

RECREACIÓN CON CATIA DE LA MÁQUINA DE VAPOR DE LA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE MADRID.

TRABAJO FIN DE GRADO PARA
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

FEBRERO 2019

Santiago López García

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

**José Manuel Burón
Caballero**

DEDICATORIA

No podía dedicarle este trabajo a otra persona que no fuera mi madre, cuya fuerza de voluntad entre otras interminables virtudes me inspira día a día a seguir superando cualquier adversidad, como ha hecho ella siempre. Te quiero.

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo Fin de Grado debe reconocer a una serie de personas su aportación para que finalmente haya visto la luz:

A mis amigos y familiares, que siempre han estado ahí para apoyarme en los momentos más difíciles.

A José Manuel Burón Caballero, por su pasión e interés para sacar adelante este proyecto.

A Milagrosa González, por su ayuda y consejo en diferentes momentos.

A Matilde, Raúl, Luz, Pilar y Luis, por su amabilidad y calidad humana, siempre dispuestos a echarme una mano.

A Adrián y Rubén, por las largas horas compartidas en el Laboratorio de Motores.

RESUMEN

Se puede decir que durante décadas, miles de estudiantes, profesores y personal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII), han desfilado día tras día por la Sala de la Máquina. Dicha sala, el hall de la ETSII, no puede llevar un nombre más propicio y más representativo. Se puede afirmar, casi con total seguridad, que cualquier persona que haya cruzado alguna de las tres puertas que conducen a la Sala de la Máquina se ha parado un momento a reparar en la estructura colosal que adorna su centro. Y también, con bastante certeza, se habrán formulado la pregunta: ¿eso qué es?

Esta y otras cuestiones, que quizás aquellas personas también se hayan planteado, son las que se pretenden contestar en este escrito. En consecuencia, y así ya se adelanta la respuesta a la pregunta anterior, en las páginas posteriores no se va a completar un tratado sobre la máquina de vapor, sino un tratado sobre la Máquina de la Escuela. Sobre las primeras hay mucha documentación, de hecho, es sorprendente la cantidad de manuscritos, manuales o enciclopedias que recogen información sobre las máquinas de vapor. No en vano durante más de un siglo fue de los pocos, si no el único, motor térmico empleado por la humanidad para satisfacer las cada vez mayores necesidades tecnológicas.

Sin embargo, al navegar largo y tendido por el complejo mundo de las máquinas de vapor, uno toma conciencia de la singularidad que caracteriza a la Máquina de la Escuela. En todos los libros, artículos y páginas web consultadas no ha aparecido una que sea exactamente igual a esta. Aunque todo depende del grado de detalle con el que se mire la Máquina. Es tentador mirar ejemplos de máquinas de vapor con una forma similar, es decir, con los mismos elementos característicos, de los que ya se hablarán, y pensar que son clavadas. Y misterio resuelto.

Pero nada más lejos de la realidad. En este proyecto, cuyo grado de detalle está desarrollado al máximo posible y viable (y sano también), la realidad aparece totalmente distinta a lo comentado en el párrafo anterior. Es cierto que los elementos, los componentes, que diferencian a las máquinas de vapor como concepto, están presentes o al menos, se sabe que estuvieron presentes, como el caso del condensador o la caldera, que ya no están. La particularidad aparece en cómo están dispuestos estos elementos y cómo se interrelacionan entre sí. Aquí es donde comienzan los primeros (y quizá últimos) quebraderos de cabeza, y en parte, la misión de este proyecto es tratar de descifrar, descubrir o intuir cómo trabajaban aquellos elementos.

Lo anterior podría ser más sencillo si la Máquina estuviera completa. No se sabe en qué momento ciertos elementos, que en general son de transmisión, de conexión, entre esos elementos denominados característicos, desaparecieron. Es posible que nunca llegaron a instalarse cuando se trasladó la Máquina a su emplazamiento actual. En este aspecto, una primera noción que hay que asumir al llevar a cabo este proyecto, es que hay misterios que nunca, desgraciadamente, se van a poder resolver con certeza. A pesar de los esfuerzos propios y de la comunicación con asociaciones e instituciones, no ha sido posible encontrar archivos en los que se recoja un solo plano o referencia a su construcción.

En relación con la negatividad del párrafo anterior, hay que destacar que muchos de ellos sí que han podido resolverse. Se ha encontrado un ejemplar de una revista verdaderamente antigua en la que se habla sobre la Máquina y su instalación en la ETSII, de la cual no han sido pocas las deducciones extraídas. A través de dicha información se ha podido descubrir que la Máquina no fue siempre la escultura estática que hoy en día se conoce. Hasta cierto año del siglo XX lo cierto es que se movía, ¡jentera! La colosal e imponente Figura moviéndose y girando con su volumen descomunal y sus ciertas toneladas. Debía ser un espectáculo digno de ver.

Junto con lo anterior, a lo largo de este proyecto se han realizado incursiones a los entresijos de la Máquina. La verdad es que esta afirmación es muy cercana a la literalidad. La Máquina

se puede dividir en dos partes: la visible, la que todo el mundo que pasa a su lado puede apreciar; y la subterránea, la oculta debajo de las chapas metálicas y el cemento, con capas de polvo acumulado durante décadas. Esta última parte es en la que el autor ha podido adentrarse, contorsionarse y condenar por tanto a toda su ropa a la lavadora. Con gran emoción las personas partícipes de este proyecto contemplaron cómo se descubrió aquello que llevaba tanto tiempo escondido. No se tenía noción alguna de lo que allí se podría encontrar una vez se levantasen las chapas con un destornillador como palanca. ¿Estaría la Máquina completa, ahorrando así un trabajo importante al autor? ¿No habría absolutamente nada? ¿Estaría todo lleno de basura acumulada? Los resultados se mostrarán más adelante, pero como anticipo, se confirmó que completa, desde luego, no estaba.

En las líneas recientes se han introducido dos conceptos que están relacionados con el presente proyecto. Por un lado, ha aparecido, y no por accidente, claro, la palabra escultura. De algún modo, es una forma de rendir homenaje a la belleza de la Máquina. No se sabe si en la época en la que se construyó sería considerada como tal, pero lo cierto es, que hoy en día, la línea que la separa de una obra de ingeniería a una obra de arte es muy fina. De nuevo aquí depende de con qué ojos y con qué detenimiento se decida observarla. Este proyecto puede confirmar, con cada una de las piezas realizadas al detalle, que hay una intención, además de la simplemente funcional, puramente decorativa. El trabajo que se realizó sobre el metal sin duda fue llevado a cabo por personas expertas y mentalizadas de que dicha Máquina era algo más que un simple medio para conseguir producir.

Por otro lado, se ha hablado de la Máquina moviéndose y aún no se ha mencionado apenas la finalidad del proyecto. Estos dos aspectos están ampliamente relacionados. La primera es una línea futura (se espera que no demasiado) de la segunda. Llega el momento de concretar lo que aquí se ha llevado a cabo, pero en definitiva, todo va orientado a conseguir, en algún momento del futuro a corto-medio plazo, mover la Máquina.

Para ello, hay que ir siguiendo una serie de pasos necesarios que faciliten de algún modo el fin último de todo esto. Los dos primeros de ellos son los que se han tratado de cubrir aquí y además están interrelacionados. Estos no son otros que diseñar y modelar la Máquina en un programa de diseño 3D, en este caso CATIA, para, en un proyecto posterior, posibilitar la construcción de una maqueta de la misma, capaz de moverse y funcionar de la misma manera que lo haría la real. A partir de ahí, se estaría en situación de plantearse movilizar la Máquina, con todo lo que ello podría implicar. Desde luego, supondría un gran reto. Realmente, cada una de las etapas lo es. En la primera y la que aquí se recoge, se incluye además el objetivo de comprender cómo funciona la Máquina.

Durante todo el Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales (GITI) se ha repetido por parte de los profesores la expresión: *‘El papel aguanta todo’*. Y en estos días, mejor dicho, hace alguna que otra década, se podría decir más bien: *‘El ordenador lo aguanta todo’*. Y gracias a esa expresión, y en definitiva, a esa realidad, se ha pretendido comprender la manera en la que esta Máquina realizaba su función. Y es que, a la complicación añadida de no saber cómo lo hacía en general, de carecer de cualquier plano de la misma y de la ausencia de piezas importantes, se añade una más: cierta parte de la Máquina que sí que está presente está colocada del revés.

Esta noción, procedente de la revista antigua mencionada y de la cual no se pretende adelantar nada más, es la que el ordenador puede asumir. Esto se debe a que en el contexto actual, no es posible desmontar y montar piezas y tratar de deducir, mediante prueba y error cómo iban exactamente. Como consecuencia, el proyecto necesitó de cierto reajuste en lo que a los objetivos a alcanzar se refiere. Inicialmente, se pretendía incluir también el tercer paso, es decir, la concreción de ese diseño en 3D en una maqueta a escala capaz de funcionar con un fluido que no necesariamente sería vapor. Sin embargo, la realidad siempre tiende a poner a cada uno (proyecto), en su sitio. De nuevo, según se iban adquiriendo conocimiento sobre la Máquina, más se era consciente de que construirla constituía un reto inabarcable.

para un proyecto de este carácter. Y es más, en los objetivos del diseño y simulación del movimiento ni siquiera está incluido un análisis fluido, termodinámico o de esfuerzos.

De esta manera, el proyecto aquí desgranado, se concibe como uno perteneciente a la búsqueda y a la investigación, al mismo tiempo que se erige como un trabajo con elevado carácter práctico. Quizás, en este caso, plasmar el gran volumen de investigación realizado sea complicado, puesto que en la búsqueda de una simple descripción de una máquina del tipo de la aquí desarrollada se han consultado un gran número de volúmenes. Como ya se ha comentado, se han tratado de encontrar referencias y documentos tanto sobre cómo y cuándo llegó la Máquina a España, como en el equivalente a su donación a la ETSII. Sin embargo, esta búsqueda, que abarcó un número de horas considerable, fue en su mayor parte infructuosa, salvo diversas excepciones, como la revista encontrada (Figura 1).

Gracias a dichas excepciones, se ha podido conocer que la placa de la cual se ha partido para la investigación, es errónea. Tanto la fecha de fabricación como la de donación a la ETSII, son incorrectas, siendo 1832 y 1914 respectivamente, en lugar de 1859 y 1910. Además, se ha podido saber la potencia de la Máquina, 25 caballos, y se han encontrado fotos de su posible emplazamiento durante su emplazamiento. De esta manera, las excepciones, aunque escasas, han podido arrojar datos importantes de la Máquina.

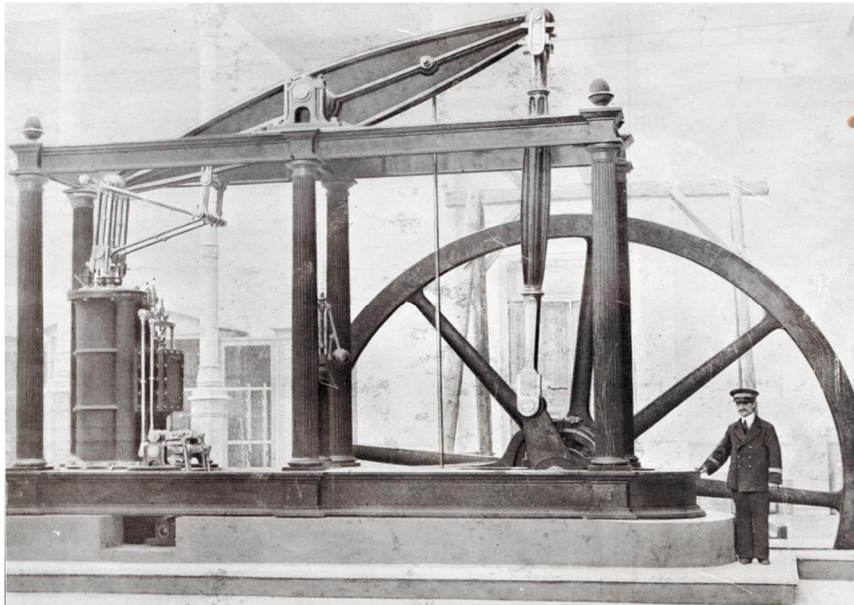


Figura 1: Revista encontrada

Por otro lado, tampoco han sido pocos los escritos y manuales consultados para tratar de entender cómo funcionan las máquinas de vapor. Fue en este punto donde la dimensión del mundo de las máquinas de vapor adquirió el status de Universo. Es increíble, admirable y al mismo tiempo fascinante, la complejidad y la variedad de tipos, formas, tamaños y disposiciones a los que la máquina de vapor dio lugar. Constituía una rama de la ingeniería por sí sola, y eran abundantes los campos de la ciencia que podía aglutinar. Termodinámica, mecánica, dinámica, hidráulica, metalurgia, lubricación. El mundo actual no es consciente de los recursos puestos a disposición del desarrollo de la máquina de vapor durante más de un siglo. Y sin embargo ahora mismo, no tiene prácticamente aplicación alguna.

Al mismo tiempo, no deja de sorprender la calidad de los dibujos y planos encontrados, con un detalle y una precisión que llevan a preguntarse por la maestría de aquellos que los realizaron. Y no ha sido en algún caso aislado, sino que en multitud de libros se han podido encontrar máquinas plasmadas en un conjunto de planos con diferentes vistas y secciones de las mismas. Y a pesar de ello, la Máquina no ha aparecido por ningún lado.

En cuanto a la parte eminentemente práctica, se han ido realizando todas y cada una de las piezas de la Máquina por medio de CATIA. Como ya se ha mencionado, no se ha tratado de crear piezas que puedan cumplir las diferentes funciones y que más o menos se parezcan a las originales. La calidad que en parte se ha tratado de otorgar a este proyecto está en la precisión y el detalle con el que se ha partido como premisa. Y en la mayoría de ocasiones se ha conseguido.

En reiteradas ocasiones el autor ha estado midiendo muchas partes de muchas piezas con un metro o un pie de rey, con el fin de disponer de las medidas más fiables posibles para después concretarlas en diseños en CATIA. Este no ha sido un proceso fácil ni rápido. Sin embargo, el objetivo es claro, y la maqueta que se realice posteriormente en base a la construcción digital debe ser lo más fidedigna posible, incluso en aquellas partes puramente estéticas. Es en esos detalles donde en parte radica la calificación previa de obra de arte, y es lo que se pretende mantener.

El problema que surge al realizar esta tarea es que aparece una nueva distinción en las partes de la Máquina. Ahora hay que separar entre parte alcanzable y, por tanto, medible, y parte inalcanzable, que no es posible medir. Y muchas veces no se trata únicamente de no poder medir, sino de no poder ver siquiera ver. Aquí no ha quedado otra opción que perder calidad. Es posible que ningún detalle se haya dejado al margen, pero las medidas en este caso han perdido su fiabilidad. Incluso en algunos casos es difícil determinar dónde acaba una pieza y termina otra. Y esto es importante, porque en este caso, el objetivo es que la Máquina se pueda mover. Para que esto suceda, las diferentes partes deben tener sus correspondientes medidas geométricas y relaciones entre ellas. En este punto los misterios vuelven a aparecer, pues al no saber cómo funcionan exactamente ciertos mecanismos, las leyes que los rigen tampoco son fáciles de descubrir. ¿Con qué criterio creas las piezas si no tienes algún parámetro, alguna relación? Esto desde luego ha supuesto contratiempos, obligando a corregir piezas una vez realizadas para que encajen con el resto y puedan, a priori, cumplir su función.

Además de las partes alcanzables, se puede apreciar otro tipo, como son las alcanzables pero no medibles. Al menos no de manera muy precisa. Por un lado, se podría hablar de piezas como el eje del volante y del mecanismo biela-manivela. Es perfectamente visible y cercano, pero no hay forma de medir el radio correctamente, por su disposición semienterrada y por las piezas que tiene acopladas. Tampoco es muy factible la medición de la parte inferior del cilindro o de la biela (del mecanismo anterior), por iluminación y contorsionismo necesario para ello. También, se podría aplicar el mismo criterio a la conexión entre las excéntricas y el cilindro, pues tal y como está enterrado en el suelo y con el polvo acumulado, es imposible medir, y eso que se ha intentado en más de una ocasión.

Además de las clasificaciones anteriores, es posible etiquetar un conjunto entero que incluyen una dificultad adicional. En realidad, no es del todo una complicación más. Simplemente es una nueva bajada a la tierra por parte del orgullo del autor en su afán por diseccionar y radiografiar todas las partes, grandes y pequeñas, de la Máquina. Y este conjunto no es otro que las uniones.

Las uniones son un punto ciego del que, a no ser que se desmantelen, es imposible saber realmente cómo son. Es necesario admitir aquí el hecho de que mientras cumplan su función, el cómo sean por dentro en el diseño es lo de menos. Y también es verdad que en muchos casos es posible determinar si la unión es articulada o no, es decir, si existe movimiento relativo entre las diferentes partes de la unión. Pero en otras ocasiones esta tarea no es tan sencilla, y al no conocer exactamente el funcionamiento de ciertos mecanismos, la caracterización de la unión dista mucho de ser inmediata. Y en parte no lo es debido de nuevo al polvo y otras partículas, que, después de décadas de hieratismo impiden saber si en algún momento ciertas piezas se movieron unas respecto de otras.

En relación con el objetivo del trabajo, en este proyecto no se verán largos desarrollos matemáticos, ni cálculos complejos ni histogramas. La finalidad es otra. Lo que sí se podrán

apreciar serán planos de las piezas y capturas de su diseño; comparaciones entre realidad y entorno virtual; diversas partes de la Máquina que dan lugar a conjuntos con una finalidad determinada; detalles no apreciados a simple vista y partes nunca vistas de la misma, entre otras cosas.

El contenido teórico existe, para dotar al lector la posibilidad de comprender, al menos en líneas generales, cuál es la función de los diferentes mecanismos. Conviene recordar aquí que el presente escrito es un tratado sobre la Máquina de la ETSII. En consecuencia, una parte irá dedicada a explicar y desarrollar aspectos, mencionados en este breve resumen, concernientes a la propia Máquina. Aquella revista encontrada; el rastro seguido a partir del nombre del fabricante que aparece marcado en su propia base; su procedencia y funcionalidad.

Por último, el resultado más ambicioso al que podría aspirar este proyecto, sería conseguir que toda la Máquina, es decir con todas y cada una de las piezas, incluidas las que faltan, se moviese como lo haría en su época. Sin embargo, el resultado que aquí se puede ofrecer se limita a disponer de todas las piezas visibles y ensambladas para dar lugar a la Máquina que se conoce hoy en día (Figura 2). El movimiento de la Máquina del modo anterior no ha sido posible por todas las limitaciones derivadas de las dificultades de medición de ciertas partes y la singularidad de la misma.

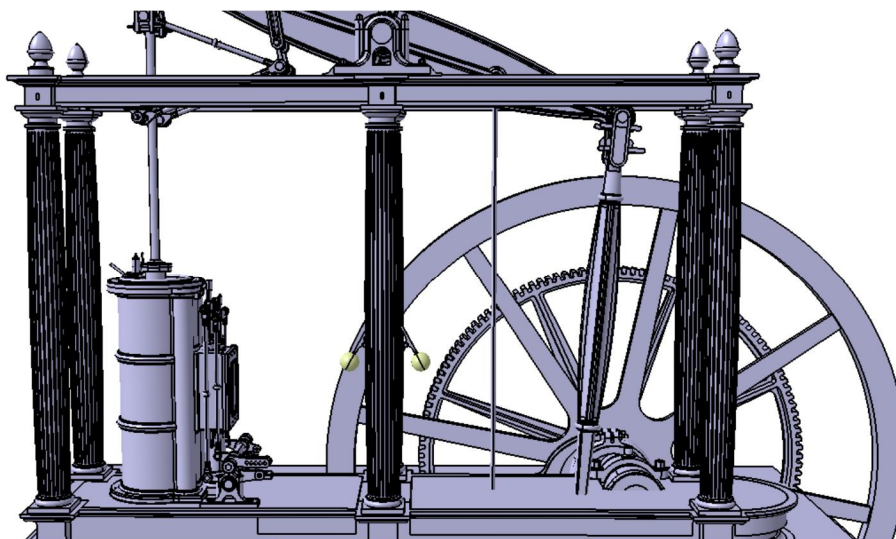


Figura 2: Diseño Máquina

PALABRAS CLAVE: Máquina, vapor, CATIA, diseño 3D, detalle, obra de arte, medir, incursiones, descubrimientos, entorno virtual, fabricante

CÓDIGO UNESCO: Máquinas de vapor (331328), Diseño con ayuda de ordenador (120309)

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	7
1 INTRODUCCIÓN.....	15
2 PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO.....	17
2.1 ¿CÓMO SURGE EL PROYECTO?.....	17
2.2 OBJETIVOS.....	18
3 INVESTIGACIÓN.....	21
3.1 BÚSQUEDA SOBRE MÁQUINAS DE VAPOR	21
3.1.1 BREVE HISTORIA MÁQUINA DE VAPOR	22
3.1.2 CLASIFICACIÓN MÁQUINA DE LA ETSII	25
3.1.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS PARTES DE LA MÁQUINA	26
3.1.4 EXPLICACIÓN DE LAS PARTES DE LA MÁQUINA.....	27
3.2 BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN SOBRE LA MÁQUINA DE LA ETSII.....	35
3.2.1 NAPIER POWER HERITAGE TRUST	36
3.2.2 INSTITUTE OF MECHANICAL ENGINEERS.....	38
3.2.3 MUSEO DE LA CASA DE LA MONEDA DE MADRID.....	39
3.2.4 ARCHIVOS	43
3.2.5 REVISTAS Y PERIÓDICOS.....	44
3.2.6 FORNCETT INDUSTRIAL STEAM MUSEUM.....	51
3.2.7 VÁLVULAS DOBLES	53
3.2.8 MANUSCRITOS.....	55
4 PROCEDIMIENTO	57
4.1 ELECCIÓN DE LAS PIEZAS	59
4.2 MEDICIÓN DE LAS PIEZAS.....	59
4.3 INCURSIONES Y DESCUBRIMIENTOS	62
4.4 ENTORNO DE CATIA Y MÓDULO PART DESIGN	75
4.5 MÓDULO ASSEMBLY DESIGN.....	86
5 RESULTADOS	92
5.1 DISEÑO DE PIEZAS.....	92
5.2 RESULTADO ENSAMBLAJES	111
6 CONCLUSIONES.....	125
7 IMPACTO DEL PROYECTO	127
8 LÍNEAS FUTURAS.....	129
9 BIBLIOGRAFÍA.....	133

10	PLANIFICACIÓN	135
11	PRESUPUESTO.....	139
12	ÍNDICE DE FIGURAS.....	141
13	ÍNDICE DE TABLAS.....	147
14	ABREVIATURAS.....	149
15	GLOSARIO DE TÉRMINOS	151
16	ANEXO.....	153
16.1	LA ESFERA. MAYO DE 1914.....	153
16.2	EL MUSEO UNIVERSAL, 1866	155

1 INTRODUCCIÓN

Este Trabajo Fin de Grado supone uno de los mayores esfuerzos realizados en el estudio de la Máquina de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII). Durante más de cien años, este monumento ha estado adornando la entrada de esta Escuela, atrayendo las miradas de cuantos pasaban a su lado y constituyendo el fondo de multitud de fotografías para el recuerdo. La Máquina actualmente es un símbolo en el que los Ingenieros Industriales y de otras titulaciones de la casa se ven representados, hasta el punto de incluir una de sus partes, el regulador de Watt, en el Escudo de la Escuela (Figuras 3 y 4).



Figura 3: Escudo de la ETSII



Figura 4: Escudo de la ETSII en una de sus ventanas

Y es un símbolo con el que todo aquel que pasa semanas, meses o años en la ETSII acaba conviviendo, llegando un momento en el que apenas se repara en él. Sin embargo, se tiene la certeza de que la Máquina estaba antes entrar por primera vez al magnífico edificio que la alberga, y, del mismo modo, la seguridad de que ahí seguirá la última vez que se crucen las puertas que dan a la salida.

Por otro lado, es la primera vez que se plantea un proyecto para la modelización de la Máquina en un programa de diseño, en este caso CATIA. Sin embargo, no lo es el empleo de dicho programa para tratar de trasladar a la pantalla de un ordenador una escultura o monumento. Ejemplos de esto son fácilmente localizables, como es el caso del diseño en CATIA de la Torre Eiffel o de la Grúa de Piedra de Santander. En lo que respecta al diseño y construcción de máquinas de vapor, lo primero desde luego es menos habitual, aunque se dispone del ejemplo cercano del Trabajo Fin de Grado de D^a. Yolanda Caballero. En contrapartida, la construcción de modelos de máquinas de vapor es mucho más habitual, encontrando multitud de maquetas realizadas por particulares (Figura 3), que recuerdan bastante a aquella que se encuentra en la Sala de la Máquina.

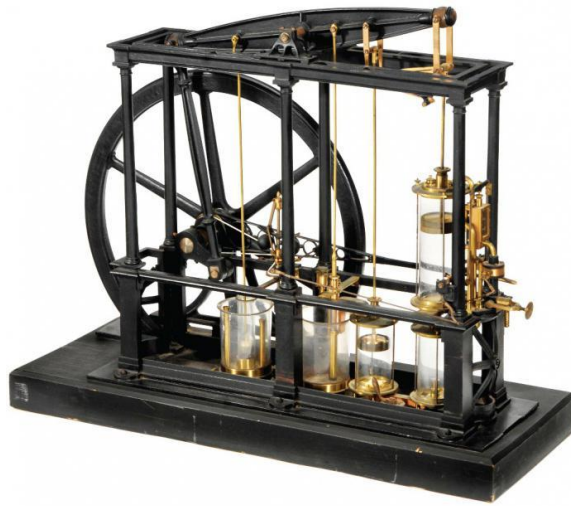


Figura 5: Maqueta de una máquina de vapor tipo Watt

2 PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

2.1 ¿CÓMO SURGE EL PROYECTO?

Quizás se debe a esta familiaridad con la Máquina lo que lleva a no sorprenderse al verla, lo que conduce a no detenerse a su lado y tratar de comprenderla. De este modo, llama la atención la poca información que se tiene actualmente de ella. Es posible que en algún momento del siglo pasado muchas cosas sobre la Máquina estuviesen de sobra comprendidas, pero la realidad es que actualmente esto no es así. Como consecuencia, este proyecto surge en parte para tratar de rellenar los huecos que faltan en la comprensión de la Máquina. El profesor D. José Manuel Burón, del Departamento de Motores, impulsor y tutor de este proyecto, siempre ha admirado la obra de ingeniería que constituye el corazón de la ETSII. Y esta admiración, es la que se ha traducido en voluntad para acabar con ese conformismo en torno al origen, naturaleza y funcionamiento de la Máquina. De esta manera, tanto los objetivos a cumplir como las líneas futuras del proyecto, de los que se hablará más adelante, están marcadas por esa voluntad.

