

Trabajo Fin de Grado Grado en Ingeniería Aeroespacial

Modelado y animación en CATIA V5 de la máquina de vapor London's Carriage de Richard Trevithick

Autor: Juan Carlos Cantos Galán

Tutora: María Gloria de Río Cidoncha

**Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Modelado y animación en CATIA V5 de la máquina de vapor London's Carriage de Richard Trevithick

Autor:

Juan Carlos Cantos Galán

Tutora:

María Gloria de Río Cidoncha

Profesora Titular

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Modelado y animación en CATIA V5 de la máquina de vapor London's Carriage de Richard Trevithick

Autor: Juan Carlos Cantos Galán
Tutora: María Gloria de Río Cidoncha

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A mis padres, a mis hermanos, a mis abuelas, a mi tía Vivi y a Cristina.

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se modelarán en 3D las piezas que componen uno de los primeros carros a vapor de la historia, en este caso, el inventado por Richard Trevithick. Para ello, se hará uso de una licencia gratuita de uso para estudiantes de CATIA V5, donde después del modelado de las piezas, se ensamblarán, se animarán en vídeo algunos movimientos de sus componentes y finalmente se renderizará para otorgarle un aspecto realista al modelo. Además, se estudiarán las ventajas e inconvenientes de este carro de Trevithick y el legado que ha dejado en la actualidad.

También se investigarán los contextos histórico, económico y social en los que se encuentra esta máquina de vapor. Se trata de Gran Bretaña a principios del siglo XIX, en plena Revolución Industrial. Se detallarán varios diseños de otros inventores, que causaron precedentes muy importantes y fueron vitales para que Trevithick desarrollara este carro a vapor.

Para acabar, se explicarán los motivos por los que se tomó la decisión de desarrollar este proyecto con CATIA V5 en lugar de otros software, y posibles desarrollos futuros que se pueden continuar a partir de este TFG.

Abstract

In this Thesis, the 3D modeling of the components of one of the earliest steam carriages in history will be carried out. In this case, the one invented by Richard Trevithick. To achieve this, a free license for students of CATIA V5 will be used. After modeling the parts, they will be assembled, some movements of their components will be animated in video format, and finally, rendering will be done to give a realistic appearance to the model. Additionally, the advantages and disadvantages of Trevithick's carriage and its contemporary legacy will be examined.

The historical, economic, and social contexts in which this steam engine machine is located will also be investigated. This context is early 19th-century Great Britain during the Industrial Revolution. Different designs by other inventors will be detailed, which set significant precedents and were vital for Trevithick's development of this steam carriage.

To conclude, the reasons for choosing to undertake this project with CATIA V5 instead of other software will be explained, along with potential future developments that can be developed over this Thesis.

Índice

1. Introducción	4
1.1. Objetivos del trabajo	4
1.2. Metodología	4
1.3. Estructura del proyecto y alcance	4
2. Richard Trevithick: su contribución a la Revolución Industrial	6
2.1. Biografía y logros de Richard Trevithick	6
2.2. Contexto histórico y tecnológico del siglo XIX	7
2.3. La Revolución Industrial en Gran Bretaña	9
2.4. Innovaciones y contribuciones tecnológicas de Trevithick en el ámbito de los carros de vapor	10
3. Los orígenes del carro de vapor de Richard Trevithick	12
3.1. Evolución de las máquinas de vapor y su aplicación en la locomoción	12
3.2. Precedentes e inspiraciones para el desarrollo del carro de vapor de Trevithick	16
3.2.1. Máquina de vapor de Savery	17
3.2.2. Máquina de vapor de Newcomen	19
3.2.3. Máquina de vapor de James Watt	21
4. Impacto y legado del carro de vapor de Trevithick	24
4.1. Recepción y reacción de la sociedad de la época	24
4.2. Influencia en el desarrollo de la tecnología de transporte	25
4.3. Comparativa con otros medios de transporte de la época	26

5. Selección de software	28
5.1. Sistemas CAD	28
5.1.1. Siemens NX	28
5.1.2. Solid Edge	28
5.1.3. SolidWorks	29
5.1.4. AUTODESK	30
5.2. Justificación del software utilizado: CATIA V5	30
6. Análisis técnico y consideraciones de ingeniería en el modelado 3D	31
6.1. Descripción detallada del diseño y componentes del carro de vapor .	31
6.2. Funcionamiento del carro de vapor	36
6.3. Principales desafíos técnicos y soluciones implementadas	38
6.4. Evaluación de la eficiencia y seguridad del carro de vapor de Trevithick	41
6.5. Renderizado	42
6.6. Animación	45
7. Conclusiones y desarrollos futuros	46
7.1. Recapitulación de los hallazgos y resultados del estudio	46
7.2. Reflexión sobre la importancia del carro de vapor de Trevithick en la historia de la tecnología	46
7.3. Líneas futuras de desarrollo	47

Índice de figuras

1.	Boceto del London Steam Carriage [3]	11
2.	Boceto del Architronito, cañón de Arquímedes descrito por Leonardo Da Vinci [20]	13
3.	Diseño del Aelópilo de Herón de Alejandría [21]	13
4.	Boceto del digestor de vapor de Denis Papin [24]	14
5.	Imagen de la locomotora de Richard Trevithick, apodada “Puffing Devil”[3]	15
6.	Boceto de la locomotora de George Stephenson, conocido como “The Rocket” [29]	16
7.	Máquina de vapor de Thomas Savery [26]	18
8.	Máquina de vapor de Thomas Newcomen [26]	20
9.	Máquina de vapor de James Watt [37]	22
10.	Caldera y tubo de escape de gases de combustión.	31
11.	Pistón, biela y cigüeñal.	32
12.	Ruedas motrices.	33
13.	Ensamblaje de piezas estándar en la caldera y alrededores.	34
14.	Rueda dentada de 30 dientes.	39
15.	Desarrollo del modelado de la guía de palanca de desengranaje.	40
16.	Cabina de pasajeros.	41
17.	Palanca de acoplamiento de los engranajes con el eje del cigüeñal.	42
18.	Parte frontal del carro de vapor de Trevithick.	43
19.	Parte trasera del carro de vapor de Trevithick.	44

1. Introducción

1.1. Objetivos del trabajo

El objetivo de este trabajo es el estudio y modelado en 3D del carruaje a vapor de Richard Threvithick, diseñado a principios del siglo XIX. Se destacarán también las innovaciones, ventajas e inconvenientes que tuvo este invento dentro de su contexto histórico en plena Revolución Industrial. También se obtendrán simulaciones del movimiento de la máquina y un renderizado del montaje final haciendo uso del software CATIA V5.

1.2. Metodología

El software elegido para la elaboración de este proyecto ha sido CATIA V5, principalmente por la versatilidad y completitud que ofrece. CATIA V5 es conocido por ser un software completo que abarca todas las etapas del proceso de diseño, desde la conceptualización hasta el renderizado final. Ofrece módulos específicos para modelar, ensamblar, simular y visualizar, y todos ellos incluidos en una versión de prueba gratuita para estudiantes que se puede obtener a través de la Universidad de Sevilla. Además, la asignatura de “Diseño y fabricación asistidos por ordenador” que se imparte en el 3º curso de esta titulación se basa en este programa. Esto sumado a que la interfaz es intuitiva y fácil de usar facilita la curva de aprendizaje y permite desarrollar pequeños proyectos como este sin que sea necesario un dominio completo del software.

1.3. Estructura del proyecto y alcance

Este Trabajo de Fin de Grado se enfoca en abordar el análisis, la representación gráfica y la simulación de una máquina de vapor utilizando herramientas de Diseño Asistido por Computador (CAD).

En un principio, se llevará a cabo una exploración detallada de la evolución histórica y las diversas aplicaciones de la máquina de vapor, poniendo de manifiesto su papel fundamental en el desarrollo de la industria moderna y la revolución que provocó en diversos medios de transporte.

Posteriormente, se procederá a introducir a Richard Trevithick, el ingeniero

británico cuyo diseño del carro de vapor es el centro de este Trabajo. Además, se describirá el funcionamiento de este invento en concreto y de la importancia de la máquina de vapor en general en el contexto del siglo XIX.

A continuación, se llevará a cabo la modelación detallada de cada una de las piezas que componen esta máquina de vapor de Trevithick. Este proceso se basará en los planos obtenidos de [1]. Una vez que todas las piezas hayan sido generadas, se procederá al ensamblaje, en el cual se irán construyendo diversos subconjuntos hasta llegar a la configuración final de la máquina de vapor. La fase de modelado culminará con una simulación virtual que recreará el movimiento de las partes móviles más relevantes de la máquina.

Para finalizar, se expondrán las conclusiones derivadas de la ejecución de este proyecto. Además de estas conclusiones, se plantearán posibles direcciones para futuros desarrollos que podrían partir del modelado realizado en este TFG.

2. Richard Trevithick: su contribución a la Revolución Industrial

2.1. Biografía y logros de Richard Trevithick

Richard Trevithick (13 de abril de 1771 - 22 de abril de 1833, Cornwall, Inglaterra) fue un ingeniero e inventor británico que desempeñó un papel crucial en el desarrollo de la locomoción a vapor y la maquinaria industrial durante la Revolución Industrial en el Reino Unido. Esta era se caracterizó por la transición de una economía agraria y artesanal a una economía industrial basada en la maquinaria y la producción en masa. Su trabajo pionero sentó las bases para la futura expansión de los ferrocarriles y la industria del transporte [2].

Provenía de una familia minera y creció en un entorno donde la minería y la ingeniería eran partes fundamentales de la vida cotidiana. Aunque no tuvo una educación formal extensa, creció rodeado de maquinaria y equipos mineros, lo que influyó en su interés por la ingeniería y la innovación. Desde muy joven, Trevithick demostró un espíritu curioso y un gran interés por experimentar con máquinas y mecanismos. A lo largo de su vida, llevó a cabo una serie de experimentos y proyectos de ingeniería que iban desde la construcción de modelos de barcos hasta la invención de locomotoras de vapor. Su enfoque en la experimentación y su disposición para probar nuevas ideas contribuyeron a su reputación como un ingeniero innovador [3].

Trevithick era conocido por ser un hombre apasionado y audaz. Su disposición para asumir riesgos y desafiar las convenciones de su época lo convirtieron en un pionero en su campo. A pesar de sus logros técnicos, estos riesgos y desafíos que Trevithick se propuso, a menudo le llevaron a enfrentarse con dificultades financieras, lo que dificultó que pudiera patentar y comercializar sus ideas. El hecho de no lograr el éxito comercial que esperaba, lo dejó con importantes deudas y luchas económicas. La falta de reconocimiento financiero a menudo le impedía aprovechar al máximo sus inventos y dificultaba su capacidad para llevar a cabo investigaciones y desarrollos continuos. A pesar de sus dificultades financieras y decepciones, nunca dejó de creer en el potencial de sus ideas y continuó buscando nuevas formas de aplicar la tecnología de vapor en diversos campos [3].

Sin embargo, el legado de Richard Trevithick persiste a día de hoy gracias a algunos de sus logros más importantes, entre los que destacan [2],[3],[4]:

- Locomotora de carretera: además de su trabajo en ferrocarriles, Trevithick construyó una locomotora de vapor de carretera en 1801, conocida como “Puffing Devil”. Esta fue una de las primeras aplicaciones exitosas de la locomoción a vapor en tierras no ferroviarias y ayudó a sentar las bases para el desarrollo de vehículos motorizados.
- Carruaje a vapor: en 1803 Trevithick construyó otro vehículo automóvil, el “London Steam Carriage”, cuyo objetivo original fue para ser empleado en reparto de correos. Básicamente, se trataba de un carro habitual, pero provisto de una máquina de vapor en lugar de caballos (como era propio en aquella época). Aunque llamó la atención del público y la prensa, en la práctica era más caro de mantener que un carro de caballos, por lo que no logró imponerse [5].
- Locomotora de vapor de alta presión: uno de los logros más significativos de Trevithick fue la invención de la primera locomotora de vapor operativa de alta presión. En 1804, construyó una locomotora que transportó una carga de hierro y pasajeros en los ferrocarriles de Penydarren en Gales. Esta fue una de las primeras demostraciones exitosas de una locomotora de vapor en funcionamiento en una vía férrea.
- Inventiones en minería: Trevithick también destacó en el campo de la minería. Diseñó y construyó bombas de vapor y motores de drenaje que ayudaron a mantener las minas secas y productivas. Sus innovaciones contribuyeron al desarrollo de la minería y la extracción de minerales a mayor profundidad.

2.2. Contexto histórico y tecnológico del siglo XIX

Este Trabajo se centra en analizar y comprender la figura de Richard Trevithick y su trascendental contribución a la Revolución Industrial a través de sus avances en el campo de los carros de vapor. En este apartado, se abordará el contexto histórico y tecnológico del siglo XIX que propició el surgimiento de innovaciones revolucionarias como la de Trevithick.

