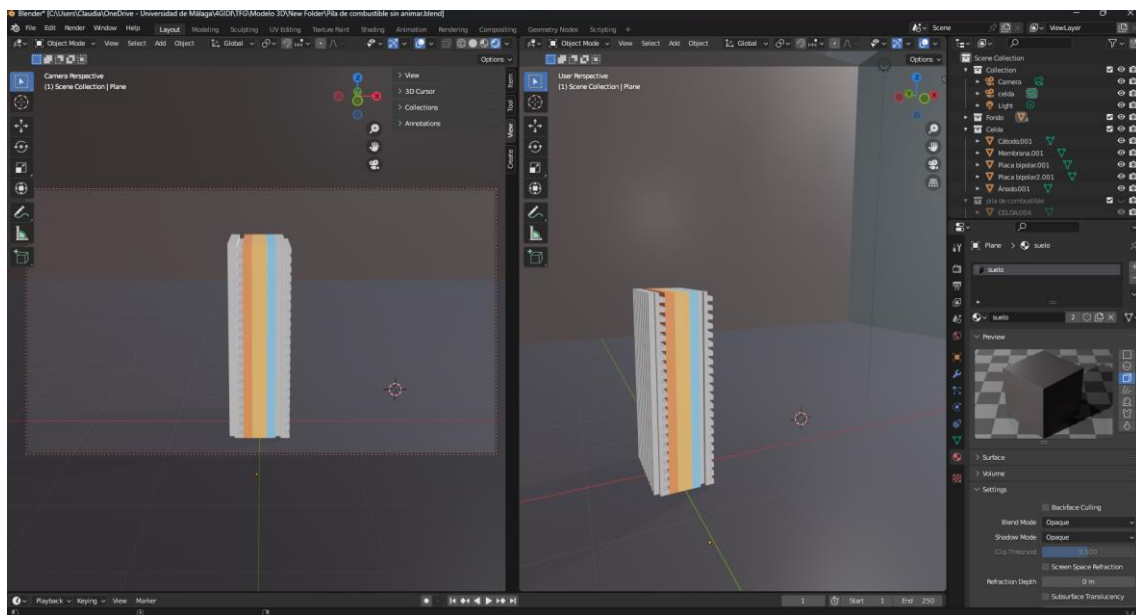


Figura 80. Celda de pila de combustible en Blender. (Fuente: elaboración propia)

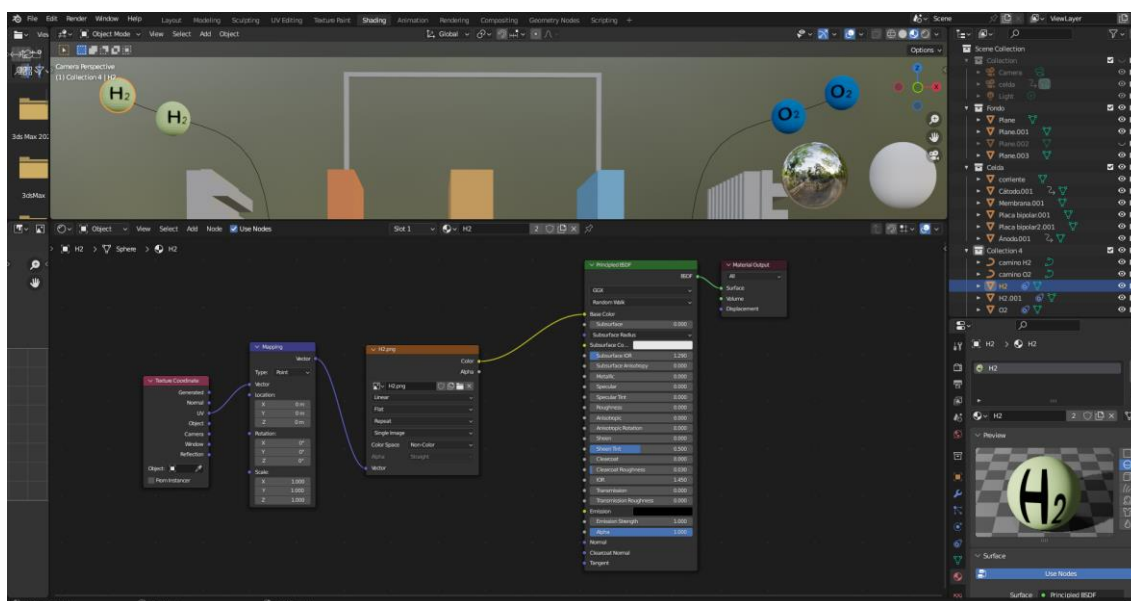


Figura 81. Material H₂. (Fuente: elaboración propia)

Para animar cualquier elemento, se debe crear un camino con la herramienta Bezier y añadir al objeto el modificador “Follow Path” (Figura 33). Dentro de los ajustes de este modificador y en el modo edición, se establecen las coordenadas iniciales y finales del objeto. Este proceso se repite con todas las partículas.

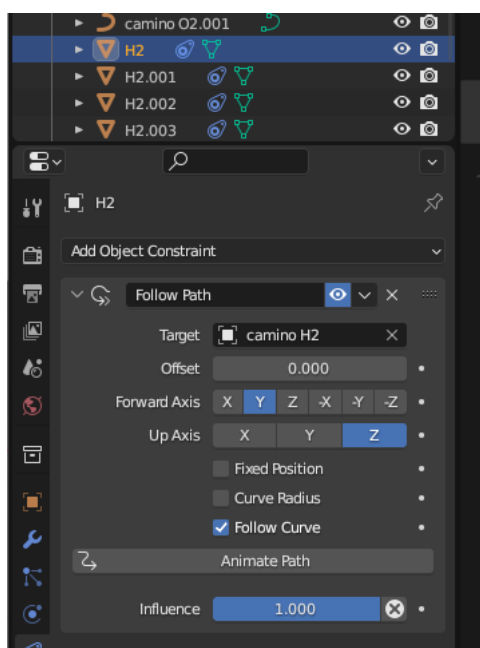


Figura 82. Camino de entrada del H₂ a la celda. (Fuente: elaboración propia)

Para lograr un movimiento continuo, se graban en los distintos frames de la línea de tiempo los ajustes de posición, rotación y escala del objeto. (Véase Figura 34)