¿Cómo es posible que en una institución, como es la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, donde multitud de investigaciones son punteras en diversos campos, no se comprenda ni siquiera el funcionamiento de lo que supone parte del pasado de una profesión como es la de Ingeniero Industrial? Por lo tanto, aparece como una necesidad incipiente el conocimiento y el descubrimiento de los secretos que alberga la Máquina. Porque la verdad es que pocos artilugios, mecanismos o construcciones representan tan fielmente el espíritu de la Ingeniería como la Máquina. Esta podría considerarse como la culminación, perfeccionamiento u optimización de una idea. Un concepto que acabaría desarrollándose hasta el punto de posibilitar toda una Revolución Industrial. Este concepto no es otro que el uso del vapor como fuerza motriz. Porque, como bien dice la placa conmemorativa de la Máquina, esta se trata de una máquina de vapor.

Aquí es conveniente volver a la necesidad del proyecto, pues no son pocas las personas que entran en el hall de la ETSII, por curiosidad, por error o por trabajar o estudiar en ella, y se preguntan: ¿qué es eso?. Es comprensible por tanto, plantearse la posibilidad de construir una maqueta, al igual que otras presentes en dicha sala, que represente a pequeña escala la Máquina. Este uno de los argumentos que con más fuerza justifican el presente proyecto. Aspirar a construir la Máquina en miniatura (relativamente) para poder ilustrar el movimiento de cada una de sus partes, algo que actualmente no es tan inmediato.

Por otro lado, además del interés que pueda suscitar un proyecto como este en el contexto de la ETSII, es posible encontrarlo en al menos una organización, con la cual se requirió establecer comunicación para su realización. Fruto de la misma, dicha organización, mejor denominada asociación, llamada Napier Power Heritage Trust, mostró interés en conocer e incluso redactar un artículo sobre el modelo que se iba a construir en el proyecto. Como se verá más adelante a la hora de compartir la investigación acerca de la Máquina, la asociación anterior tiene como fin preservar el patrimonio de la compañía D. Napier & Son Limited, a la cual se atribuye la construcción de la Máquina, por lo que cobra sentido el interés mencionado.

En el contexto de este Trabajo Fin de Grado, se puede enmarcar otro proyecto, cuyo desarrollo coincidió en parte temporalmente con este. Este, fue realizado por D^a. Yolanda Caballero, y en él se consiguió simular una máquina de vapor, aunque diferente a esta. Al plantear los objetivos del presente proyecto, se profundizará más en las similitudes y diferencias con este.

A lo anterior se une la motivación personal para la realización del proyecto. Esta procede en parte de la necesidad de realizar un importante ejercicio de ingeniería inversa, de descubrir aquello que actualmente se desconoce. Plantear hipótesis y tratar de verificarlas por medio de la observación y de la investigación supone una actividad verdaderamente estimulante, al

mismo tiempo que exigente. Además, el hecho de que el objetivo de dicho ejercicio sea la Máquina implica un aliciente añadido, pues se trata de una estructura de una calidad técnica y artística excepcional. Por lo tanto, la motivación para realizar el proyecto es considerable, así como el reto que supone, de ahí que el esfuerzo desarrollado haya sido también importante.

2.2 OBJETIVOS

En este aspecto, son varios los objetivos que abarca este proyecto, aunque hay uno de ellos que tiene clara prioridad sobre el resto. Este no es otro que la construcción de la Máquina en un programa de diseño 3D. Este objetivo requiere de varios matices para comprender su alcance.

Por un lado, no se pretende crear un diseño que recuerde y en cierto momento pudiera llegar a moverse de forma similar, con piezas equivalentes, a cómo lo haría la Máquina. Aquí parece que se pondría la funcionalidad por encima de otros aspectos que en este caso se consideran más importantes. En lo que respecta al presente proyecto, se persigue y se busca representar la Máquina con el mayor grado de detalle posible, tratando en parte de aportar así calidad al mismo. Y con posible se hace referencia a las limitaciones técnicas, y también temporales, que existen y que impiden con toda lógica que el diseño en el programa sea absolutamente igual a la realidad. Muchos son los factores que se irán complementando para colaborar en esta diferencia, y se irán exponiendo según fueron surgiendo en el avance del proyecto.

El programa empleado es CATIA, y sobre él se incluyen ciertas nociones para, en caso de no haber trabajado con él o con otro programa de diseño gráfico, se pueda comprender cómo ha sido el proceso de construcción de cada una de las piezas y su ensamblaje. Obviamente, no se explicará cada paso para cada una de las distintas partes de la Máquina. Es cierto que en general cada pieza es diferente y su interpretación para transformarlas en dibujos y volúmenes también lo es. Sin embargo, el proceso para diseñarlas es similar, y las operaciones realizadas en el programa suelen ser del mismo tipo. Como consecuencia, un objetivo del proyecto, quizá más propio, consiste en aprender a utilizar una herramienta tan potente como es CATIA, muy ampliamente empleada en la industria, por su versatilidad y precisión.

Por otro lado, teniendo en cuenta cómo se planteó el proyecto, es un objetivo fundamental tratar de conocer el funcionamiento de la Máquina. Aunque la teoría sobre cómo consiguen las máquinas de vapor obtener potencia en un eje está clara, el funcionamiento concreto y particular de la Máquina no lo es tanto. Más adelante se explica el proceso general de una máquina cualquiera, sin entrar en mucho detalle. Como consecuencia, se podrán apreciar en la Máquina los distintos elementos que caracterizan a las máquinas de vapor. Sin embargo, el cómo se produce la conexión entre ellos ya no es tan inmediato. Esta máquina es ciertamente particular por diversos aspectos, y respecto a ella hay muchas incógnitas, por diversos motivos. Por lo tanto, tratar de revelar estas incógnitas es parte implícita del proyecto. Porque si se pretende construir la Máquina y así poder en un futuro aspirar a simular su movimiento, muchas de ellas tienen que ser desveladas.

Además de lo anterior, conviene diferenciar este proyecto con respecto a otros sobre máquinas de vapor. En las páginas siguientes no se va a desarrollar toda la teoría, y hay mucha, sobre las máquinas de vapor, no es el objetivo. Este documento está dedicado a la Máquina de la ETSII, y por ello relacionado con aquello que tiene que ver con los motores de vapor. Como consecuencia, los desarrollos matemáticos o los diagramas termodinámicos no van a tener protagonismo en este proyecto. Esto se debe a que, por un lado, se pretende representar la Máquina en un programa de diseño y no caracterizar matemáticamente su movimiento; por otro, la simulación que en un futuro podría llevarse a cabo, en todo caso sería mecánica, y no llegaría en ningún momento a incluir simulaciones con un fluido como el vapor.

En lo que respecta a las diferencias con el Trabajo Fin de Grado de D^a. Yolanda Caballero, en aquel se disponían de planos de las piezas, con medidas y posiciones relativas para poder construirla. La máquina cuyo diseño realizó, se conoce con el nombre de Lady Stephanie, y su origen en nada tiene que ver con el propio de la Máquina. Esto se debe a que no se trata de una máquina de vapor diseñada y construida para una aplicación real hace 150 años. En su lugar, se concibe como una máquina de exhibición en 1981, cuyo autor responde al seudónimo de Tubal Cain, y cuyos planos aparecieron incluso en la revista *Engineering in Miniature*. En el caso actual, y de esto será el lector más consciente posteriormente, no se tiene información, plano o dibujo alguno acerca de esta máquina. Por lo tanto, un objetivo consistiría en poder crear todos los planos acotados de todas las piezas. Esto, podría facilitar sin duda estudios posteriores acerca de la Máquina.

Otro objetivo que persigue este proyecto, y que está implícito en el hecho de diseñar la Máquina, es el hecho de completarla. Esto es debido a que hay ciertas partes de las cuales lo único que se sabe es que en la actualidad no están presentes. No se tiene constancia de si alguna vez estuvieron, es decir, de si fueron instaladas en la Máquina cuando esta fue trasladada a su emplazamiento actual. Esta tarea, que si bien puede tener éxito en lo que se refiere a conseguir la funcionalidad deseada, se antoja complicada de verificar. Las piezas diseñadas en consecuencia no se pueden considerar como representación de la realidad.

Por último, existe en este proyecto un afán de investigación y búsqueda de información, referencias o documentos relacionados con la Máquina de la ETSII. De esta manera, se ha tratado de rastrear, entre otros, su origen, su instalación en España o su traslado a la Escuela. Se considera de vital importancia poder tener fielmente documentada toda la historia de esta máquina. Del mismo modo, se ha perseguido encontrar alguna máquina de vapor que fuese igual a esta, es decir, localizar el modelo de máquina. Para lo anterior, se parte únicamente de una placa informativa en la base de la misma, de la cual se hablará más adelante.

Estos objetivos, presentados de esta manera, inicialmente no eran así. El tiempo y el transcurso del proyecto los han ido adaptando hasta los que aquí se han presentado. Al comienzo este trabajo se planteó con la realización de la maqueta incluida. Y esto se manifestó más bien pronto como una tarea inabarcable para el carácter de un proyecto como este. El detalle y la precisión que se ha pretende darle al diseño 3D impedían desde luego poder llegar a esa meta. Además, como ya se ha mencionado, al tratar de profundizar en el conocimiento de la Máquina, mayores eran los problemas a resolver. De tal modo que lo que al principio, mirando la Máquina como cualquiera que pasa por su lado, se antojaba como algo más o menos sencillo, con no demasiadas piezas, que además eran simples, y cuyo funcionamiento estaba claro, al poco se transformó en lo que este proyecto pretende abarcar.

Como consecuencia, los objetivos que se persiguen en este proyecto se pueden resumir en los siguientes:

- Diseño en CATIA de la Máquina de la ETSII con la intención de que sea idéntica a la original. Obtención de un modelo lo más cercano a la realidad.
- Encontrar algún plano o documento en la que se haga referencia a la Máquina (construcción, instalación, traslado). Averiguar la historia de la Máquina y documentarla.
- Averiguar el funcionamiento exacto de cada una de las partes de la Máquina.
- Adquisición de la destreza necesaria en el manejo de Catia para poder afrontar el proyecto.
- Realización de planos de las piezas, en el caso de no encontrarlos.
- Simulación del movimiento de las diferentes partes de la Máquina y del conjunto.

3 INVESTIGACIÓN

Para tratar de alcanzar los objetivos planteados, es necesario seguir un proceso constituido por diversos pasos, los cuales van a ser explicados a continuación. Además, hay que tener en cuenta que para llegar a ciertas metas, hay que perseguir otras primero. Como consecuencia, disponer del diseño completo de la Máquina y estar en disposición de llevar a cabo en un futuro la simulación del movimiento, serán en todo caso consecuencia de los distintos trabajos previos. Por otro lado, también es cierto que otros objetivos que persigue el proyecto, como la búsqueda de referencias sobre esta máquina, pueden ser realizados en paralelo junto a otras actividades, sin que por ello bloqueen el desarrollo del proyecto. Esto se podrá apreciar con mayor claridad en el apartado correspondiente a la planificación.

En cuanto a la metodología, las distintas tareas que ha requerido el proyecto van a ser agrupadas en dos grupos. El primero es el referido a la investigación, a toda la búsqueda realizada, tanto online como a través de los volúmenes de la Biblioteca y el Depósito de la ETSII. El segundo recoge todo aquello que tiene que ver directamente, en la práctica, con la consecución del objetivo principal del trabajo. Por lo tanto, engloba todo el proceso de medidas que se han realizado en la Máquina, así como el diseño implementado en CATIA.

3.1 BÚSQUEDA SOBRE MÁQUINAS DE VAPOR

En primer lugar, para acometer un proyecto como este, era necesario comprender cómo funcionaban las máquinas de vapor. Para ello, fue necesario recurrir a diversos libros y a vídeos explicativos para tratar de entender, en un principio, el funcionamiento básico de estos motores. Aquí, es conveniente destacar el volumen de información disponible sobre ellos. Esta magnitud es tal debido a la importancia que adquirió la máquina de vapor en todos los ámbitos. Es sorprendente la variedad y complejidad que llegaron a alcanzar, aunque en realidad, era necesario para conseguir satisfacer las necesidades que la sociedad comenzaba a exigir. Lo que comenzó siendo un artilugio que ni siquiera conseguía cumplir la tarea que le daba nombre (‘El Amigo del Minero’ de Savery), se acabó convirtiendo en el motor térmico por excelencia durante parte del siglo XVIII, el siglo XIX y principios del XX.

Cuanto más se pretende profundizar en este mundo de las máquinas de vapor, más se es consciente de la ciencia que se acabó desarrollando en torno a ellas. Entre ellas la termodinámica, pues es sorprendente el hecho de que las primeras máquinas de vapor fueran anteriores al propio Sadi Carnot (1796-1832), padre de dicha ciencia. Sin embargo, no se debe caer en el error de suponer que estas máquinas se construyeron sin fundamento matemático o mecánico. Todo lo contrario. Desde que James Watt favoreció con sus aportaciones el desarrollo de la máquina de vapor a lo que hoy en día conocemos, y desde que su patente caducó en 1800 [1], muchas personas colaboraron para dotarla de la capacidad y diversificación de las que llegó a gozar. Y todo ello apoyado ya en leyes y principios físicos, a partir de los cuales fue posible buscar su optimización.

Todas las nociones anteriores se adquieren con cierta búsqueda sobre máquinas de vapor. El conocimiento extraído de los libros consultados se traduce en una explicación, más adelante en el presente documento, sobre una breve historia de la máquina de vapor y acerca de sus diferentes partes. Además, también se pretende introducir, mediante una explicación no muy extensa, el funcionamiento de las máquinas de vapor. La finalidad de todo ello es favorecer la comprensión, y familiarizar al lector con las diferentes partes que luego van a ser diseñadas mediante el programa. De esta manera, las principales fuentes a las que se ha recurrido para ello han sido: *La Escuela del Técnico Mecánico* [2]; *Motores de vapor. Máquinas de émbolo* [3]; *Machines a vapeur et machines thermiques diverses* [4]; y *El Mundo Físico* [5], entre otros.

3.1.1 BREVE HISTORIA MÁQUINA DE VAPOR

Si durante más de un siglo las máquinas de vapor permitieron el desarrollo industrial de la época, siendo el motor principal, y prácticamente único, de todas las industrias, fue principalmente gracias a James Watt (1736-1819). Sin él, el alcance de las mismas no habría podido ser tal, y quizás la máquina de vapor habría quedado relegada mucho antes de lo que en la realidad fue. Sin embargo, Watt no fue el primero que pensó en la fuerza elástica de un fluido como el vapor como motor del movimiento.

De un modo muy distinto al que trabajaría la Máquina de la ETSII, otros artefactos han funcionado a partir de la expansión del vapor. Aquí, se puede enmarcar la conocida Eolipila (puerta del aire) de Herón de Alejandría, en el siglo I. Sin una finalidad más allá de la recreativa, basaba su funcionamiento en la reacción a la fuerza del vapor. En la Figura 6 se puede observar cómo, gracias a la salida del vapor a través de dos tubos contrapuestos, se conseguía el giro de una esfera metálica.



Figura 6: Eolipila de Herón de Alejandría [6]

Muchos otros nombres y artefactos se podrían mencionar entre Herón y su invención, y las máquinas que se van a describir a continuación. Sin embargo, únicamente se pretende aquí dar unas pinceladas a una historia tan longeva como es la del vapor. Salomon de Gaus, Blasco de Garay o Edward Somerset, entre otros muchos, tienen sin duda un hueco eterno en la historia del desarrollo de la máquina de vapor.

Por otro lado, conviene destacar que muchas tentativas con respecto a esta nunca podrían haber tenido éxito. Y la razón es tan simple como que en muchos casos se trataron de invenciones previas siquiera al conocimiento del concepto de presión atmosférica y la invención del barómetro o el termómetro. Papin y Watt son los hijos de Torricelli y Galileo [5].

El primer artefacto que puede ser considerado como máquina de vapor aplicada a la industria, fue construido por Savery a finales del siglo XVII. El principio bajo el que se regía fue introducido inicialmente por Dionisio Papin: «Papin es el primero que ha pensado en combinar (ë) la acción de la fuerza elástica del vapor con la propiedad que tiene este vapor (ë) de condensarse por enfriamiento» [5]. Papin, médico francés de ese mismo siglo, puede ostentar el título de inventor de la máquina de vapor. El artefacto que ideó se observa en la Figura 7, y simplemente ponía de manifiesto la capacidad del agua contenida en el recipiente A de, al convertirse en vapor con el debido aporte de calor, elevar el émbolo B. Posteriormente, el enfriamiento y la condensación de ese vapor junto con el peso del émbolo, llevaba a la bajada de este:

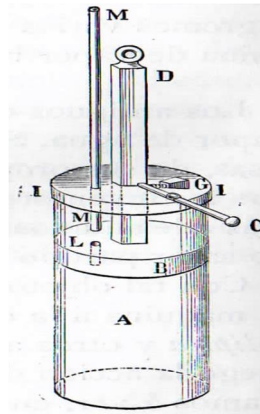


Figura 7: Artefacto de Papin [5]

De esta manera, Savery, en 1698, construyó el conocido óAmigo del Mineroô cuyo esquema es similar al de la Figura 8:

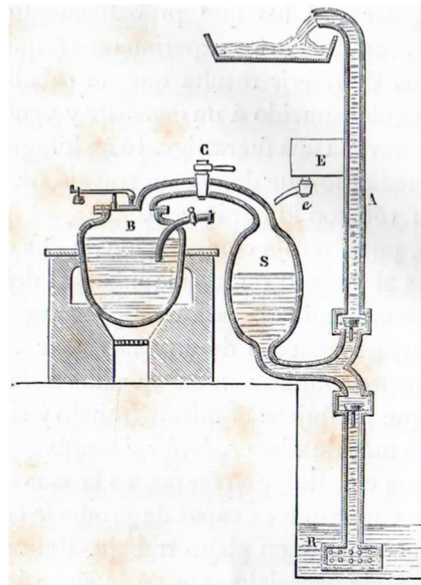


Figura 8: Amigo del Minero de Savery [5]

En esta máquina, empleada fundamentalmente para la elevación de agua, se utilizaba la condensación del vapor, producido en la caldera B, del depósito S, para succionar el agua del depósito R. El agua elevada de este modo, llenaba parte del depósito S, y, posteriormente, mediante una inyección de vapor desde la caldera, se impulsaba de nuevo hasta la altura deseada.

A pesar del nombre de esta máquina, lo cierto es que tuvo escasa utilidad en las minas. Esto, se debe a que la elevada presión que necesitaba el vapor, para elevar el agua a una altura considerable, era tal que implicaba un cúmulo de riesgos que podían derivar en explosiones. Como consecuencia, su utilidad se limitó a aplicaciones donde la altura a salvar no fuese excesivamente grande, áunos cuarenta piesô[5].

Pocos años después, en 1712, de nuevo Savery, junto con Thomas Newcomen, de oficio herrero, y Juan Cawley, vidriero, constituyeron una asociación de la que nacería la que se conoce actualmente como Máquina de Newcomen o máquina atmosférica (Figura 9).

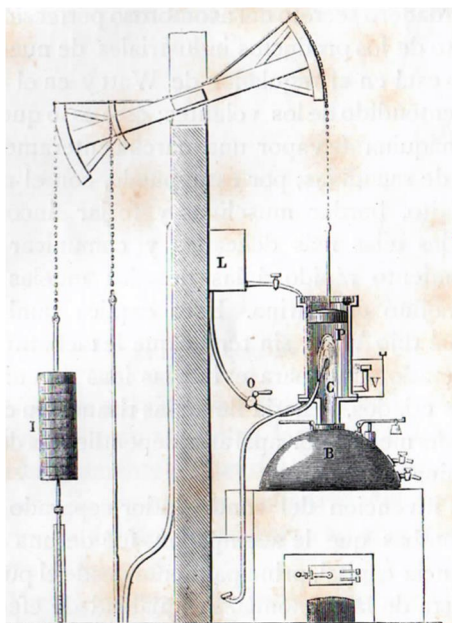


Figura 9: Máquina de Newcomen [5]

En esta máquina, es la presión de la atmósfera la que actúa como verdadero motor. En este caso, el vapor se emplea únicamente para elevar el émbolo, y, por medio, de la condensación, que tiene lugar en el mismo cilindro, favorecer la acción de la mencionada presión. De esta manera, se inyecta agua en el espacio del cilindro en el que se ha incorporado vapor de la caldera. Este al condensarse da lugar a la succión, al empuje, del émbolo hacia abajo.

Por otro lado, se observa en la Figura 9, la existencia de un nuevo elemento, y no es otro que el balancín. La función de este es, en primer lugar, transformar el descenso súbito del émbolo en un ascenso, un bombeo, en su otro extremo; y en segundo lugar, facilitar el regreso del émbolo a su parte superior por medio de un contrapeso. Esta máquina, fue empleada sobretodo en minería y en la distribución de agua en la ciudad de Londres [5].

Es necesario destacar, que tanto el *Amigo del minero* como la Máquina de Newcomen, se basan en conceptos ligeramente diferentes al introducido por Papin. Este último, como se ha expuesto, aprovechaba la fuerza elástica del vapor para empujar un émbolo. En cambio, la creación de Savery se basaba en dicha fuerza elástica para empujar directamente una masa de agua, y la máquina atmosférica aprovechaba la presión exterior en lugar de la comentada fuerza del vapor. A pesar de ello, esta última fue la disposición adoptada durante décadas, hasta 1769, en la que hace su aparición Watt y sus innovaciones con respecto a las máquinas de vapor.

¿Cómo se puede transformar un concepto, que a priori únicamente solo era válido para el bombeo de agua, en todo un motor universal que se ha comentado que fue? Un primer paso fue transformar el llamado simple efecto en el necesario doble efecto. El primero se mostraba inservible para el funcionamiento de máquinas o industrias que requiriesen de un régimen continuo, sin intermitencias.

Como consecuencia, James Watt introdujo el concepto del doble efecto, en el que conseguía, suprimiendo la acción atmosférica, aprovechar la fuerza del vapor en las dos fases del movimiento (subida y bajada del émbolo). Cerrando el cilindro y disponiendo un sistema de distribución del vapor, que alternativamente lo introdujese por la zona superior o inferior del cilindro, consiguió llevar a la práctica el objetivo mencionado. Este fue el inicio de toda una rama de desarrollo en torno a sistemas de distribución, dando a lugar a complejas disposiciones y mecanismos para poder controlar diferentes variables del vapor, como la presión o el caudal. Una de ellas es la que aparece en la Máquina de la ETSII y está

comandada por la actuación de dos excéntricas. Sobre esto se hablará en páginas posteriores.

Como consecuencia, esta primera y gran transformación, permitió que la acción del émbolo transferida al balancín fuese de la misma magnitud en todas sus oscilaciones. Sin embargo, Watt no se detuvo aquí, y prosiguió buscando formas de optimizar aquello que había creado. El resultado fue la creación de un aparato que lleva su nombre, el regulador (moderador o gobernador) de Watt. Su explicación, que constituye un apartado por sí solo de este escrito, y su eficacia y relevancia, se comprenden muy bien con la siguiente afirmación: «La eficacia del regulador es tal (ë) que se veía (ë) en la fábrica de hilados de algodón (ë), un reloj puesto en movimiento por la máquina de vapor (ë) sin que su marcha discrepase casi nada de la de otro reloj de muelle que había a su lado»[5].

Además de lo anterior, estableció en sus máquinas un condensador separado del cilindro en el que actuaba el vapor [1], lo que supuso un ahorro brutal, desde el punto de vista del vapor, y por ende, del consumo del combustible para obtenerlo. Hasta cuatro veces menos combustible era necesario utilizar frente a la Máquina de Newcomen, a igualdad de potencia.

Esta magnitud es perfectamente lógica si se tiene en cuenta la pérdida de rendimiento asociada al calentamiento, cuando entraba el vapor, y al enfriamiento, al introducir el agua de refrigeración, en la misma cámara de las máquinas tipo Newcomen.

Las innovaciones sobre la máquina de vapor no terminan ni mucho menos aquí, y algunas de ellas son perfectamente apreciables en la Máquina de la ETSII. El volante inercia, en la anterior imponente cuanto menos, había sido introducido por primera vez por Keane Fitzgerald en 1758, para regularizar el movimiento rotativo. Por otro lado, en 1778, Washbrough se sirvió de bielas para transformar el movimiento rotativo en el alternativo del émbolo y por último, en 1801, Murray introdujo el uso de la caja de distribución cuyo movimiento era gracias a una excéntrica [5]. Un mundo aparte y al mismo tiempo complementario son las locomotoras y las máquinas de vapor marinas, que se desarrollaron prácticamente en paralelo con las anteriores, incorporando los conceptos de las máquinas explicadas, adaptándolos, e introduciendo necesariamente otros elementos. Pero esto es otra historia.

En definitiva, muchos nombres cooperaron para dar lugar al motor que posibilitó un desarrollo industrial sin precedentes. Ninguna de las sucesivas máquinas puede entenderse sin las anteriores. De hecho, Watt comenzó su andadura en el mundo de las máquinas de vapor al tener que reparar máquinas tipo Newcomen, observando en ese proceso una serie de imperfecciones que tal vez se pudieran optimizar. Así fue como comenzó a introducir las grandes mejoras asociadas a su persona, algunas de las cuales llevan su nombre.

Por último, en la historia de la máquina de vapor interviene otra persona sin la cual Watt no habría podido inmortalizar su invención. Gracias a Matthew Boulton James Watt pudo materializar sus invenciones en una máquina mundial. Este hijo de ingeniero de Birmingham fue el que llevó a cabo toda la parte financiera de su sociedad con Watt, dejando a este último espacio y tiempo para continuar desarrollando sus ideas. Las primeras máquinas de vapor comerciales comenzaron a operar en 1776, resultando cuatro veces más eficientes que sus antecesoras de tipo Newcomen [7].

Aquello que Watt había concebido ya no tenía freno posible, y la máquina de vapor continuó desarrollándose hasta transformar completamente la sociedad.

3.1.2 CLASIFICACIÓN MÁQUINA DE LA ETSII

Las máquinas de vapor, con la diversificación en multitud de diferentes aplicaciones que tuvieron, pueden clasificarse en distintos grupos atendiendo a una serie de criterios. En lo que respecta a la Máquina, en este apartado se va a enmarcar en estos grupos, en función de sus características.