El siglo XIX fue un período de profundos cambios históricos y transformaciones tecnológicas que sentaron las bases para la sociedad moderna. A medida que el siglo XIX avanzaba, las sociedades de todo el mundo experimentaban una rápida transición de una economía agraria y artesanal a una economía industrializada. El crecimiento demográfico, la urbanización y la migración del campo a la ciudad condujeron a la formación de grandes centros urbanos y a la expansión de la

clase trabajadora. El surgimiento de fábricas impulsadas por la máquina de vapor marcó el inicio de una nueva era en la producción, desencadenando un aumento sin precedentes en la capacidad de manufactura y la producción en masa de bienes. Algunos de los eventos y desarrollos clave fueron [6]:

- **Revoluciones y nacionalismo:** el siglo XIX fue testigo de una serie de revoluciones políticas y movimientos nacionalistas que transformaron la estructura política de muchas naciones. La Revolución Francesa en el siglo XVIII influyó en los ideales de libertad, igualdad y fraternidad que siguieron influyendo en eventos como la Revolución de 1830 y la Revolución de 1848 en Europa.
- **Revolución Industrial:** uno de los desarrollos más significativos fue la Revolución Industrial, que comenzó en Gran Bretaña en el siglo XVIII pero tuvo su impacto más profundo en el siglo XIX. La mecanización de la industria, la introducción de fábricas y la adopción de tecnologías como la máquina de vapor llevaron a un cambio masivo en la economía y la sociedad, impulsando la urbanización y el crecimiento económico [7],[8].
- **Imperialismo:** las potencias europeas expandieron sus imperios coloniales en África, Asia y otras partes del mundo, aprovechando la tecnología y la superioridad militar para establecer el dominio sobre vastas áreas.
- **Guerras napoleónicas:** las guerras napoleónicas (1803-1815) tuvieron un impacto significativo en Europa, alterando las fronteras y las alianzas políticas [9].
- **Abolición de la esclavitud:** a lo largo del siglo XIX, hubo movimientos cada vez más fuertes para poner fin a la esclavitud en todo el mundo. Varios países abolieron la esclavitud, aunque este proceso fue gradual y a menudo acompañado de conflictos.

Este período también sentó las bases para muchas de las estructuras y tecnologías que aún influyen en nuestro mundo actual. En cuanto a desarrollos tecnológicos, los más significativos que cambiaron la forma en que las personas vivían y trabajaban fueron [10]:

- **Máquina de vapor:** la invención de la máquina de vapor por James Watt en el siglo XVIII se convirtió en el motor detrás de la Revolución Industrial, impulsando fábricas, barcos y trenes. Este invento, que comenzó su desarrollo en el siglo XVIII, encontró sus aplicaciones más amplias y diversas en la

producción y el transporte. Ingenieros y científicos se dedicaron a perfeccionar y adaptar la máquina de vapor para satisfacer las crecientes demandas de energía en diversas industrias, como la textil, la siderúrgica y la minería [11].

- Ferrocarriles: la expansión de las redes ferroviarias conectó regiones previamente aisladas, mejorando el transporte de bienes y personas.
- Telégrafo: la invención y adopción generalizada del telégrafo permitió una comunicación instantánea a larga distancia, revolucionando las comunicaciones y el comercio.
- Electricidad: a finales del siglo XIX, se realizaron avances significativos en la generación y aplicación de la electricidad, lo que allanó el camino para la iluminación eléctrica, la electrificación de fábricas y hogares, y la creación de nuevas tecnologías.
- Máquinas y producción en serie: la introducción de máquinas y técnicas de producción en serie cambió la forma en que se fabricaban productos, permitiendo una mayor eficiencia y reducción de costos [12],[13].
- Automóviles y aviación: aunque todavía en sus primeras etapas, los desarrollos en la industria automotriz y los experimentos en aviación sentaron las bases para los cambios tecnológicos masivos del siglo XX.
- Fotografía: la invención de la fotografía a mediados del siglo XIX permitió la captura de imágenes precisas y cambió la forma en que las personas documentaban su mundo.
- Medicina y ciencia: el siglo XIX fue testigo de avances médicos y científicos significativos, como la teoría de la evolución de Charles Darwin, que revolucionó la comprensión de la biología y la diversidad de especies.

2.3. La Revolución Industrial en Gran Bretaña

La Revolución Industrial en Gran Bretaña, que tuvo lugar entre finales del siglo XVIII y principios del XIX, fue un período de transformaciones fundamentales en la economía, la sociedad y la tecnología. Esta era de cambio estuvo impulsada por una combinación de factores interrelacionados que se unieron para cambiar radicalmente la forma en que se producían bienes y se organizaba la vida cotidiana.

Una serie de factores contribuyeron al surgimiento de la Revolución Industrial. La Revolución Agrícola del siglo XVIII marcó un aumento en la producción de alimentos y liberó a una parte de la población rural, lo que permitió el crecimiento de la industria. Aunque esto trajo consigo un crecimiento económico significativo, también tuvo un impacto social profundo. El crecimiento de las fábricas y la creación de núcleos urbanos atrajeron a las personas del campo a las ciudades en busca de trabajo. Esto dio lugar a la formación de barrios industriales y a condiciones de vida y trabajo a menudo precarias para la clase trabajadora [10],[14].

Además, Gran Bretaña contaba con abundantes recursos naturales, como carbón y hierro, que resultaron esenciales para la fabricación de maquinaria y el desarrollo industrial. Estos recursos, a su vez, impulsaron innovaciones tecnológicas que marcaron el inicio de esta revolución.

En esta época, surgieron importantes avances tecnológicos como la ya descrita máquina de vapor. Ésta se convirtió en un componente clave para el funcionamiento de fábricas y maquinaria industrial. Entre esta maquinaria, cabe destacar la usada para el transporte, ya que la invención de locomotoras a vapor transformó la movilidad y el comercio al permitir el transporte rápido y eficiente de mercancías y personas.

2.4. Innovaciones y contribuciones tecnológicas de Trevithick en el ámbito de los carros de vapor

En 1797, Trevithick realiza el primer modelo de una máquina de vapor a alta presión y consigue hacer funcionar un primer diseño de locomotora a vapor, es por todo ello considerado uno de los promotores de este invento [4],[15].

Pocos años después, en 1801, construye a escala real la primera locomotora, la cual estaba destinada a ser usada en carretera. Al año siguiente, en 1802, diseñó el que se considera el primer carruaje a vapor (en el que se basa este proyecto, Figura 1) y la primera locomotora sobre raíles a escala real, añadiendo algunas modificaciones: emplea una presión más alta (hasta casi 10 bares), introduce el hervidor fabricado en hierro fundido, el cilindro tenía 18 cm de diámetro y una batida de 0.9 m, llegando a cuarenta golpes de pistón por minuto, con una presión de caldera sin precedentes de 145 psi (1.000 kPa) [3].

El aplicar alta presión de vapor, permitió eliminar mecanismos que dejaron de ser necesarios y eficientes, como el condensador y el balancín, consiguiendo así una máquina compacta con claras ventajas para el transporte.

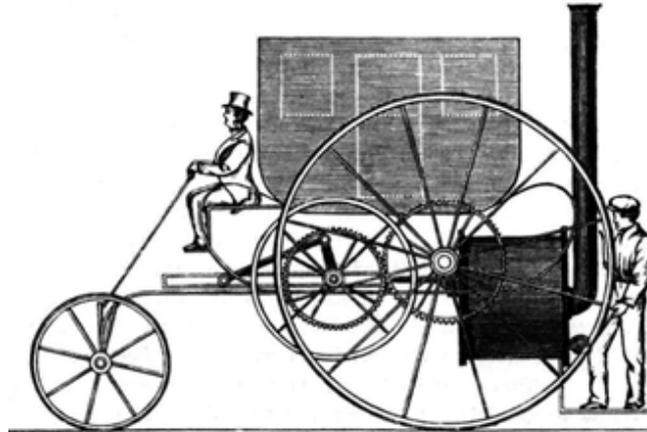


Figura 1: Boceto del London Steam Carriage [3]

En 1804 consiguió construir la primera locomotora ferroviaria, poniéndola a prueba al remolcar cinco vagones, con una carga total de diez toneladas y 70 hombres a bordo en el viaje inaugural durante 16 km, a una velocidad media de 3.9 km/h [3]. Cabe destacar que esta locomotora contaba con un único cilindro, empleaba engranajes para transmitir la fuerza a las ruedas y adoptó el volante y la tobera de las máquinas estacionarias. A pesar de que esta locomotora funcionó perfectamente, nunca se llegó a incorporar al mercado, ya que dañaba los raíles de hierro a su paso debido a su gran tonelaje [16].

En 1898, toda esta evolución y tecnología dio paso al sistema de tracción por diésel diseñado por el ingeniero mecánico alemán Rudolf Christian Karl Diesel, dando lugar a las locomotoras diesel-eléctricas y, posteriormente, a los actuales trenes eléctricos [16].

3. Los orígenes del carro de vapor de Richard Trevithick

La máquina de vapor, impulsada por la expansión de la minería de carbón y el desarrollo de ferrocarriles, se convirtió en el motor de la Revolución Industrial. Su capacidad para generar energía mecánica a partir del vapor de agua transformó la producción y el transporte. En la industria textil, permitió la mecanización de la fabricación de telas y prendas de vestir, acelerando los procesos de hilado y tejido.

Además, la máquina de vapor revolucionó la minería y la metalurgia al proporcionar energía para la extracción y procesamiento de minerales, impulsando la producción de hierro y acero. Sin embargo, el impacto más significativo de la máquina de vapor se vio en el transporte. La invención del ferrocarril y la locomotora de vapor inauguraron una nueva era de movilidad. Los ferrocarriles permitieron el transporte rápido y eficiente de bienes y personas, reduciendo drásticamente las distancias y acortando los tiempos de viaje. Con esto, ciudades que antes estaban aisladas se conectaron entre sí, lo que fomentó el comercio y el intercambio cultural [17].

3.1. Evolución de las máquinas de vapor y su aplicación en la locomoción

Cuando se habla de la máquina de vapor siempre acude a nuestra mente el nombre de James Watt. En el año 1769 desarrolló su patente, siendo la invención y catalizador más importante de la Revolución Industrial. Aunque se convirtió en su pionero principal [18], cabe destacar que el primer indicio de uso registrado de una máquina de este estilo data del siglo III a.C. de la mano de Arquímedes de Siracusa: el Architronito (Figura 2), un cañón que emplea la fuerza del vapor de agua que se aplicaba a técnicas de defensa del asedio del Imperio Romano [19],[20].

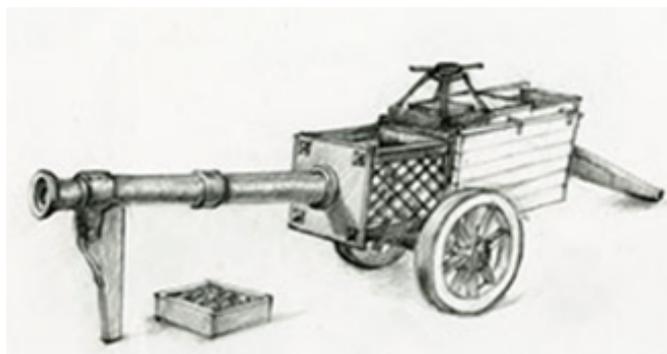


Figura 2: Boceto del Architrón, cañón de Arquímedes descrito por Leonardo Da Vinci [20]

No será hasta el siglo I d.C, en Egipto, cuando veamos descrito el invento de la primera máquina de vapor con turbina (Aelópilo, con fines lúdicos, Figura 3), atribuido a Herón de Alejandría, el cual también diseñó mecanismos de apertura de puertas del templo de Isis aplicando la fuerza del vapor de agua [19],[21].



Figura 3: Diseño del Aelópilo de Herón de Alejandría [21]

Habrá que pasar la Edad Media para encontrar los siguientes avances y aplicaciones de la máquina de vapor, siendo el más destacable el de Salomón Claus, que la aplicó para impulsar el flujo de agua en las fuentes.

Pero no será hasta 1680, cuando Denis Papin desarrolla el digestor de vapor (Figura 4), considerada la primera olla a presión con válvula de seguridad, llegando a la conclusión que calentando agua y enfriando el vapor se podían conseguir máquinas motrices para molinos, barcos e incluso vehículos automóviles [22]. Sin embargo, no se llegó a llevar a cabo ya que sus ideas chocaban con las limitaciones técnicas de la época y la falta de apoyo de sus compañeros [23].

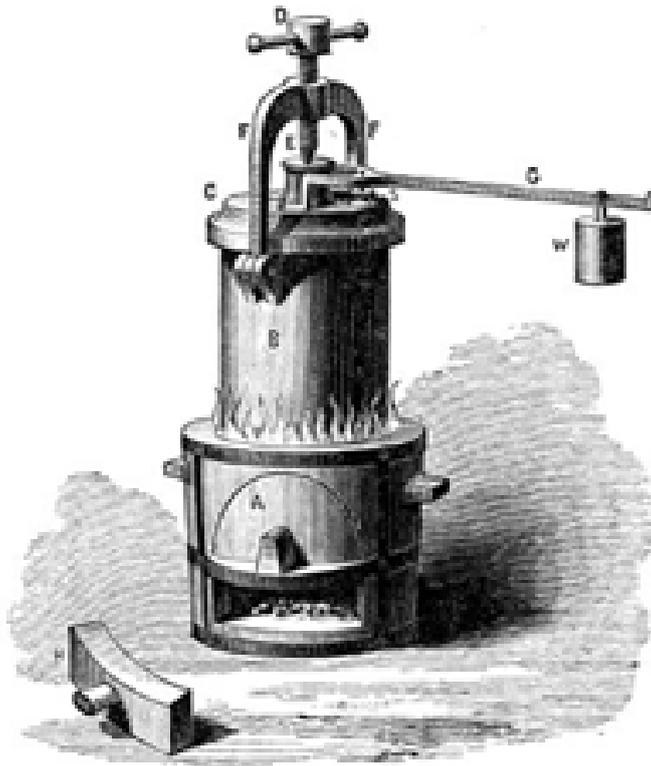


Figura 4: Boceto del digestor de vapor de Denis Papin [24]

Desde este momento, los estudios y desarrollo de la máquina de vapor crecen de manera exponencial: en 1663 se documenta la primera patente de la primera máquina de vapor por Edward Somerset, que basó sus estudios en los trabajos de Salomon Claus. Thomas Savery patentó en 1698 una máquina de extracción de agua de las minas empleando bomba de vapor atmosférica, aunque no se pudo emplear hasta 1712, cuando Thomas Newcomen introdujo todas sus mejoras. Aunque fueron avances muy importantes, las máquinas de vapor seguían siendo poco eficientes a la hora de trabajar y muy costosas para hacerlas funcionar [23],[25],[26].