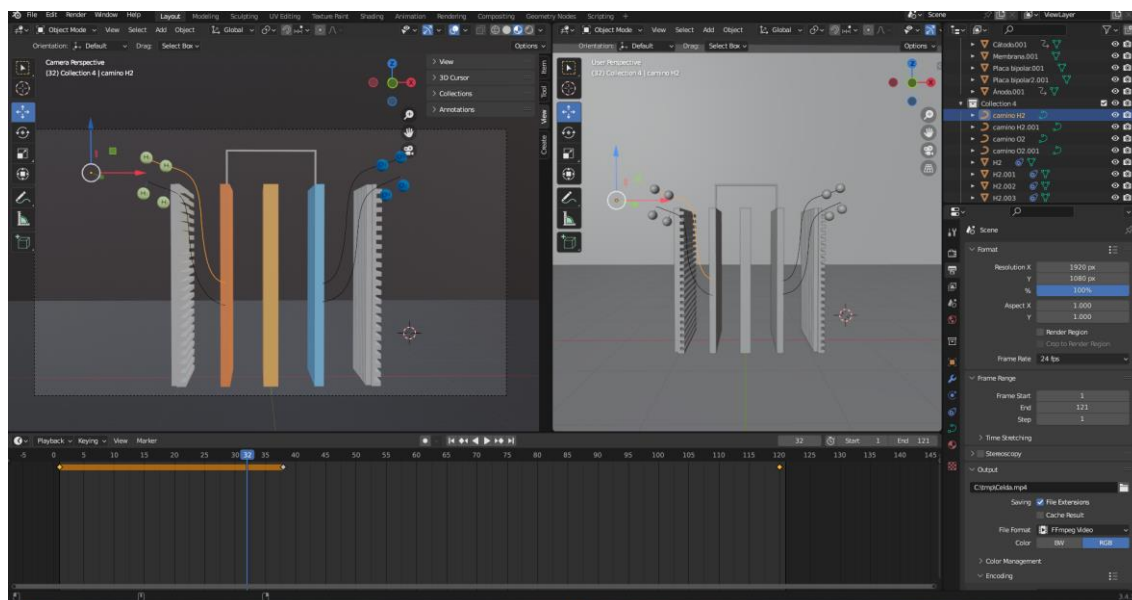


Figura 83. Línea de tiempo de la secuencia de la celda. (Fuente: elaboración propia)

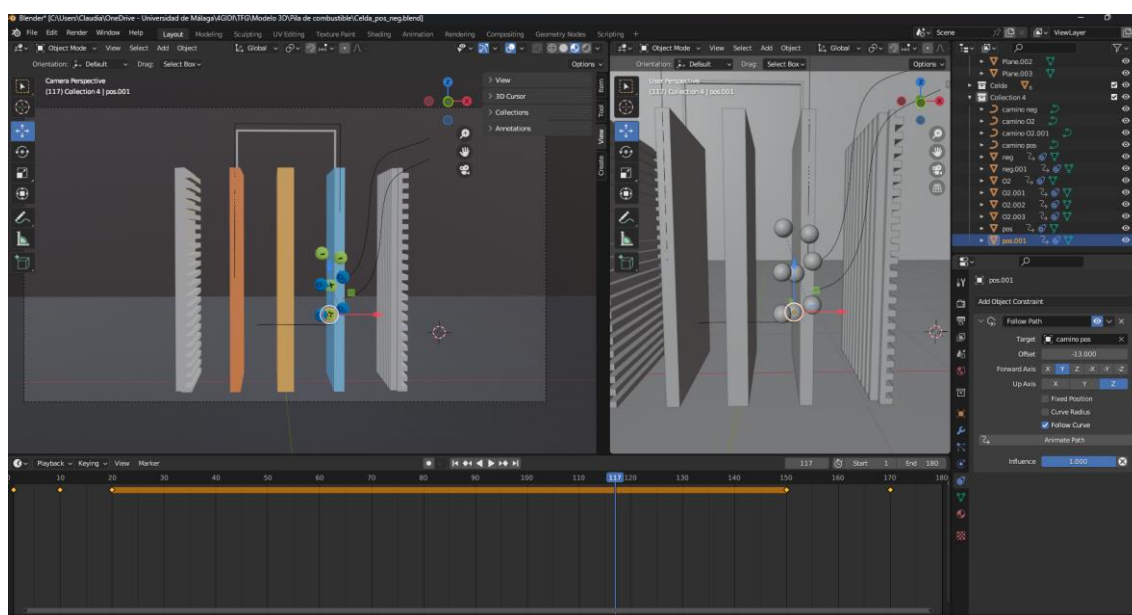


Figura 84. Movimiento del hidrógeno del ánodo al cátodo. (Fuente: elaboración propia)

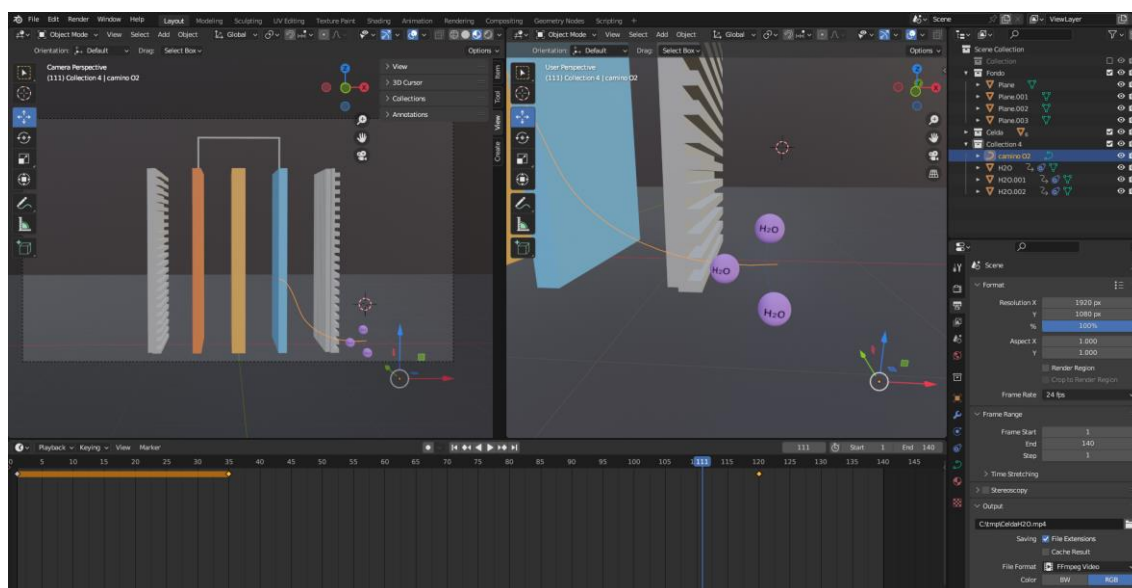


Figura 85. Movimiento de las partículas de vapor de agua fuera de la pila. (Fuente: elaboración propia)

Toda la animación se ha renderizado desde el mismo Blender y se ha exportado a Adobe Premiere Pro para su edición. (Véase Figura 37)