Dentro de las máquinas que trabajan con el vapor como fluido motor, la Máquina se identifica como una máquina alternativa o de cilindro y émbolo, en la que el vapor empuja por su presión a un émbolo en el interior de un cilindro.

Según la disposición del mecanismo empleado para transmitir la energía producida en el émbolo, se trata de una máquina de cilindro fijo y émbolo fijo, y dentro de esta categoría, se perfila como una máquina de émbolo con balancín. El movimiento del émbolo se convierte en circular continuo mediante un paralelogramo de Watt, una pieza oscilante o balancín y un mecanismo biela-manivela.

Atendiendo al número de caras activas del émbolo, es decir, el número de caras sobre las que actúa el vapor, la Máquina es de doble efecto, pues el vapor empuja al émbolo del cilindro por ambas caras alternativamente.

Según el modo de actuar del vapor dentro del cilindro sobre la cara activa del émbolo, puede identificarse como una máquina con expansión, en lugar de a plena presión. Esto solo se pudo confirmar al final de la investigación, como se verá más adelante. En este tipo de dispositivos, el vapor solo actúa a plena presión durante una fracción de la carrera del émbolo, expandiéndose durante la fracción restante al cortar el suministro del vapor.

En cuarto lugar, se trata de una máquina con condensación, en la cual el vapor del cilindro escapa de este a un condensador, con baja presión y temperatura, en el que se condensa. Esto permite también mejorar el rendimiento de las máquinas, al enfrentar el vapor que actúa sobre la cara activa del émbolo con una contrapresión menor que si el escape fuera a la atmósfera.

Si se atiende a la disposición del eje geométrico del cilindro, claramente la Máquina es de tipo vertical. Frente a las horizontales, ocupan menos espacio, suelen tener menos carrera (el cilindro) y mayor velocidad angular, a igualdad de potencia.

Por otro lado, a diferencia de las policilíndricas, la Máquina se encuentra en el grupo de máquinas que tienen un único cilindro. También se podría considerar como una máquina fija, dispuesta sobre su propia cimentación y estando separada de la caldera (en el pasado). Si la Máquina trabajaba con vapor saturado o recalentado es imposible establecerlo.

Por último, la Máquina podría considerarse como de transmisión indirecta, pues el movimiento del émbolo no se convierte inicialmente en movimiento rotativo del árbol de potencia. Estas clasificaciones responden a los criterios transmitidos por Spangler [8] y Guillemín [5].

3.1.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS PARTES DE LA MÁQUINA

En este apartado, se procede a identificar visualmente las partes de las que consta una máquina de vapor y que se pueden observar en la Máquina (Figura 10 y 11). De este modo, es posible realizar una primera aplicación de los conocimientos adquiridos a partir de las investigaciones anteriores, y se permitirá así al lector comprender las explicaciones posteriores sobre ellas, pues se estará en disposición de visualizar las mismas.

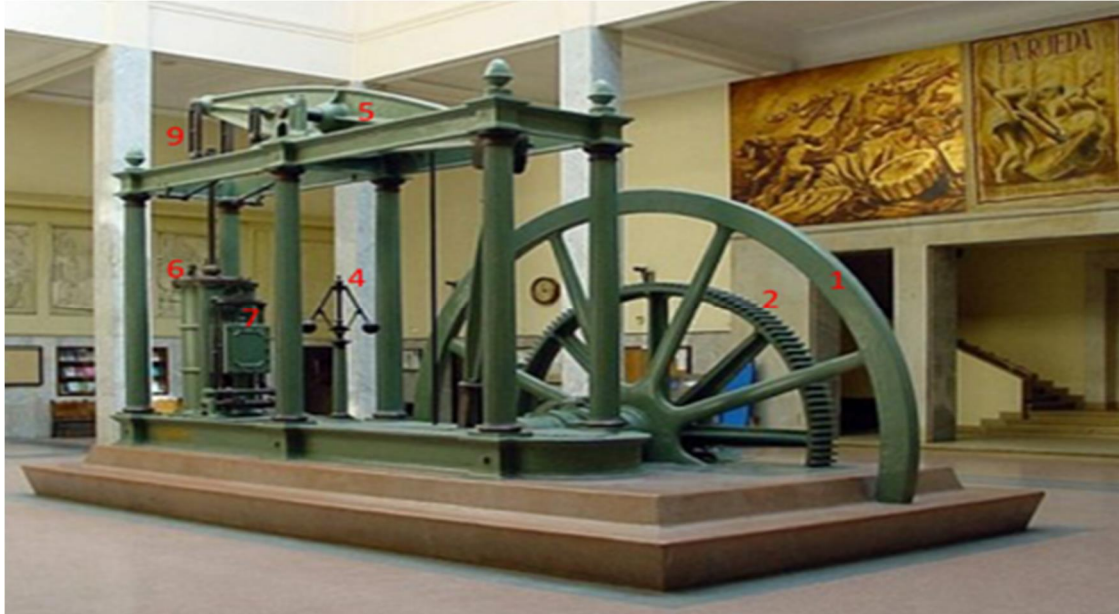


Figura 10: Máquina de la ETSII con numeración de sus diferentes partes (1)

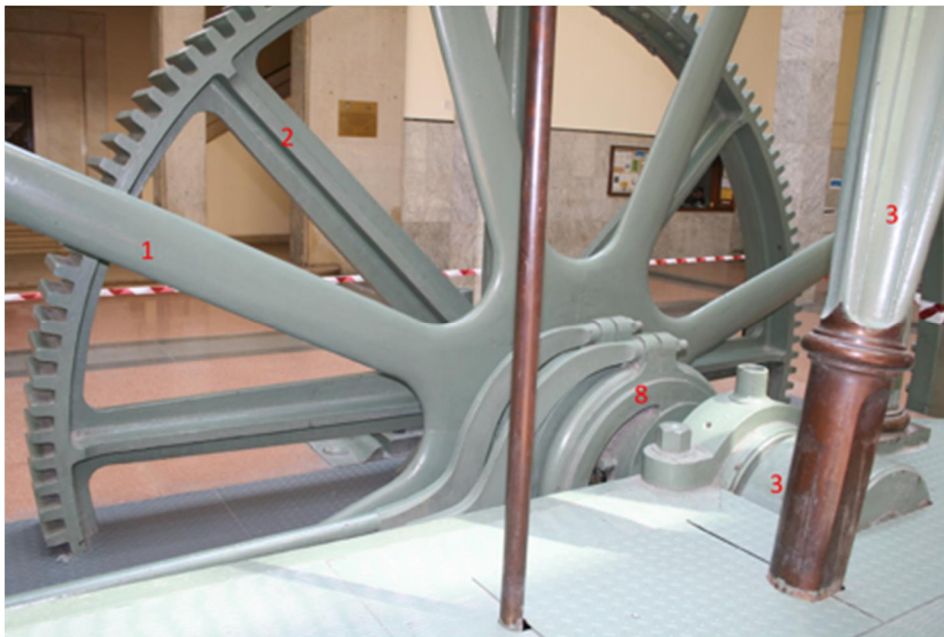


Figura 11: Máquina de la ETSII con numeración de sus diferentes partes (2)

- | | | |
|-----------------------|------------------|--------------------------|
| 1. Volante de inercia | 2. Rueda dentada | 3. Biela-manivela |
| 4. Regulador de Watt | 5. Balancín | 6. Cilindro doble efecto |
| 7. Distribución | 8. Excéntricas | 9. Paralelogramo de Watt |

3.1.4 EXPLICACIÓN DE LAS PARTES DE LA MÁQUINA

Tras la identificación de los diferentes elementos que pueden ser considerados como característicos de las máquinas de vapor, es necesario explicar su disposición en funcionamiento. Este desarrollo, sin embargo, no tiene la intención de ser muy profundo, pues entre los objetivos del proyecto no está recogida dicha intención. Se explicará, de una forma

básica, en mayor o menor medida en función de la parte que se trate, el comportamiento de los diferentes elementos anteriormente identificados. Además, esta información se acompañará también de fotografías, para complementar las vistas del conjunto de la Máquina previamente incluidas. Esta visualización, y por ende, la interiorización, de la forma que adoptan las diferentes partes de la Máquina, detalles incluidos, adquiere gran relevancia en este proyecto. La causa de esto reside en la posterior traslación de aquello que se ha observado a un entorno virtual de diseño, de tal forma que así sea posible determinar la calidad del modelo creado.

1. Volante de inercia. Se trata de un elemento que no es particular de las máquinas de vapor, con gran aplicabilidad hoy en día. Se trata de un elemento pasivo, de gran tamaño y peso (en el caso de la Máquina), cuya función consiste en almacenar energía cinética, oponiéndose a las aceleraciones bruscas que se pudieran producir en la rotación del elemento al que va acoplado. De este modo, se emplea para reducir las pequeñas variaciones de velocidad angular que en un momento dado pudieran producirse, suavizando el movimiento
2. Rueda dentada. Es el elemento que, por medio de engranajes, permite dar salida a la potencia generada en la máquina de vapor.
3. Biela-manivela. Este mecanismo tampoco es particular de las máquinas de vapor. Ya existía previamente a su invención, pues su origen podría remontarse a la época romana [8], y tras el abandono de las máquinas de vapor, en la actualidad sigue teniendo una gran aplicación, como en los motores de combustión interna. Esto se debe a su gran utilidad, pues permite transformar un movimiento circular en un movimiento de traslación, y viceversa.

Como su propio nombre indica, consta de dos partes diferenciadas. La biela, que es el elemento visible en la Máquina, es rígida y larga, y une en este caso el extremo del balancín con la biela. El movimiento del extremo del balancín no es de traslación propiamente dicho, pues describe una curva debido a la rotación del balancín. La manivela, por su parte, está acoplada al árbol al que le confiere el movimiento rotativo (en el caso de las máquinas de vapor), siendo de menor longitud que la biela y estando oculta en la parte inferior de la Máquina. La parte inferior del mecanismo se aprecia en la Figura 12.



Figura 12: Biela-manivela

4. Regulador de Watt. El regulador de Watt (Figura 13 y 14), fundamental para el correcto funcionamiento de las máquinas de vapor, podría considerarse como uno de los identificadores de la ETSII, pues hace su aparición en el propio escudo. Como su

propio nombre indica, desempeña una función clara, actuando, en líneas generales, sobre la velocidad de giro del árbol de la máquina.



Figura 13: Regulador de Watt (1)



Figura 14: Regulador de Watt (2)

Además de ser necesario, como se ha explicado, el volante de inercia, como acumulador de energía, y como nivelador entre los esfuerzos resistente y motor que actúan sobre el árbol, surge la necesidad de otro elemento capaz de actuar con mayor celeridad y capaz de hacer desaparecer diferencias duraderas que de otro modo persistirían si únicamente existiese el volante [3].

Este nuevo elemento, o dispositivo, no es otro que el regulador, y permite actuar sobre la cantidad de vapor que entra al cilindro por embolada o sobre la presión de vapor, por medio de una válvula que en la actualidad es bastante conocida: la válvula de mariposa.

Dentro del regulador, se pueden distinguir entre dos partes claramente diferenciadas. La correspondiente al medidor de velocidad o tacómetro, que, como su propio nombre indica, existe para poder conocer, en cada momento, el régimen de giro del motor térmico. Y por otro lado, la referente a todo el mecanismo que posibilita la actuación sobre el caudal o presión del vapor. La regulación, aplicada así sobre las máquinas de vapor, se puede considerar como directa.

A continuación, se va tratar de caracterizar el regulador de la Máquina, en función de la tipología y el modo de funcionamiento que adopta. Dicha tipología facilita su identificación como un regulador de bolas o regulador de Watt. Este, encuentra su base en el desarrollo de fuerzas centrífugas causadas por masas dotadas de un movimiento muy rápido (más del que puede parecer en una máquina como la de la ETSII). Movimiento, que en este caso es de rotación.

Las masas en la Máquina son esféricas y se pueden apreciar con claridad. De hecho, aún es posible moverlas. Como consecuencia, este regulador se puede enmarcar dentro de los reguladores centrífugos y en los reguladores de peso.

Si se atiende a cómo se transmite este movimiento al mecanismo que conecta con la distribución, es decir, al que conecta con la válvula de mariposa, se puede caracterizar como un regulador de manguito. Este manguito, puede deslizarse sobre el eje de rotación del regulador, y será ese deslizamiento el que, a través de un sistema de palancas consiga concretarse en una variación de la apertura de la válvula (Figura 15). Además, en relación a la trayectoria descrita por los baricentros de los pesos, se puede clasificar como regulador cónico.

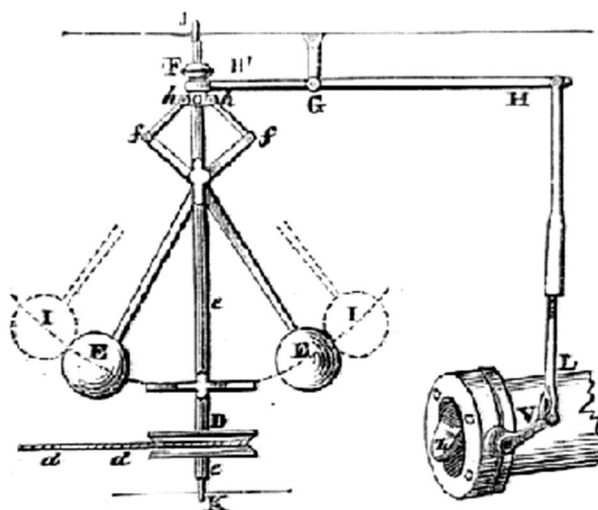


Figura 15: Esquema regulador de Watt [9]

Por otro lado, se puede distinguir como un regulador estático, en lugar de astático. Esto quiere decir que a cada posición del manguito, le corresponde un número de vueltas determinado. Al cambiar el régimen de giro del árbol, la posición de equilibrio de los pesos, y por consiguiente la del manguito, variará [3]. En realidad, esta condición realmente es necesaria para que pueda regular correctamente la marcha del motor.

Junto con lo anterior, se trata de un regulador estable, puesto que a medida que se incrementa el número de vueltas, el manguito sube. Si fuese al contrario, tendría la denominación de inestable, y sería inservible.

Las dos últimas clasificaciones, es decir, astático o estático y estable o inestable, y por tanto, la utilidad del motor, vienen definidas por las curvas características de los reguladores. Estas curvas representarían, en este caso, el desplazamiento de los pesos según varíe el régimen de giro. No se pretende aquí realizar una explicación sobre la construcción de dichas curvas, y simplemente es conveniente saber su existencia y su utilidad en el estudio de la viabilidad de los reguladores de este estilo.

A pesar de haber clasificado el regulador de la Máquina, no se ha explicado, en líneas generales, cómo actúa un regulador de esta tipología. Esto se explicará a continuación, para después particularizar para el caso pertinente.

De esta manera, en situación de equilibrio, el regulador se encuentra girando a un régimen determinado, dado por el árbol de la máquina. Si, por el motivo que fuera, la carga resistente disminuye, se producirá una aceleración del régimen. Esto causará que los pesos, las bolas, al girar a mayor velocidad, tiendan a alejarse del eje de giro del regulador, describiendo una trayectoria curva hacia arriba. Este movimiento es el causante del deslizamiento del manguito, que provocará un desplazamiento de la válvula de mariposa. En este caso, el movimiento será para estrangular el flujo de vapor, provocando que la fuerza con la que se impulsa la máquina, es decir, la que produce su giro, sea menor. Al ser ahora menor la velocidad, los pesos del regulador recuperarán una posición más cercana, llegando de nuevo, tras cierto tiempo, a una situación de equilibrio. Si la carga resistente aumentase, la respuesta sería la inversa.

Como se ha podido ver, la respuesta del regulador no es inmediata, así como tampoco es la más perfecta. Debido a ello, surgieron otros reguladores, también de bolas, como el Kley o el Proell [3], o incluso de una concepción diferente, ya no de pesos, sino de muelles, resortes, cuya tensión se podía modificar en función de las necesidades.

En lo que respecta al regulador de la Máquina, a la vista está cuáles son los pesos empleados para dicha regulación. Sin embargo, el resto de partes ya no son tan inmediatas o visibles. Por un lado, al contemplar la Máquina no se observa el

mecanismo de conexión entre el regulador y el árbol. ¿Cómo se transmitía el giro para que el regulador pudiese realizar su función? Esto se descubrió en un punto posterior del proyecto.

5. Balancín. El balancín constituye uno de los elementos básicos que permiten transformar el movimiento rectilíneo alternativo del émbolo del cilindro, en otro circular [10]. La forma que presenta este elemento en la Máquina (Figuras 16 a 18), podría equipararse con una simple barra, con un movimiento circular alternativo alrededor de su eje, que en este caso está fijado por dos cojinetes a los lados. En sus extremos está unido al émbolo del cilindro y al paralelogramo, y al mecanismo biela-manivela.



Figura 16: Balancín (1)



Figura 17: Balancín (2)



Figura 18: Balancín (3)

El movimiento que sigue el balancín se puede apreciar en la Figura 19. En ella, se observa como el extremo del balancín está unido mediante una barra intermedia al extremo del vástago del émbolo del cilindro. Este vástago, describe simplemente una trayectoria vertical, mientras que el balancín (barra o palanca), rota sobre su eje, transmitiendo este movimiento al mecanismo biela-manivela del extremo contrario [5]. La rotación del balancín está acotada a un ángulo determinado, siendo este límite aproximadamente 38° entre sus posiciones extremas [10].

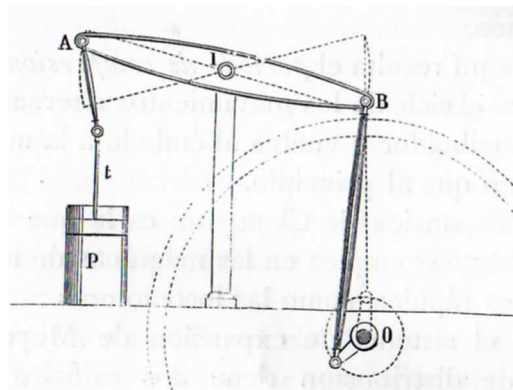


Figura 19: Trayectorias balancín

6. Cilindro doble-efecto. Sobre este elemento poco más hay que añadir a lo explicado anteriormente como invento de Watt. En la Máquina es posible apreciar que el cilindro

(Figura 20), aparte de una gran belleza, dispone en su tapa de unos instrumentos (Figura 21), cuya función no está determinada, aunque podrían tener función de manómetros, entre otras posibilidades.



Figura 20: Cilindro doble-efecto



Figura 21: Instrumentos cilindro

7. Distribución. Se entiende por distribución aquellos elementos que permiten controlar la entrada y salida del vapor del cilindro, permitiendo de este modo disponer de un cilindro de doble efecto. En la Máquina se puede identificar con las Figuras 22 y 23.



Figura 22: Distribución (1)

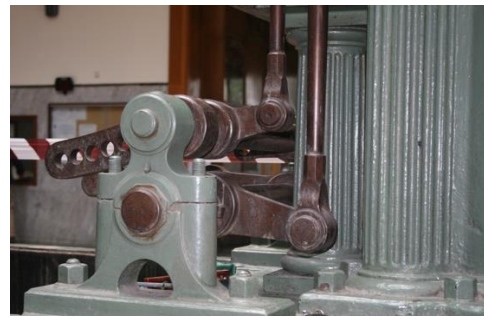


Figura 23: Distribución (2)

En las máquinas de vapor, el fluido entra y sale del cilindro por conductos que pueden equiparse con lumbreras, y que dirigen el vapor de entrada o bien a la parte inferior del cilindro, o bien a la parte superior, al mismo tiempo que el vapor de salida se dirige al condensador o a la atmósfera. Para conseguir este comportamiento, se dispone de válvulas, generalmente de corredera, que irán abriendo y cerrando los conductos mencionados en función del movimiento de la máquina.

Existen muchos tipos de válvulas capaces de realizar una regulación de este tipo, adoptando formas y tipologías muy diversas (distribución en D, Trick, Pennë) [2] Sin embargo, todas ellas cumplen con el principio anterior, el cual se ilustra en la Figura 24.

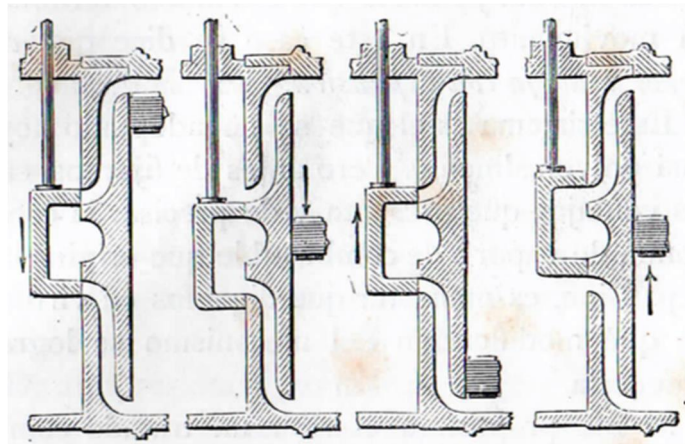


Figura 24: Secuencia de la distribución del vapor

En la figura anterior, se aprecia como en el instante de la izquierda, el vapor no puede entrar al cilindro, en el cual se encuentra el émbolo en su extremo superior. Al moverse la válvula hacia abajo, libera la alimentación del vapor a dicha parte superior, moviéndose por tanto el émbolo hacia abajo también por la fuerza del vapor. Cuando el cilindro llega abajo, la válvula sube, permitiendo ahora la entrada del vapor por la parte inferior y empujando el émbolo hacia arriba. El vapor que se encontraba en la parte superior, escapa ahora hacia el condensador (en el caso de la Máquina). Cuando el émbolo llega a la parte superior, comienza de nuevo la secuencia anterior [5].

Por otro lado, del mismo modo que con un motor de combustión interna, se puede hablar de avance al escape y avance a la admisión. De este modo, el primero consiste en la apertura de la lumbrera de escape antes de que el émbolo llegue a su punto muerto (superior o inferior), comenzando así la salida del vapor del cilindro aun cuando este se está expandiendo y empujando al émbolo. El segundo, en cambio, consiste en la apertura de la lumbrera de admisión antes de que el émbolo llegue a su punto muerto, entrando el vapor al cilindro por la parte cuyo volumen se está reduciendo. Estas fases en el movimiento del émbolo dependen del ángulo de avance o de calado de la excéntrica que rija los movimientos de la válvula [2].

En la Máquina, en este punto del proyecto, la tipología de la distribución era desconocida.

8. Excéntricas. Se pueden encontrar dos en la Máquina, acopladas al árbol en un extremo (Figura 25). La conexión del extremo opuesto no es visible (Figura 26), por lo que más adelante se ilustrará esta parte. De nuevo este elemento no supone una particularidad de las máquinas de vapor. De un modo general, estos elementos mecánicos están acoplados a un eje que no pasa por su centro geométrico, permitiendo así convertir el movimiento de rotación de dicho eje en un movimiento rectilíneo alternativo del elemento en su extremo.

La función de las excéntricas en la Máquina es gobernar el movimiento de la válvula de la distribución para que controle la entrada y salida de vapor al cilindro. Sin embargo, no se conoce cómo las excéntricas son capaces de realizar esto en la Máquina.



Figura 25: Excéntrica (1)

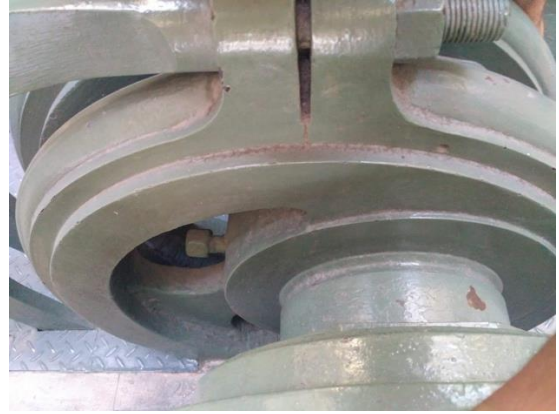


Figura 26: Excéntrica (2)

9. Paralelogramo de Watt. En el balancín se ha explicado que entre su extremo, con una trayectoria curva por la rotación del balancín, y el vástago, de trayectoria vertical recta, había un elemento adicional. Este elemento, el paralelogramo de Watt, es necesario para no torcer el vástago con el movimiento del balancín. En la Máquina se observa con claridad (Figura 27).



Figura 27: Paralelogramo de Watt

A partir del esquema de dicho sistema (Figura 28), se va a explicar cómo se mueven las diferentes barras, lo que servirá para su posterior diseño.

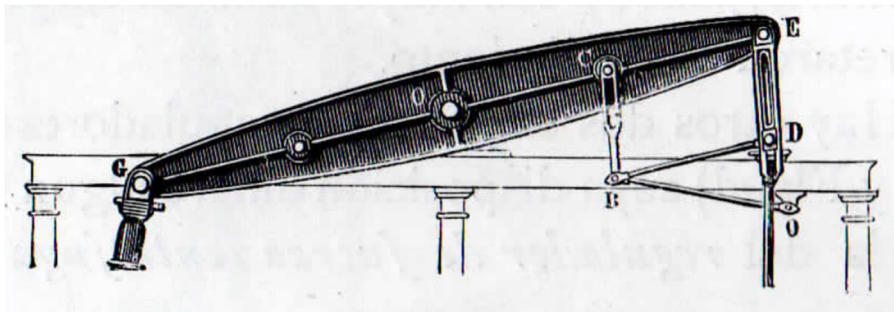


Figura 28: Esquema del paralelogramo

El paralelogramo propiamente dicho, es el formado por $CBDE$, de tal modo que está formado por cuatro lados rígidos, de longitudes invariables. Las dimensiones de cada uno de ellos se calculan con la intención de conseguir que D se mueva describiendo una línea vertical, mientras que C , B y E se pretende que describan arcos de círculo.

Al igual que D, el mecanismo del paralelogramo otorga al punto medio de *CB* la misma condición para su trayectoria. Para que esto sea posible, como se ha indicado anteriormente, la oscilación del balancín debe estar acotada.

3.2 BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN SOBRE LA MÁQUINA DE LA ETSII

Una vez se dispone del conocimiento que posibilita comprender el funcionamiento básico de los motores de vapor y sus partes, se ha realizado una búsqueda intensiva de información específica de la Máquina. En parte para facilitar el trabajo correspondiente a la medida y diseño de la misma, encontrando algún plano o foto, y en parte para conocer su historia. Para acometer dicha tarea, se han explorado diferentes vías que la lógica y la intuición han ido sugiriendo. De esta manera, a continuación se desarrollan los hallazgos, fracasos y conclusiones que han derivado de las mismas.