Pasaron 50 años cuando James Watt introdujo todas las mejoras y modificacio-

nes necesarias a la máquina de Newcomen (condensador por separado, camisa de vapor, engrase de aceite, aislamiento del cilindro), y la hizo una máquina eficiente para el trabajo y con un funcionamiento de bajo coste [25],[27].

Con el paso de los años, esta máquina fue cada vez más perfeccionada y fueron surgiendo nuevas patentes pero, aunque en 1775 la máquina de Watt seguía siendo la más empleada [28], en 1787 Richard Trevithick construye la primera locomotora de vapor de alta presión, añadiendo mejoras a los anteriores modelos de máquinas de vapor. Principalmente, se centró en reducir el tamaño de las máquinas y añadirle unas calderas capaces de producir mayor presión, aumentando así su rendimiento. Diez años después, construye su primer modelo de vehículo, nombrado “Puffing Devil” (Figura 5), en el que motor y caldera eran una sola pieza, siendo uno de los primeros vehículos con autonomía y capaz de transportar personas, pero aún era poco eficiente al perder pronto la presión.

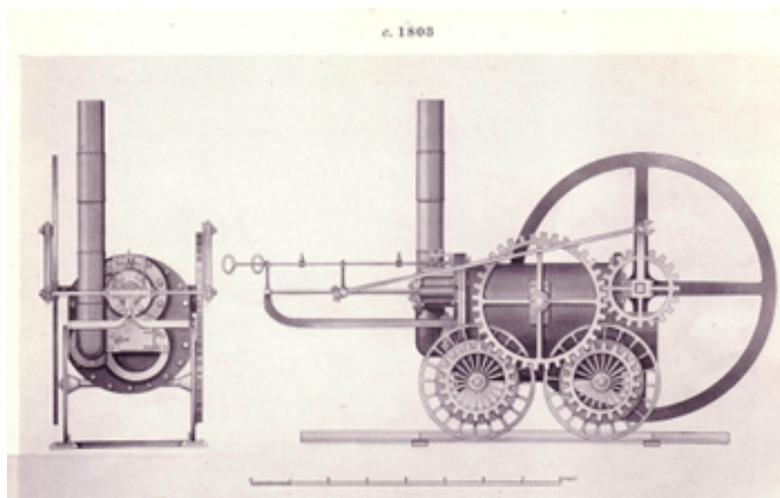


Figura 5: Imagen de la locomotora de Richard Trevithick, apodada “Puffing Devil”[3]

A partir del año 1800, se empiezan a poner en funcionamiento de manera eficiente las locomotoras y se empezaron a usar en transporte de pasajeros y materiales. Sin embargo, la idea de Trevithick de utilizar de un fuelle para avivar el fuego y usar un cilindro a modo de chimenea para el escape de vapor, cayó en el olvido hasta que George Stephenson lo utilizó para añadir mejoras a sus máquinas locomotoras, las cuales sí fueron ampliamente utilizadas para el transporte de pasajeros y mercancías [4],[15].

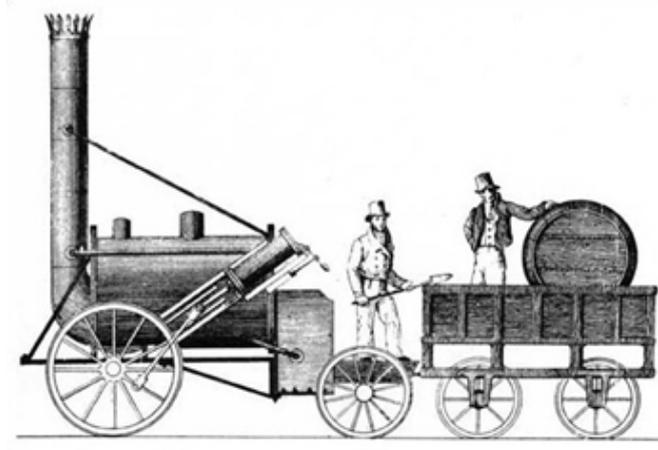


Figura 6: Boceto de la locomotora de George Stephenson, conocido como “The Rocket” [29]

A Trevithick nunca se le reconocieron sus aportaciones ni el impulso al desarrollo práctico de las locomotoras de vapor, a pesar de haber construido la que es considerada la primera de la historia. Hijo de un ingeniero de minas (trabajador de la mina de Dolcoath), destacó a edad temprana en aptitudes para la ingeniería, realizando sus estudios en Ingeniería de Minas en la Camborne School. Conforme adquiría experiencia profesional, iba experimentando para introducir mejoras a los motores de vapor con los que trabaja e iba avanzando en sus inventos (entre los que cabe destacar una bomba para achicar agua de la mina). Trevithick emigró por temas laborales a Sudamérica y no volvería a Inglaterra hasta 1827, totalmente arruinado. A pesar de sus mejoras a las máquinas de vapor de entonces y de sus inventos, no consiguió el reconocimiento que merecía de sus coetáneos, falleciendo en 1833, quedó su nombre en el olvido, que hasta hace poco no ha sido reconocido en muchos libros de historia [4],[15].

3.2. Precedentes e inspiraciones para el desarrollo del carro de vapor de Trevithick

Tal y como se ha puesto de manifiesto en el contexto histórico, el ser humano lleva empleando la energía producida por el vapor de agua desde hace más de dos mil años y durante todo este tiempo se han ido perfeccionando los diferentes tipos de máquinas.

En este trabajo, se ha puesto el foco en el modelo desarrollado por Richard Trevithick, el cual optimiza el patentado por James Watt. Trevithick consigue esta optimización gracias a la introducción de diferentes mejoras, como por ejemplo, reducir el tamaño de la máquina, construir de forma efectiva calderas que llegan a presiones más altas (y por lo tanto aportan mayor rendimiento) e innova también al emplear una barra de hierro al rojo vivo que se introducía en el tubo de calefacción para generar calor en lugar del carbón [30].

La máquina de vapor de Richard Trevithick es una evolución de las de Newcomen y Savery, por lo que a continuación se explica cómo funcionaban éstas y cómo Trevithick las mejoró.

3.2.1. Máquina de vapor de Savery

La máquina de vapor de Thomas Savery (1650-1715), también conocida como “la máquina de vapor atmosférica”, fue uno de los primeros intentos de utilizar vapor para realizar trabajo mecánico. Savery, un ingeniero e inventor inglés, desarrolló su máquina de vapor en el contexto del siglo XVII y la patentó en el 1698. Su invención se centró en la necesidad de bombear agua de las minas de carbón inundadas en Inglaterra, una tarea crucial para la industria en ese momento. Su diseño era relativamente simple pero ingenioso para su época [11],[31],[32]:

- Caldera: la máquina de Savery contaba con una caldera en la que se calentaba agua. La fuente de calor generalmente era una hoguera de carbón o leña.
- Cilindro de vapor: desde la caldera, el vapor se dirigía a un cilindro de vapor. Este cilindro era una estructura metálica hermética con una tapa móvil. El cilindro estaba sumergido en el agua que se deseaba bombear desde las minas.
- Vaciado del cilindro: después de que el cilindro se llenaba de vapor, se rociaba agua fría sobre su parte exterior. Esto enfriaba el vapor y creaba un vacío parcial en el interior del cilindro.
- Presión atmosférica: la presión atmosférica circundante ejercía presión sobre la tapa móvil del cilindro, lo que hacía que se moviera hacia abajo, succionando agua de la mina a través de una tubería conectada a la parte inferior del cilindro.
- Elevación del agua: una vez que la tapa móvil del cilindro descendía completamente, se cerraba la válvula de vapor y se abría una válvula de escape.

Esto permitía que la presión atmosférica volviera a elevar la tapa móvil del cilindro y expulsara el agua hacia arriba a través de otra tubería conectada a la parte superior del cilindro.

- Descarga del agua: el agua bombeada desde la mina se recogía en un depósito y podía ser utilizada o transportada según las necesidades.

El funcionamiento de la máquina de vapor de Savery se basaba en el principio de que la vaporización y la condensación del agua podían crear un vacío parcial en un cilindro y, al aprovechar la presión atmosférica, permitir la elevación del agua desde niveles más bajos hasta niveles más altos. Aunque su diseño era ingenioso, la máquina de Savery tenía limitaciones en términos de eficiencia y potencia, y no podía elevar agua a grandes alturas ni en grandes cantidades [33].

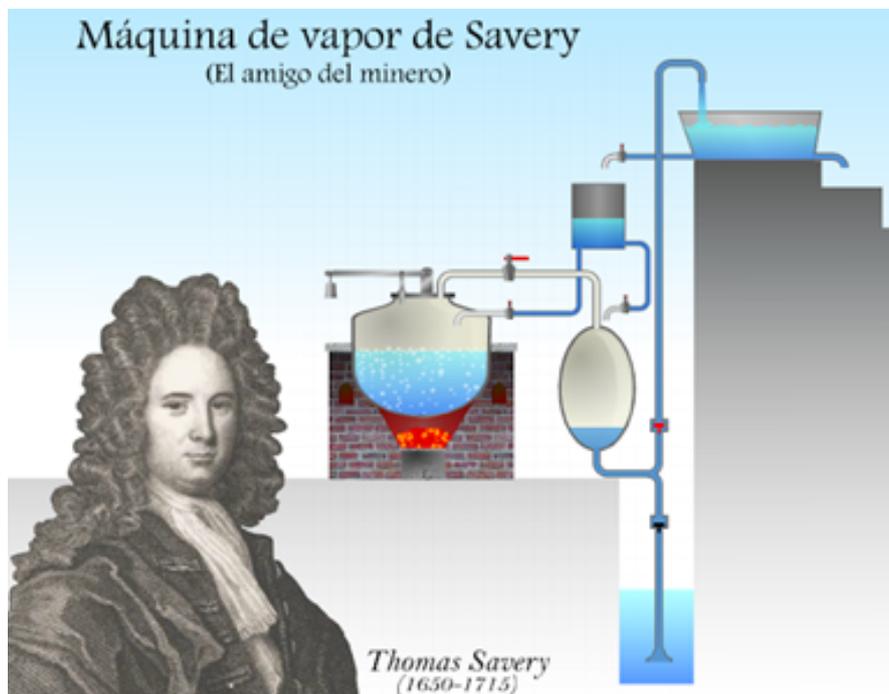


Figura 7: Máquina de vapor de Thomas Savery [26]

A pesar de sus limitaciones, la máquina de vapor de Savery fue un paso importante en el desarrollo de la tecnología de vapor y desempeñó un papel en la industria minera de la época al ayudar en el drenaje de las minas inundadas. Sin embargo, posteriormente, las mejoras realizadas por inventores como Thomas

Newcomen y James Watt llevaron a diseños de máquinas de vapor más eficientes y poderosas que revolucionaron la Revolución Industrial.

3.2.2. Máquina de vapor de Newcomen

Thomas Newcomen (1664-1729), herrero e inventor inglés, construyó y registró su máquina de vapor por primera vez en el año 1712. Al igual que pasó con Savery, su invención surgió como una solución a la creciente necesidad de bombear agua de las minas de carbón en Inglaterra, donde la industria del carbón estaba en auge. El diseño de la máquina de vapor de Newcomen fue bastante parecido al de Savery, ya que fueron prácticamente sucesivos cronológicamente [34],[35].

La principal diferencia en el diseño de ambas máquinas de vapor radicaba en cómo manejaban la generación de vapor. En el diseño de Savery, se utilizaba una única caldera donde el agua se calentaba directamente y se convertía en vapor. El vapor resultante se dirigía directamente al cilindro sin pasar por un proceso de enfriamiento previo. En cambio, en la máquina de vapor de Newcomen, se empleaba una caldera separada para generar vapor. Este vapor se transfería desde la caldera a través de tuberías hacia el cilindro de vapor [33].

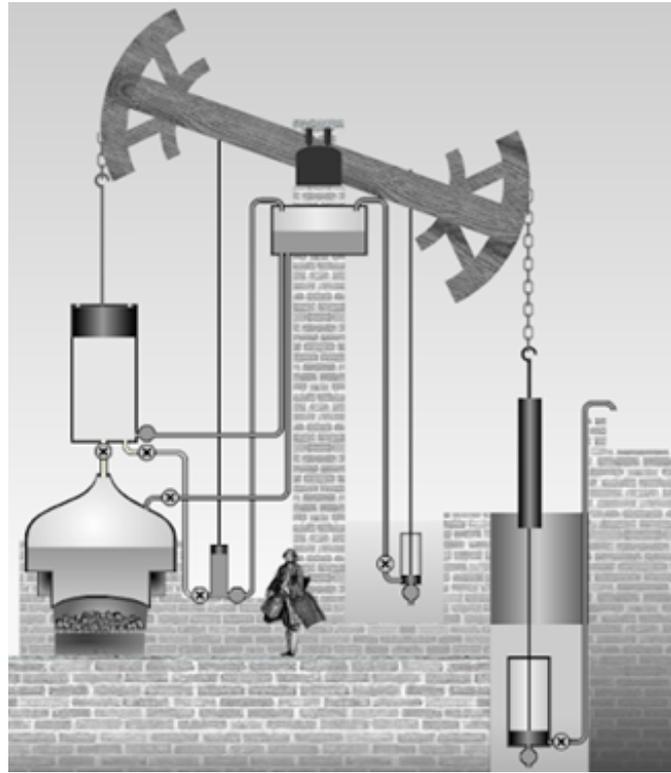


Figura 8: Máquina de vapor de Thomas Newcomen [26]

El ciclo de operación de ambas máquinas también difería. En el diseño de Savery, el ciclo se basaba en el principio de la condensación del vapor mediante el contacto directo con agua fría. Este proceso creaba un vacío en el cilindro que succionaba agua desde las minas, pero no involucraba un pistón móvil en el cilindro. En contraste, la máquina de vapor de Newcomen introducía un pistón móvil en el cilindro. Su ciclo de operación incluía la inyección de agua fría en el cilindro después de que el vapor hubiera empujado el pistón hacia arriba. La presión atmosférica empujaba el pistón hacia abajo y volvía a llenar el cilindro de vapor [35].