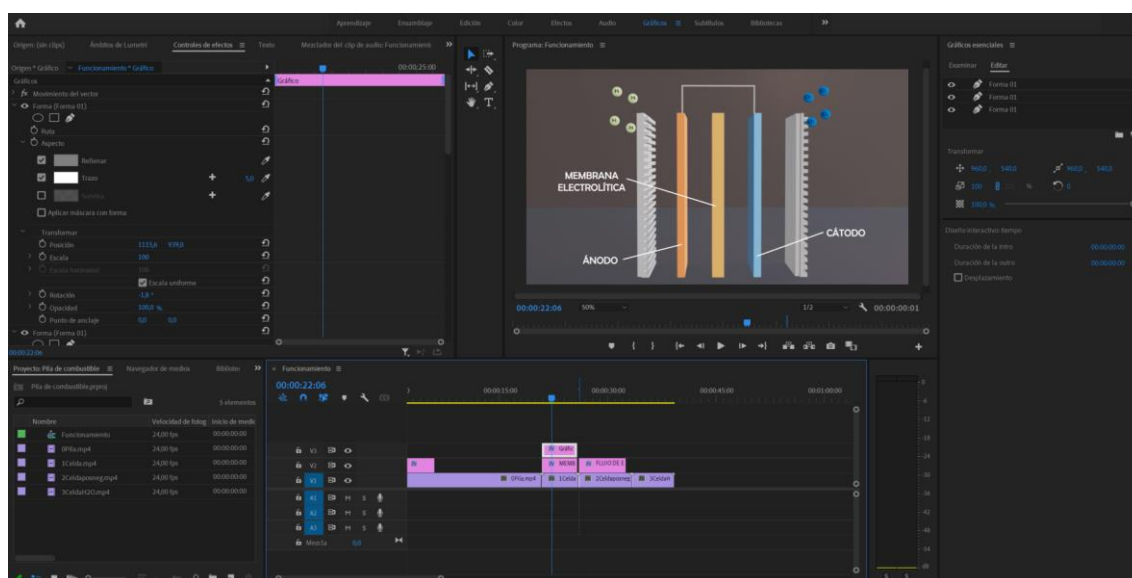


Figura 86. Entorno de Adobe Premiere Pro con la edición de la secuencia de la pila de combustible. (Fuente: elaboración propia)

Para entender mejor el resultado final en el video, se adjuntan un conjunto de clips de este.

Se empieza por un plano desde la derecha (*figura 87*) para hacer un giro con la cámara alrededor de la cara frontal de la pila (*figura 88*) y así poder verla con detalle.



Figura 87. Pila de combustible 1. (Fuente: elaboración propia)

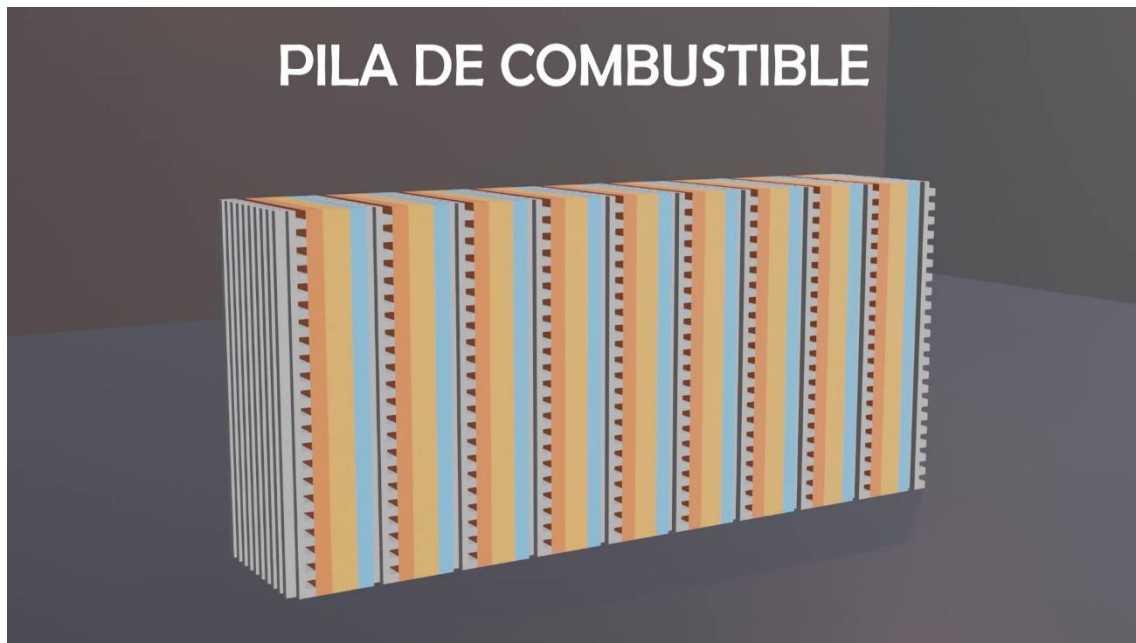


Figura 88. Pila de combustible 2. (Fuente: elaboración propia)

A partir de aquí, la cámara permanece estática y comienza la animación de las celdas que conforman la pila. Desde el plano frontal centrado con el que se ha terminado antes, [figura 89](#), las celdas de los extremos comienzan a alejarse ([figura 90 y figura 91](#)).



Figura 89. Pila de combustible 3. (Fuente: elaboración propia)

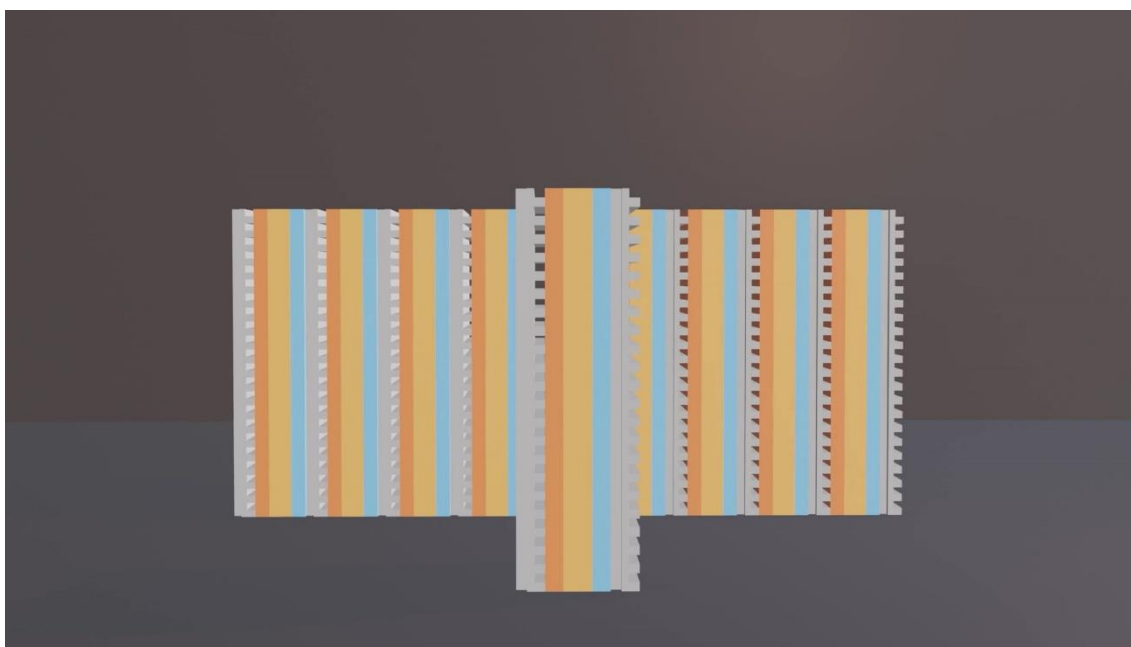


Figura 90. Pila de combustible 4. (Fuente: elaboración propia)