El punto de partida, a partir del cual se realizó dicha búsqueda, fue naturalmente la placa que se puede admirar en la base de la Máquina, y se corresponde con la Figura 29:



Figura 29: Placa situada en la Máquina de la ETSII

De ella se pueden extraer ciertos aspectos relevantes que guiaron la investigación desde el comienzo. El primero de ellos, se corresponde al tipo de máquina de vapor, en este caso, tipo Watt. En realidad, se trata de una información de la que ya se disponía y que tampoco aclaraba nada las incógnitas del proyecto. Esto se debe a que dicha clasificación es de un carácter generalista, y a que simplemente confirma algunas de las nociones básicas de esta máquina, como pueden ser la presencia de los diferentes elementos característicos o el funcionamiento al nivel más simple.

Sin embargo, el hecho de que sea tipo Watt no caracteriza necesariamente dichos elementos, puesto que la distribución o el condensador pueden adquirir muchas configuraciones diferentes. Y lo mismo sucede con la conexión entre el árbol de la Máquina y el regulador y entre último y la alimentación de vapor. En la Figura 30, se puede apreciar una máquina tipo Watt, y aunque sin duda recuerda a la que se encuentra en la ETSII, muchas son las diferencias existentes. Como esta imagen, se podrían incluir decenas similares, y cada una de ellas podría diferir de la anterior en aspectos diferentes.

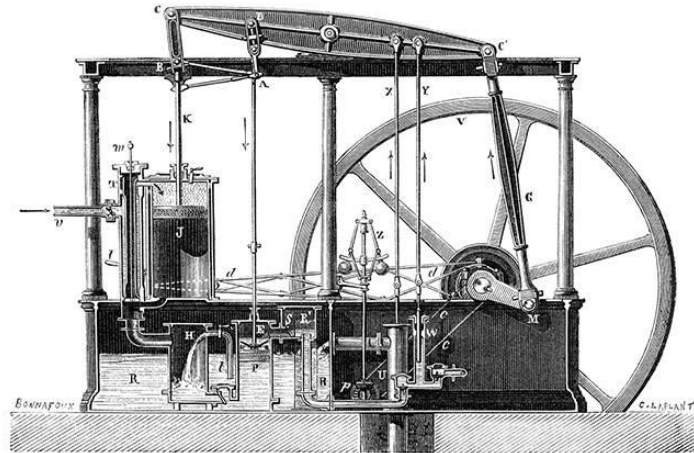


Figura 30: Plano de una máquina de vapor tipo Watt [5]

3.2.1 NAPIER POWER HERITAGE TRUST

Por otro lado, en la misma frase que el tipo de máquina, se pueden apreciar dos puntos muy importantes: ¿construida por D. Napier and Son (London) en el año 1859? Aquí se dispone de un punto de partida robusto para comenzar el rastreo propiamente dicho del origen de la Máquina.

De esta manera, la compañía *D. Napier & Son Limited* tiene su origen en 1808 gracias a David Napier, y durante la primera mitad de ese siglo gozó de bastante éxito, vendiendo y fabricando una gran variedad de productos. Entre ellos se podían encontrar máquinas como la de la Escuela, que, como se verá posteriormente, se empleaban para dotar de movimiento a las diferentes prensas que se requerían para la acuñación de moneda.

Por lo tanto, la mejor manera de obtener información acerca de la Máquina era a través de dicha compañía, si es que en la actualidad se encontraba operativa. Y lo cierto es que existe hoy una empresa descendiente de aquella firma, de nombre *Napier Turbochargers*, y que resulta ser subsidiaria de la compañía americana *WABTEC*, habiendo sido entre 2008 y 2013 también parte de Siemens. Sin embargo, resultó que la compañía actual no era poseedora de los archivos de la firma original, remitiendo en su lugar a una asociación y página web bastante particular, cuya página de inicio se observa en la Figura 31:



Figura 31: Página principal de la Napier Power Heritage Trust

De este modo, se llega a la *Napier Power Heritage Trust* (NPHT), una asociación destinada a conservar y a difundir la memoria de *D. Napier & Son Limited*, lo que permite hacerse a la idea de la relevancia que esta compañía tuvo a lo largo del siglo XIX y parte del XX. En ella, se comparten fotografías y documentos, así como se realizan actividades para transmitir la trayectoria de la compañía. Además, incluyen un apartado en el comparten algunos de los muchos productos que llegó a producir la compañía, dividiéndolos tanto por su aplicación (marina, terrestre o aérea), como por periodos de tiempo. Aquí se podría destacar la dedicación de la firma a los coches de carreras, siendo, según dicha asociación, los primeros que fabricaron motores de seis cilindros a gran escala. En total, se llegaron a fabricar más de 10000 coches durante los aproximadamente 25 años que se dedicó a ello [11].

Como consecuencia, parece que este es el lugar idóneo para encontrar información sobre la Máquina. Además, en la propia Figura 31, en la parte superior, se puede apreciar una imagen de la Máquina. Así, en el apartado de productos, aparece una sección destinada a maquinaria anterior a 1900. Sin embargo, estaba aún en proceso de desarrollo.

A pesar de lo anterior, son varias las cuestiones que han podido saberse a través de esta asociación. Por un lado, y algo a lo que también se hace referencia en la placa, hablan sobre el Museo Nacional de la Casa de la Moneda de Madrid, donde se encuentra alguna máquina construida por *D. Napier & Son*. Por otro lado, se refieren también al *Institute of Mechanical Engineers*, institución en la cual se guardan todos los archivos relativos a la compañía original. Así, es posible que referencias a la Máquina y a sus planos, aunque no hayan sido registradas por la *Napier Power Heritage Trust*, sí que estén presentes en la institución mencionada. Por último, y a partir de la comunicación con la asociación, se transmite la opción de que la Máquina en realidad no fuese construida por *D. Napier & Son*, sino que, por el contrario, fuese subcontratada a otra entidad. Lo que sí es seguro, es que el equipo y maquinaria necesarios para, a partir del trabajo de la máquina de vapor, acuñar moneda, fue realizado y manufacturado por la compañía, e incluido como parte en el mismo lote que la Máquina [11].

3.2.2 INSTITUTE OF MECHANICAL ENGINEERS

De esta manera, el siguiente paso consistió en acudir al *Institute of Mechanical Engineers*, para ver si era posible acceder a los archivos de *D. Napier & Son Limited*. A través de su archivista Karyn French, fue posible acceder a un compendio de documentos, planos y fotografías bastante importante e interesante. En él, se pudo encontrar una sección entera dedicada a *D. Napier & Son Limited*, en el que figuraban decenas de máquinas y artefactos que la compañía construyó. Todos los archivos estaban organizados de dos maneras. Por un lado, era posible acceder a todo lo relacionado con la firma, clasificado por fechas y por nombres, como se observa en la Figura 32:

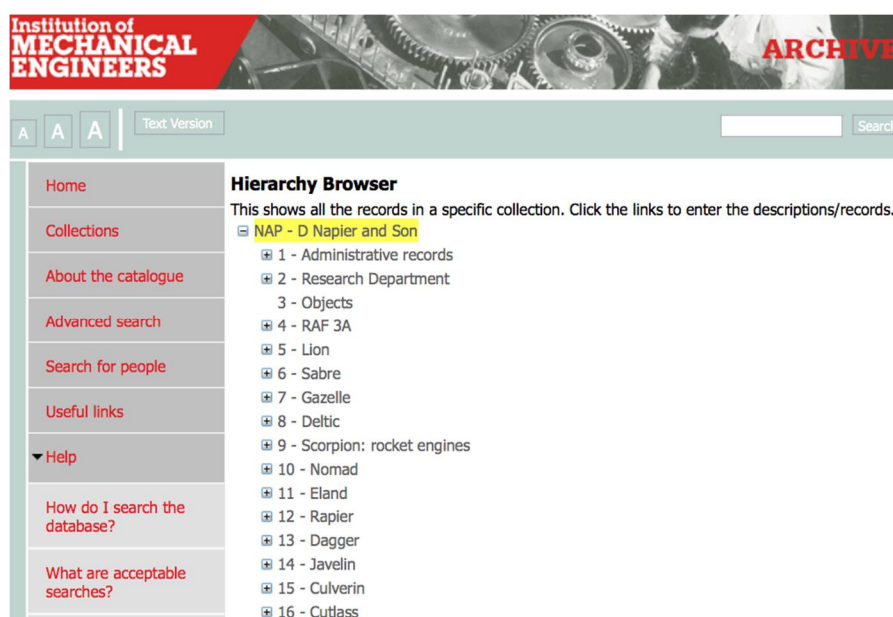


Figura 32: Archivos de D. Napier & Sons del Institute of Mechanical Engineers [12]

Tras comprobar todos los archivos, no hubo entre los diferentes artefactos, ningún resultado que fuera acorde con la fecha de fabricación de la Máquina (1859 según la placa). Por el contrario, entre los de carácter administrativo, sí que se pudo encontrar alguno de esa época, pero no contenía información de interés para el proyecto. De nuevo aquí es posible reparar en la importancia de la compañía.

Por otro lado, las diferentes imágenes estaban agrupadas de distinta manera en otro enlace suministrado, encontrando en él, además de archivos y cuadernos de *D. Napier & Son Limited*, cientos de documentos de otras compañías, alguna de las cuales también tenían gran relevancia en el diseño y construcción de máquina de vapor. Una de ellas, cuya relevancia se entiende por la historia de dichas máquinas, es la de *Boulton & Watt*. De esta manera, aparecen entre los archivos imágenes de diferentes máquinas de vapor, una de las cuales se incluye a continuación, simplemente a título ilustrativo (Figura 33).

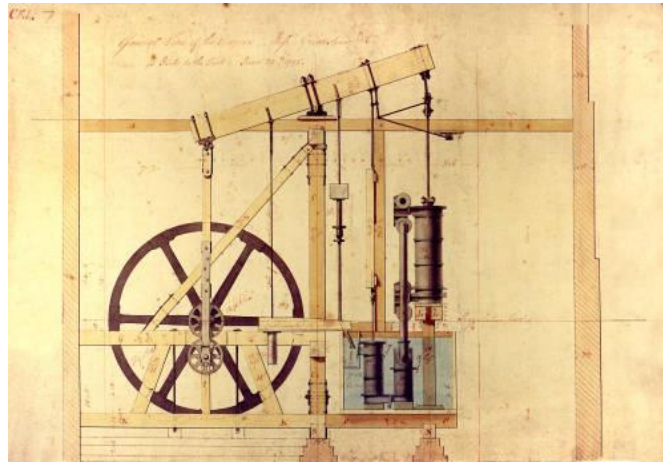


Figura 33: Máquina de vapor [13]

Respecto a Napier, una de las imágenes más antiguas que se ha encontrado se presenta en la Figura 34:

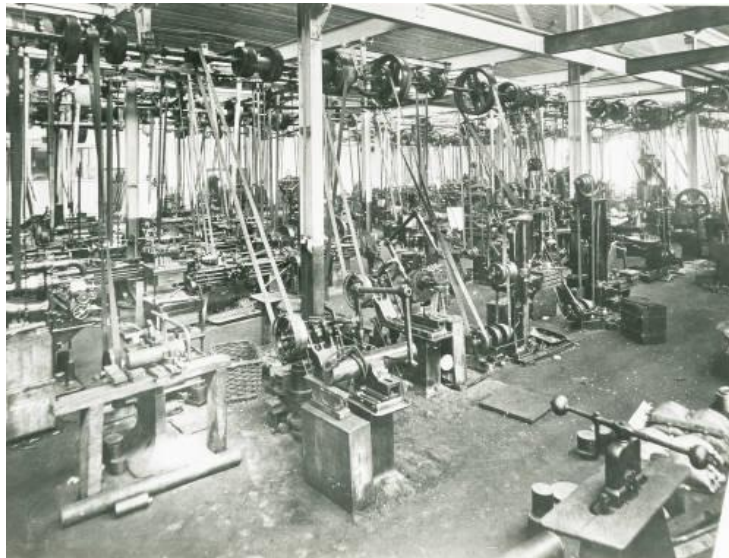


Figura 34: ÓActon Works [13]

En la imagen anterior, se puede observar toda la transmisión de la potencia que alimentaba la fábrica, probablemente suministrada por una máquina de vapor.

Tras no haber encontrado nada de especial interés para el proyecto en el archivo, se procedió a continuar la búsqueda por el segundo de los aspectos mencionados en la *Napier Power Heritage Trust*, que coincide con la siguiente frase relevante (para la búsqueda) que se podía apreciar en la placa: ÓAccionó hasta finales del siglo pasado las prensas de acuñación de la Fábrica Nacional de Moneda y Timbre (ë).ô

3.2.3 MUSEO DE LA CASA DE LA MONEDA DE MADRID

En consecuencia, se procedió a la comunicación con la Fábrica Nacional de Moneda y Timbre (FNMT) y con el Museo Casa de la Moneda de Madrid, de la cual se pudo obtener únicamente la siguiente información.

Por un lado, la consulta del proyecto acerca de la Máquina se correspondía con la cuarta ocasión en la que, desde la ETSII, se realizaba. Junto con lo anterior, se informó de que no

disponen de ningún tipo de documentación sobre la Máquina, y en todo caso, esta se encontraría en el Archivo Histórico Nacional, pues en él se recoge toda su documentación anterior a 1939. Por otro lado, según el Museo, la Máquina no impulsaba únicamente las presas de acuñación, sino que dotaba de potencia, mediante árboles y poleas, a las máquinas que realizaban todas las operaciones mecánicas de la fabricación de moneda. Principalmente laminadores, cortes y acuñadoras[14].

Además, este sistema no era sino el habitual, tanto en la acuñación como en multitud de industrias, durante el siglo XIX y parte del XX. Sin embargo, el sistema comentado presentaba una particularidad respecto a la mayoría de ellos. La transmisión a través de árboles tenía lugar por medio de trincheras excavadas en el suelo, a diferencia de lo que sucedía en otra clase de industrias donde éstos discurrían por los techos[14].

Por otro lado, otra vía para poder rastrear la Máquina a partir de la FNMT, es mediante el libro, editado en 1994, *Cien años de historia. Fábrica Nacional de Moneda y Timbre*. En él se repasa la historia de la FNMT, por lo que era de esperar que en algún punto se hiciese referencia a la Máquina. Y así fue. Es en la página 37 de dicho volumen en el que se recoge una imagen (relativamente actual, por lo que no se incluirá) de la Máquina en la misma situación que se puede apreciar hoy en día, con el siguiente título: *Máquina de Vapor de 25 CV, la primera que se instaló en el nuevo edificio*[15]. De esta manera, se obtuvo por primera vez una cifra relativa a la potencia de la Máquina.

Además de lo anterior, se menciona el hecho de que fue la primera en instalarse en el nuevo edificio. La situación en la cual se encontraba la FNMT en aquel momento giraba en torno a la necesidad de incorporar las máquinas de Boulton y Watt para resolver una producción débil e insuficiente. Dicha escasa producción, que tenía lugar en el antiguo edificio de la calle de Segovia, motivó la construcción de una nueva Casa de la Moneda. Como consecuencia, esta se convirtió en uno de los establecimientos industriales más importantes del país, llevando a cabo una continua política de innovación. Dicha estrategia, llevó a la incorporación de más maquinaria y medios productivos, durante varios años y desde varios países como Francia o Inglaterra. El hecho más claro que justifica la estrategia anterior consiste en la triplicación de la producción de monedas, pasando a acuñarse 89.895.000 reales de vellón en doblones en el año 60 a 303.084.660 en el año 61[15].

Dos piezas de información adicionales deben rescatarse del libro anterior. Por un lado, es probable que aunque la Máquina fuese construida en 1859 (según la placa), no comenzase a operar hasta 1861, año en que se inauguró el nuevo edificio. En consecuencia, toda la maquinaria necesaria para funcionar en la nueva construcción, y que además comenzó a adquirirse desde 1848, se almacenaba en la casa nº 23 de la calle María Cristina adquirida en 1847 [15]. De esta manera, lo más probable es que prensas de volante, prensas Thonnelier, balanzas automáticas del ingeniero inglés James Napier e incluso, la propia Máquina, residieran un tiempo en ese almacén provisional antes de ser instaladas en su ubicación definitiva. Respecto a James Napier, es posible que, cuando anteriormente se habló de que en la *Napier Power Heritage Trust* se hacía referencia a unas máquinas existentes en el Museo Casa de la Moneda, fueran estas.

Por otro lado, en el libro se hace también referencia a la fecha de sustitución de la Máquina por una más moderna y potente. *Sustituida en 1891 por una de 50 caballos de la Casa Sulzer Hnos. de Winterthur (Suiza)*. De esta manera, la Máquina, en cualquier caso, parece que operó apenas 30 años. Por lo tanto, si se tienen en cuenta la fecha de sustitución y la de cesión e instalación (1910 según la placa) de la Máquina en la ETSII, se observa un desfase temporal en torno a los 20 años.

En consecuencia, cabe preguntarse qué pasó en ese intervalo de tiempo con ella. A partir de aquí, ya son todo conjeturas sin mucho fundamento. En la fábrica sería extraño que hubiese continuado si no realizase ningún trabajo. Quizás volvió a aquel almacén temporal. ¿Es posible que fuese en aquel periodo en el que se perdieron las partes que hoy en día ya no están? Tal vez. En cualquier caso, se trata de una información que no se ha encontrado.

Una vez explicada de forma breve la construcción de un nuevo edificio, es posible incluir una serie de fotos, suministradas por el Museo Casa de la Moneda, en las que se ilustran, por ejemplo, la situación de la Máquina en dicho edificio. No se dispone de la fecha en que fueron tomadas, aunque en principio datarían principios del siglo XX, probablemente de los años 20. De esta manera, en las siguientes Figuras pueden apreciarse diversas estancias, como son las calderas o el patio en el que situaba la Máquina. Aquí, aunque se haya hablado de la Máquina, la realidad es que esas estancias pudieron acoger otras máquinas de vapor, como aquella que en 1891 sustituyó a la Máquina.

Así, en la Figura 35 y 36 se pueden apreciar el patio y el local de la máquina de vapor, según lo aportado por el Museo.

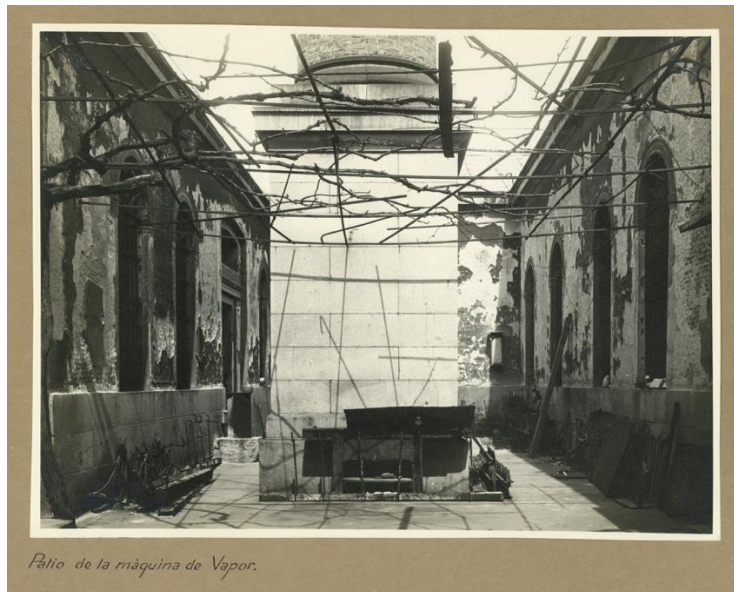


Figura 35: Patio de la Máquina de Vapor de la FNMT de Colón [14]



Figura 36: Local de la antigua máquina "Watt" [14]

Además, en las Figuras 37 y 38, es posible observar la sala de calderas y la caldera en las cuáles se produciría el vapor que alimentaría las máquinas de vapor.

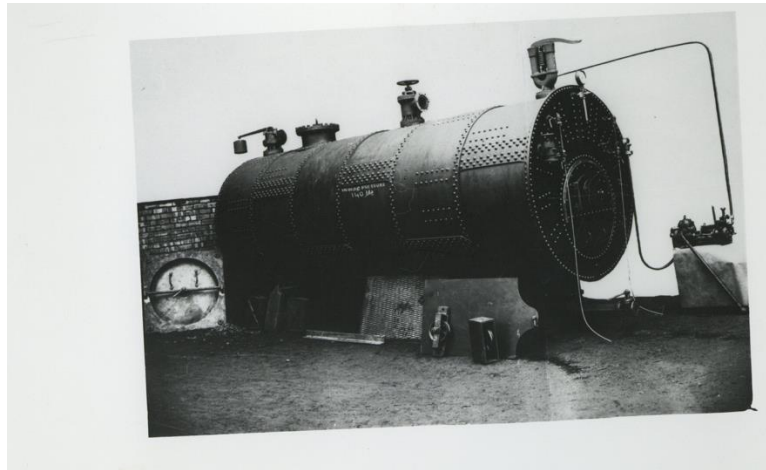


Figura 37: Caldera FNMT [14]

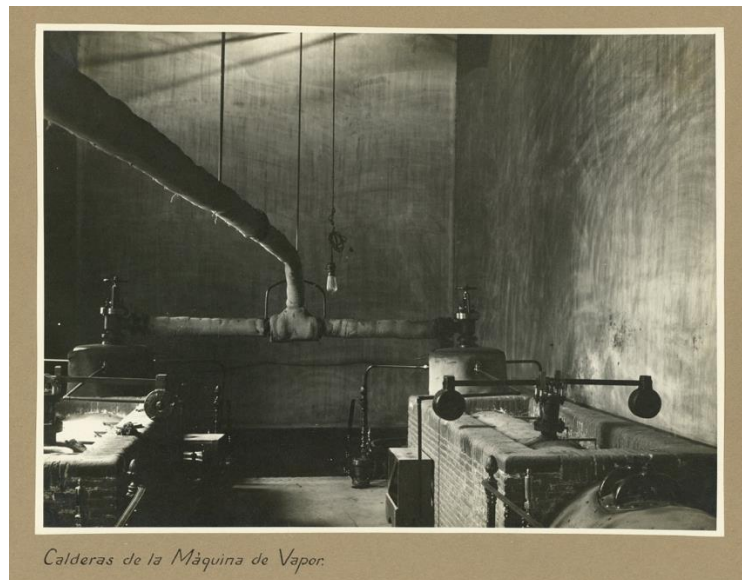


Figura 38: Calderas de la Máquina de Vapor de la FNMT [14]

Por último, se incluye una imagen (Figura 39) en la que, a priori, se supone que se observa una máquina de vapor. Obviamente, no se corresponde con la Máquina, así como tampoco se corresponde con la totalidad de una máquina de vapor. Podría tratarse, eso sí, del volante de una máquina, empleado para favorecer un movimiento más regular, como ya se ha explicado.

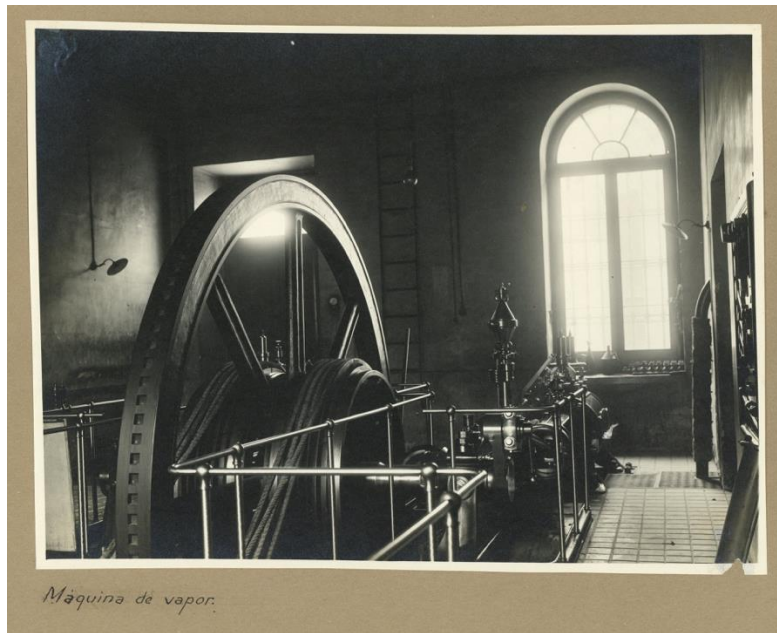


Figura 39: Máquina de Vapor de la FNMT [14]

Por otro lado, y a partir también del libro (*Cien años de historia. Fábrica Nacional de Moneda y Timbre*), se tuvo constancia de la revista *El Museo Universal*, la cual, disponible digitalmente en la Biblioteca Virtual de Prensa Histórica, hace referencia en un número concreto, a la Casa de la Moneda. De esta manera, aporta ilustraciones de ella e información acerca de las diferentes estancias y disposición del nuevo edificio de la FNMT. Así, es posible confirmar, en el Año X número 48-1866 diciembre 20 de *El Museo Universal*, que la Máquina se encontraba en dicho edificio y en funcionamiento, durante 1866, y que tenía 25 CV de potencia: «El motor que impulsa todas las máquinas, es un magnífico vapor Napier, sistema Watt, de expansión varia y fuerza veinte y cinco caballos»[16].

Además, también es posible encontrar aquello que se ha mencionado anteriormente sobre la existencia de otras máquinas de vapor en la fábrica: «() son movidas por una de vapor, vertical, de expansión variable y ocho caballos de fuerza, construida en Barcelona»[16]. En ese mismo número de la revista, es posible encontrar también grabados que describen los hornillos de fundición y el departamento de estampación de la fábrica. Se incluirán en un anexo.

3.2.4 ARCHIVOS

Tras las revelaciones anteriores, el siguiente paso consistió en acudir al Archivo Histórico Nacional, que, como se indicó desde la FNMT, contenía el archivo de la Casa de la Moneda de Madrid anterior a 1939. Sin embargo, la búsqueda fue infructuosa y no se encontró nada de valor para el presente proyecto. Y ello a pesar de que los contenidos que figuraban en el catálogo acerca de planos, dibujos y fotos de máquinas de vapor, incluso de Napier, y con fechas coherentes con lo que se estaba buscando, daban lugar a pensar que allí se encontrarían los planos de la Máquina. Pero nada más lejos de la realidad.

En lo que respecta a la placa de la Máquina, solamente queda por analizar la última frase: «siendo donada e instalada en el vestíbulo de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid en 1910» Como consecuencia, se planteó la posibilidad de buscar algún tipo de documento en el cual se registrase dicha donación a la ETSII. Para ello, se acudió al Archivo General de la Universidad Politécnica de Madrid y al Archivo Histórico de la ETSII. De nuevo, ningún documento o referencia a la Máquina pudo ser encontrado.