También fue muy significativa la diferencia en eficiencia que había entre ambas máquinas. La máquina de Savery era menos eficiente en términos de consumo de energía y tenía un rendimiento limitado en la elevación del agua a alturas significativas. Además, no era adecuada para aplicaciones industriales a gran escala. Por otro lado, la máquina de Newcomen mejoró la eficiencia en comparación con la de Savery, lo que la hizo más adecuada para la industria minera, ya que podía elevar agua desde profundidades mayores y se convirtió en una herramienta esencial para la industria minera de la época [11],[35].

En cuanto a la presión del vapor, la máquina de Savery no requería altas presiones de vapor, ya que su acción principal era la creación de un vacío para succionar agua. En contraste, la máquina de Newcomen trabajaba con presiones de vapor ligeramente más altas, pero aún no alcanzaba las presiones significativas que se verían en las posteriores máquinas de vapor como la de Richard Trevithick.

3.2.3. Máquina de vapor de James Watt

La máquina de vapor del ingeniero escocés James Watt (1736-1819), se considera una versión mejorada de la máquina de vapor de fines del siglo XVIII y fue uno de los avances más influyentes de la Revolución Industrial. Su invención fue un paso fundamental en la mecanización de la industria y el transporte, ya que permitía la conversión eficiente de energía térmica en trabajo mecánico. El diseño de la máquina de vapor del británico incorporó varias mejoras significativas en comparación con los modelos de máquinas de vapor anteriores, como la de Thomas Newcomen [11],[27],[30],[36]:

- **Cilindro de doble acción:** Watt diseñó un cilindro de doble acción, lo que significa que el vapor actuaba tanto en el lado superior como en el inferior del pistón. Esto permitía que el pistón se moviera hacia arriba y hacia abajo en cada ciclo, lo que aumentaba la eficiencia y la potencia de la máquina.
- **Condensador externo:** Watt separó el cilindro de vapor y el condensador. En la máquina de Newcomen, estos dos componentes estaban en la misma cámara. Al separarlos, Watt logró un ciclo más eficiente, ya que podía enfriar el vapor en el condensador, creando un vacío parcial en el cilindro que ayudaba a mover el pistón hacia abajo.
- **Mecanismo de biela y manivela:** James Watt introdujo un mecanismo de biela y manivela para convertir el movimiento alternativo del pistón en un movimiento rotativo. Esta innovación fue clave para aplicaciones industriales, ya que permitía usar la potencia de la máquina para realizar trabajo mecánico, como hacer funcionar máquinas textiles o bombear agua.

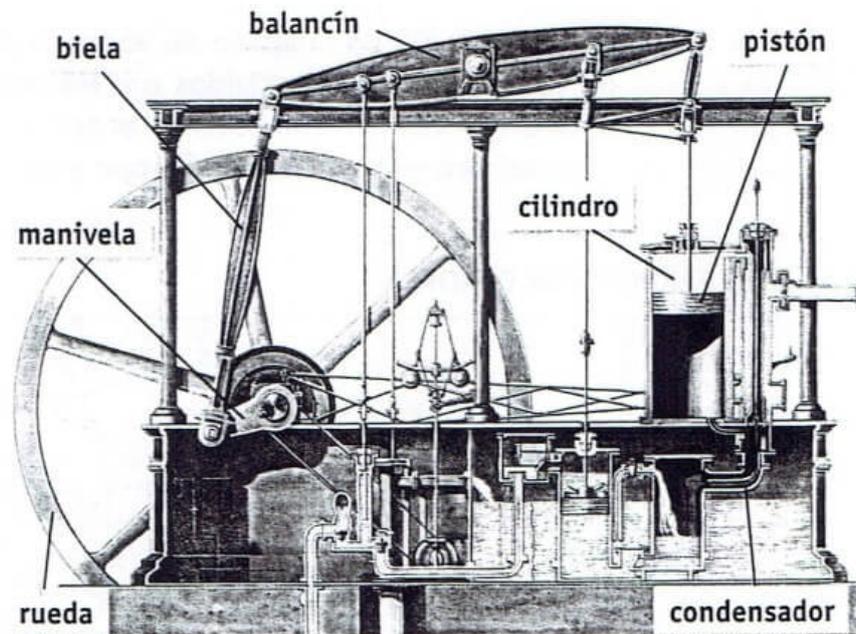


Figura 9: Máquina de vapor de James Watt [37]

Y su funcionamiento se puede dividir en varios pasos:

- Admisión de vapor: el vapor se introducía en el cilindro del motor y actuaba sobre el pistón desde arriba y desde abajo. El vapor caliente empujaba el pistón hacia arriba.
- Enfriamiento y condensación: luego de que el pistón alcanzaba su punto más alto, se abría una válvula de escape y el vapor caliente se dirigía al condensador externo. En el condensador, se enfriaba rápidamente y se convertía en agua. Esto creaba un vacío parcial en el cilindro, ayudando a mantener el pistón en movimiento hacia abajo.
- Movimiento de la biela y la manivela: el movimiento alternativo del pistón se convertía en movimiento rotativo a través de una biela conectada a una manivela. Esta manivela podía ser utilizada para realizar trabajo útil, como mover ruedas, bombear agua o impulsar maquinaria en fábricas.
- Escape del agua condensada: el agua condensada se eliminaba del condensador, generalmente mediante una bomba de agua o un proceso de drenaje, para permitir que el ciclo se repitiera.

Este proceso de admisión de vapor, enfriamiento, conversión de movimiento lineal en movimiento rotativo y eliminación del agua condensada se repetía continuamente, lo que permitía que la máquina de vapor de Watt generara energía mecánica de manera eficiente y se convirtiera en una fuerza motriz fundamental en la Revolución Industrial. Esta invención contribuyó en gran medida al crecimiento de la industria y la transformación del transporte en el siglo XIX.

4. Impacto y legado del carro de vapor de Trevithick

4.1. Recepción y reacción de la sociedad de la época

El carro de vapor construido por Richard Trevithick en 1801 tuvo un impacto significativo en la sociedad de la época y dejó un legado duradero en la historia de la tecnología y el transporte. Aquí se detalla el impacto de esta invención desde la perspectiva de la recepción y reacción de la sociedad de la época [15]:

- Primer vehículo autopropulsado: el carro de vapor de Trevithick fue uno de los primeros intentos exitosos de crear un vehículo que pudiera moverse por sí mismo sin depender de animales o tracción humana. Esto fue revolucionario en un momento en que los medios de transporte eran principalmente tracción animal y barcos a vela [3].
- Cambios en la industria y el transporte: el carro de vapor demostró el potencial de la energía del vapor como fuente de movimiento. Esto allanó el camino para el desarrollo de locomotoras de vapor y barcos de vapor, lo que cambió radicalmente la industria y el transporte al permitir un movimiento más rápido y eficiente de mercancías y personas.
- Aplicaciones en la minería y la industria: además del transporte, la máquina de vapor de Trevithick se utilizó en la minería y la industria para bombear agua de las minas y alimentar maquinaria. Esto contribuyó al crecimiento y la expansión de la industria y la economía [30].

Sin embargo, la reacción inicial de la sociedad ante esta nueva tecnología fue mixta. Aunque muchos veían el potencial revolucionario de la energía del vapor, hubo escepticismo y cautela en ciertos sectores. Algunos individuos consideraban que la máquina de vapor podía ser peligrosa o poco confiable, lo que generó dudas sobre su viabilidad a largo plazo. Además, la búsqueda de inversores y financiamiento para esta novedosa forma de transporte también enfrentó desafíos, ya que algunos empresarios eran reticentes a respaldar una tecnología sin precedentes.

No obstante, el éxito del carro de vapor de Trevithick influyó en la percepción pública del vapor como una fuente confiable y efectiva de energía. Esto, a su vez, facilitó la aparición de desarrollos posteriores en la tecnología de vapor. Uno de los

legados más duraderos del carro de vapor fue su contribución al desarrollo de locomotoras de vapor y sistemas ferroviarios. Esta innovación transformó por completo el transporte terrestre, permitiendo el movimiento rápido y eficiente de personas y mercancías, y desempeñó un papel fundamental en la Revolución Industrial al impulsar la mecanización de la industria [15].

4.2. Influencia en el desarrollo de la tecnología de transporte

El carro de vapor desarrollado por Richard Trevithick en 1801 tuvo una influencia fundamental en el desarrollo de la tecnología de transporte, desencadenando una serie de avances y transformaciones que marcaron el camino para la Revolución Industrial y la modernización del transporte en general. La invención de Trevithick influyó en el desarrollo de la tecnología de transporte de varias maneras [2]:

- Impulso a la locomotora de vapor: el carro de vapor de Trevithick demostró que el vapor podía utilizarse de manera eficaz para propulsar vehículos. Esto inspiró a otros inventores y pioneros, como George Stephenson, a perfeccionar la locomotora de vapor. Las locomotoras de vapor revolucionaron el transporte ferroviario al permitir el movimiento rápido y eficiente de personas y mercancías a largas distancias.
- Desarrollo de ferrocarriles: la invención de la locomotora de vapor y su aplicación en los ferrocarriles transformaron considerablemente el transporte terrestre. Los ferrocarriles comenzaron a expandirse ampliamente a medida que se demostraba su eficacia y se construían líneas de ferrocarril para conectar regiones distantes. Esto tuvo un impacto masivo en la economía al facilitar el comercio y la industrialización [37].
- Cambio en la movilidad urbana: el desarrollo de locomotoras de vapor y ferrocarriles también influyó en la movilidad dentro de las ciudades. Los sistemas de tranvías tirados por caballos y más tarde por locomotoras eléctricas tomaron forma, permitiendo un transporte público más eficiente y rápido dentro de las áreas urbanas.
- Desarrollo de barcos de vapor: la exitosa aplicación del vapor en el transporte terrestre también inspiró la creación de barcos de vapor. Los motores de vapor se adaptaron para impulsar barcos, lo que revolucionó el transporte marítimo

al reducir drásticamente los tiempos de viaje y permitir el transporte masivo de carga y pasajeros por agua.

- Impacto en la Revolución Industrial: la combinación de la locomotora de vapor y los ferrocarriles tuvo un papel crucial en la Revolución Industrial al permitir la rápida distribución de materias primas y productos manufacturados. Esto impulsó la producción en masa y la expansión de la industria, al tiempo que generó un aumento en la demanda de recursos naturales [8].
- Cambio en la estructura urbana: el desarrollo de tecnologías de transporte basadas en vapor influyó en la configuración de las ciudades. Las líneas de ferrocarril y los sistemas de transporte público afectaron la planificación urbana, facilitando la expansión de las ciudades y su conectividad con otras regiones.

4.3. Comparativa con otros medios de transporte de la época

El carro de vapor de Trevithick se destacó notablemente cuando se comparó con otros medios de transporte de la época, aunque también presentó desafíos únicos en comparación con alternativas ya existentes.

En primer lugar, en contraste con el transporte a tracción animal, el carro de vapor ofrecía una ventaja significativa al eliminar la dependencia de la fuerza física de los animales. Esto permitía una mayor velocidad y eficiencia en viajes de larga distancia y terrenos variados, además de una eficiencia y utilidad notables en la industria y el comercio, al permitir el movimiento de grandes volúmenes de mercancías. Sin embargo, la complejidad operativa y los requisitos de mantenimiento de la tecnología del vapor a menudo resultaban desafiantes, ya que requerían una infraestructura adecuada para un funcionamiento óptimo, como caminos o vías de ferrocarril bien construidos [2].

En el ámbito marítimo, el carro de vapor también marcó una diferencia considerable al compararse con los barcos a vela. Los barcos de vapor ofrecían una ventaja crucial al no depender de los vientos para navegar, lo que aumentaba su fiabilidad y control direccional. Además, estos barcos mantenían velocidades constantes, lo que acortaba los tiempos de viaje y mejoraba la capacidad de transporte. A pesar de estas ventajas, las complicaciones radicaban en el consumo significativo de combustible, generalmente carbón, necesario para propulsar los motores de

vapor. Además, la tecnología de motores de vapor estaba en sus primeras etapas de desarrollo, lo que generaba cuestiones de eficiencia y confiabilidad.

5. Selección de software

En esta sección se tratará de explicar por qué se tomó la decisión de usar el CATIA V5 frente a otros software. Se resumirán los distintos programas que fueron planteados para usar al comienzo de este proyecto junto a sus ventajas e inconvenientes que han llevado a tomar la decisión final.

5.1. Sistemas CAD

5.1.1. Siemens NX

Siemens NX es un software de diseño y fabricación utilizado en diversas industrias. Sus ventajas incluyen ser una suite integral que abarca diseño, simulación, fabricación y gestión de datos, un potente modelado 3D, simulación avanzada, y herramientas de colaboración. Sin embargo, requiere mucho tiempo alcanzar un nivel óptimo de usuario para las funciones más básicas, es costoso en términos de licencias y capacitación, requiere hardware potente y puede tener una interfaz complicada. Además, su integración con otros software puede ser desafiante, y necesita recursos significativos de hardware para funcionar de manera óptima. La elección de Siemens NX depende de las necesidades y recursos específicos de cada organización [38].

5.1.2. Solid Edge

Solid Edge es una destacada solución de diseño asistido por computadora (CAD) desarrollada por Siemens Digital Industries Software. Este software es ampliamente utilizado en diversas industrias, como la ingeniería mecánica y la fabricación, para el diseño y desarrollo de productos. Ofrece un conjunto completo de herramientas de modelado en 3D y 2D, simulación, gestión de datos y colaboración que permiten a los diseñadores e ingenieros crear productos innovadores y eficientes [39].