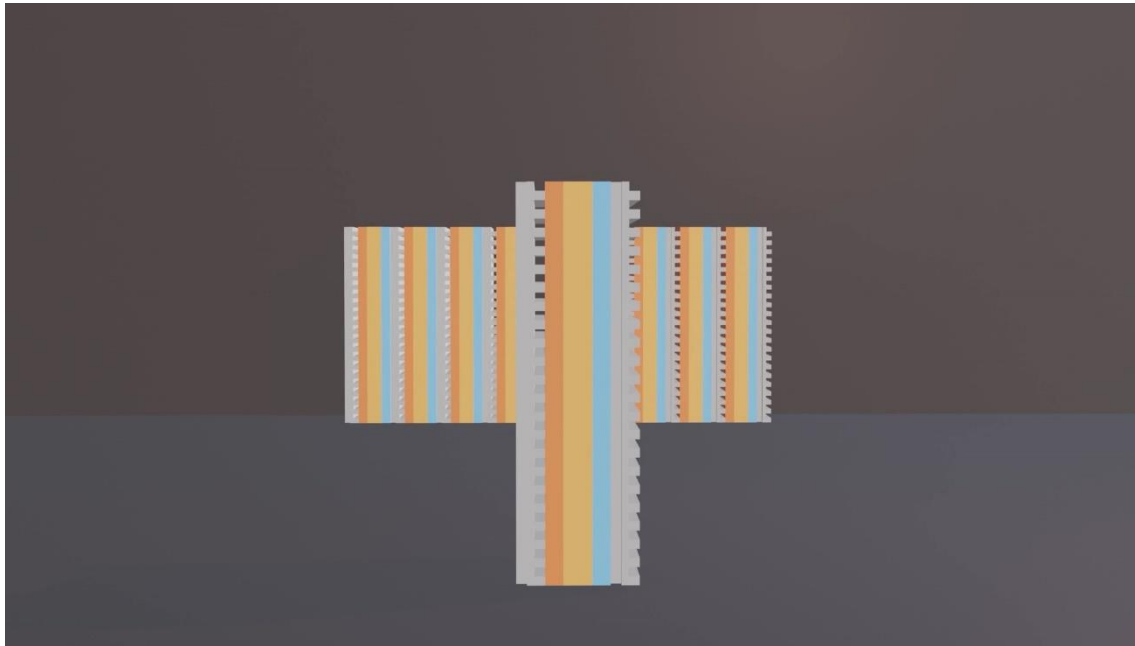


Figura 91. Pila de combustible 5. (Fuente: elaboración propia)

Una vez que ha quedado una única celda en el centro, [figura 92](#), esta comienza a separarse.

Primero se alejan las placas bipolares ([figura 93](#)) siguiendo un movimiento rectilíneo y constante a lo largo del eje. Se paran a una distancia lo suficientemente alejada como para dejar espacio para las demás partes y la animación.

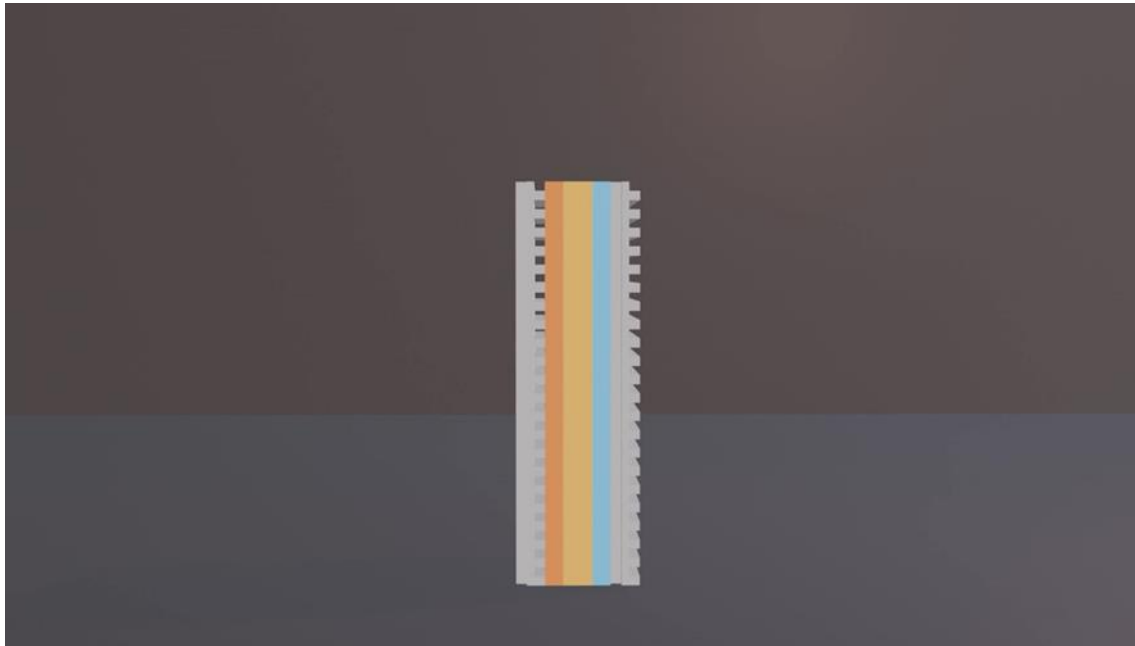


Figura 92. Celda 1. (Fuente: elaboración propia)