3.2.5 REVISTAS Y PERIÓDICOS

Una vez rastreadas las posibles fuentes de información, relativas a lo atestiguado en la placa y en lo que respecta a archivos, bibliotecas y registros, el siguiente paso natural consistió en acudir a documentos del tipo El Museo Universal. De esta manera, se acudió a los medios de comunicación que existiesen, tanto en el siglo XIX como en el siglo XX, buscando así revistas, como la mencionada, o periódicos, en los que se hiciera referencia a la Máquina. Para esto también resultó útil la placa, pues buscando en las fechas que aparecen en ella, es decir, la de construcción (1859) y donación (1910), la probabilidad de encontrar alguna referencia a ella se incrementaba.

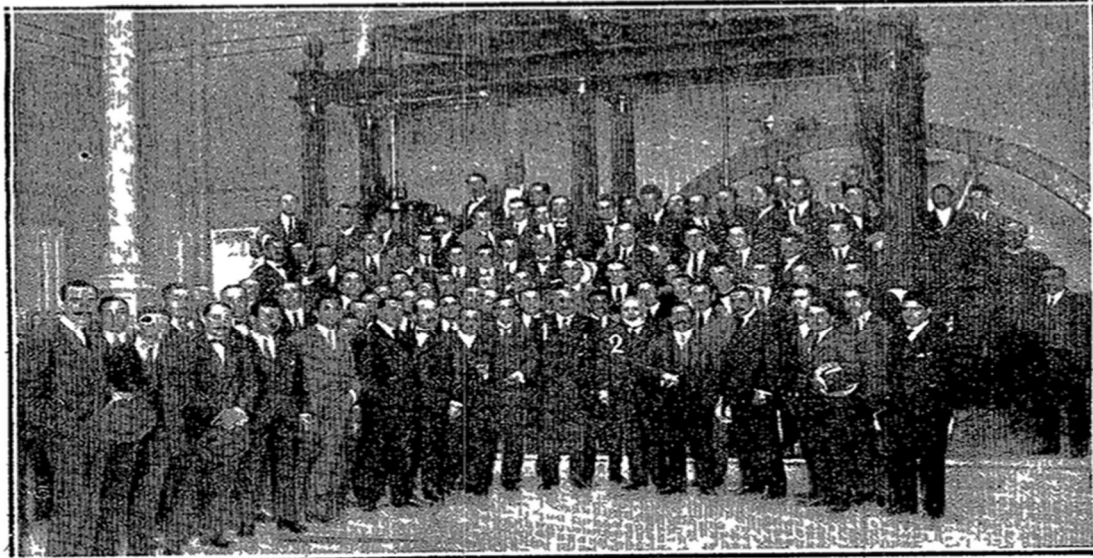
Aunque el material bibliográfico, en este aspecto, es de tal magnitud que es posible que alguna noticia, alguna referencia o algún número de alguna revista se haya quedado sin descubrir, lo cierto es que la Máquina se encontró en varios artículos. Así, a continuación se incluyen diversas fotografías en las que es posible apreciarla en diferentes momentos a lo largo del siglo XX. En ellas, si bien en un principio puede parecer que la aportación al proyecto es poca, y que simplemente son interesantes a ojos de mentes curiosas (que por supuesto, lo son), la información que de ellas se ha llegado a obtener es fundamental. Además, no solo en lo que respecta al funcionamiento de la propia Máquina, sino que también se ponía en entredicho alguna afirmación de las que aparecen en la placa.

En primer lugar, se incluyen tres fotografías, Figuras 40, 41 y 42, encontradas, todas ellas en el periódico ABC, en las ediciones del 11 de Mayo de 1914, 15 de Mayo de 1917 y 16 de Julio de 1929, respectivamente.



EN LA ESCUELA CENTRAL DE INGENIEROS INDUSTRIALES
EL MINISTRO DE INSTRUCCION PUBLICA (1), EL SR. RODRIGUEZ SAN PEDRO (2)
Y TODO EL CLAUSTRO DE PROFESORES DE LA ESCUELA CENTRAL DE INGENIEROS
INDUSTRIALES DURANTE LA VISITA QUE AQUELLOS HICIERON AL MENCIONADO
CENTRO DOCENTE. (FOTO ZEGRI)

Figura 40: ABC [17]



EN LA ESCUELA CENTRAL DE INGENIEROS INDUSTRIALES
EL MINISTRO DE INSTRUCCION PUBLICA (1), CON EL DIRECTOR DE LA ESCUELA, D. CMT-
LIO COLOMINA (2), Y LOS ALUMNOS, DURANTE SU VISITA DE AYER A AQUEL CENRO DO-
CENTE (FOTO DUQUE)

Figura 41: ABC [18]



MADRID. EN LA ESCUELA CENTRAL DE INGENIEROS INDUSTRIALES
LOS ALUMNOS QUE ACABAN DE TERMINAR LA CARRERA, ENTRE LOS CUALES FIGURA LA SEÑORITA PILAR CAREAGA Y BASADE,
CON SU PROFESOR, D. JUAN USABIAGA, EN UNO DE LOS SALONES DE LA ESCUELA

Figura 42: ABC [19]

En las figuras anteriores queda de manifiesto la importancia, al menos desde un punto de vista institucional (desde otros, también es indudable) que ha tenido la Máquina a lo largo de los años. Siendo la imagen de una Escuela referente y siendo motivo de visita de diferentes autoridades, aunque para esto no es necesario remontarse un siglo atrás, la importancia de la Máquina justifica la necesidad de un proyecto, y sus posteriores, como este.

En la Figura 43, se aprecia de nuevo la Máquina, apreciándose mejor que en las anteriores imágenes y mostrándose tal cual se observa hoy en día. La fotografía fue encontrada en la Revista de la Asociación Nacional de Ingenieros Industriales, en el Año 19 Número 12 Diciembre 1944, y muestra la Máquina junto con el avión sin motor, construido en la ETSII, y de nombre el Ingeniero Industrial Aunque la fotografía aparezca en la revista en 1944, por la información contenida en ella, se deduce que fue tomada en 1934.

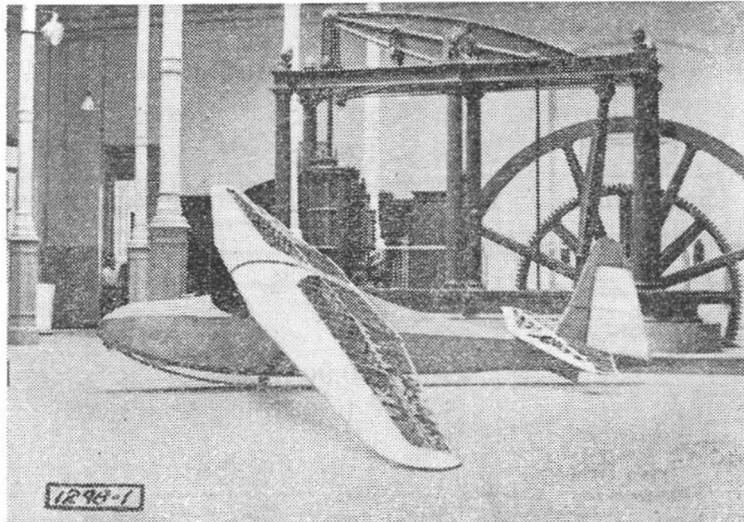


Figura 43: Avión junto a la Máquina [20]

Por otro lado, en las figuras también se puede apreciar un hecho crucial, si bien es necesario disponer de buena vista. Sin embargo quedará totalmente reflejado en una imagen posterior. Este hecho, no es otro que la posición de la Máquina en las diferentes fotografías en diferentes años. De esta manera, en el periódico La Esfera, en su edición del 16 de Mayo de 1914, incluye, en un artículo de dos caras, un fragmento de la historia de James Watt y la máquina de vapor, así como una fotografía, Figura 44, de notable calidad, en la que se puede admirar la Máquina.

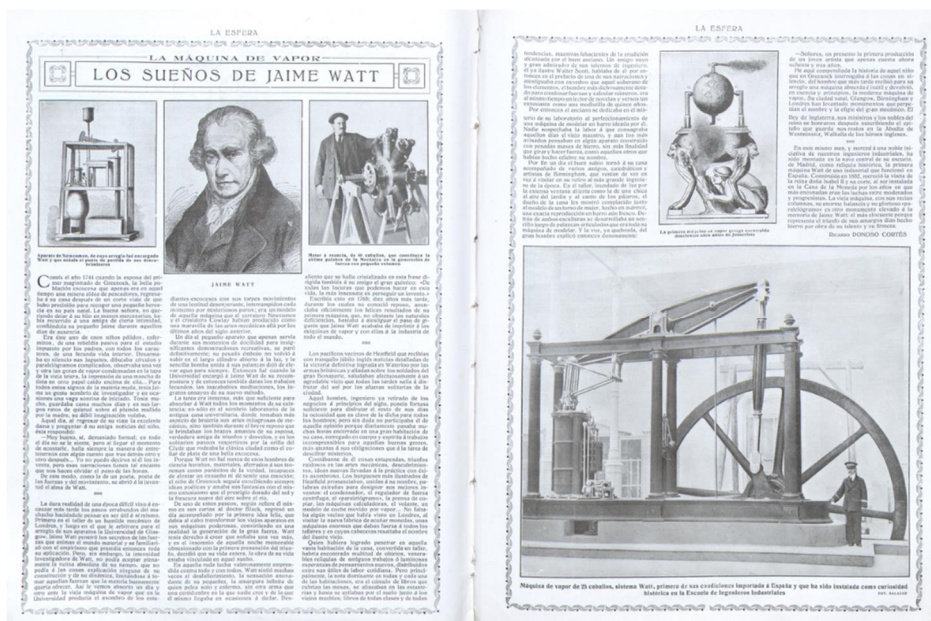


Figura 44: La Esfera, 16 de Mayo de 1914 [21]

En el anexo, se incluye a un tamaño suficiente como para poder disfrutar de la lectura del artículo en cuestión. En las líneas sucesivas, se comentan las principales aportaciones que el texto del artículo añade al proyecto, así como se explica aquello que la imagen precedente aporta, de gran relevancia para el diseño de la Máquina.

En primer lugar, es necesario llegar hasta el último párrafo del artículo para encontrar alguna referencia acerca de la Máquina. Sin embargo, en tan solo unas pocas líneas, es capaz de contradecir de manera importante a la placa que se había empleado como guía en la investigación. Así, se puede leer: «En este mismo mes, y merced á una noble iniciativa de nuestros ingenieros industriales, ha sido montada en la nave central de su escuela, de Madrid, como reliquia histórica, la primera máquina Watt de uso industrial que funcionó en España [21].

Como consecuencia, siendo la publicación de Mayo de 1914, se pone en entredicho el año 1910 como fecha de instalación y donación de la Máquina a la Escuela. Por lo tanto, cabe preguntarse cuál de las dos es la verdadera. Sin embargo, dada la fecha de la edición del artículo, y teniendo en cuenta, como se puede apreciar en la imagen previa y en otras posteriores que se incluirán, que la placa en aquella época no estaba presente, es posible afirmar, con bastante seguridad, que la Máquina fue instalada en el vestíbulo de la ETSII en Mayo de 1914. De hecho, no se dispone de la fecha en que la placa se instaló. Sin embargo ahora es posible saber que la información que aporta a todo aquel que la lea es errónea. Y esto no se termina aquí, pues el artículo también habla sobre la construcción de la Máquina.

De esta manera, se recita inmediatamente después de la cita anterior: «Construida en 1832, mereció la visita de la reina doña Isabel II y su corte (ë)ô [21]. Esta fecha contrasta enormemente con la que Figura en la placa (1859), entendiéndose por tanto que se trata de un nuevo error en la misma. Además de por el hecho de la antigüedad de la publicación, la fecha de 1832 también es posible que aparezca impresa en la propia Máquina. Y es que, aunque en las Figura 45 y 46 no se llega a apreciar del todo el número exacto, sin duda es más que factible que sea 1832, y de ser así, la fecha de construcción sería precisamente esa, pues la inscripción lo más probable es que se realizara una vez finalizara la construcción de la Máquina.



Figura 45: Inscripción presente en la base de la Máquina



Figura 46: Fecha de construcción de la Máquina

Además de lo anterior, lo que desde luego confirma el artículo es la relevancia que tuvo (y tiene) la Máquina y su instalación en España, siendo la primera de su clase, y constituyendo todo un paso hacia la modernidad de aquella época.

Por otro lado, más allá de datos y fechas, lo que realmente más llama la atención del artículo es la posición en la que se encuentra la Máquina. Efectivamente, se encuentra en el mismo lugar de la llamada Sala de la Máquina actual, pero si se repara en la disposición de sus diferentes partes, es posible observar que difieren con las que se puedan apreciar hoy en día. Para ilustrar lo anterior, se muestra, en la Figura 47, únicamente la Máquina tal y como aparece en La Esfera.

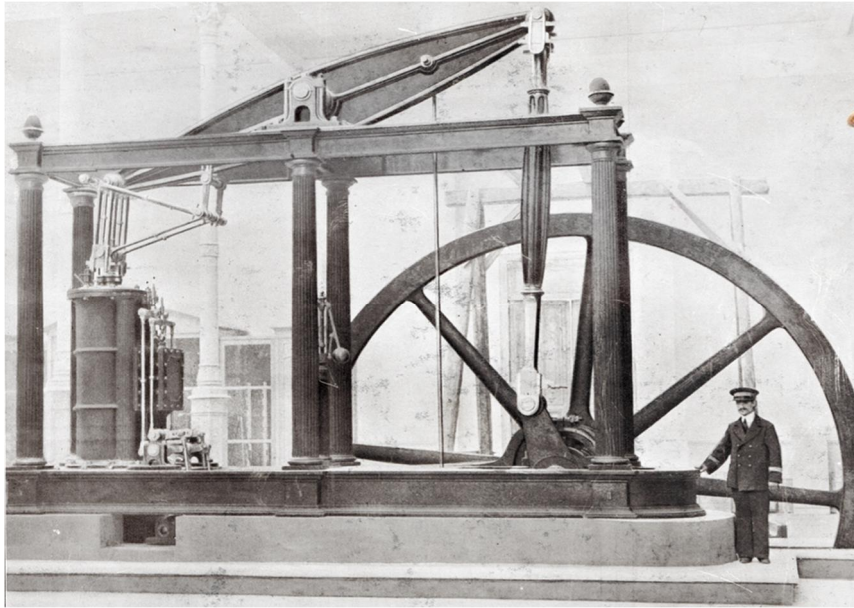


Figura 47: Máquina de la ETSII en 1914 [21]

Para ilustrar mejor la diferencia, se dispone la imagen de la posición actual, Figura 48:



Figura 48: Máquina en la actualidad

La conclusión inmediata es que la Máquina, a diferencia de lo que ocurre hoy en día, podía moverse. Actualmente, como se observa en la imagen superior, el volante y el engranaje están inmovilizados, con el movimiento impedido por una plataforma de cemento. Por el contrario, en la fotografía de 1914 se observa que dicha plataforma no existe, o al menos, presenta una

disposición diferente, que permitía al volante girar. Y al poder girar dicho volante, el resto de los mecanismos se encontraban también libres para realizar su movimiento.

Como consecuencia, las diferencias entre las distintas posiciones son claramente apreciables. Simplemente atendiendo a la diferente inclinación del balancín, es posible vislumbrar que ambas disposiciones son prácticamente opuestas. Por un lado, el mecanismo biela-manivela, en la situación de 1914, pone de relieve que se encuentra en una posición cercana a la extrema, en este caso, la de mayor distancia entre extremos de ambas piezas. En cambio, en la actualidad, dicha distancia es cercana a la mínima posible, con la biela y la manivela cercanas al alineamiento. Por otro lado, la diferencia en el ángulo que forma el balancín, da lugar a una configuración diferente también del paralelogramo de Watt, lo que implica diferencias notables en la altura a la que se encuentra el émbolo dentro del cilindro. De este modo, mientras en la actualidad, este se encuentra teóricamente (no es posible verlo) muy cercano al extremo superior del cilindro, en 1914 el émbolo estaría prácticamente en su posición más cercana al fondo.

Por lo tanto, ¿en qué momento se bloqueó el movimiento? ¿Por qué? Más adelante, se explicará que el bloqueo por medio de la plataforma mencionada no fue la única de las medidas tomadas para impedir el movimiento.

El momento en que se llevó a cabo, gracias a las fotos que en este proyecto se han incluido, está acotado entre la instalación de la Máquina en la ETSII y 1934, año de la fotografía encontrada en la revista anterior. De esta manera, es posible que durante veinte años fuera posible mover la Máquina, algo que desde luego constituiría un espectáculo. Si realmente en ese tiempo se movía con asiduidad, también es posible que fuera objeto de clases prácticas sobre motores de vapor. Además, es factible que el motivo que llevó a su bloqueo fuese debido a un accidente o a una rotura de alguna de las partes de la Máquina, pues en la actualidad, es perfectamente visible una fractura en el mismo volante, apreciable en la Figura 49.



Figura 49: Fractura observable en la rueda dentada

Obviamente, lo anterior son meras hipótesis cuya validación es ciertamente improbable, pero el hecho de que en el momento que se instaló en la ETSII se podía mover, constituía toda una realidad. Otro hecho es sin duda que dicho movimiento se trataba de una consecuencia puramente mecánica, pues parece claro que en el vestíbulo de la ETSII no se disponía de caldera alguna para que generara el vapor necesario para impulsarla.

Por otro lado, además del bloqueo basado en rellenar de cemento la cavidad inferior que alberga al volante y el engranaje, se llevó a cabo una serie de acciones que impidieron definitivamente la conexión entre el movimiento del eje y el desempeño de la distribución. De entre ellas, en este apartado del proyecto únicamente cabe mencionar aquella que es posible apreciar con mayor claridad, puesto que otras, hasta que no se llegue al punto de mostrar la

entrada al interior de la Máquina y explicar lo que se encontró y no se encontró, no se estará en disposición de explicarlas.

Sin embargo, aquella que se va a explicar a continuación es la que tiene mayor relevancia, y la que aporta un argumento a favor del empleo de una herramienta como CATIA para la simulación. Para identificarla, en la Figura 50 y 51, es posible comparar la parte de la distribución en 1914, ampliada de la imagen original, con la situación actual.

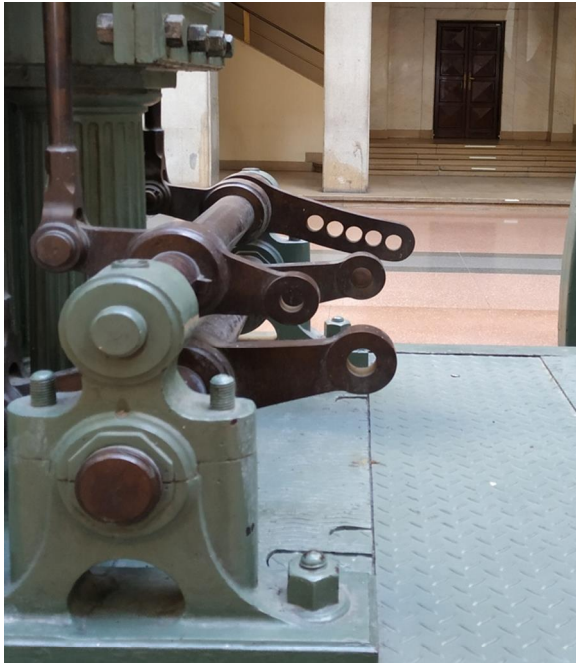


Figura 50: Disposición actual de la zona inferior del cilindro

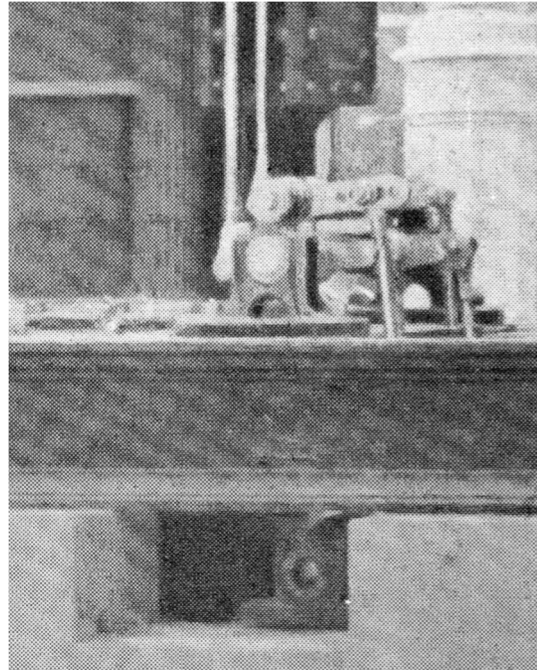


Figura 51: Disposición en 1914 de la zona inferior del cilindro [21]

En estas imágenes, se puede observar claramente la diferencia en la disposición de la biela con múltiples agujeros, aisladas en las Figuras 52 y 53. En la correspondiente a la actualidad, la biela se encuentra en el plano de la Máquina alejado del observador, mientras que en 1914, la situación era a la inversa y se encontraba en el plano más cercano, siendo ambas fotografías tomadas desde la misma mitad del vestíbulo de la ETSII.



Figura 52: Biela multi-agujereada



Figura 53: Biela multi-agujereada 1914 [21]

Como consecuencia, es posible determinar que dicha biela fue, o bien desencajada del eje al que va acoplada y posteriormente recolocada, o bien, se mantuvo en su sitio pero se le dio la vuelta al eje. Esta última opción, no es viable por sí misma, puesto que, si se repara en la curvatura de la biela en ambas fotos, es la misma, cóncava. De tal manera que si únicamente se hubiera invertido el eje, la curvatura en la actualidad sería convexa. Al estudiar con mayor detalle la unión entre la biela y el eje, todo parece indicar que, efectivamente, el eje se invirtió, pero para ello tuvo que ser necesario desacoplar las diferentes bielas. Y al volver a incorporarlas al eje, la biela en cuestión se acopló de la misma manera en la que se encuentra hoy en día, en el plano y con la curvatura que pueden observarse. El argumento que sustenta esto reside en la existencia de chavetas para impedir el giro relativo entre la biela y su eje. Así, la chaveta solo está presente en el lado en el que la biela se encuentra actualmente, por

lo que, si únicamente se hubiera movido la biela y el eje se hubiera quedado fijo, esta chaveta se encontraría en el plano más cercano al observador.

En relación a lo anterior, a posibilidad de disponer de un modelo de la Máquina en un entorno virtual, permite deshacer aquello que se llevó a cabo y reconstruir las diferentes partes de ella, pues de otro modo no se podría realizar.

Fuera de entorno virtual, esto es imposible, puesto que tratar de ver cómo era realmente la Máquina por medio de un proceso de *prueba-error* no es lo más eficiente dadas las circunstancias. A lo anterior se une la posibilidad que otorga el ordenador de comprender la función de dicha biela, pues en este punto del proyecto, su función era cuanto menos conocida.

Por otro lado, junto con las diferencias anteriores, aparece otra justo en la base de la máquina. Actualmente, no se aprecia debajo del sistema de distribución comentado ningún agujero o cavidad, mientras que en 1914 se distingue fácilmente la existencia de un elemento más. Esta parte, en dicho momento desconocida, será explorada posteriormente al tratar lo que correspondería a la parte práctica del proyecto, y simplemente conviene mencionar aquí que, en el momento en el que se modificó la plataforma de la Máquina, dicha ventana a su interior se tapió, ocultando lo que allí había.

3.2.6 FORNCETT INDUSTRIAL STEAM MUSEUM

Tras la localización de la revista de La Esfera, considerado como un éxito del proyecto, aún quedaban otras vías por explorar para hallar nuevos datos de la Máquina. Más que datos, pues en realidad habían sido importantes los recopilados, las búsquedas se enfocó más bien en encontrar otras máquinas, (muy) similares, que permitiesen comprender definitivamente el funcionamiento de la Máquina.

Como consecuencia, se realizó una búsqueda por diferentes museos, no solo en España, sino también en Europa y resto de mundo. Todo aquel museo que fuese de carácter industrial o que directamente incluyese una sección de máquinas de vapor, era susceptible de disponer de alguna máquina (muy) similar. Y quizás también poseyeran unos planos que facilitasen la comprensión y el diseño de las distintas piezas de la Máquina.

De entre todos los museos consultados, hay uno que destaca sobre los demás, puesto que, entre sus paredes, no solo contiene una máquina de vapor realmente parecida a la que existe en la ETSII, sino que además, esta máquina se pone en movimiento durante ciertos días del año, en lo llamados *steam up days*. El museo en cuestión, es el *Forncett Industrial Steam Museum*, en Norfolk, Reino Unido. Como anticipa su nombre y expresa claramente su página web, el museo permite al visitante tomar conciencia de la importancia del vapor en la Revolución Industrial. En él se encuentra una máquina conocida como *The Hopwas Beam Engine* y se muestra en las Figuras 54 y 55. La vía por la cual se llegó a este museo fue a partir de un vídeo, concebido como un medio de difusión de la misma, en el cual se muestra la máquina en funcionamiento.

El hecho de encontrar una máquina de tales características, y que en la actualidad pudiese funcionar, planteó la posibilidad de viajar hasta Norfolk para conocerla de primera mano. Realmente, dicha experiencia habría supuesto un avance importante en el proyecto, pues habría propiciado un conocimiento que de otro modo habría sido difícil de adquirir.



Figura 54: The Hopwas Beam Engine Spruce [22]



Figura 55: The Hopwas Beam Engine Spruce [22]

Dicha máquina, donada al museo por la compañía llamada *South Staffordshire Water Works Company*, presenta ciertas diferencias con la Máquina. Por un lado, la primera fue construida casi 50 años tomando como referencia 1832 después que la Máquina, en 1879, y se mantuvo en funcionamiento hasta el sorprendente año de 1964 [22]. Estas fechas refrendan la importancia y el avance tecnológico que supusieron las máquinas de este tipo. Casi medio siglo después de la construcción de la Máquina aún se seguían construyendo dispositivos no sólo con el mismo principio básico de funcionamiento, sino también con elementos ciertamente similares. Y además, el hecho de estar durante más de ocho décadas aportando trabajo para el bombeo de agua, demuestra la fiabilidad de una construcción con estas características. Como datos adicionales, la máquina es de 50 caballos de potencia y su velocidad nominal de giro son veinte revoluciones por minuto. Estos datos y otros muchos, están disponibles en la propia página web del museo.