Entre las ventajas de Solid Edge se encuentra su interfaz de usuario intuitiva, que facilita su aprendizaje y uso, incluso para usuarios nuevos en CAD. Una característica destacada es su capacidad de modelado síncrono, que permite modificar geometrías de manera flexible y eficiente, acelerando el proceso de diseño. Además, Solid Edge ofrece herramientas de simulación integradas para analizar el

rendimiento de los productos antes de su fabricación, lo que contribuye a la toma de decisiones informadas. La capacidad de colaboración en equipo y la gestión de datos mejoran la eficiencia de los proyectos.

Sin embargo, Solid Edge no está exento de desventajas. La curva de aprendizaje puede ser pronunciada para algunas de sus características más avanzadas, lo que puede requerir tiempo y capacitación adicional. Además, como con cualquier software CAD, el costo de las licencias y el hardware necesario pueden ser una inversión significativa para algunas organizaciones. La integración con otros sistemas de software puede ser un desafío en entornos donde se utilizan múltiples aplicaciones. En general, la elección de Solid Edge dependerá de las necesidades y recursos específicos de cada usuario o empresa [40],[41].

5.1.3. SolidWorks

SolidWorks es una destacada solución de diseño asistido por computadora (CAD) desarrollada por Dassault Systèmes. Este software se utiliza ampliamente en diversas industrias para el diseño y desarrollo de productos. Ofrece una amplia gama de herramientas de modelado en 3D y 2D, simulación, gestión de datos y documentación técnica.

Una de las ventajas de SolidWorks se encuentra su enfoque intuitivo y orientado al diseño. Su interfaz de usuario es amigable y facilita la creación de modelos 3D y 2D, lo que resulta en una curva de aprendizaje más suave en comparación con algunos otros programas CAD. Además, SolidWorks ofrece una excelente integración de simulación, lo que permite a los usuarios evaluar el rendimiento y la resistencia de los productos antes de su fabricación. También es conocido por su amplia comunidad de usuarios y la disponibilidad de recursos de aprendizaje en línea.

Por otro lado, el modelado de superficies complejas en SolidWorks puede ser un desafío. Aunque el software es altamente competente en el modelado de piezas sólidas, puede resultar menos eficiente al trabajar con geometrías superficiales complejas y detalladas, lo que puede requerir técnicas más avanzadas y tiempo adicional para lograr los resultados deseados. Además, SolidWorks tiene un motor de renderizado relativamente limitado en comparación con software especializado en renderizado y visualización. Esto puede ser un inconveniente si se requiere una representación altamente detallada y realista de los diseños en 3D, como conseguimos con el CATIA V5 [41],[42].

5.1.4. AUTODESK

Entre las ventajas de los productos Autodesk se encuentra la versatilidad. Autodesk ofrece una variedad de programas de software, como AutoCAD, Revit, Maya, Fusion 360 y muchos otros, diseñados para satisfacer las necesidades específicas de diferentes industrias y disciplinas de diseño. Esto permite a los usuarios encontrar la herramienta adecuada para su proyecto. La interoperabilidad es otra ventaja a destacar, ya que muchos productos de Autodesk están diseñados para funcionar de manera conjunta y permiten la colaboración efectiva entre equipos multidisciplinarios. Además, Autodesk ofrece una amplia comunidad de usuarios y recursos de aprendizaje en línea, lo que facilita el aprendizaje y el soporte técnico.

No obstante, también existen inconvenientes. En primer lugar, el costo puede ser un inconveniente significativo, ya que las licencias de software de Autodesk pueden ser caras, especialmente para pequeñas empresas y usuarios individuales. Además, algunos usuarios pueden encontrar que la curva de aprendizaje es muy pronunciada, especialmente para software más avanzado como AutoCAD Civil 3D o Autodesk Inventor. La dependencia de la nube para ciertas funcionalidades también puede generar preocupaciones de seguridad y disponibilidad en entornos donde la conectividad no es constante [43].

5.2. Justificación del software utilizado: CATIA V5

CATIA V5 destaca como una solución integral y versátil en el ámbito del diseño y modelado 3D, ensamblaje, simulación de movimientos y renderizado.

Posee una alta capacidad para crear piezas de geometrías complejas con precisión y su posterior ensamblaje, lo que es esencial para unir múltiples componentes de manera eficiente y garantizar la coherencia en el diseño final.

La simulación de movimientos es otro aspecto fundamental. CATIA V5 proporciona módulos específicos que permiten evaluar cómo interactúan los componentes de un ensamblaje en movimiento, esenciales para asegurarse de que los productos funcionen adecuadamente y sean eficientes antes de la producción.

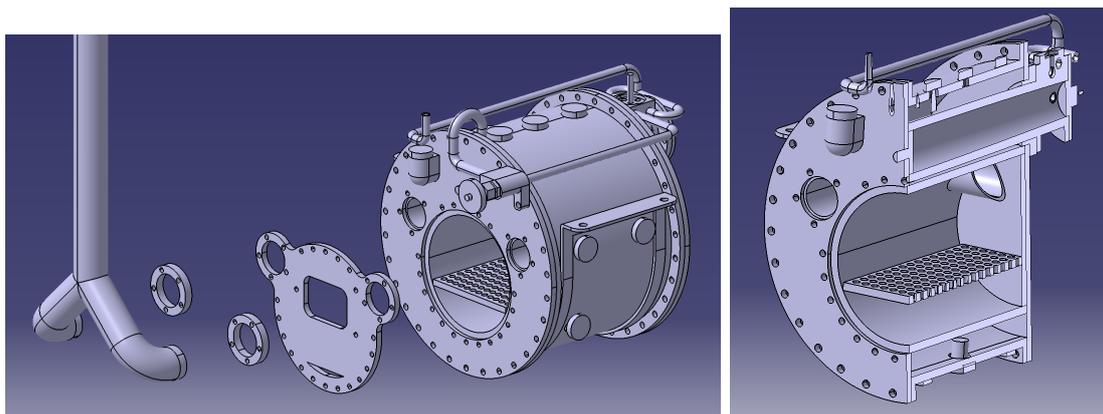
En cuanto al renderizado, CATIA V5 ofrece herramientas avanzadas que permiten crear imágenes y visualizaciones realistas de los modelos 3D. Esto resulta crucial para presentar los diseños de manera atractiva y comunicar ideas de diseño de manera efectiva [44].

6. Análisis técnico y consideraciones de ingeniería en el modelado 3D

6.1. Descripción detallada del diseño y componentes del carro de vapor

El carro de vapor de Trevithick fue uno de los primeros vehículos de vapor en funcionar exitosamente en una carretera pública [15]. Tenía un diseño simple pero efectivo y en este trabajo se han modelado todas las piezas que aparecen en los planos de [1]. Se describirán aquí las partes más relevantes para el funcionamiento de este carro de vapor:

- Caldera:
 - El corazón del vehículo era su caldera. Esta caldera, que estaba ubicada en la parte trasera del carro, era el lugar donde se calentaba agua para convertirla en vapor. La caldera era cilíndrica y estaba construida en hierro fundido. Dentro de la caldera, el agua se calentaba mediante una hoguera alimentada con carbón o madera.
 - A medida que el fuego calentaba la caldera, el agua se evaporaba, creando vapor a alta presión. Esta alta presión era esencial para generar la fuerza necesaria para propulsar el vehículo.



(a) Despiece de caldera.

(b) Sección de la caldera.

Figura 10: Caldera y tubo de escape de gases de combustión.

- Cilindro y pistón:
 - Desde la caldera, el vapor generado se dirigía hacia un cilindro, que era también cilíndrico y estaba diseñado para resistir la alta presión del vapor.
 - En el interior del cilindro, un pistón podía moverse hacia adelante y hacia atrás. El pistón estaba sellado herméticamente contra las paredes del cilindro para evitar la fuga de vapor.
 - La dirección del movimiento del pistón se determinaba por la entrada y la salida del vapor. Cuando el vapor se introducía en un extremo del cilindro, empujaba el pistón en esa dirección, y cuando se liberaba el vapor, el pistón se movía en la dirección opuesta.
- Mecanismo biela-cigüeñal:
 - El extremo del pistón está unido a una estructura que avanza y retrocede a través de un carril de guías horizontales.
 - Esta estructura solidaria al pistón va articulada con un extremo de la biela, que se ve arrastrada por el movimiento del pistón hacia adelante y hacia atrás.
 - El otro extremo de la biela está conectado al cigüeñal, transformando así el movimiento rectilíneo del pistón en uno rotatorio que el cigüeñal transmitirá a las ruedas.

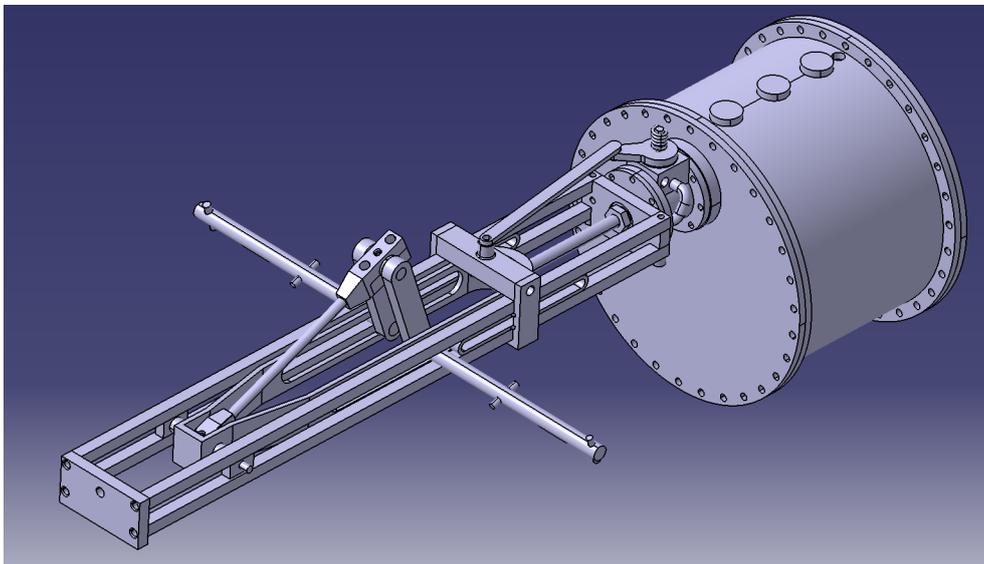


Figura 11: Pistón, biela y cigüeñal.

- Ruedas motrices: una característica distintiva del diseño de Trevithick era el uso de ruedas motrices con dientes, similar a un engranaje. Estas ruedas estaban conectadas directamente al pistón del cilindro a través del mecanismo biela-cigüeñal y eran esenciales para la tracción y el movimiento del carro [30].

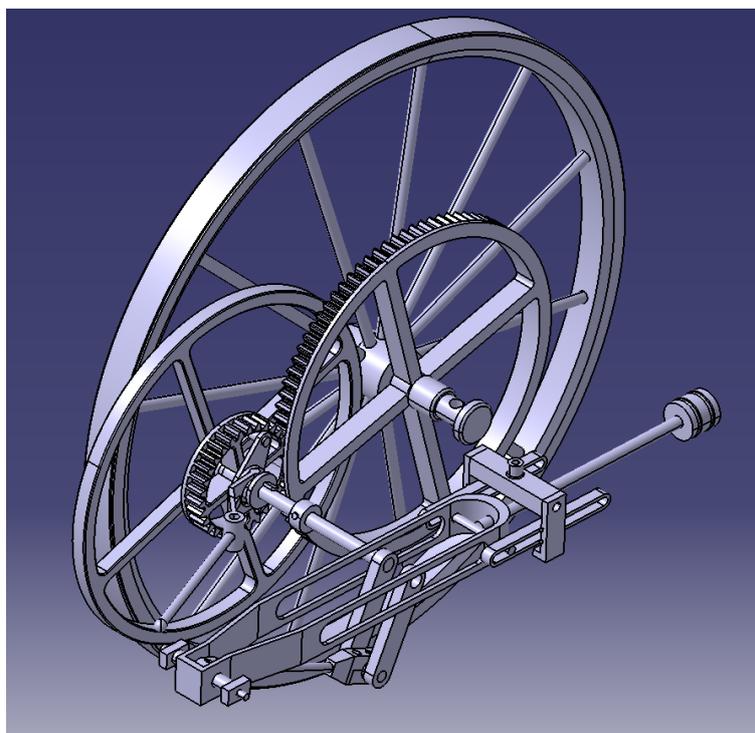


Figura 12: Ruedas motrices.

- Piezas estándar: como tornillos, pasadores y tuercas. Aunque su diseño no ha sido parte de este trabajo porque ya se pueden encontrar en la biblioteca de CATIA [45], se han importado una a una según fuera necesario teniendo en cuenta que sus propiedades principales (longitud, diámetro, etc.) coincidan con las requeridas por las piezas donde van ensambladas. En total se pueden contar un total de 178 piezas estándar que han sido ensambladas, como se puede ver en la Figura 13.