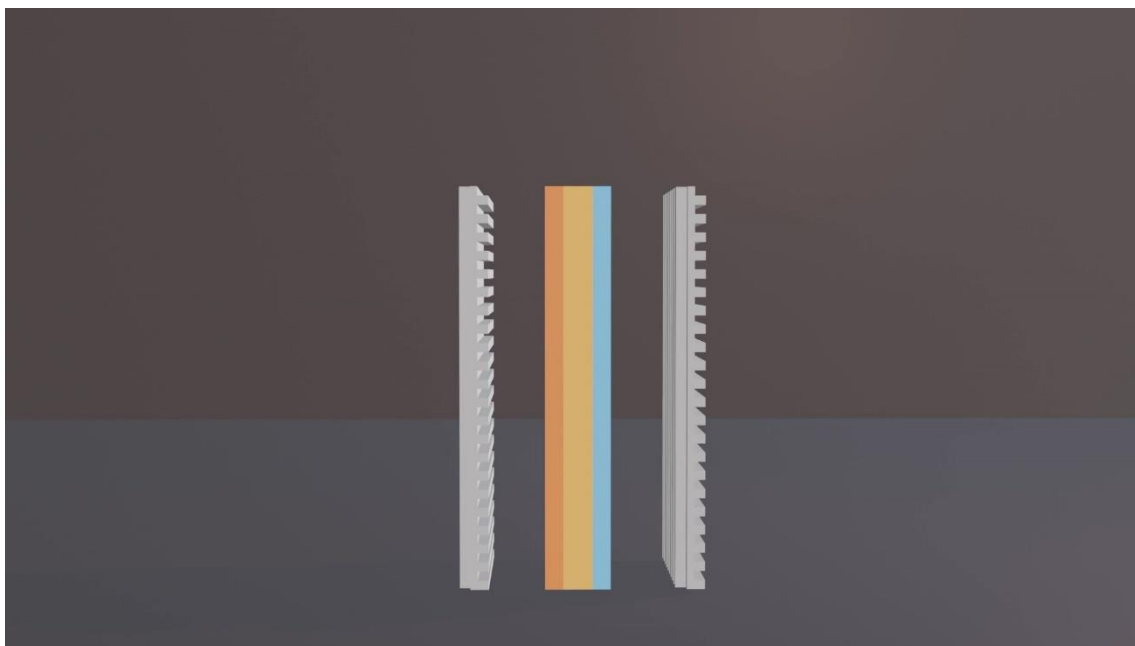


Figura 93. Celda 2. (Fuente: elaboración propia)

En la [figura 94](#) se ve el siguiente movimiento, la separación del cátodo, de naranja a la izquierda; de la membrana, de amarillo en el centro; y del ánodo, de azul a la izquierda.

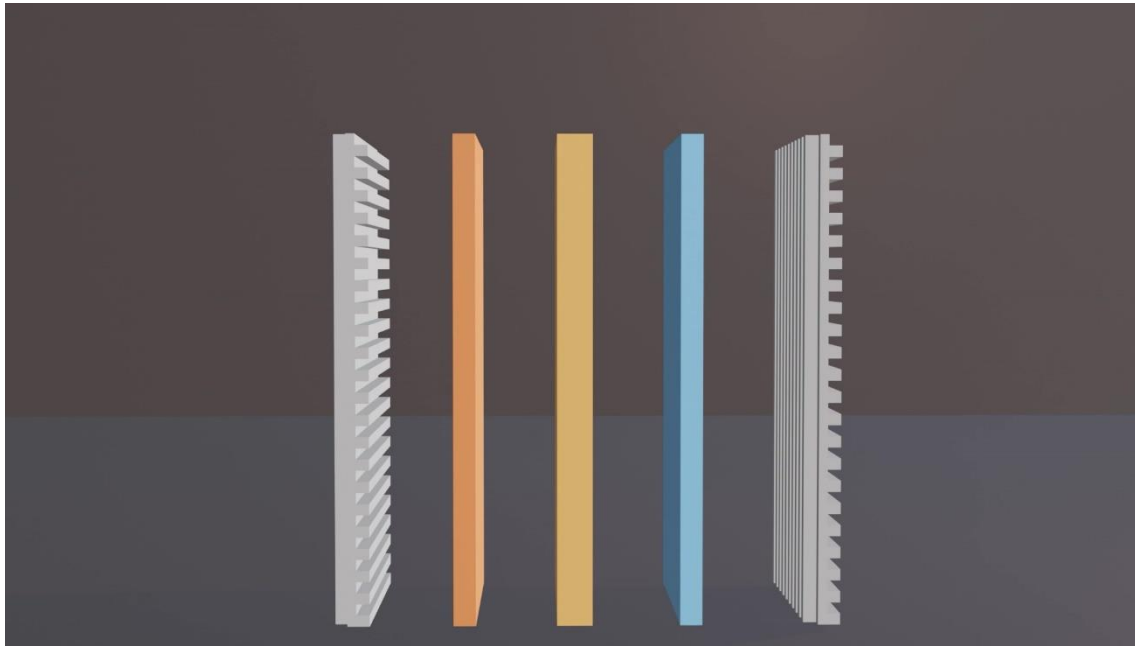


Figura 94. Celda 3. (Fuente: elaboración propia)

Para seguir, aparecen las partes indicadas, así como la representación del hidrógeno a la izquierda y del oxígeno a la derecha. Ambos entran por las placas bipolares correspondientes. *(Figura 95)*

Estas esferas comienzan su camino hacia el cátodo y el ánodo respectivamente. En la *figura 96* se ve su posición final.

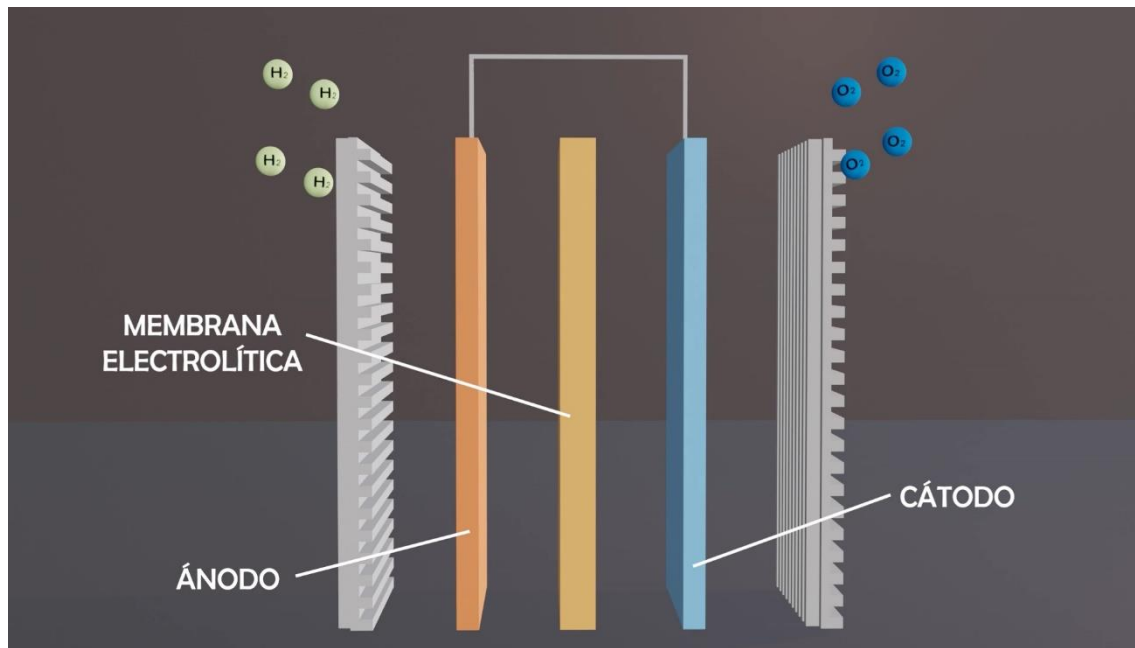


Figura 95. Celda 4. (Fuente: elaboración propia)