Tras examinar la descripción exhaustiva, con caracterización material y tipología de las diferentes partes, que se ha encontrado de la máquina *Spruce*, se considera necesario realizar aquí un inciso fruto de una reflexión surgida a partir de esta. Dicha reflexión, está en sintonía con los argumentos que justificaban el desarrollo de un proyecto como este, y consiste en plantear aquí la posibilidad de realizar con la Máquina un trabajo equivalente para compartir la información, de la misma manera que se ha realizado con la máquina *Spruce*. De esta manera, cualquier persona podría consultar datos, curiosidades y documentación acerca de la Máquina en la propia web de la Escuela. Esta proyección se explicará con más detalle en las líneas futuras del presente proyecto.

A continuación de este breve aparte, se explica aquello que se ha podido conocer gracias a la comunicación con el museo, concretamente con su fundador, el Doctor Rowan Francis. A través de diversos correos electrónicos, confirmó, por un lado, que la máquina que conserva en su museo es muy similar a la Máquina. Por otro lado, indicó también que la válvula distribuidora de la Máquina era doble, en lugar de simple, indicando que algunas de las desventajas que presentaban estas últimas consistían en la imposibilidad de variar la cantidad de vapor que entraba al cilindro. Asimismo, el punto en el cual dejaba de entrar vapor al cilindro también estaría fijo, entre $5/8$ y $7/8$ de la carrera del émbolo. Como consecuencia de lo anterior, la expansión del vapor, y en definitiva, el aprovechamiento de su energía, estaría limitada a un periodo de tiempo que siempre sería el mismo.

En contrapartida, las válvulas dobles posibilitan la variación del tiempo de admisión del vapor, permitiendo así al vapor expandirse en mayor medida que en el caso anterior, pero disminuyendo también el caudal de entrada del mismo. Uno de los argumentos que motivó lo anterior, fue la posibilidad de reducir el consumo de combustible (carbón) una vez que la máquina había alcanzado su velocidad de funcionamiento, pues toda la inercia que se oponía a dicha velocidad ya había sido superada. Como se ve en el argumento anterior, la finalidad de una válvula doble para una máquina de este tipo (estática) no es cambiar continuamente el tiempo de expansión del vapor. Para aplicaciones móviles del vapor, como la locomotora, en las que la cantidad de vapor debía ser regulada con una frecuencia muy superior, aunque

se empleaban también válvulas dobles, estas presentaban una tipología ciertamente diferente.

Para el caso que concierne al proyecto, el Doctor Rowan indicó la posibilidad de que se tratase de una válvula tipo Meyer. Sin embargo, en el momento en cual se le realizó la consulta, aún no se conocía el año real de construcción de la Máquina. En consecuencia, su asociación con una válvula Meyer era errónea, puesto que dicho dispositivo fue patentado por Jean-Jacques Meyer (1804-1877) en 1841, por lo que difícilmente la válvula de la Máquina se podría corresponder con ella.

3.2.7 VÁLVULAS DOBLES

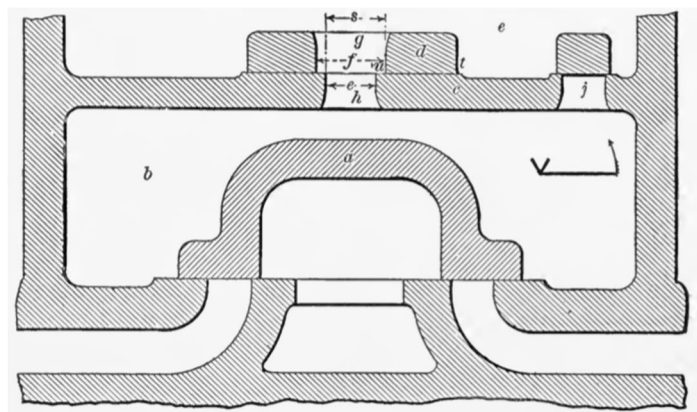
Sin embargo, aunque el modelo sugerido por el Doctor Rowan no era el concreto de la válvula, tampoco fue la distribución Meyer el primero que era de doble válvula. De esta manera, a partir de aquí fue mucho más sencillo identificar el tipo que realmente gobernaba la alimentación y expansión de vapor del cilindro.

La investigación sobre estas válvulas dobles confirmó las ventajas que ya habían sido introducidas anteriormente. Las válvulas simples no son capaces de cortar la alimentación de vapor al cilindro para aprovechar la expansión de este ósin afectar la acción perfecta de la válvula en otros aspectos[23]. Esto quiere decir que una única válvula podría modificarse de tal modo que consiguiera realizar el corte rápido del vapor. No obstante, las implicaciones de una modificación como la anterior, podrían afectar al escape del vapor, o al tamaño de la válvula. En cambio, el mecanismo de una única válvula es mucho más sencillo que el propio para una válvula doble.

Por otro lado, Hawley comenta también el aprovechamiento que se ha tratado de realizar de las desventajas mencionadas anteriormente. Ya que el corte de vapor va a ser fijo y no va a poder sacar el máximo rendimiento de la expansión del vapor, ¿por qué no tratar de optimizar el resto de procesos que tienen lugar en el cilindro en detrimento del corte del vapor? En consecuencia, el escape y la compresión se pueden regular con mucha precisión y como se desee, sin mucho solape. (ë) Esto solo es posible en la posición menos optimizada de la válvula con respecto al corte del vapor[23]

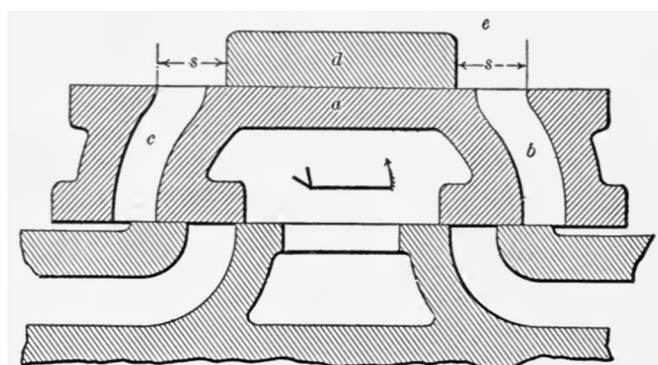
En relación con lo anterior, la disposición que se solía adoptar con válvulas simples era la que se ha comentado, lo que se conseguía por medio de una excéntrica con un avance angular de 90°, y se complementaba con otros métodos de corte de vapor, que presentaban importantes desventajas. La solución que surgió, atribuida a Gonzenbach, fue el empleo del *riding cut off* es decir, de un corte (del vapor) sobrepuesto por medio del empleo de una válvula doble, con su respectiva excéntrica.

En lo que respecta a dichas válvulas, se pueden distinguir dos tipos. La primera de ellas, conocida como válvula *Gridiron* (o *Gonzenbach*), dispone de cuerpos independientes para cada una de las válvulas (Figura 56). La válvula secundaria controla la admisión del vapor al cuerpo donde se encuentra la válvula principal a [24]. Como consecuencia, la válvula secundaria puede impedir la entrada de vapor independientemente de la posición en la que se encuentre la válvula principal.

Figura 56: Válvula *Gridiron*

Esta podría haber sido la tipología de la válvula de la Máquina. Sin embargo, las investigaciones que más adelante se explicarán, descartaron que se tratase de una válvula de este primer tipo.

En lo que se refiere a la segunda clase de válvulas dobles, se encontró una denominada válvula *Polonceau*. En la Figura 57, se puede apreciar cómo, en este caso, la válvula secundaria, se mueve sobre el cuerpo de la válvula principal. La posición que en esta Figura se muestra no sería una posición posible si las válvulas estuviesen conectadas a sus respectivas excéntricas.

Figura 57: Válvula *Polonceau*

La válvula principal se identifica con a, mientras que la válvula d es la secundaria o de corte, siendo los conductos b y c los de alimentación de vapor al cilindro.

Para entender un poco como se comporta esta válvula, se incluye a continuación una breve secuencia de movimientos de las válvulas. Según la válvula principal se desplaza a la izquierda, el vapor entra al cilindro por el conducto b. Si hubiese habido una secuencia previa, el vapor del lado contrario del émbolo, escaparía al condensador por el conducto en la parte central de a. Al mismo tiempo que ese desplazamiento de a, la válvula de corte d se desplaza a la derecha, cortando la alimentación de vapor en el punto de la carrera del cilindro definido por la posición de su respectiva excéntrica [24].

Como consecuencia de lo anterior, se puede afirmar, con bastante certeza, que la válvula de la Máquina es de tipo *Polonceau*. Al mostrar el interior de la caja distribuidora en la que se encuentra dicha válvula se podrá comprobar mejor la afirmación anterior. Sin embargo, aunque el movimiento de las dos válvulas regidas por sus excéntricas esté explicado en las referencias anteriores, en el caso de la Máquina no se conoce cómo las excéntricas son capaces de transmitirle el movimiento adecuado a las mismas. Desde luego, a simple vista no es posible apreciarlo, pero como también se verá posteriormente, tampoco al abrir la Máquina quedará esto muy claro.

3.2.8 MANUSCRITOS

Por último, además de los anteriores intentos de encontrar la Máquina, aún restaba uno más por probar. Cabía la posibilidad de que en algún volumen del siglo XIX, máquinas como esta hubieran sido inmortalizadas, a modo de recopilación del desarrollo de la tecnología del vapor en ese momento. Basándose en esta premisa, se pueden destacar dos óseriesô de publicaciones que cumplían perfectamente con las pautas recientemente establecidas, ambas accesibles en el Depósito de la ETSII.

La primera de ellas, de título *On the Facilities of the rotatory steam engine* [25], desde luego era coherente con la fecha de fabricación de la Máquina. Se erige como un tratado sobre la máquina de vapor, desde su historia hasta su cálculo, así como incluye decenas de grabados (*plates*) en los que se pueden encontrar máquinas de vapor completas, con varias perspectivas y secciones. Este, no era sino uno de los tres volúmenes de la colección, y cada uno ellos estaba dedicado a aplicaciones diferentes de las máquina de vapor.

La segunda de las obras encontradas en realidad supone una colección de ellas, puesto que se trata de una especie de revista. De esta manera, la obra en cuestión *Publication industrielle des machines, outils et appareils* [26] cumplía perfectamente con aquello que se estaba buscando. En sus diversos tomos, aglutinaba en forma de grabados algunas de las máquinas de vapor más ilustres de la época. Además de simplemente mostrarlos, los diferentes volúmenes también iban acompañados de sus respectivos Atlas, en los cuales se explicaban con cierta profundidad los grabados. El problema con estas publicaciones estaba relacionado con las fechas, puesto que de nuevo aquí se tenía la idea de que la Máquina databa de 1859.

Sin embargo, en ninguna de las dos obras mencionadas apareció un grabado de una máquina que dispusiera de unos sistemas muy parecidos a la Máquina.

Más concretamente, en la mayoría de ellos por supuesto había reguladores de Watt, pero ninguno disponía de una alimentación de vapor por la parte inferior de la caja distribuidora, un hecho que posteriormente se indicará cómo se descubrió. Junto con lo anterior, también en multitud de grabados era posible apreciar máquinas con válvulas dobles y con dos excéntricas. Pero de nuevo, no se encontró disposición alguna en la que las excéntricas no fueran directamente conectadas a la distribución.

A modo de anticipo de lo que más adelante se explicará, en la Máquina, las excéntricas que parten del árbol están asociadas a un eje, a partir del cual se transmiten los giros de las mismas a los ejes superiores. Estos ejes transforman ese movimiento rotatorio en subidas y bajadas de las dos válvulas de corredera que caracterizan a la válvula doble. Por lo tanto, dichas obras no fueron de gran ayuda en este sentido.

Entre los motivos por los que aquí se mencionan, está por un lado la calidad de sus grabados, con detalles y secciones de máquinas de vapor, muy complejas, y de las que sí se puede decir que han ayudado a la visualización y comprensión de la Máquina. Además de lo anterior, también presentan, ambas obras, grabados sobre partes específicas de las máquinas, como el paralelogramo de Watt o el volante de inercia. Por otro lado, si este consistiese en un proyecto sobre la máquina de vapor, la historia detallada de la misma en el primero de los volúmenes mencionados no podría faltar. Por último, y un hecho que ya se ha mencionado en otras ocasiones, estos volúmenes volvieron a manifestar el alcance y el impacto que tuvieron las máquinas de vapor en la sociedad. La variedad, el desarrollo y la complejidad apreciada en los grabados así lo demuestra, como también la calidad que presentan los mismos denotan el esfuerzo que se puso en su difusión y conservación.

4 PROCEDIMIENTO

Tras el desarrollo de toda la investigación realizada, es el momento de mostrar cuál ha sido la metodología que ha permitido el traslado de la Máquina desde la sala que lleva su nombre a una pantalla de ordenador. Antes de comenzar la explicación, se incluye un extracto del mismo número de *El museo universal* que se mencionó anteriormente, y que ilustra perfectamente lo que implica la Máquina y la intención a la hora de modelizarla, de modo que condicionó inherentemente todo el proceso del proyecto: «Así estas prensas, como la maquinaria toda, corresponden a los últimos adelantos, tanto por su belleza, cuanto por lo mucho que facilitan la operación»[17].

Aquí reside una de las claves del trabajo, pues en la Máquina, se aprecia clara y continuamente, una intención funcional junto con una función decorativa. La palabra belleza no es en vano, pues cuanto más se observa y mayor grado de detalle y conocimiento de ella se alcanza, más se es consciente del trabajo, refinado y preciso, realizado para construir un artefacto que estuvo al frente de innovación de su época, y que hoy día es capaz de retener las miradas de cuantos pasan por lado.

En consecuencia, la intención a la hora de diseñar la Máquina en CATIA no podía ser otra que tratar de plasmar ese aura que desprende, y la única manera de conseguir eso era mediante la búsqueda de la máxima precisión posible. Este objetivo, por supuesto, condicionó el avance del proyecto, pues el proceso para lograrlo podría tildarse de tedioso.

Son muchas las piezas que era necesario estudiar con detenimiento e incluso interpretar. Estudiar porque para diseñar y construir cada pieza era fundamental saber perfectamente cómo son, e interpretar porque aunque se sepa cómo son, se requiere convertir cada uno de los sólidos en un conjunto de polígonos, círculos, elipses y otros elementos geométricos que sean posibles de implementar en el programa.

Conviene recuperar aquí la noción (por desgracia) de la inexistencia de unos planos de la Máquina que posibilitasen lo anterior. Al no disponer de ellos, solo había una manera de poder llegar al objetivo.

Para conseguir plasmar la calidad y la complejidad de las piezas se erigió como necesario medirlas. Todo lo relativo a ellas, es decir, tanto sus diferentes rasgos como su posición relativa dentro de los subconjuntos en los que se divide la Máquina. En más de una ocasión, se planteó la posibilidad de realizar unas pocas medidas y con ellas, y por medio de diferentes fotos, calcular por relativamente sencillas reglas de tres (proporciones y semejanza). Sin embargo, la persecución del objetivo mencionado anteriormente desestimaba la opción anterior, pues ciertamente, con la precisión con la que fue construida la Máquina, el empleo de fotos como base para el cálculo de proporciones no parecía que fuese a conducir a su consecución. A esto se une el hecho de que dichas fotografías debían gozar de una resolución y calidad muy elevadas, lo que estaba condicionado tanto a la luz que en un momento dado invadiera la Sala de la Máquina, como a cámara empleada.

Y es que, aunque la Máquina presente unas dimensiones descomunales, los detalles previamente comentados son, en muchas ocasiones, de unos escasos centímetros. Por desgracia, y como se explicará posteriormente, en ocasiones no quedó otra opción que recurrir al método alternativo, debido en parte a esas dimensiones de la Máquina.

Por lo tanto, para el lento proceso de medir todas y cada una de las piezas, se recurrió a dos instrumentos elementales: un pie de rey y un metro, ilustrados en las Figuras 59 y 59.



Figura 58: Metro



Figura 59: Pie de rey

Ambos se complementaban de manera idónea para poder disponer de la medida de las diferentes formas y sólidos que están presentes en la Máquina. En particular, con el pie de rey era posible disponer de medidas con una precisión del orden de décimas de milímetro. Sin embargo, aunque es cierto que al comienzo del proyecto, con la intención de familiarizarse con la herramienta y de hacerse una idea de la precisión con la que era necesaria abordar el mismo, sí que se recurrió a tomar medidas con dicha precisión, al poco tiempo esto se descartó. Las dimensiones de la Máquina son tales que un error de ese orden no tendría relevancia alguna en lo que respecta a la utilidad del diseño.

En contrapartida, el pie de rey resultó muy útil en la medida de diámetros de ejes y elementos cilíndricos, e incluso permitió alcanzar a medir piezas que inicialmente no era posible. En lo que se refiere al metro, su mayor utilidad residía en las medidas de las largas piezas que conforman la Máquina, así como en la posibilidad que otorgaba de medir su altura sin necesidad de acudir a instrumentos auxiliares.

A continuación, se va a describir el procedimiento que se siguió, en líneas generales, para conseguir llegar al modelo buscado. Además, hay que tener en cuenta que no se trata de una secuencia de actividades en la que se ha realizado una detrás de la anterior, de tal manera que los distintos trabajos no podían comenzarse hasta que se terminasen todos los que han comenzado previamente, sino que se han ido solapando en el tiempo. En la planificación del proyecto es posible apreciar lo que se ha comentado.

Las actividades en las que se puede descomponer, de un modo muy general, la parte práctica de proyecto son:

1. Elección de la pieza a realizar. No se ha empleado un criterio específico con el que asignar un orden entre las diferentes piezas. Sin embargo, sí que se ha tratado de, una vez se comenzaba a realizar una pieza de una parte de la Máquina, como las esferas que cumplen la función de pesos centrífugos en el regulador, terminar todas las piezas de esa parte, para facilitar así su posterior ensamblaje.
2. Una vez identificada la pieza, el siguiente paso consistía en medirla. Por medio de los instrumentos ya mencionados, se buscó conseguir, con las mínimas medidas posibles, tener totalmente acotada la pieza. Además de esto, fue necesario disponer de múltiples fotografías, en diferentes ángulos y posiciones, así como de un papel en el que realizar croquis de las diferentes partes y situar así los diferentes valores numéricos que se iban tomando.
3. Diseño de la pieza en CATIA, cuya descripción tendrá lugar en el apartado correspondiente a su explicación.
4. Ensamblaje de las diferentes piezas para dar lugar a distintos conjuntos, obligando en ocasiones a corregir los diseños anteriores.
5. Investigación y estudio de las partes de la Máquina, tanto visibles como no visibles, por medio de la observación y de la exploración.

Esta es la secuencia, sencilla, que recoge los pasos que se han seguido in situ, es decir, los que están directamente relacionados con la interacción directa con la Máquina. Sin embargo, en cada uno de ellos es necesario realizar una explicación más extensa, con las diferentes particularidades y dificultades a las que se han ido haciendo frente durante el proceso.

Aunque se haya establecido la observación y estudio de la Máquina en quinto lugar en la secuencia de actividades previa, en realidad demuestra que se trata de un trabajo que durante todo el proyecto tuvo que ser realizado. En este sentido, hay que desarrollar con profundidad las diferentes incursiones (o excursiones) y las conclusiones que se obtuvieron a través de ellas.

4.1 ELECCIÓN DE LAS PIEZAS

Así, en esta primera parte práctica del proyecto la pregunta que surge es ¿por dónde se empieza? La verdad es que la respuesta en este caso no tiene mucho misterio, puesto que, al tratarse de la primera toma de contacto con un proceso que se iba a extender durante meses, inicialmente se buscó optar por la sencillez. Por lo tanto, la primera pieza realizada fue una de las columnas principales, identificables sin ningún problema a simple vista. Además, al disponer la Máquina de seis de ellas, bastaría con diseñar una para tener todas a disposición del modelo. Las siguientes piezas diseñadas fueron en esta línea también, dejando algunas de las piezas más complejas para un punto posterior.

4.2 MEDICIÓN DE LAS PIEZAS

Además de lo anterior, las diferentes mediciones que se realizaron a lo largo del proyecto, y que por supuesto no fueron asunto de un único día, semana o mes, no estuvieron exentas de complicaciones debido a la concurrencia habitual de la Sala de la Máquina. Esto se debe a que no son pocos los eventos que tienen lugar en torno a la Máquina, lo que aporta valor también al presente proyecto y su línea futura de disponer de una maqueta perfectamente funcional. Decir que simplemente llamaría la atención de los allí presentes sería quedarse bastante corto. Tampoco han sido pocos los que, durante las propias mediciones e investigaciones in situ se han acercado a preguntar qué intención tenía todo aquello.

En la misma línea, y debido a que la Máquina es un tesoro (patrimonio de la Escuela por supuesto), que debe ser cuidado y preservado, existe un cartel en su base para disuadir a cualquiera a subirse a ella. Precisamente, el objetivo del proyecto implicaba necesariamente reducir significativamente la distancia que se estipulaba en el mencionado cartel, lo que ha provocado en multitud de ocasiones la necesidad de justificar ante el diferente personal de la Escuela la presencia sobre la Máquina, al contravenir la prohibición anterior.

En lo que respecta a la medición propiamente dicha es adecuado introducir previamente una primera distinción (además de la separación en partes principales) entre las partes y piezas de la Máquina.

Así, se puede diferenciar entre parte visible y parte no visible (subterránea, oculta). La primera de ellas es la que cualquier persona que esté en el vestíbulo de la ETSII puede apreciar y admirar. En cuanto a la parte no visible, es aquella que hace referencia a las tripas de la Máquina, a la parte que está por debajo de las chapas metálicas. Aquí, surge la necesidad de explicar aquello que se fue descubriendo por medio de diferentes expediciones al interior de la Máquina, por lo que en un apartado posterior se irá desgranando lo aprendido en todas ellas. Además de aquello que se encontraba por debajo del nivel del suelo, hay que tener en cuenta que tampoco se tenía acceso al interior del cilindro, puesto que, el enorme peso de la tapa del cilindro y la situación de la Máquina en medio de una sala como es el vestíbulo de la ETSII, disuadían cualquier tentativa de acceder a él.

En consecuencia, por el momento se aparca aquello referido a la parte no visible para iniciar otra clasificación, que afecta al proceso de medición y toma de datos de la Máquina. Así, se puede distinguir entre unas partes alcanzables y no alcanzables. Las primeras son aquellas a

las que es posible acceder sin necesidad de ningún medio auxiliar, mientras que las segundas, hacen referencia a aquellas, que para poder disponer de su medición, sería necesario el empleo de una escalera u otro medio. Esto realmente supone una problemática importante.

Toda la parte superior de la Máquina, que podría identificarse con una cornisa, junto con el balancín y el paralelogramo, entre otros, se encuentra a una altura totalmente inalcanzable. Tanto por la situación de la Máquina como por el peligro que supondría tratar de llegar a dichas partes, no se llegó en ningún momento a plantear el empleo de métodos para poder alcanzarlas.

De este modo, el método de medición que se estaba realizando tuvo que verse alterado una vez se procedió a diseñar toda la parte superior de la Máquina. Y se alteró en el sentido que quería evitarse según se mencionó al inicio del procedimiento.

La única manera de poder realizar las piezas fue mediante medidas de las que sí se disponía, de las piezas alcanzables, y a partir de diversas fotografías, por medio de proporciones, calcular el resto. Esto supuso una fuente de errores importante, pues el nivel de detalle de las piezas se pretendía que fuera el máximo, y además, al tratar de ensamblar las diferentes piezas de la Máquina en el programa de ordenador, la discrepancia en las medidas implicó la necesidad de corregir los diseños para lograr un ensamblaje adecuado. Además, aunque este ensamblaje fuera finalmente realizado, posteriormente la intención de conferir movimiento a la Máquina añadía una dificultad adicional, porque los diferentes errores en las medidas o en la corrección de los diseños, implicaba que estos en ocasiones se fueran acumulando. Al final del proyecto, se podrá comprobar si estos errores fueron realmente un impedimento para conseguir los objetivos del proyecto.

Por otro lado, es posible distinguir otro tipo de piezas o partes de la Máquina, y está relacionado con una de las clasificaciones anteriores. Se trata de las piezas alcanzables pero no medibles. Esto, se debe a que determinadas piezas, que ciertamente se encuentran al alcance de los instrumentos de medida empleados, por su disposición o situación en la Máquina, o por su relación con otras piezas, resultaba imposible determinar con total precisión ciertas magnitudes de ellas. Por poner dos ejemplos, tanto el árbol de la Máquina como el volante de inercia, se encuentran semienterrados, por lo que poder disponer de una medida exacta de sus dimensiones era relativamente complejo.

Obviamente, en este caso particular, el desviarse uno o varios centímetros de la medida real no supone ningún problema respecto al funcionamiento o ensamblaje de la Máquina. Sin embargo, en otras piezas sí que supone un desafío mayor, pues, al recordar aquí que el funcionamiento de algunos sistemas de la Máquina, como la distribución, no era conocido, el hecho de no tener medidas verdaderamente precisas añade de nuevo una complicación. A la hora de realizar los ensamblajes y simulaciones tuvieron que ser tenidos en cuenta.

Por último, conviene destacar un grupo aparte dentro de las partes de la Máquina. Este, no es otro que el de las uniones entre las diferentes piezas. Después de, al menos, más de ochenta años sin soportar movimiento alguno, junto con el polvo acumulado y la pintura que en su momento se empleó para dar color a la Máquina, las piezas que en su momento eran capaces de moverse relativamente unas con otras, en la actualidad algunas se encuentran totalmente estáticas. Esto último se comprobó más adelante en el proyecto simplemente con la necesidad de separar piezas unidas por tornillos. Sin embargo, en otros casos, aún hoy es posible conferir movimiento a ciertas partes, como es el regulador de Watt, que sin necesidad de excesiva fuerza puede girar.

En muchos casos, en la mayoría de hecho, es posible determinar si se trataba de una unión articulada o rígida, incluso aunque ese movimiento ya no sea realizable. Un ejemplo de ellas se puede apreciar en las Figuras 60 y 61. Está claro que la distinción entre estos dos tipos de uniones podría dar lugar a número mucho mayor de tipologías diferentes. Sin embargo, únicamente se pretende transmitir que lo más importante para el proyecto es conocer si existía movimiento relativo entre las piezas de la unión.



Figura 60: Ejemplo de unión rígida



Figura 61: Ejemplo de unión articulada

Independientemente de que sea posible conocer lo anterior, lo que desde luego no está en disposición de descubrirse es cómo son dichas uniones por dentro, a no ser que se desmontasen, algo que por supuesto no tuvo lugar. Por lo tanto, en este caso la finalidad del proyecto, es conseguir que en el diseño las uniones se mantengan iguales desde el exterior y que cumplan su función de permitir o evitar el movimiento relativo.