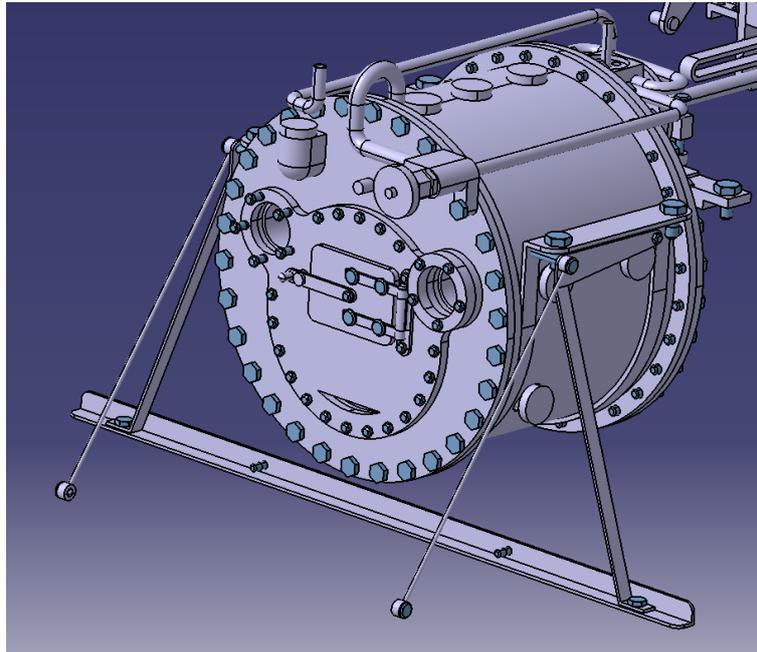


Figura 13: Ensamblaje de piezas estándar en la caldera y alrededores.

Aunque aquí solo se haya descrito un grupo reducido de piezas, en total aparecen 135 piezas individuales distintas, algunas de ellas repetidas en varias zonas del carro. Si se considera el carro completo como el nivel 1 del ensamblaje completo, habría 50 componentes en un nivel 2 inmediatamente inferior, que ensamblan entre ellos. En la Tabla 1 se pueden ver todas las componentes de este nivel 2, que las podemos clasificar como piezas individuales (marcadas como tipo “P”) y subconjuntos (marcados como tipo “SC”); estos subconjuntos son a su vez se pequeños montajes de otras piezas que ya serían de nivel 3.

6.1 Descripción detallada del diseño y componentes del carro de vapor

Tipo	Cantidad	Part Number	Nombre
SC	1	09E-32-00-1-01	CHASIS
P	2	09E-32-00-1-02	COJINETE RUEDA TRASERA
P	2	09E-32-00-1-03	COJINETE CIGÜEÑAL
SC	1	09E-32-00-1-04	CARRIL DE GUÍA
P	1	09E-32-00-1-05	SOPORTE DE CALDERA
P	2	09E-32-00-1-06	GUÍA PALANCA DE DESENGRANAJE
SC	2	09E-32-00-1-07	EJE RUEDA TRASERA
SC	1	09E-32-00-1-08	CALDERA
SC	1	09E-32-00-1-09	CILINDRO
P	1	09E-32-00-1-10	TUBO ESCAPE HUMOS CALDERA
SC	1	09E-32-00-1-11	TUBO ESCAPE EXTERIOR
P	4	09E-32-00-1-12	MANGUITO CALDERA
P	2	09E-32-00-1-12	MANGUITO CALDERA
P	1	09E-32-00-1-12	MANGUITO CALDERA
P	1	09E-32-00-1-13	TUBO INTERNO CILINDRO
P	1	09E-32-00-1-14	TUBO EXTERNO CILINDRO
P	1	09E-32-00-1-15	TUBO SUMINISTRO VAPOR
P	1	09E-32-00-1-16	TUBO SUMINISTRO VAPOR CALDERA
SC	1	09E-32-00-1-17	VÁLVULA SUMINISTRO DE VAPOR
SC	1	09E-32-00-1-18	SOPORTE TRASERO PARA CARGA
SC	2	09E-32-00-1-19	GUÍA SOPORTE TRASERO
P	1	09E-32-00-1-20	TUBO ESCAPE CILINDRO
SC	1	09E-32-00-1-21	PUERTA CÁMARA COMBUSTIÓN
P	1	09E-32-00-1-22	REPOSAPIÉS
P	1	09E-32-00-1-23	SOPORTE REPOSAPIÉS
SC	1	09E-32-00-1-24	ASIENTO CONDUCTOR
P	2	09E-32-00-1-25	ESCALÓN CORTO
P	2	09E-32-00-1-26	ESCALÓN LARGO
P	4	09E-32-00-1-27	PILAR CABINA PASAJEROS
P	4	09E-32-00-1-28	ANILLA
P	4	09E-32-00-1-29	CORREA DE CUERO
SC	1	09E-32-00-1-30	CABINA PASAJEROS
P	1	09E-32-00-1-31	VIGA TRANSVERSAL CHASIS
SC	1	09E-32-00-1-32	TECHO CABINA PASAJEROS
SC	1	09E-32-00-1-33	PUERTA CABINA PASAJEROS
SC	1	09E-32-00-2-01	CIGÜEÑAL
SC	1	09E-32-00-2-02	CRUCETA CILINDRO-BIELA
SC	1	09E-32-00-2-03	BIELA
P	2	09E-32-00-2-04	RUEDA ENGRANAJE CIGÜEÑAL
SC	2	09E-32-00-2-06	BRAZO DESENGRANAJE
P	2	09E-32-00-2-07	PALANCA DE DESENGRANAJE
SC	2	09E-32-00-2-08	ENGRANAJE RUEDA TRASERA
P	24	09E-32-00-2-09	RADIO RUEDA TRASERA
SC	2	09E-32-00-2-10	LLANTA RUEDA TRASERA
SC	1	09E-32-00-2-11	MANILLAR RUEDA DELANTERA
SC	1	09E-32-00-2-12	RUEDA DELANTERA
P	1	09E-32-00-2-13	VÁLVULA CONTROL VAPOR
P	1	09E-32-00-2-14	VÁLVULA RESORTE
P	1	09E-32-00-2-15	UNIÓN VÁLVULA BLOQUEO
SC	1	09E-32-00-2-16	DESLIZADERA

Tabla 1: Lista de piezas y subconjuntos.

6.2. Funcionamiento del carro de vapor

El carro de vapor de Trevithick fue bastante innovador, aunque su funcionamiento era relativamente sencillo:

- Generación de vapor:
 - El proceso de funcionamiento del carro de vapor comenzaba con la generación de vapor en la caldera. Esta caldera era una estructura resistente construida para contener agua y soportar altas temperaturas y presiones. Se ubicaba en la parte trasera del vehículo.
 - Para iniciar el viaje, se encendía una hoguera debajo de la caldera. El calor proveniente de la hoguera calentaba el agua contenida en la caldera, lo que provocaba que esta agua se convirtiera en vapor.
- Movimiento del pistón:
 - El cilindro era una cámara herméticamente sellada, en cuyo interior un pistón estaba libre para moverse hacia adelante y hacia atrás. Cuando el vapor se introducía en un extremo del cilindro, ejercía presión sobre el pistón, empujándolo hacia adelante con fuerza.
 - La conexión entre el pistón y las ruedas motrices era crucial. Un mecanismo de biela y cigüeñal transformaba el movimiento lineal del pistón en un movimiento rotativo. La biela conectaba el extremo superior del pistón con el cigüeñal, que a su vez estaba conectado a las ruedas motrices.
- Desplazamiento: cuando el cigüeñal hacía girar las ruedas motrices del vehículo, se proporcionaba la fuerza motriz necesaria para que el carro se moviera hacia adelante. El vehículo avanzaba sobre sus ruedas gracias a la tracción generada por la rotación de las mismas.
- Repetición del ciclo: el proceso mencionado se repetía continuamente en un ciclo mientras el vehículo estaba en movimiento. Cuando el pistón alcanzaba el punto más alto de su movimiento, la válvula de admisión se abría para permitir que el vapor se dirigiera al otro extremo del cilindro, empujando el pistón hacia abajo, lo que mantenía en movimiento perpetuo a las ruedas [30].

Este ciclo continuo de generación de vapor, movimiento del pistón y rotación de las ruedas permitía que el carro de vapor de Trevithick se desplazara sobre

carreteras y demostraba la viabilidad de utilizar vapor como fuente de energía para la propulsión de vehículos terrestres. Aunque era un diseño primitivo en comparación con las locomotoras posteriores, representó un hito importante en la historia del transporte y la tecnología.

La máquina de vapor de Trevithick, al igual que otras máquinas de vapor de la época, operaba en un ciclo cerrado, lo que significa que el agua se reciclaba continuamente. No consumía agua en el sentido de quemarla o gastarla como combustible, sino que la utilizaba como un medio para transferir calor y convertirlo en energía mecánica.

Conociendo ya las características más importantes del carro de Trevithick, se puede realizar una comparativa con respecto a una máquina de vapor convencional. A continuación se exponen las principales diferencias:

- Aplicación:
 - El carruaje de vapor de Trevithick fue diseñado específicamente como un vehículo terrestre para el transporte en carreteras. Estaba destinado a moverse por tierra y transportar personas o cargas.
 - Una máquina de vapor convencional, por otro lado, se diseñaba típicamente para aplicaciones estacionarias, como la generación de energía para fábricas, molinos o estaciones de bombeo. No estaba diseñada para ser móvil.
- Diseño de la caldera:
 - En el carruaje de vapor de Trevithick, la caldera estaba diseñada para ser más compacta y ligera, ya que necesitaba ser transportada en el vehículo. Esto requería un equilibrio entre la generación de suficiente vapor y la portabilidad.
 - En una máquina de vapor estacionaria, la caldera podía ser más grande y robusta, ya que no tenía limitaciones de peso y tamaño como las que tenía que enfrentar el carruaje de vapor.
- Sistema de propulsión:
 - En el carruaje de vapor de Trevithick, el vapor impulsaba directamente las ruedas motrices a través de una conexión mecánica relativamente simple, utilizando un pistón y una biela. Esto permitía que el vehículo se moviera sobre ruedas.

- En una máquina de vapor convencional, la energía generada por el vapor se usaba para girar un eje que luego podía ser acoplado a diferentes tipos de maquinaria, como generadores eléctricos, bombas, molinos u otros dispositivos industriales.
- Movilidad:
 - El carruaje de vapor de Trevithick se diseñó para ser móvil y operar en carreteras. Se necesitaban ruedas y un sistema de dirección adecuado para permitir el movimiento por tierra.
 - Las máquinas de vapor convencionales estaban ancladas en su lugar y no tenían la necesidad de ruedas o sistemas de dirección [30].

6.3. Principales desafíos técnicos y soluciones implementadas

Aunque finalmente fue posible diseñar el 100 % de las piezas que aparecen en [1], hubo varios motivos que dificultaron la creación de los modelos, entre los que se puede destacar:

- Falta de cotas en los planos: en [1] se han representado muchas piezas en muy pocas páginas. El hecho de tener que apilarlas tanto ha provocado que falten algunas medidas esenciales para el diseño de las piezas. Para ello, en este proyecto se estimaron algunas de ellas y a posteriori se comprobó que las proporciones de la pieza obtenida eran similares a su homóloga del plano original. Otras cotas, aunque no aparecían en el plano, se podían obtener cuando a la hora de ensamblar tenían que cumplir alguna relación (de paralelismo, planitud o concentricidad, por ejemplo) con otras piezas. En este caso, hubo que modificar la pieza original y volver a ensamblar para comprobar que con la corrección sí se cumplían condiciones necesarias.
- Dificultad en el modelado: aunque la mayoría de las piezas tienen geometrías sencillas (líneas rectas, arcos circulares, simetrías, etc.), hay otras que tienen cierto grado de complejidad. Se muestran a continuación algunas de ellas:
 - Rueda dentada de 30 dientes: partiendo de un sólido circular macizo, se tuvo que diseñar un diente cuya base coincidiera con el diámetro exterior del círculo y que ocupara de ancho $1/30$ del total (12°). Una vez diseñado, se vacía mediante la operación Pocket y se ejecuta simetría

radial en forma de corona circular, hasta un total de 30 lugares. Posteriormente, mediante operaciones mucho más sencillas, se pueden hacer los vaciados de las zonas interiores y del hueco del eje y repetir simetría radial en 4 lugares.

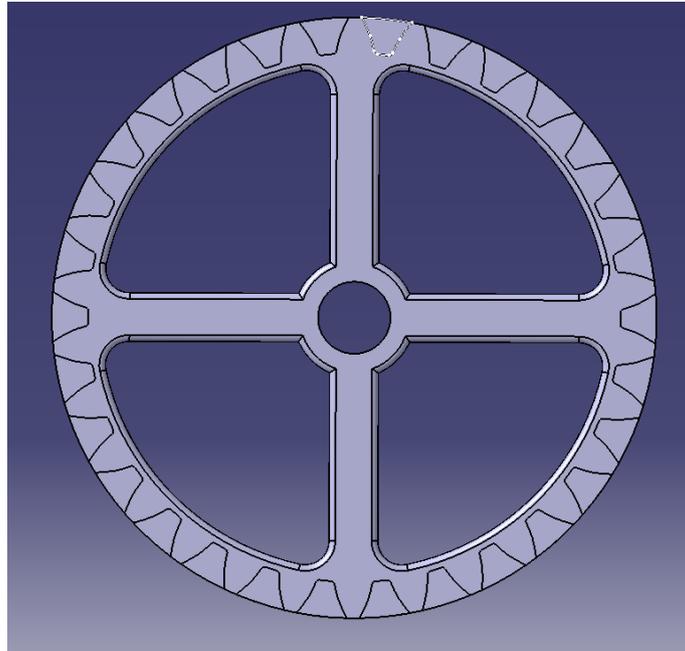


Figura 14: Rueda dentada de 30 dientes.