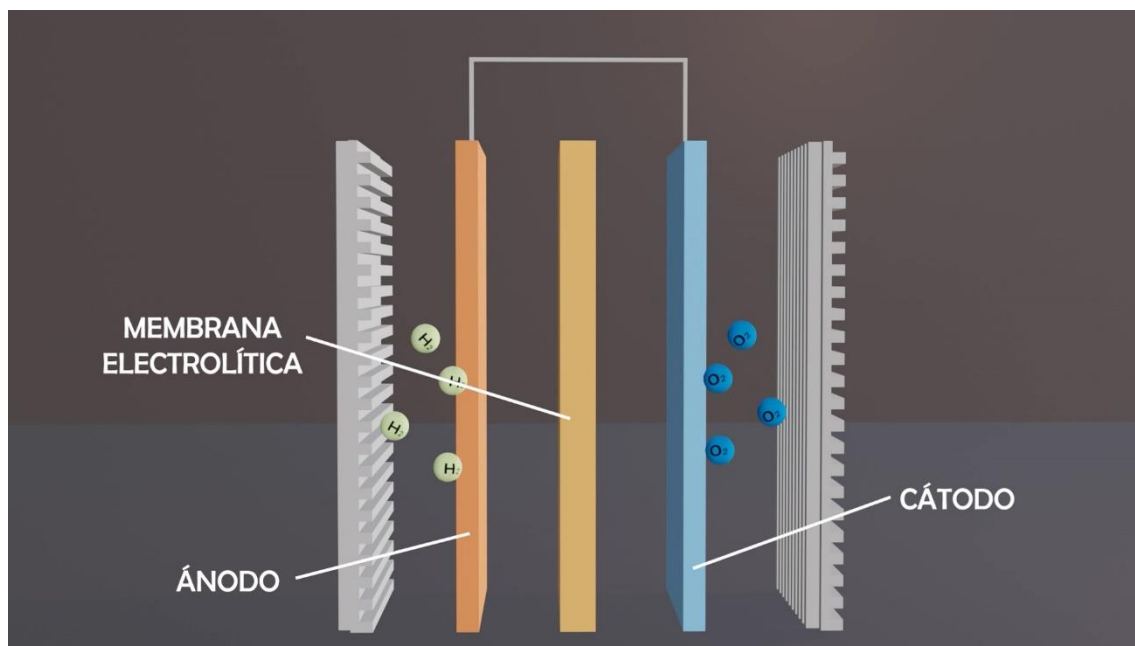


Figura 96. Celda 5. (Fuente: elaboración propia)

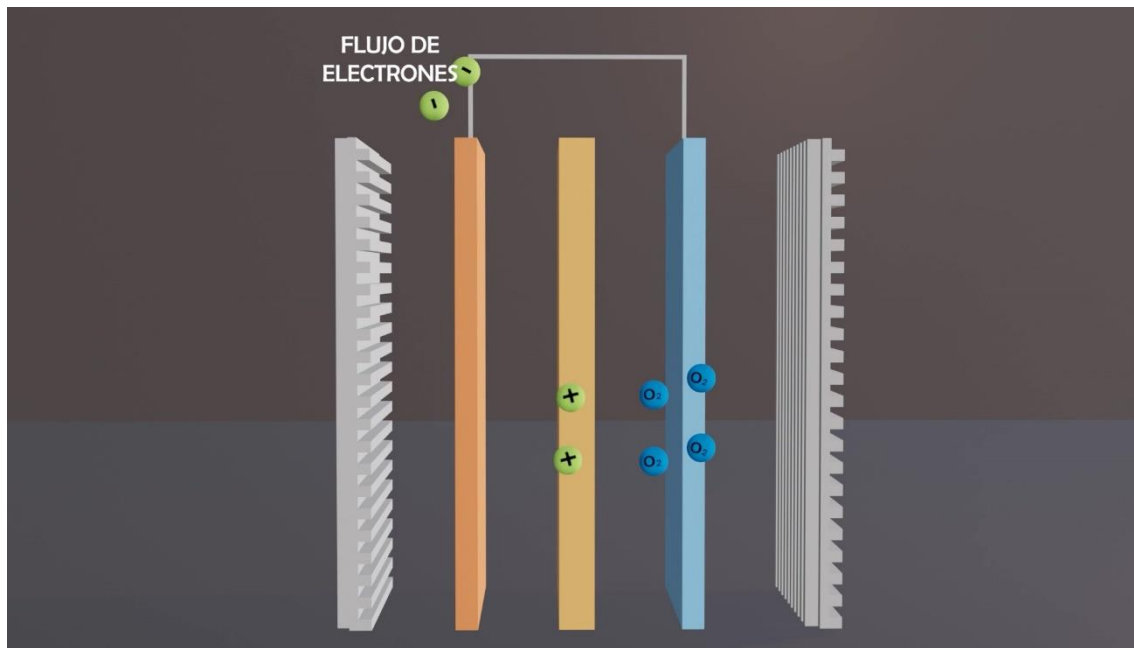


Figura 97. Celda 6. (Fuente: elaboración propia)

El siguiente paso en el video es la división en las partículas del hidrógeno. Las positivas pasan a través de la membrana y a la vez tiene lugar el flujo de electrones por un circuito externo. (Figura 97)

Cuando el hidrógeno llega a tener contacto con el oxígeno (figura 98), reacciona formándose partículas de vapor de agua (figura 99).