Sin embargo, aunque esto sea de hecho factible, en determinadas ocasiones no lo fue del todo, puesto que, debido también a la distancia desde la que había que observar ciertas piezas, no era posible conocer en qué punto terminaba una y comenzaba la otra (piezas de la unión). Como consecuencia, por medio de la lógica y la intuición al mismo tiempo, se realizó el diseño de las piezas tratando de observar las diferentes funcionalidades que podría tener cada una. De nuevo, la posibilidad de trabajar con CATIA facilitó la labor de determinación de los aspectos anteriores.

Además de la anterior, se podría calificar un grupo de uniones como especiales. Esto, que se aprecia especialmente en aquellas que se encuentran en la parte superior de la Máquina, se debe a su complejidad y particularidad, llegando un punto en el que se plantea la cuestión de la finalidad de cada una de las piezas que intervienen en ellas. Un ejemplo de este tipo de uniones se muestra a continuación (Figura 62).



Figura 62: Unión compleja

4.3 INCURSIONES Y DESCUBRIMIENTOS

Antes de comenzar este proyecto, muchas eran las incógnitas que rodeaban a la Máquina en lo que respecta a su funcionamiento (a su origen ya ha quedado claro). Una de las maneras más sencillas y viables de resolverlas consistía en abrir, entrar y estudiar aquello que llevaba oculto durante décadas. Todas las actividades que se van a ir describiendo en las próximas líneas disponían del permiso necesario para ello. Un permiso cuya existencia es vital, puesto que las piezas a manejar tienen casi doscientos años de antigüedad, y, además de constituir el símbolo de la ETSII, requieren tener especial cuidado en lo que respecta a la seguridad.

En consecuencia, por medio de un simple destornillador como palanca, y la colaboración entre varias personas, las chapas metálicas fueron retiradas y apartadas, siempre priorizando la seguridad, debido a su importante peso. Una vez se dispó el polvo que durante tantos años se había acumulado dentro de la Máquina, la primera imagen que se obtuvo de su interior fue algo parecido a lo que se aprecia en la Figura 63:



Figura 63: Vista del interior de la Máquina

Y en las Figuras 39 y 40 se muestra una ampliación de la imagen anterior y un intento para tratar de encajar la parte inicialmente visible con la previamente oculta.



Figura 64: Intento de ensamblaje



Figura 65: Ampliación vista interior de la Máquina

¿Qué es lo que se ha podido deducir a partir de estas imágenes? Desde luego, son bastantes las conclusiones que, tras un breve vistazo, son posibles de obtener. Por un lado, se puede observar así un elemento de conexión muy importante en la Máquina, y es el relativo a la

distribución del vapor, a la regulación de las entradas y expansión del vapor. Previamente, solo se disponía del propio sistema de distribución y de las excéntricas, las cuales eran las responsables de convertir el giro del árbol principal de la Máquina en pequeños desplazamientos de las válvulas que regirían la entrada o evacuación del vapor. Sin embargo, cómo conseguían las excéntricas esta misión no era conocido.

Así, resulta que en las imágenes se observa un eje, de diámetro considerable, situado de forma transversal en las imágenes, cuyo giro era posible gracias a dos bielas que conectaban cada una de las excéntricas con el eje. Esto es posible observarlo tanto al levantar otro conjunto de chapas, como al introducirse en el propio interior de la Máquina, lo que observa en las Figuras 66, 67 y 68. Como se puede apreciar también, la accesibilidad a esta parte es ciertamente complicada, impidiendo disponer de medidas de muchas de las dimensiones de las piezas así como de algunos de sus detalles.



Figura 66: Conexión de excéntricas con el eje descubierto



Figura 67: Vista desde el interior de la conexión eje-excéntrica

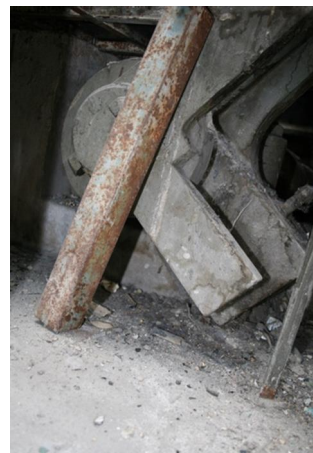


Figura 68: Conexión eje-excéntrica

Sin embargo, el análisis inicial no termina con las deducciones anteriores. Al reparar con mayor detenimiento en las barras que aparecieron unidas a dicho eje, y en el número de bielas que hay tanto en dicho eje como en la parte superior y visible (Figura 39), se observa que existe una diferencia importante. De esta manera, existen dos barras y tres bielas acopladas al eje descubierto, mientras que tanto en los dos ejes, también transversales que están en la parte superior, las posibilidades de conexión son cuatro, con tres bielas comunes y la propia con múltiples agujeros. Esto quiere decir que faltan dos barras, que probablemente fueran de carácter muy similar a las que han llegado hasta la actualidad, y una biela.

Por otro lado, también es factible observar, aunque en las imágenes no lo es tanto, que el eje encontrado presenta cierta inclinación. Y una inclinación además que no puede ser corregida, debido al tonelaje del eje. Para encontrar el motivo de la misma, basta únicamente con

comparar ambos extremos del eje. En la imagen anterior, se puede ver con nitidez la existencia de un cojinete en el extremo del mismo.

En el extremo contrario, apreciable en la Figura 65, sin embargo, no existe cojinete alguno. En cambio, al remontarse a la Figura 51, la propia de 1914, con aquella ventana a la interior de la Máquina, una vez levantadas las chapas metálicas, es perfectamente deducible que lo que en aquella imagen se observaba, era el cojinete. Esto quiere decir, que en algún momento ese cojinete desapareció, quizás junto a las barras y la biela, y es posible que fuera en el momento en el que se bloqueó la Máquina.

Por último, al remontarse también a 1914 y a la problemática con la biela agujereada, es posible determinar, por la posición de las bielas del eje descubierto, que, efectivamente, tal y como se había podido deducir a partir de la fotografía, la biela agujereada originalmente se encontraba en el extremo contrario al actual. Además, al confirmarse este hecho, se revela otro problema respecto las dos bielas que comparten eje con la anterior.

En la situación actual, la biela situada a la izquierda del eje superior según la Figura 50, es imposible que estuviera situada en ese mismo lugar durante el funcionamiento de la Máquina. El motivo es que, tal y como se observa hoy en día, no es posible conectar dicha biela con el eje inferior descubierto, puesto que además de que no hay espacio en dicho eje para una biela más en la posición necesaria para que una barra conectase ambas bielas, la biela superior chocaría con la correspondiente biela del eje inferior visible, la cual está en su sitio original.

Las anteriores conclusiones no son más que el principio de un conjunto obtenido a partir de sucesivas bajadas a la interior de la Máquina, no solo a la parte descubierta en la Figura 50, sino en toda la longitud de la misma. Lo que se pretende transmitir con esto es que el conocimiento que se ha obtenido acerca de la Máquina no ha sido inmediato. Más bien lo contrario. Porque en más de una ocasión, lo que a primera vista parecía obvio, en una segunda o tercera reflexión o visita a su interior, o por medio de la retroalimentación entre las personas implicadas en el proyecto, como D. José Manuel Burón o D^a. Milagrosa González, quedaba descartado a favor de una nueva teoría.

Una de las incógnitas que rodeaban a la Máquina en cuanto a su funcionamiento era relativa a la entrada del vapor. Inicialmente, se podría pensar que la entrada de vapor se encontraba directamente en la *ócaão* o compartimento que contiene, a priori, las válvulas para la distribución del vapor, y se muestra en las Figuras 69 y 70:



Figura 69: Perspectiva caja distribuidora (1)



Figura 70: Perspectiva caja distribuidora (2)

Podría parecer factible que fuera por este elemento por el cual se alimentase de vapor al cilindro. Y si esto era realmente así, el escape de dicho vapor al condensador se identificaría con la columna que se encuentra justo debajo del elemento en cuestión. Sin embargo, la

investigación empírica llevó a desechar por completo estas hipótesis. En las imágenes que se van ir mostrando a continuación se muestra lo que se encontró debajo del cilindro, que por un lado y como se ha visto, anuló algunas suposiciones, mientras que, por otro lado, confirmó otras.

En primer lugar, respecto a la alimentación del vapor, esta resultó ser aquello que inicialmente se había pensado que correspondía con el escape al condensador. El argumento que permitió determinar lo anterior fue la presencia de un elemento fundamental en la marcha de las máquinas de vapor: la válvula de mariposa.

La mera existencia de la válvula es suficiente para afirmar con total seguridad que la tubería vertical, cuya parte inferior se muestra en las Figuras 71 y 72, que baja desde el compartimento superior se corresponde con la alimentación del vapor. Lo que no se encontró fue rastro alguno de tuberías que conectasen dicha alimentación con la antigua caldera. Esto tampoco es sorprendente porque la Máquina nunca llegó a disponer, una vez instalada en la ETSII, de caldera, y por tanto, es perfectamente plausible que las tuberías ausentes nunca llegaron a estar.



Figura 71: Tubería alimentación de vapor (1)



Figura 72: Conexión exterior con la válvula (2)

En cuanto a la válvula, que en su momento debía permitir la regulación del caudal entrante a partir del regulador de Watt, se muestra en la Figura 73, y actualmente no es posible, puesto que se encuentra bloqueada tras más de cien años sin uso alguno.



Figura 73: Válvula de mariposa

Por otro lado, una incógnita que también envolvía a la Máquina, y en concreto a una de sus partes definitorias como máquina tipo Watt, se resolvió en cuanto se abrió la Máquina por primera vez. Esta parte no es otra que el condensador, que debía estar a priori justo debajo del cilindro, y del cual no había rastro alguno. Por la configuración del habitáculo que se encuentra en su lugar, todo indica que no llegó a acompañar al resto de la Máquina en su traslado a su emplazamiento actual.

A lo anterior, se podría añadir la pregunta: ¿si lo que se creía que era el escape al condensador era en realidad la alimentación del vapor, donde se encontraba entonces dicha tubería? La respuesta a la cuestión apareció inmediatamente al bajar al habitáculo y observar

lo que allí había. Debido a las escasas condiciones de iluminación del mismo, en las Figuras 49 y 50, puede que sea difícil apreciar lo que se va a comentar a continuación.

De esta manera, fue posible observar la pared inferior del cilindro, a la cual estaba acoplada una tubería de un diámetro importante. A dicha tubería llegaban dos conductos, y, desde el propio habitáculo, se podía apreciar cómo dichos conductos procedían de las columnas acoplada al cilindro, que se distinguen en la Figura 76, y de su simétrica, también acoplada por supuesto. Los conductos, indudablemente evacuaban el vapor del cilindro a partir de la caja distribuidora a la gran tubería, la cual llevaba con certeza al condensador.

En realidad, el hecho de encontrar esta disposición de la evacuación del vapor fue en parte desconcertante, puesto que en toda la bibliografía de máquinas de vapor consultada no apareció una tipología así. Tampoco se sabía si las columnas tenían también una función de alimentación de vapor al cilindro desde la caja distribuidora. Esto quiere decir, que de la misma manera que el vapor era evacuado por las columnas, ¿por qué el vapor no podía bifurcarse también para entrar al cilindro?

Así, en la Figura 74, se puede observar la posición relativa de la tubería con respecto a la alimentación, y en esta misma y en la 75, es posible distinguir el extremo de los conductos en la tubería. Por último, en la Figura 76, aparecen además los conductos, siguiendo su trayectoria hacia las columnas.



Figura 74: Escape al condensador (1)



Figura 75: Escape al condensador (2)

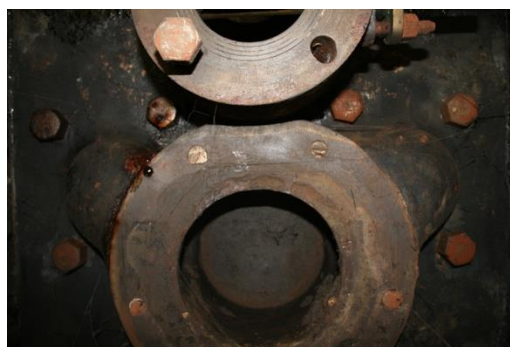


Figura 76: Escape al condensador (3)

Además de lo anterior, que se correspondía con la parte subterránea más interesante de la Máquina, aún quedaba más de la mitad por ver y analizar. Una vez dentro del habitáculo, basta con girar la vista dejando a la espalda la parte del cilindro, eje y condensador. Así, es posible observar la parte inferior del regulador de Watt, con la esperanza de encontrar algún tipo de conexión tanto con el árbol como con la alimentación de vapor, que ya había sido identificada. En definitiva, lo que actualmente se encuentra en el inferior de la Máquina, justo

por debajo del regulador, puede apreciarse en la serie de imágenes que se incluyen a continuación (Figura 77 a Figura 80).



Figura 77: Parte inferior regulador (1)



Figura 78: Parte inferior regulador (2)



Figura 79: Parte inferior regulador (3)



Figura 80: Parte inferior regulador (4)

Por lo tanto, ¿qué es lo que ha aportado al desarrollo del proyecto? Por un lado, quedó resuelto el mecanismo de conexión entre el árbol y el regulador, que le permitía a este último girar a una velocidad que variaba con la de la propia Máquina. Como se puede apreciar en todas las Figuras anteriores, dicha conexión se realizaba por medio de engranajes cónicos, aunque, como también queda de manifiesto, uno de ellos está ausente. Resulta imposible saber si en algún momento estuvo ahí, pero lo que parece claro, es que existió un engranaje cónico acoplado al eje vertical del regulador que dirigía su movimiento.

Sin embargo, había que determinar también como se transmitía el movimiento previamente al engranaje que está presente. Dicho engranaje está acoplado a un eje, perpendicular a la pared de la Máquina, el cual giraba gracias a un sistema de correas. De las correas, por supuesto no hay el menor indicio, pero lo que sí ha perdurado hasta la actualidad son las ranuras en las que estas iban encajadas. Estas se observan claramente en la Figura 81, y se pudo entender así como las correas podían actuar en diferentes posiciones, en función de las especificaciones de funcionamiento.



Figura 81: Ranuras para correa en múltiples posiciones

De la misma manera, en el propio árbol también es posible apreciar los surcos en los que irían las correas, como se ve en la Figura 82. Tanto esta última noción como la anterior eran desconocidas antes de entrar en la Máquina, ya que, aunque dichos elementos son totalmente visibles desde el exterior, sin saber cómo era la Máquina por dentro no era inmediato conocer su función. Por lo tanto, ya quedó establecido el sistema de transmisión del movimiento rotativo del árbol al regulador.



Figura 82: Ranura para correa en el árbol

Sin embargo, aún queda un aspecto a determinar que guarda la relación con el hallazgo de la válvula de mariposa. En este sentido, aún no se conocía cómo el regulador era capaz de regular el caudal de vapor, y por tanto las revoluciones de la Máquina, al actuar sobre dicha válvula. Tras la realización del proyecto, esto aún no ha sido determinado. El motivo principal es que no existe, no ha llegado hasta el tiempo actual, sistema alguno que conecte las partes mencionadas. Además, no es apreciable, por condiciones de iluminación y/o conservación, alguna hendidura o marca fruto de algún tipo de unión con el elemento que conecta con la válvula de mariposa, ilustrado en la Figura 72. Por lo tanto, ¿cómo era posible hacer oscilar la válvula para estrangular o abrir el paso del vapor?

A lo anterior se une el hecho de la posición relativa entre el regulador como tal, es decir, las esferas metálicas y el manguito deslizante, y la entrada del vapor. En consecuencia, es perfectamente comprensible que una estructura como esa, que debía ser sin duda visible, describiendo alguna especie de escalón articulado, no haya llegado hasta la actualidad. De hecho, ni siquiera en la imagen de 1914 aparece. Aunque esto plantea la cuestión de si lo que se ha sugerido como estructura de conexión en realidad era diferente. Quizás es posible que la conexión regulador-válvula siempre hubiera estado en la parte no visible de la Máquina.

El hecho es que actualmente, y debido a los motivos ya comentados sobre la inmovilidad de ciertas piezas y la dificultad en ocasiones de distinguirlas unas de otras, no se puede afirmar a ciencia cierta cómo era el sistema de conexión.

Y lo cierto es que realmente existen muchas posibilidades para dicho sistema, porque son muchas las tipologías de reguladores de Watt encontradas en la bibliografía. Sin embargo, ninguna de ellas coincidía con la disposición encontrada en la Máquina, lo que corrobora en parte la particularidad de la misma. Y es que, la entrada del vapor por debajo, tal y como muestra la Máquina es ciertamente distinta de aquello que se ha podido encontrar en las diversas fuentes consultadas. De ahí que no esté claro y no se pueda asegurar cómo era exactamente el mecanismo de transmisión.

En lo que respecta a la parte no visible desde el exterior y subterránea de la Máquina, aún queda por analizar la parte correspondiente al mecanismo biela-manivela, el cual permitía la conversión del movimiento del balancín en movimiento rotativo en el árbol. En este sentido, no había mucho por descubrir, puesto que se trata de un mecanismo sobradamente conocido. En cambio, era necesario observarlo de cerca y detenidamente para poder plasmar la forma y los detalles presentes en las piezas del mecanismo. En las Figuras 83 y 84 puede apreciarse lo comentado. De cara a su diseño en el programa, a pesar de poder bajar y fotografiar las piezas, de nuevo la iluminación, el polvo o las escasas dimensiones del habitáculo correspondiente, impedían disponer de medidas muy cercanas a las reales. Por lo tanto, en esta parte lo que se ha priorizado ha sido la funcionalidad, puesto que el detalle era complicado trasladarlo al diseño.



Figura 83: Biela-manivela. Vista exterior



Figura 84: Biela-manivela. Vista interior

Por último, solo queda un aspecto importante que comentar en lo que se refiere a la parte subterránea. En este tipo de máquinas, además del condensador, que se recuerda que en esta Máquina ya no está, también solían incluir un sistema de bombeo de agua, generalmente relacionado con el propio condensador, pues era necesario, tanto evacuar el agua condensada en él, como mantenerlo a la temperatura adecuada. Este sistema, funcionaba aprovechando el propio movimiento del balancín, de tal manera que barras verticales acopladas al mismo eran capaces de transformar su propio movimiento alternativo en acciones, alternativas también, de succión y de bombeo. Ejemplos de esto son relativamente sencillos de encontrar (Figura 85), y en ellos se aprecia cómo las barras eran capaces de realizar la función comentada anteriormente.

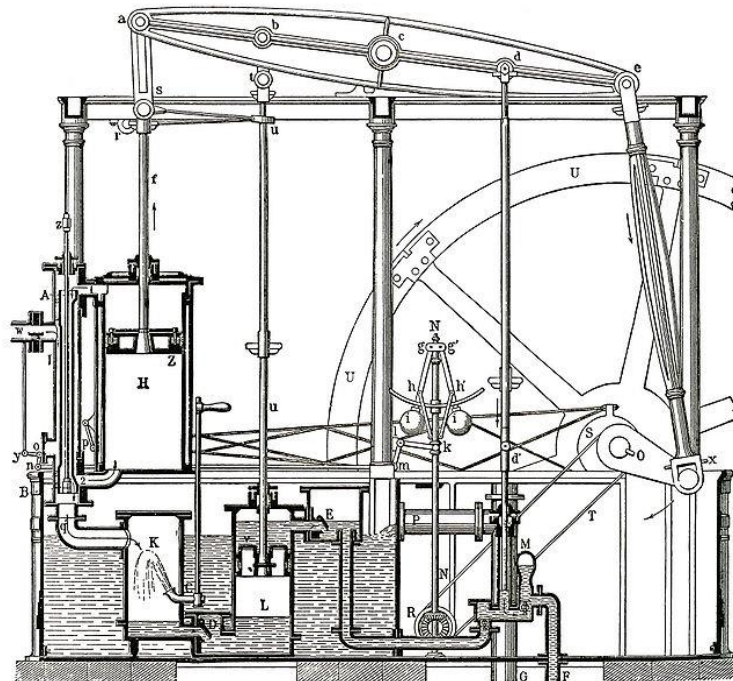


Figura 85: Máquina de vapor. Sistema de bombeo

En el caso de la Máquina, es seguro que no era exactamente así, debido a la disposición de los habitáculos, del eje encontrado y de la parte inferior del regulador. Independientemente de lo anterior, lo que sí se puede apreciar a simple vista en la Máquina son, tanto un agujero pasante presente en el balancín correspondiente a un eje al que acoplar las barras verticales, como una de estas barras (Figura 86 a 88). Si se mira la Máquina desde una perspectiva similar a las fotografías en este documento incluidas, la única barra que podría corresponder a este sistema se encontraría a la derecha, entre el regulador y el mecanismo biela-manivela.

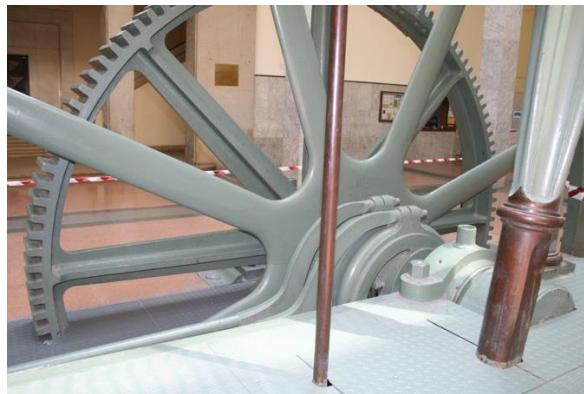


Figura 86: Barra vertical conectada al balancín



Figura 87: Barra vertical. Vista inferior (1)



Figura 88: Barra vertical. Vista inferior (2)

Además de lo anterior, las barras no desempeñaban su función por sí mismas, sino que se requería la acción de dos de ellas, idénticas en forma y longitud. Esto se deduce a partir de la Figura 64, en la que aparece un semicilindro hueco en el cual iría acoplada la barra simétrica. El hecho de trabajar en parejas parece obvio al reparar en los esfuerzos que debería soportar el eje de conexión con el balancín si únicamente dispusiera de una barra acoplada en un lado.



Figura 89: Hueco barra vertical

Aunque se disponga de la barra, esta es la única parte del mecanismo, a priori de bombeo, que ha perdurado, como corrobora la Figura 88, en la que no se aprecia conexión alguna con el extremo inferior de la barra. Como consecuencia, no forma parte de los objetivos del proyecto el tratar de recrear cómo sería esta parte, pues no afecta en lo más mínimo al desempeño mecánico de la Máquina. Ni siquiera una futura maqueta tendría por qué disponer del sistema mencionado para poder ilustrar el movimiento de la Máquina, puesto que el vapor podría no ser el fluido motor de la misma. Pero eso vendrá más adelante.

Tras la explicación de las conclusiones obtenidas a partir de distintas incursiones o excursiones (según el punto de vista) al interior de la Máquina, todavía resta por comentar la exploración de otra de las partes no visibles, que no subterráneas, de la Máquina. De esta manera, a continuación se va a explicar y documentar el proceso realizado para conocer el interior de la caja distribuidora de la Máquina.

A pesar de que se pudiese tener cierta idea de lo que allí se podía encontrar, gracias a la comunicación con el Museo de Forncett, constituía una necesidad para el diseño de la Máquina conocer lo que había en el interior de dicha caja. Además de conocerlo, también había que medirlo y documentarlo para poder convertirlo en un diseño fiel y funcional. Por lo tanto, para acceder a su interior, hubo de desatornillar un total de 11 tornillos de las 14 roscas

(hay tres que hace tiempo que desaparecieron) que conectaban la tapa de la caja con la misma. Lo que apareció queda ilustrado en las Figuras 90 y 91.



Figura 90: Interior caja distribuidora



Figura 91: Doble válvula de corredera

De esta manera, quedó al descubierto parte de la válvula distribuidora del vapor. Como era de esperar, al disponer la Máquina de dos excéntricas, también fueron dos las válvulas de corredera que se encontraban en la caja. Una de ellas es la que se encuentra más cercana al observador, con una tonalidad dorada, mientras que la otra es aquella con forma de cajón, a la que va acoplada la primera y que dispone de la hendidura visible.

Por otro lado, la posición relativa de ambas válvulas confirmó aquello que ya se sabía gracias a la posición del balancín y del mecanismo biela-manivela: el émbolo del cilindro se encuentra prácticamente en su punto muerto superior (PMS). Y es que, en la Figura 66, se muestra con claridad la ranura superior de entrada del vapor, lo que implica que si la Máquina comenzase a funcionar desde dicha posición, el vapor que entraría a la caja desde la alimentación, iría a la parte superior del cilindro. Así, el émbolo, que se encontraría en un movimiento vertical hacia arriba con una aceleración negativa, comenzaría a experimentar la fuerza del vapor que, en cuanto llegase al PMS, lo impulsaría hacia abajo.

Junto lo anterior, se puede observar el conducto de la alimentación de vapor que se había identificado al adentrarse previamente. En la Figura 92 aparece de forma más nítida este conducto, y en ella también es posible reparar mejor en una sustancia de tonalidad parda-rojiza (en función de la iluminación). Esta se corresponde con una especie de grasa, de carácter viscoso, que impregna prácticamente todo el interior de la caja distribuidora. Lo más probable es que cumpliera una función de engrase de las piezas, y lo que se desconoce es el momento en el que la sustancia que ha llegado hasta la actualidad fue aplicada.



Figura 92: Vista superior alimentación de vapor

Lo anterior hace referencia únicamente a lo que se puede ver, pero hay otra parte que está oculta por la propia disposición de las válvulas. En consecuencia, y en base a la lógica aportada por multitud de ejemplos encontrados de válvulas similares (nunca iguales), es de suponer que existe una hendidura oculta en la válvula posterior.

En la situación actual de la Máquina, el vapor, en lugar de entrar en el cilindro por dicha hendidura inferior (a la parte inferior del cilindro, claro), estaría comenzando a evacuar el cilindro para alcanzar el condensador. Como consecuencia, la válvula más cercana estaría ocultando también el conducto de escape del vapor, así como el conducto comunicante entre este y el procedente del cilindro.

Sin embargo, las dimensiones de las válvulas y el espesor de ambas, situación de la hendidura superior, entre otras, pueden dar lugar a pensar que el sistema comentado no se adaptaría a las mismas, por lo que sería necesario plantear otra alternativa. Al fin y al cabo, como se determinó al inspeccionar la parte inferior del cilindro, los conductos de escape son dos. Debido a esto, el conducto teóricamente oculto por la primera válvula, debería bifurcarse en dos ramales (uno por columna), lo que se antojaría aún más inviable.

La propuesta que pudiera plantearse, sin embargo, carecería de sentido si no implicase en ella la función alternativa de las válvulas. Con esto se pretende transmitir, que un sistema que únicamente incorporase a las columnas no podría satisfacer las necesidades que requiere un cilindro de doble efecto. Por lo tanto, en la implementación en el programa se buscará diseñar un sistema que siga las directrices de los ejemplos encontrados, adaptándose al mismo tiempo a las particularidades de la Máquina.