- Guía palanca de desengranaje: aunque a simple vista no lo pueda parecer, esta pequeña pieza presenta varias complejidades, ya que tiene extruidos, vaciados y matado de aristas en múltiples direcciones, algunas de ellas curvas. En la siguiente Figura 15(a) se muestra un paso intermedio antes del modelado de la pieza final:

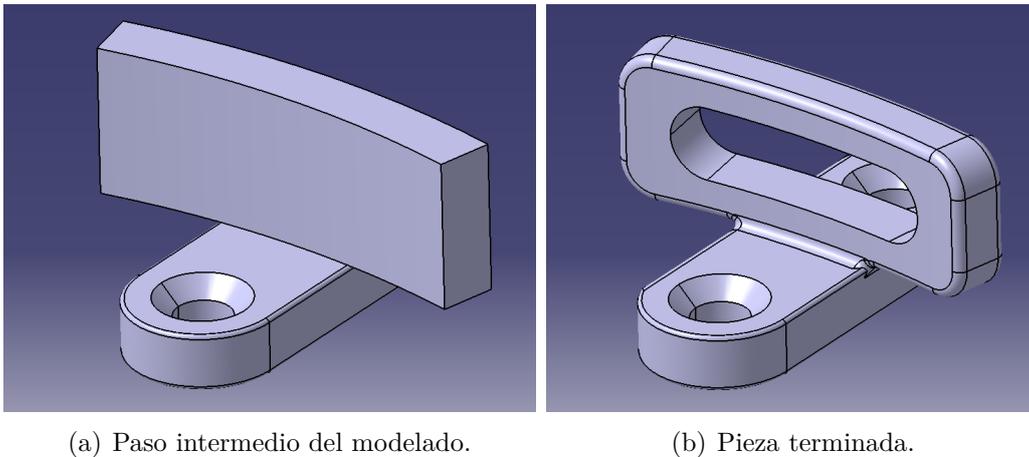


Figura 15: Desarrollo del modelado de la guía de palanca de desengranaje.

- Dificultad en el montaje: gran parte de los montajes y submontajes son sencillos con simples condiciones de concentricidad, contacto, etc. Algunos a destacar son:
 - Montaje de la caldera con tubo de escape exterior: como se puede ver en la Figura 10(a), hay dos juntas entre el tubo de escape y la tapa de la caldera. Originalmente, estas 2 juntas irían soldadas al tubo de escape, formando el subconjunto con Part Number 09E-32-00-1-11. Sin embargo, los taladros de las juntas tienen que ir coordinados con los de la tapa de la caldera, y como estas juntas van soldadas al tubo, no se podrán rotar libremente hasta hacer coincidir los taladros de ambas piezas. Además, a la hora de ensamblar estas juntas a solas con el tubo de escape, teniendo solo como referencia la verticalidad del tubo, no se pueden orientar estos taladros correctamente de manera que coincidan con los de la tapa de la caldera. Es por esto que se tomó la decisión de no ensamblar el subconjunto 09E-32-00-1-11, sino unir primero las juntas a la tapa con todos los taladros coordinados y posteriormente soldar el tubo a esta unión.
 - Montaje de la cabina de pasajeros: aunque algunos elementos como la puerta y ventanas son simples de ensamblar, hay otros que no lo son tanto. Esto es debido a que hay que crear uniones de contacto entre superficies que no son planas, como por ejemplo el tejado sobre las paredes y las guías paralelas con el suelo de la cabina. A esto hay que sumar que los taladros que tienen las guías tienen que ir coordinados con los que hay en el suelo de la cabina para ser unidos mediante tornillos,

y tienen que cumplir la condición de ser perpendiculares a la superficie curva del suelo.

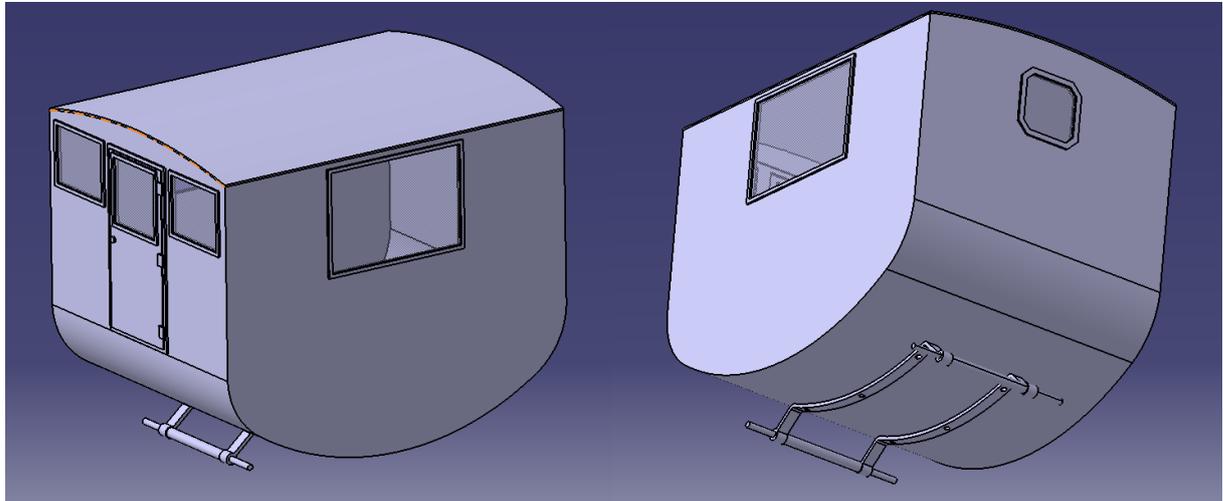
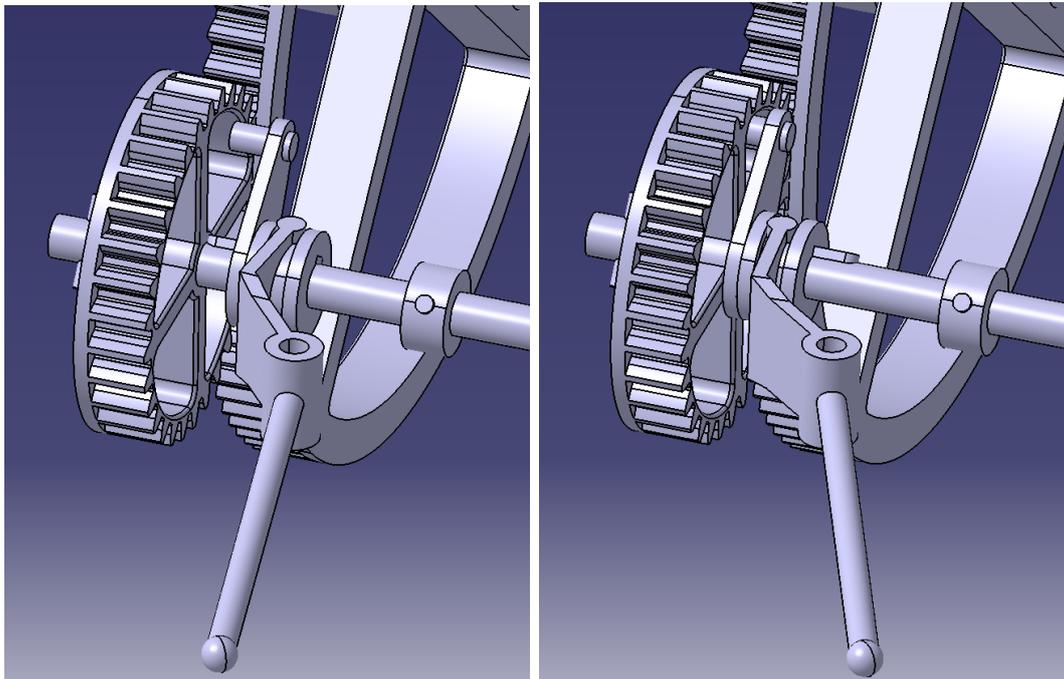


Figura 16: Cabina de pasajeros.

6.4. Evaluación de la eficiencia y seguridad del carro de vapor de Trevithick

Pese a su carácter innovador, no se puede afirmar que el carro de Trevithick fuera un invento seguro, pero sí era eficiente en términos energéticos comparado con los otros medios de transporte de la época. La caldera de alta presión optimizaba la energía obtenida de la combustión, pero tenía inconvenientes como el no poder apagarla en un periodo corto de tiempo, lo que hacía que se siguiera quemando carbón incluso cuando no se necesitaba generar fuerza en el pistón para avanzar.

Además, este vehículo carecía de sistema de frenado, lo que lo hacía propenso a sufrir accidentes como el que tuvo lugar en su demostración en Londres en 1803. En lugar de frenos, el conductor tenía a su alcance una palanca que permitía acoplar y desacoplar los engranajes del eje del cigüeñal cuando estimara oportuno (Figuras 17(a) y 17(b)). Esto hacía que el carro dejara de propulsarse, pero en ningún caso podía frenar, por lo que el carro continuaba avanzando con la inercia que tuviera en ese momento [5],[15].



(a) Palanca desacoplada.

(b) Palanca acoplada.

Figura 17: Palanca de acoplamiento de los engranajes con el eje del cigüeñal.

6.5. Renderizado

En el módulo por defecto del Assembly Design de CATIA se puede seleccionar una herramienta de renderizado rápido. Antes de sacar estas imágenes, se les ha aplicado a todas y cada una de las piezas un material acorde con el que deberían tener en la realidad [45]. Para ello, se han tomado como referencias las descritas en [1].

Tras seleccionar varias opciones de calidad y tamaño de la imagen, se pueden obtener renderizaciones como las siguientes Figuras 18 y 19:

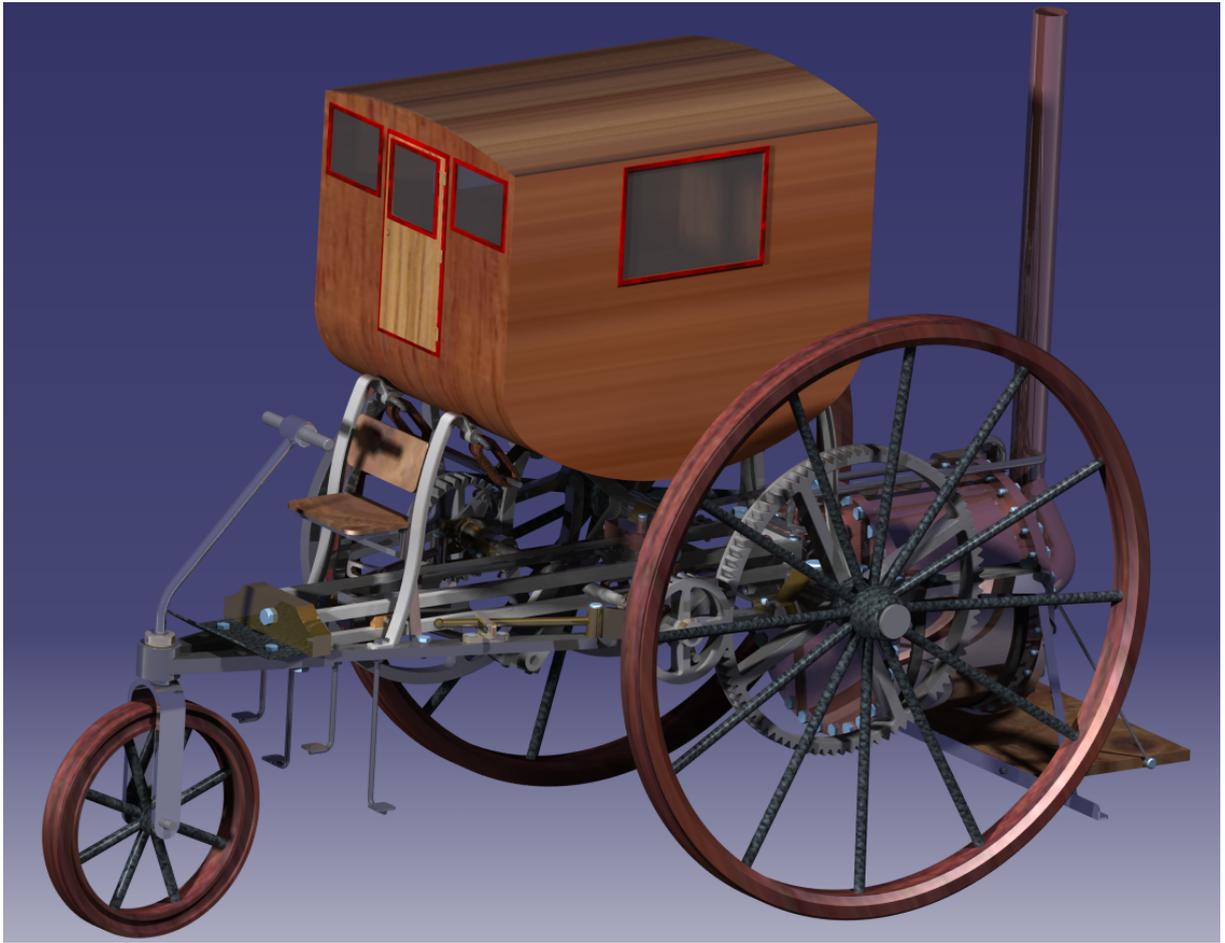


Figura 18: Parte frontal del carro de vapor de Trevithick.



Figura 19: Parte trasera del carro de vapor de Trevithick.

6.6. Animación

Para este apartado de animación se hará uso de la herramienta *DMU Kinematics*, dentro del módulo de *Digital Mockup*. Esta herramienta permite sincronizar los movimientos relativos que haya entre unas piezas y otras. Para ello, primero se creará un mecanismo (*Assembly Constraints Conversion -> New Mechanism*) y se elegirá la pieza que provoca el movimiento que queramos representar. A partir de aquí, se tendrán que crear las uniones (*Joints*) entre esta pieza y las que ensamblen con ella, es decir, las relaciones de movimientos que hay entre ellas. Las más utilizadas son [45]:

- *Rigid Joint*: unión como sólido rígido. Se suelda una pieza con otra y comparten las mismas traslaciones y rotaciones. Por ejemplo, el manillar va soldado al eje de la rueda delantera.
- *Revolute Joint*: usado cuando una pieza gira en torno a otra. Por ejemplo, el manillar rota entorno al chasis alrededor de un eje en su parte delantera, como el de una bicicleta.
- *Prismatic Joint*: solo permite un movimiento rectilíneo entre una pieza y otra. Por ejemplo, la estructura ligada al pistón avanza y retrocede deslizando en línea recta sobre el carril de guía.
- *Gear Joint*: relaciona el giro de una pieza con otra. Para ello, tenemos que indicar el sentido de giro de cada una de ellas y la relación entre las velocidades angulares. Por ejemplo, se usa para el giro que genera la rueda dentada del cigüeñal sobre la rueda dentada ligada a la rueda trasera del carro. En este caso, giran en sentidos opuestos y la relación de giro es de 3:1, ya que para darle una vuelta completa de 360° a la rueda dentada trasera, la rueda dentada delantera tiene que dar tres vueltas.