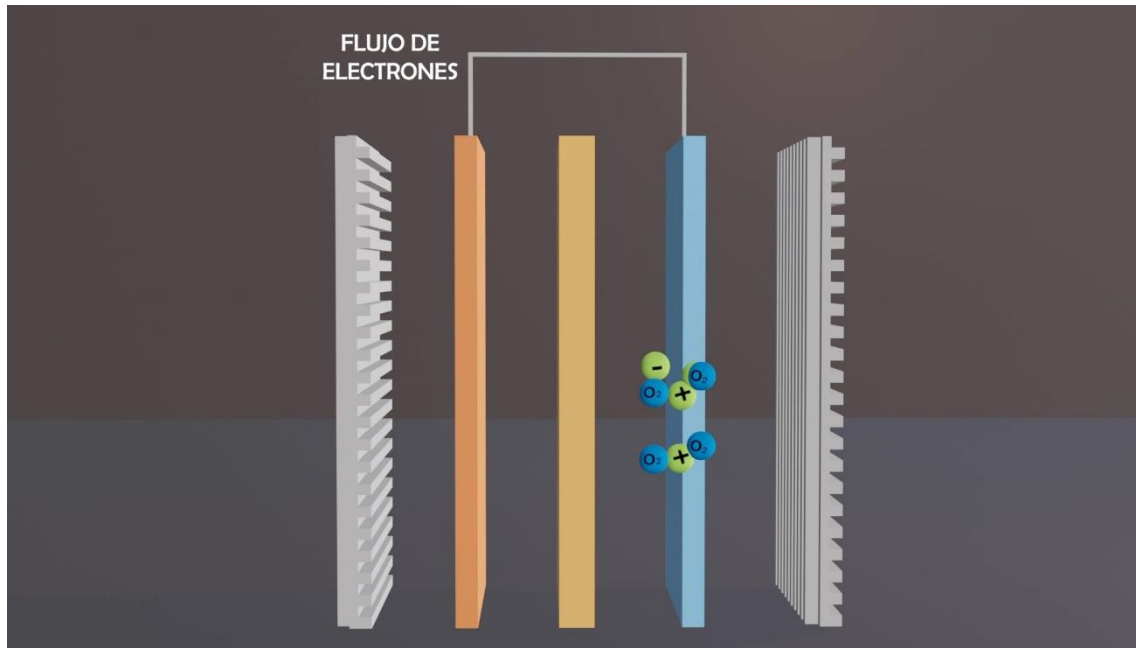


Figura 98. Celda 7. (Fuente: elaboración propia)

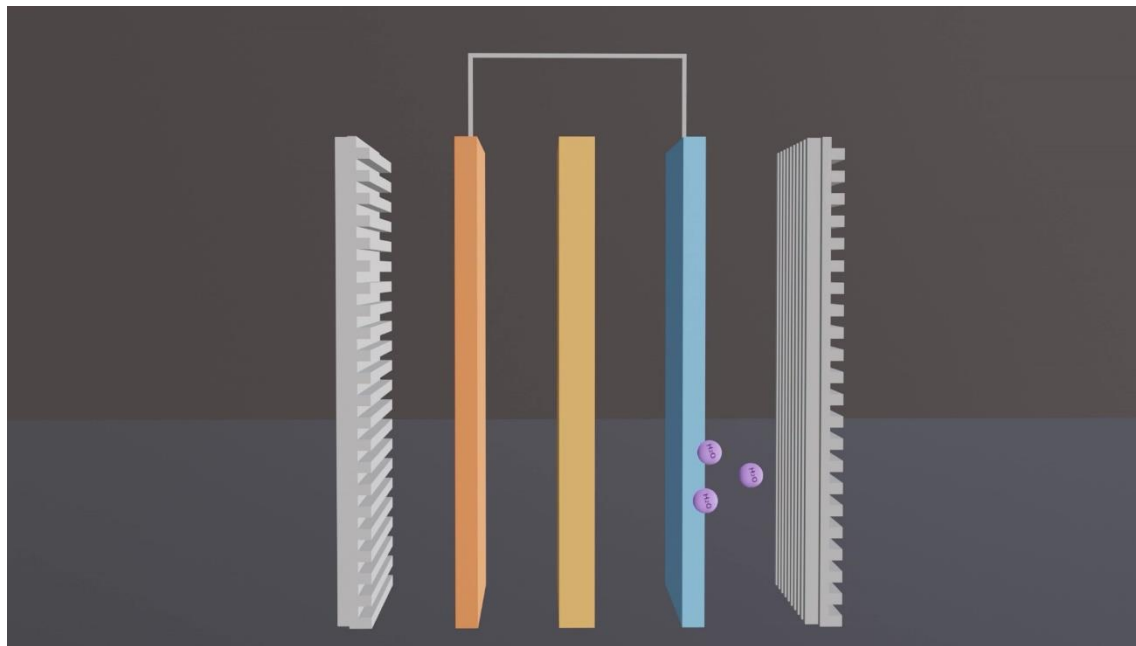


Figura 99. Celda 8. (Fuente: elaboración propia)

Finalmente, el vapor de agua sale al conducto que lo conducirá al exterior del vehículo.
(Figura 100)

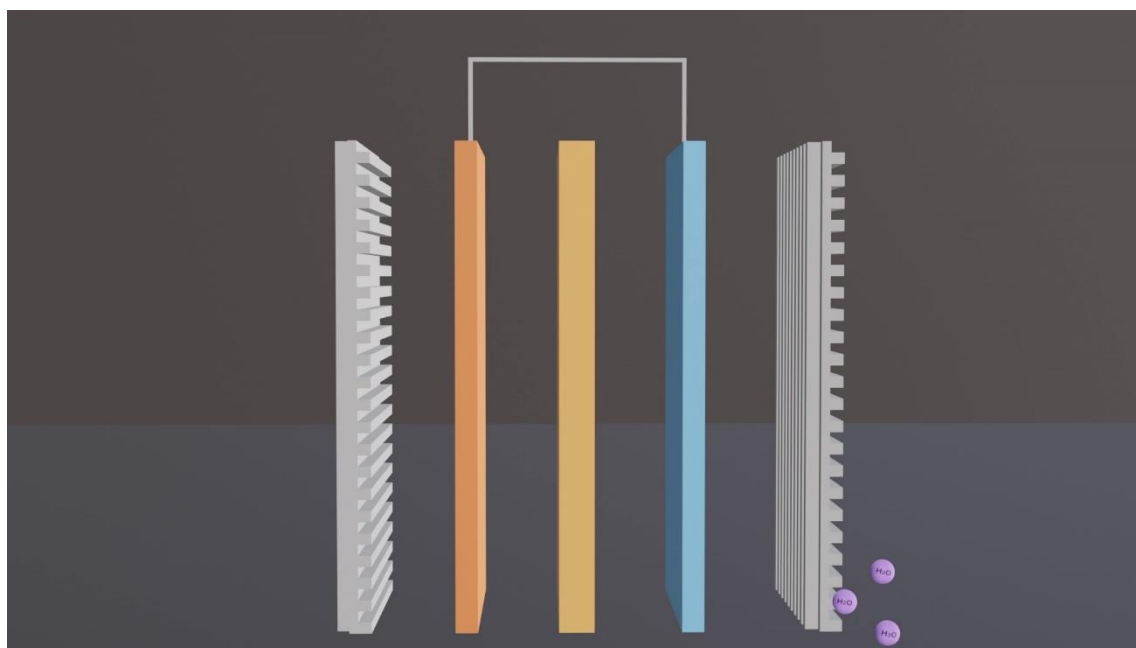


Figura 100. Celda 9. (Fuente: elaboración propia)

6. Conclusiones

Tal y como se ha ilustrado y recogido en el presente proyecto, se ha conseguido confeccionar un conjunto de modelos, infografía y video para hacer una recreación virtual de la generación de hidrógeno verde, así como su posterior transformación en energía eléctrica en un vehículo de hidrógeno. En este video se ha conseguido representar el proceso de obtención de energía por fuentes renovables, la hidrogenera en la que se produce el hidrógeno, el centro de repostaje al que llega el vehículo, y el vehículo en sí. En el vehículo se han diferenciado las partes implicadas en el funcionamiento de este.

La elaboración de esta recreación permite cumplir el objetivo de creación de material visual que puede ser usado con fines didácticos para presentar esta tecnología a quien esté interesado en aprenderla.

Se ha conseguido hacer un estudio previo del hidrógeno, de su obtención, producción y almacenamiento, de la pila de combustible y de los vehículos de hidrógeno en la actualidad. La recopilación de esta información ha servido para comprender esta tecnología que está en constante desarrollo y para entenderla y tener recursos suficientes para diseñar la recreación.

También se ha conseguido mejorar la aptitud para desarrollar ideas, llevarlas a cabo y mostrárselas a los demás de manera ilustrativa. Se han conseguido aumentar los conocimientos sobre el uso de dos de los softwares más importantes en el mundo del diseño y la animación como son SolidWorks y Blender.

El amplio campo de información que se presentaba al principio resulta de gran densidad. Es por ello que este proyecto ha cobrado sentido al mostrar la información general de este proceso tecnológico de manera visual y atractiva, facilitando la comprensión de la materia sin gran dificultad. Tras este proyecto, se valora todavía más el trabajo gráfico que se esconde detrás de cualquier animación que son usuales ver en las pantallas. El resultado hace que parezca fácil el conseguir crear algo agradable visualmente, entretenido y didáctico.

7. Lista de referencias

- Agencia Europea de Medio Ambiente [AEMA] (2018). Transport greenhouse gas emissions. European Environment Agency.
<https://www.eea.europa.eu/airs/2018/resource-efficiency-and-low-carbon-economy/transport-ghg-emissions>
- Aguado, R., Casteleiro-Roca, J. L., Jove, E., Zayas-Gato, F., Quintián, H., & Calvo-Rolle, J. L. (2021). Hidrógeno y su almacenamiento: el futuro de la energía eléctrica.
- Almarza, J. (2010). Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de Baja Potencia. Trabajo Final de Grado. Cataluña: Escola Tècnica Superior d'Enginyeries Industrial i Aeronàutica de Terrassa, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Asensio, P. (2007). Hidrógeno y pila de combustible. Obtenido de <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-paratodos-hidrogeno-y-pila-de-combustible>.
- Civieta, Ó. F. (4 de marzo 2023). Todos los colores del hidrógeno: verde, rosa, turquesa o negro. Business Insider España. <https://www.businessinsider.es/todos-colores-hidrogeno-verde-rosa-turquesa-negro-1198428>
- Hiperbaric (12 de Enero 2024). *Qué es la compresión de hidrógeno* Hiperbaric. <https://www.hiperbaric.com/es/compresion-h2/que-es-la-compresion-h2/>
- Hortal, M. A., & Barrera, A. L. M. (2012). El hidrógeno: fundamento de un futuro equilibrado. Ediciones Díaz de Santos.
- How does a #hydrogen fuel cell work? | what is #hydrogen fuel cell | #hydrogen cell explain. (n.d.). Wwww.youtube.com. <https://youtu.be/a4pXAmljdUA>
- Hydrogen Council (2020). *Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost perspective*. https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf
- Hydrogen Fuel Cell: How It Works. (n.d.). Wwww.youtube.com. Retrieved January 15, 2024, from <https://youtu.be/bFb5TKVPSiY>

- Infozara. (24 de noviembre 2008). ISQCH.

<http://www.isqch.unizar-csic.es/ISQCHportal/celdasDeCombustible.do>

- Ingeoexpert. (21 de enero 2021). Coches de hidrógeno ¿qué son y cómo funcionan? *Ingeoexpert*. <https://ingeoexpert.com/2020/03/31/coches-de-hidrogeno-que-son-y-como-funcionan/>
- Kenshiki Forum 2022 - Plenary Session. (n.d.). *Www.youtube.com*. Retrieved January 15, 2024, from <https://youtu.be/ONQo5Iv8ksE>
- Ley sobre la industria de cero emisiones netas de 2023. By Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on establishing a framework of measures for strengthening Europe's net-zero technology products manufacturing ecosystem (Net Zero Industry Act). COM(2023) 161, SWD(2023) 68
- Llera Sastrea, E.M.; Zabalza Bribián, I. (2011) Hidrógeno: producción, almacenamiento y usos energéticos, *Prensas Universitarias de Zaragoza*, 1ª edición, Zaragoza.
- Llorca Piqué, J. (2010). El hidrógeno y nuestro futuro energético, Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 1ª edición, Barcelona.
- Noya, C. (10 de marzo 2023). Este país africano será uno de los inesperados protagonistas de la producción de hidrógeno verde para Europa. *Forococheselectricos*. <https://forococheselectricos.com/2023/03/pais-africano-inesperados-protagonistas-produccion-hidrogeno-verde-europa.html>
- Otero, A. (20 de febrero de 2018). Coches de hidrógeno: así funciona esta tecnología de cero emisiones contaminantes. *Motorpasión*.
<https://www.motorpasion.com/tecnologia/coches-de-hidrogeno-asi-funciona-esta-tecnologia-de-cero-emisiones>
- Grueso, I. (2020). Diseño y cálculo de un depósito de almacenamiento de hidrógeno para un vehículo industrial. Trabajo Final de Grado. Valencia: Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad Politécnica de Valencia.

- Roca, R. (11 de marzo de 2023). La central nuclear de Nine Mile Point en Nueva York inicia la producción de hidrógeno limpio. *El Periódico De La Energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/la-central-nuclear-de-nine-mile-point-en-nueva-york-inicia-la-produccion-de-hidrogeno-limpio/>
- Santiago, O. (22 de octubre de 2017). Almacenamiento de hidrógeno comprimido: tipos de tanques. *Apilados*. <https://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/>
- Sauras, Á. (1 de diciembre de 2021). Coches de hidrógeno: el eterno combustible del futuro. *Autofacil.es*. <https://www.autofacil.es/coches-electricos-e-hibridos/coches-hidrogeno-eterno-combustible-futuro/189233.html>
- *Toyota Mirai - How a fuel cell works*. (n.d.). Wwww.youtube.com. Retrieved January 15, 2024, from <https://www.youtube.com/watch?v=0PN4XaMcrTQ>
- TOYOTA MIRAI | 2nd Generation Toyota Fuel Cell System | Toyota. (n.d.). Wwww.youtube.com. Retrieved January 15, 2024, from https://www.youtube.com/watch?v=-tmuiHm5sbc&ab_channel=ToyotaGlobal



*Recreación virtual de la generación de hidrógeno verde, así como
su posterior transformación en energía eléctrica en un vehículo de hidrógeno*



En Málaga, a 15 de enero de 2024

Fdo. Claudia Luque Bermúdez