Una vez establecidas todas las uniones de cada mecanismo que queramos animar, con el botón *Simulation* podremos establecer parámetros como la velocidad de animación y los intervalos en los que va a variar alguna magnitud del movimiento. Por ejemplo, la rotación del volante respecto al chasis se podría simular entre -45° (giro a la izquierda) y $+45^\circ$ (giro a la derecha).

7. Conclusiones y desarrollos futuros

7.1. Recapitulación de los hallazgos y resultados del estudio

Se podría decir que uno de los hallazgos principales de este trabajo ha sido el descubrimiento de un personaje tan importante como Richard Trevithick. Aunque sea prácticamente desconocido en la actualidad, fue uno de los promotores principales de las máquinas de vapor, lo que supuso un impulso muy pronunciado en muchos aspectos, como el acelerado desarrollo de ciudades importantes, la aparición de grandes fábricas, evolución en los medios de transporte, etc.

También destacar la gran influencia que había de unos inventores a otros en plena Revolución Industrial, la capacidad de adaptación con los medios de los que disponían y la manera que tenían de afrontar los problemas cotidianos de aquella época (como inventar las primeras máquinas de vapor con la finalidad de extraer el agua de las minas).

7.2. Reflexión sobre la importancia del carro de vapor de Trevithick en la historia de la tecnología

No cabe duda de que el carro de vapor de Trevithick fue de vital importancia en el desarrollo de los medios de transporte que existen hoy en día, ya que fue la primera máquina que funcionaba con vapor de agua que fue capaz de transportar personas (aunque fuera a muy baja velocidad y con poca capacidad de carga). Con esa intención de transportar bienes y personas mediante algo distinto a la tracción animal, y con el empeño en hacer un motor de vapor muy compacto, este invento fue el precursor de las locomotoras que acortaron enormemente los tiempos de viaje entre unas ciudades y otras. Esta interconexión de ciudades hizo que cualquier avance científico que se llevara a cabo en alguna ciudad llegara en un tiempo muy reducido a otras ciudades lejanas, acelerando así exponencialmente el desarrollo tecnológico de la época.

7.3. Líneas futuras de desarrollo

Como posibles vías de desarrollo futuro de este proyecto, se propone:

- Impresión en 3D de las piezas aquí modeladas y el ensamblaje de la maqueta resultante. Sería interesante también diseñar algún componente sencillo que esté ausente en este invento de Trevithick, como un sistema sencillo de frenos.
- Volver a realizar el modelado, ensamblaje, animación y renderizado usando otro software y extraer conclusiones más realistas sobre cuál sería el óptimo para un proyecto de esta envergadura.

Referencias

- [1] J.A.M. De Waal Papakura, “London steam carriage” (En línea). Disponible en: <http://www.vapeuretmodelesavapeur.com/patrickleclere/trevithick-london-steam-carriage-complet.pdf> (Accedido el 01/09/2023)
- [2] “Biografía de Richard Trevithick” (En línea). Disponible en: [https://historia-biografia.com/richard-trevithick/#:~:text=Richard%20Trevithick%20\(13%20de%20abril,de%20transportar%20a%20varios%20pasajeros.](https://historia-biografia.com/richard-trevithick/#:~:text=Richard%20Trevithick%20(13%20de%20abril,de%20transportar%20a%20varios%20pasajeros.) (Accedido el 03/09/2023)
- [3] “Richard Trevithick” (En Línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Richard_Trevithick. (Accedido el 24/05/2023)
- [4] “Ingenieros ilustres, Richard Trevithick” (En Línea). Disponible en: https://eimem.uniovi.es/facultad/ilustres/-/asset_publisher/9RUx/content/richard_trevithick?redirect=%2Ffacultad%2Filustres#:~:text=Richard%20Trevithick%20construy%C3%B3%20la%20primera,ruedas%20se%20realizaba%20por%20engranajes. (Accedido el 03/05/2023)
- [5] “Historia de los vehículos de carretera a vapor” (En línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_los_veh%C3%ADculos_de_carretera_a_vapor (Accedido el 03/09/2023)
- [6] “Transformaciones agrarias y proceso de industrialización en la España del siglo XIX” (En línea). Disponible en: bit.ly/3EuIUny (Accedido el 03/09/2023)
- [7] “Revolución Industrial” (En línea). Disponible en: <https://concepto.de/revolucion-industrial/#:~:text=Se%20conoce%20como%20Revoluci%C3%B3n%20Industrial,Unidos%2C%20finalizando%20a%20mediados%20del.> (Accedido el 26/05/2023)
- [8] “Revolución Industrial” (En línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Revoluci%C3%B3n_Industrial (Accedido el 03/09/2023)
- [9] “Guerras napoleónicas” (En línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Guerras_napole%C3%B3nicas (Accedido el 03/09/2023)
- [10] M.Cartwright, R. Castillo, “La máquina de vapor en la Revolución Industrial británica” (En línea). Disponible en: <https://www.worldhistory.org/trans/es/2-2166/>

- [la-maquina-de-vapor-en-la-revolucion-industrial-br/](#). (Accedido el 26/05/2023)
- [11] “¿Quién fue el inventor de la máquina de vapor?” (En línea). Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/quien-invento-la-maquina-de-vapor/> (Accedido el 03/09/2023)
- [12] “¿Qué es la producción en cadena?” (En línea). Disponible en: <https://www.edsrobotics.com/blog/produccion-cadena-que-es/> (Accedido el 03/09/2023)
- [13] J. González, “¿Quién fue el inventor de la máquina de vapor?” (En línea). Disponible en: http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/4502/La_produccion_en_serie_BAJO_Azcapotzalco.pdf?sequence=1 (Accedido el 04/09/2023)
- [14] D. Martínez, “Cuando Fue La Revolucion Industrial” (En línea). Disponible en: <https://normasambientales.com.mx/infoblog/ar/cuando-fue-la-revolucion-industrial.html> (Accedido el 04/09/2023)
- [15] “Historia del ferrocarril. Richard Trevithick.” (En línea). Disponible en: <https://trenak.com/2010/04/13/historia-del-ferrocarril-richard-trevithick>. (Accedido el 06/09/2023)
- [16] “Se cumplen 217 años de la primera locomotora de vapor” (En línea). Disponible en: <https://weekend.perfil.com/noticias/informativo/se-cumplen-217-anos-de-la-primera-locomotora-de-vapor.phtml>. (Accedido el 26/05/2023)
- [17] C. González, “La primera revolución industrial y la máquina de vapor” (En línea). Disponible en: <https://historiaencomentarios.com/2021/03/30/la-primera-revolucion-industrial-y-la-maquina-de-vapor/> (Accedido el 04/09/2023)
- [18] A. Gayubas, “Revolución Industrial” (En Línea). Disponible en: <https://humanidades.com/revolucion-industrial/#:~:text=la%20Revoluci%C3%B3n%20Industrial%3F-,La%20Revoluci%C3%B3n%20Industrial%20fue%20un%20proceso%20hist%C3%B3rico%20de%20transformaciones%20econ%C3%B3micas,luego%2C%20en%20todo%20el%20mundo>. (Accedido el 02/05/2023)

- [19] “La máquina de vapor: historia, definición, funcionamiento, inventor” (En línea) Disponible en: <https://www.abcpedia.com/ciencia-tecnologia/maquinas-de-vapor>. (Accedido el 02/05/2023)
- [20] I. Camarero, “Máquinas antiguas de vapor (II): Architrónito.” (En línea). Disponible en: <https://ismaelcamarero.blogspot.com/2021/02/maquinas-antiguas-de-vapor-ii.html>. (Accedido el 28/05/2023)
- [21] “El inventor de la máquina de vapor vivió hace 20 siglos” (En línea). Disponible en: <https://www.curistoria.com/2017/09/el-inventor-de-la-maquina-de-vapor.html>. (Accedido el 28/05/2023)
- [22] J. Evelyn, “The Diary of John Evelyn” (En línea). Disponible en: <https://www.gutenberg.org/files/42081/42081-h/42081-h.htm>. (Accedido el 06/09/2023)
- [23] L. Sevilla, “Orígenes históricos del empleo tecnológico del vapor (1)” (En línea). Disponible en: [https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/8329-Origenes-historicos-del-empleo-tecnologico-del-vapor-\(1\).html](https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/8329-Origenes-historicos-del-empleo-tecnologico-del-vapor-(1).html). (Accedido el 02/05/2023)
- [24] “MARMITA DE PAPIN O DIGESTOR A VAPOR” (En línea). Disponible en: <https://lafabrica.us.es/marmita-de-papin-o-digestor-a-vapor/>. (Accedido el 28/05/2023)
- [25] J. Varela, “La primera patente de una máquina de vapor en la Historia; Savery.” (En línea). Disponible en: <https://ahombrosdegigantescienciaytecnologia.wordpress.com/2015/07/27/la-primera-patente-de-una-maquina-de-vapor-de-la-historia-savery/>. (Accedido el 03/05/2023)
- [26] P. Landín, “Máquinas de vapor de Newcomen” (En línea). Disponible en: <http://pelandintecno.blogspot.com/2011/03/maquinas-de-vapor-de-newcomen-y-de.html>. (Accedido el 30/05/2023)
- [27] J. Varela, “Una máquina para una revolución; Watt y su máquina de vapor.” (En línea). Disponible en: <https://ahombrosdegigantescienciaytecnologia.wordpress.com/2015/08/19/la-maquina-de-una-revolucion-la-maquina-de-vapor-de-watt/>. (Accedido el 02/05/2023)
- [28] R. Cartay, “La energía del vapor: una avanzada del progreso” (En línea) Disponible en: <https://www.revistaespacios.com/a95v16n03/>

- 30951603.html#:~:text=La%20m%C3%A1quina%20de%20vapor%20del,el%20empresario%20ingl%C3%A9s%20Matthew%20Boulton. (Accedido el 01/05/2023)
- [29] “The Rocket” (En línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/The_Rocket. (Accedido el 28/05/2023)
- [30] A. Castilla, “La máquina de vapor: James Watt y Richard Trevithick (y II)” (En línea). Disponible en: <https://economyayfuturo.es/la-maquina-de-vapor-james-watt-y-richard-trevithick-y-ii-3/> (Accedido el 04/09/2023)
- [31] “Historia de la máquina de vapor” (En línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Historia_de_la_m%C3%A1quina_de_vapor (Accedido el 04/09/2023)
- [32] “Thomas Savery” (En línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery (Accedido el 04/09/2023)
- [33] A. Castilla, “La máquina de vapor: Thomas Savery y Thomas Newcomen” (En línea). Disponible en: <https://economyayfuturo.es/la-maquina-de-vapor-thomas-savery-y-thomas-newcomen-3/> (Accedido el 02/09/2023)
- [34] “Thomas Newcomen” (En línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Thomas_Newcomen (Accedido el 04/09/2023)
- [35] J.M. Burón “Construcción de la máquina de vapor de Newcomen con válvulas automatizadas” (En línea). Disponible en: https://oa.upm.es/49689/1/TFG_JUAN_LUIS_CABRERA_DIAZ.pdf (Accedido el 04/09/2023)
- [36] “Máquina de vapor de Watt” (En línea). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_vapor_de_Watt (Accedido el 04/09/2023)
- [37] “Quién inventó la máquina de vapor” (En línea). Disponible en: <https://curiosfera-historia.com/quien-invento-la-maquina-de-vapor-historia/> (Accedido el 02/09/2023) (Accedido el 03/09/2023)
- [38] “NX CAD para el Diseño” (En línea). Disponible en: <https://avantek.es/productos/software-nx-siemens/nx-cad-para-el-diseno/>. (Accedido el 06/09/2023)

- [39] “Novedades de Solid Edge 2022” (En línea). Disponible en: <https://solidedge.siemens.com/es/solutions/products/complete-product-development-portfolio/solid-edge-2022/> (Accedido el 06/09/2023)
- [40] “Solid Edge, ¿qué características tiene esta solución de modelado 3D?” (En línea). Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/solid-edge-solucion-modelado-021120202/#!> (Accedido el 06/09/2023)
- [41] Eriksong, “SolidWorks vs Solid Edge ¿Cuál es mejor? - Comparativa, ventajas y desventajas” (En línea). Disponible en: <https://miracomosehace.com/solidworks-solid-edge-mejor-comparativa-ventajas-desventajas/> (Accedido el 06/09/2023)
- [42] “VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE SOLIDWORKS” (En línea). Disponible en: <https://www.ms-ingenieria.com.mx/dibujo/ventajas-y-desventajas-de-solidworks/#:~:text=Las%20desventajas%20que%20tiene%20SolidWorks,Motor%20de%20renderizado%20muy%20limitado> (Accedido el 06/09/2023)
- [43] “Ventajas y desventajas del uso de AutoCAD” (En línea). Disponible en: <https://www.quecursar.com/ventajas-y-desventajas-del-uso-de-autocad> (Accedido el 06/09/2023)
- [44] Alicia M., “CATIA, el software que trasciende la tecnología de diseño CAD” (En línea). Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/catia-software-tecnologia-cad-080720202/> (Accedido el 06/09/2023)
- [45] E. Torrecilla, *El gran libro de CATIA*. Bilbao, 2012.