Tras las anteriores reflexiones, en las que se ha puesto de manifiesto que, a pesar de los diferentes esfuerzos, las incógnitas que aún quedaban por conocer eran numerosas e importantes, es preciso comentar diferentes acciones que se llevaron a cabo para tratar de hallarlas.

En primer lugar, se planteó la posibilidad de obtener una radiografía de la parte del cilindro. Si esto hubiese sido posible, se habría obtenido una imagen fiel de la situación exacta del émbolo dentro del cilindro, así como un auténtico mapa de los diferentes conductos de los sistemas previamente comentados. Como la oración anterior anticipaba, la radiografía se quedó en una simple intención, puesto que nunca llegó a realizarse. Las dimensiones y la situación de la Máquina, así como la inexistencia de medios para practicarla, impidieron llevar a cabo una exploración de dicho carácter. Además de lo anterior, se buscó si era posible recurrir a algún servicio externo a la Escuela, pero tampoco por esta vía se pudo conseguir lo que se buscaba.

En segundo y último lugar, se optó por recurrir a una especie de boroscopios, es decir, dispositivos ópticos con una cámara en su extremo y que permiten la visualización de zonas

que de otra manera sería imposible de ver. Aunque eran similares, se diferenciaban por la rigidez que presentaban los tubos con la cámara en el extremo, y ambos fueron facilitados por D^a. Milagrosa González.

Es comprensible, en este punto, preguntarse por la utilidad de los mismos. En el presente proyecto, dadas las incógnitas que había que despejar, se buscó, en primer lugar, introducir los boroscopios por los conductos que llevaban al condensador desde las columnas (Figura 76). De esta manera, quizás fuera posible observar la trayectoria que seguían dichos conductos. Para llevarlo a cabo, fue necesario abrir la Máquina una vez más para introducirse en su interior. El resultado fue negativo, pues las imágenes que pudieron ser capturadas no revelaron ningún tipo de información adicional. Lo mismo sucedió al introducir los boroscopios por la tubería de alimentación de vapor.

A pesar de estos fracasos, aún quedaban más posibilidades que agotar. Destapando la caja distribuidora de nuevo, se pretendió acceder al cilindro por la hendidura descubierta y perfectamente accesible (Figura 91). Dicha hendidura debía conducir al cilindro, como ya se había mencionado, y, al introducir las cámaras por la misma había una oportunidad de determinar la trayectoria que seguía el vapor antes de su entrada en el cilindro. Es decir, que se podría establecer si las columnas cumplían también la función de alimentación de vapor al mismo. De nuevo el resultado no fue positivo, ya que la trayectoria curva seguida por los conductos impedía llegar a la profundidad adecuada. Sin embargo, el hecho de que estos fueran curvos ya era un aspecto importante, de cara sobre todo a su diseño en el ordenador.

En relación a lo anterior, ya solo restaba una última tentativa que probar. Previamente se han identificado en la tapa del cilindro una serie de instrumentos de medida y control. Estos elementos, actualmente son móviles, y están acoplados al cilindro por medio de una unión roscada. En consecuencia, al desacoplarlos del cilindro era natural pensar que dejarían un hueco por el que poder introducir los boroscopios, y de este modo, poder acceder al interior del cilindro. En este caso, sí que fue posible realizar lo mencionado, pero la realidad es que no se pudo vislumbrar nada. Por el contrario, lo que sí se pudo determinar, de una manera aproximada, fue la posición de la cara superior del émbolo. Desde luego, se trata de una medida importante, porque permitió situarlo, si bien no se obtuvo dato alguno en relación al espesor del mismo, de tal forma que será un parámetro que tendría que estimarse.

De este modo, las actuaciones para conocer y descubrir los secretos de la Máquina terminaron aquí. Sin embargo, esto no quiere decir que en ningún momento posterior se volviese a levantar las chapas y adentrarse en su interior. Esto se debe a la necesidad de medir las diferentes piezas, un proceso que resulta imposible de realizar en una única sesión de toma de datos. Se trata de muchas piezas, con muchos detalles y con una posición relativa dentro de la Máquina. En consecuencia, si se pretendía obtener un resultado fiel y de calidad, la solución pasaba por dedicar a cada una de las piezas el tiempo necesario, para reparar de forma precisa, en la totalidad de sus rasgos.

En relación con lo anterior, si se conseguía concentrar en una única sesión todos los valores de las diferentes dimensiones, al final era bastante probable que a la hora de realizar más de una pieza, fuese necesario volver a acudir a la Máquina. Esto se debe a la dificultad de plasmar en un papel todas las medidas, en un croquis de la pieza, sin que posteriormente no se produjese ningún tipo de confusión.

Las diferentes acciones que en las páginas previas se han ido comentando, no deben hacer caer en la suposición de que concentraban todo el tiempo dedicado al proyecto. Con lo anterior, se pretende transmitir que tanto la investigación sobre el origen de la Máquina, como las diferentes acciones realizadas in situ sobre ella, se han ido realizando de manera simultánea. A esto se une también el diseño de las piezas, que también tenía lugar paralelamente en el tiempo a las otras dos actividades. De hecho, en la planificación temporal del proyecto, es posible observar cómo este último se ha desarrollado solapadamente y durante más tiempo que las otras actividades, junto con la toma de medidas. Esto se explica

también por el proceso llevado a cabo en el proyecto, es decir, por la medida de una pieza y su diseño inmediato.

Para terminar con este apartado, es necesario explicar un hecho que según las investigaciones iban avanzando parecía que tenía menos sentido. Incluso es posible que el lector ya haya reparado en él. La siguiente cuestión quizá refleje dichas inquietudes: ¿cómo es posible que por medio de un único eje, al que van acopladas dos excéntricas, sea posible modificar la posición relativa de dos válvulas?

La pregunta es totalmente lógica, y es un reflejo claro del misterio que rodea al funcionamiento mecánico del sistema de distribución. Obviamente, la teoría, sencilla, de la utilidad de las dos válvulas para controlar la expansión del vapor, se comprende con facilidad. Lo que ya no es tan sencillo es comprender el funcionamiento mecánico de los elementos que aparecen y no aparecen en la Máquina. De ahí que la visita al *Forncett Industrial Steam Museum* podría haber sido de gran ayuda para tratar de comprender lo anterior.

Por otro lado, al mismo tiempo que disponer de un diseño constituye el método idóneo para tratar de averiguar dicho funcionamiento, también supone una complicación adicional que más adelante se determinará si ha podido ser solventada. ¿Con qué criterio se diseñan piezas que desaparecieron de la Máquina mucho tiempo atrás y cuya función exacta no se conoce?

Además, si las piezas presentes no hacen sino añadir incógnitas al funcionamiento, como es el caso de la biela con múltiples agujeros, la cual parece que permite varias posiciones posibles, la dificultad aumenta. A esto se une el hecho de la incertidumbre acumulada en las medidas, que como se verá es variable en función de la parte de la Máquina en cuestión. Por lo tanto, es complicado construir un modelo capaz de realizar un movimiento coherente con una regulación adecuada de la expansión del vapor.

Volviendo a la primera pregunta formulada, la respuesta se queda en blanco. Realmente no se conoce cómo un único eje podría cumplir la función de transmitir la función de las dos excéntricas. Sin embargo, una hipótesis se planteó que, de ser cierta, podría explicar este funcionamiento. Si el eje encontrado, en lugar de ser macizo, estuviese hueco, y en lugar de un solo eje en realidad fuesen dos, dispuestos de manera concéntrica, las posibilidades de independizar los movimientos de las válvulas volvían a abrirse. Para ello, sería necesario que cada una de las excéntricas estuviese unida con solo uno de los ejes, de tal modo que posteriormente cada uno de los ejes transmitiese su movimiento a cada una de las válvulas.

Aunque la hipótesis podría ser viable, desde luego no es comprobable dado del estado actual de esa parte de la Máquina. Se recuerda aquí que el eje estaba inclinado, sin posibilidad alguna de moverlo, y que la conexión de las excéntricas con el eje (o doble eje) era cuanto menos accesible y visible. Además, tras muchas décadas oculto bajo chapas, el polvo impedía vislumbrar en alguno de los cambios de diámetro que experimenta el eje en su extremo izquierdo (según la Figura 65) si lo que se apreciaba en realidad era un segundo eje.

Como consecuencia, se encuentra aquí una incógnita que en este proyecto no va a poder ser despejada, y que es posible que suponga un impedimento para que el modelo realizado en CATIA no llegue a realizar un movimiento tal cual habría sido en la realidad.

4.4 ENTORNO DE CATIA Y MÓDULO PART DESIGN

Una vez realizada toda la explicación pertinente sobre la investigación de la Máquina, en el apartado que sigue se va a compartir el diseño de las diferentes piezas y partes que la Máquina incluye. Este diseño, fue realizado al mismo tiempo que tenía lugar parte de la investigación previa, puesto que no necesitaba de conocimientos adicionales para poder comenzar a llevarse a cabo, al menos en parte.

Repetidamente a lo largo de este documento se ha introducido brevemente una justificación del por qué se emplea un programa como CATIA. Ya se ha visto que la Máquina en su estado actual presenta piezas en una posición que difiere notablemente con respecto a la original (eje inclinado, eje invertido), por lo que es necesario realizar cambios y modificaciones para poder disponer de las piezas tal y como se encontrarían si la Máquina se dispusiese a moverse.

También repetidamente en la ETSII se recita la frase, por parte de los profesores, de *oêl papel lo aguanta todo*. Esta, se adapta perfectamente a las necesidades de las piezas de la Máquina, solo que en lugar de papel, el marco de pruebas consiste en un programa de diseño. CATIA ofrece así la posibilidad que la realidad física no puede ofrecer, dada la magnitud de las operaciones a realizar, al menos por el momento. En un futuro sí que se podría plantear actuar sobre dichas piezas con los medios adecuados. Además, tampoco el papel es capaz de ofrecer la versatilidad y comodidad que este tipo de programas presentan, modificando entonces la frase anterior a *oêl ordenador lo aguanta todo*.

Por otro lado, antes de ir introduciendo el resultado de plasmar las medidas, croquis y fotografías realizadas, es conveniente desarrollar con cierta profundidad cómo es el entorno de diseño del que se dispone en CATIA. Si se repasa en toda la capacidad que este programa aglutina, la realidad muestra que para el presente proyecto se ha necesitado un porcentaje muy pequeño de todo lo que CATIA puede ofrecer. Este programa presenta todas sus funcionalidades divididas en diferentes módulos, cada uno de los cuales está destinado a una aplicación diferente. Más adelante se especificarán aquellos que más interesan para el desarrollo del proyecto.

Junto a lo anterior, conviene destacar que CATIA, al menos en la versión que se emplea en el proyecto (V5), es un programa que destaca por el sistema paramétrico con el que permite diseñar. En otras palabras, es posible establecer relaciones internas entre los diferentes elementos que constituyan los diseños, facilitando enormemente la imposición de restricciones y la creación de diseños sólidos.

Para mostrar todas las piezas diseñadas no se va explicar en cada una de ellas el proceso de creación de las mismas. Esto supondría alejar la explicación de lo que realmente se busca, que no es otra cosa que mostrar el resultado de la interpretación y el traslado de la Máquina a un entorno virtual con el que poder trabajar. Tampoco es posible explicar cada una de las diferentes posibilidades que ofrece cada una de las herramientas de cada uno de los módulos. Son incontables las combinaciones que se pueden producir al usarlas. Como consecuencia, la explicación se realizará desde un punto de vista general, tratando de ilustrar con diferentes imágenes aquello que pueda facilitar la comprensión y el modo de actuar en un programa como este.

Por otro lado, aunque como se ha mencionado anteriormente, las piezas se hayan ido diseñando sin orden aparente, como se verá más adelante esto cambia a la hora de ir acoplándolas para crear los diferentes ensamblajes. Así, es aconsejable en este programa, y en otros del mismo tipo, ir de menos a más, es decir, ir creando subconjuntos de piezas que posteriormente se irán acoplando en conjuntos mayores, para dar como resultado finalmente la Máquina completa.

En cuanto a la escala con la que se ha diseñado el modelo, en realidad esta no es muy importante, puesto que una vez creada una pieza, es posible modificar todas sus dimensiones precisamente aplicando una escala en el programa. Independientemente de lo anterior, todas las piezas y medidas se han aplicado con un factor 1:10, por lo que si en la realidad estas se tomaban en centímetros, en el programa se establecían en milímetros. Esto se ha decidido hacerlo así por un lado por comodidad y prevención de errores, y por otro, por desconocimiento del tamaño relativo que tendría la futura maqueta que se construyese a partir de este modelo.

Por último, antes de comenzar el proyecto se disponía de una pequeña base por medio de la cual poder empezar a trabajar. Para incrementar dichos conocimientos, además de recurrir a

Internet para problemas muy particulares, se consultó toda una referencia en el complejo mundo de CATIA. Este no es otro que *El gran libro de CATIA* [27], cuyos consejos fueron realmente útiles, en especial a lo que se refiere a la estructuración de un diseño de la complejidad que muestra el de la Máquina. Además de lo anterior, y como sucede en muchos otros ámbitos, CATIA, aunque se trata de un programa bastante intuitivo, requiere de muchas horas de trabajo con él, y también de muchos errores, para aprender a manejarlo con soltura.

Como consecuencia, existe una diferencia importante entre la eficiencia con la que fueron diseñadas las primeras piezas y las últimas. Esto, no va a ser apreciable en los diseños que aquí se comparten, ya que el resultado final es el mismo. Lo que cambia es entre otras cosas, la estructura de los diseños, el tiempo invertido en ellos, la eficacia para poder realizar modificaciones en los mismos y el empleo de herramientas más adecuadas.

En primer lugar, se va a mostrar cómo es la primera pantalla que se abre indistintamente cada vez que se abre el programa (Figura 93). No se va entrar aquí en detalles específicos de extensiones de los diferentes archivos de CATIA, que daría para muchos capítulos. Simplemente, se van a explicar algunas nociones de los módulos que se han empleado para el diseño, que son principalmente *PART DESIGN* y *ASSEMBLY DESIGN*. La elección entre todos los módulos posibles se ilustra en la Figura 94.

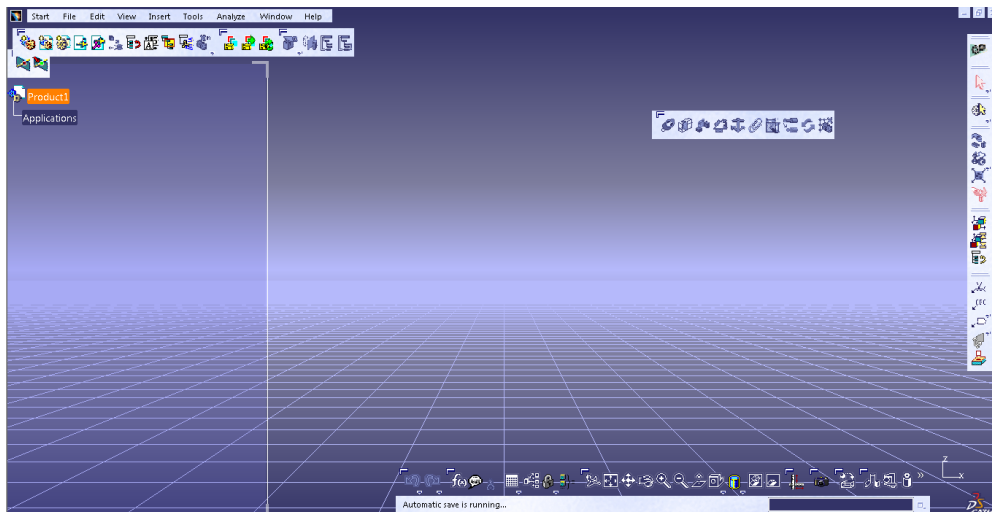


Figura 93: Pantalla inicial de CATIA

En este primer apartado, se va mostrar el proceso para la creación de un archivo del módulo *PART DESIGN* (extensión *CATPart*). Esto es, en definitiva, la creación de las diferentes piezas de manera individualizada. También en este apartado se reparará en aspectos de CATIA, generales, que no responden a un módulo específico. Se buscará desarrollar ambas ideas de forma conjunta.

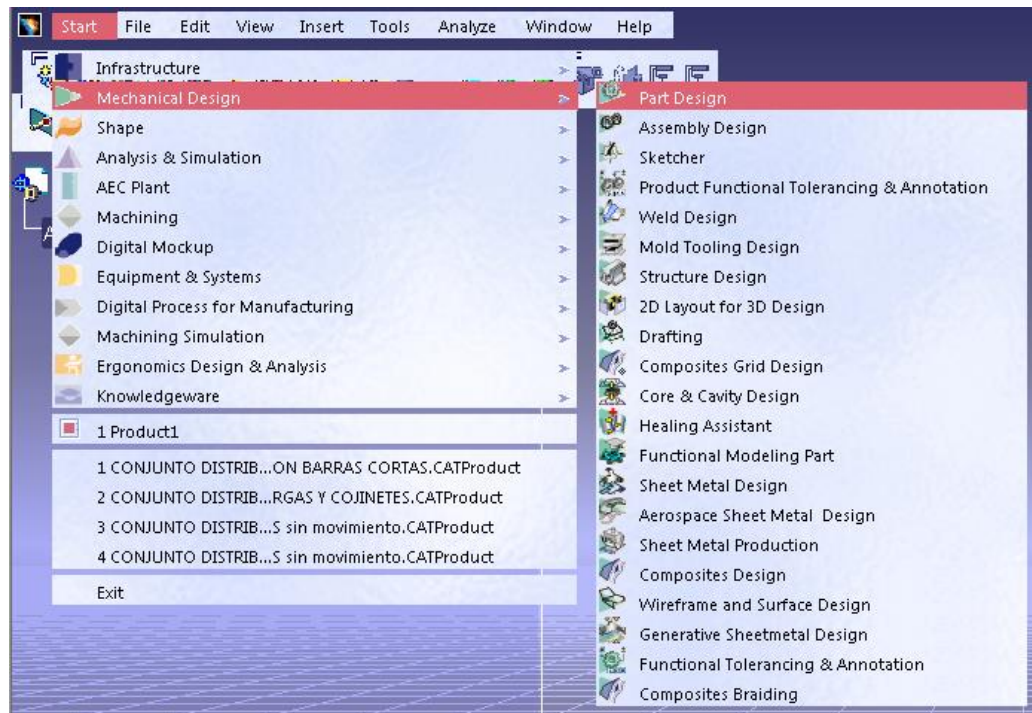


Figura 94: Módulos de CATIA

Una vez se ha escogido el módulo con el que se va a trabajar, en este caso, *PART DESIGN*, es posible comenzar a trabajar en el diseño de las piezas. Este módulo permite diseñar prácticamente cualquier geometría en formato sólido. Como se aprecia en la Figura 95, la pantalla ha cambiado con respecto a la anterior. Los símbolos que se encuentran a la derecha, que a partir de este momento se denominarán herramientas, agrupadas en barras de herramientas también han cambiado. Estas herramientas son particulares de cada módulo, y aunque se encuentren en dicha posición es posible modificarla a placer.

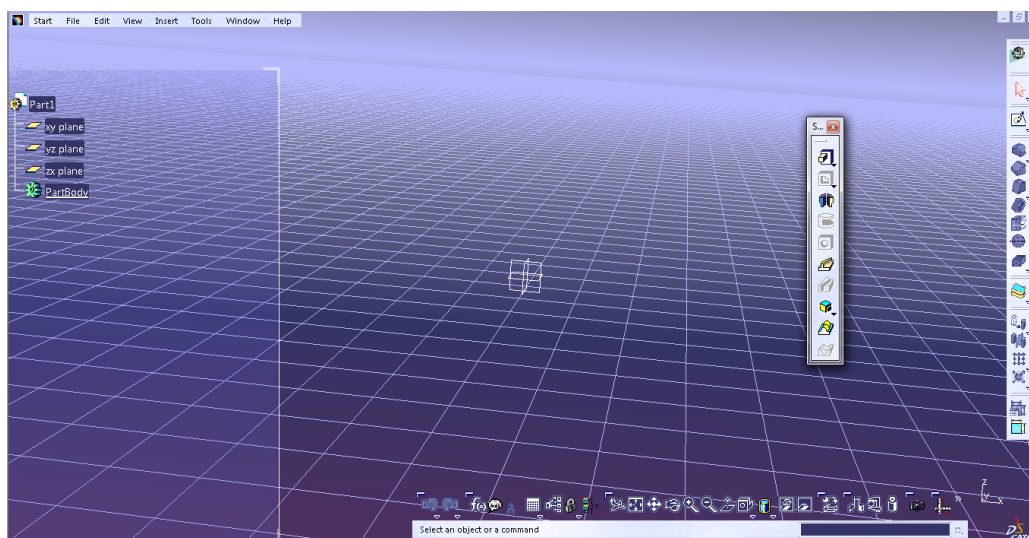


Figura 95: Pantalla de PART DESIGN

Además, hay muchas más barras de herramientas aparte de las que están a simple vista. Para acceder a ellas, simplemente es necesario mover de sitio las barras que sí son visibles, o también es posible acceder a las herramientas llamándolas desde la barra de introducción de comandos, abajo a la derecha de la Figura 96. A lo anterior se une la posibilidad de, tras haber desordenado las barras por necesidades del diseño, volver a la situación inicial. Para

ello, hay que seguir las pestañas *Tools > Customize > Restore position* y *Tools > Customize > Restore all contents*. También es posible encontrar algunas de las barras de herramientas en la pestaña superior *View*.



Figura 96: Barra de introducción de comandos

Conocer estas particularidades resulta de gran utilidad, pues en la mayoría de los casos, al iniciar por primera vez el trabajo con CATIA, sucede que no se encuentra una barra de herramientas impidiendo el progreso del trabajo.

Por último, antes se ha mencionado la modificación de la posición de las barras durante el proceso de diseño. La posición en la que se deja una barra queda guardada en el programa, como si de una configuración personal se tratase, lo que permite disponer de las barras más empleadas en la posición deseada aunque se inicie una nueva sesión del programa. Esta configuración se mantiene en una parte de la memoria del programa que se conoce como los *CATSettings*, que son de gran utilidad.

La visualización del entorno de diseño de CATIA que se va a mostrar es solo una de las múltiples opciones posibles. Esto se debe a la posibilidad de modificar muchos de los parámetros que rigen la misma, para la cual basta con seleccionar *Tools > Options* para acceder a un menú (Figura 97) desde el cual se puede controlar, por ejemplo, la resolución con la que se muestran los diferentes sólidos creados. Para comparar la diferencia que supone modificar este parámetro, se incluyen las Figuras 98 y 99. Es obvio que a mayor resolución, menor velocidad de procesamiento del programa, por lo que para el diseño se escoge trabajar con una resolución media antes que elevada.

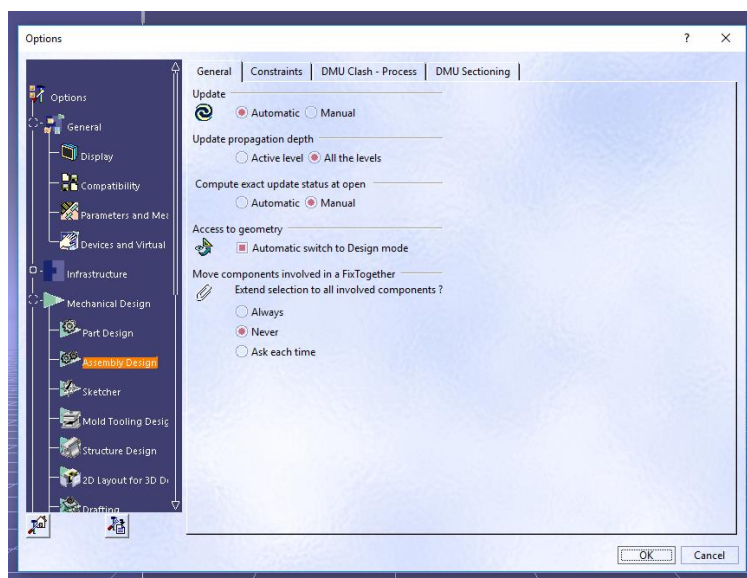


Figura 97: Menú para configurar opciones en CATIA

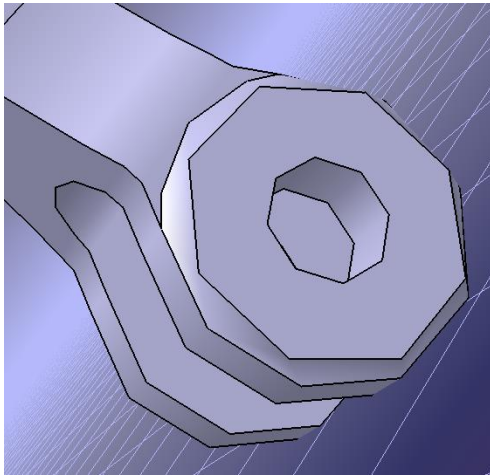


Figura 98: Pieza con resolución baja

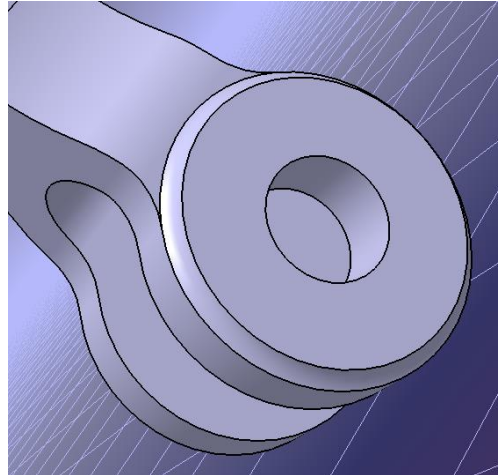


Figura 99: Pieza con resolución elevada

Por otro lado, la opción principal de este módulo, es la creación de un *sketch*, es decir, de una Figura en un plano concreto, que posteriormente y a partir de las herramientas adecuadas permite la creación de sólidos. El *sketch* (Figura 100) se erige como un entorno en sí mismo dentro del módulo, no es una herramienta como tal.



Figura 100: Icono para iniciar un sketch

En consecuencia, el primer paso, además de tener una idea clara de cómo se va a realizar el diseño, consiste en la elección de un plano del dibujo. Dedicar unos momentos a reflexionar sobre los polígonos, curvas y otros elementos geométricos que van a permitir dar forma a la pieza, constituye una actividad necesaria que ahorra mucho tiempo en correcciones posteriores.

De nuevo, dentro del sketch, la pantalla ha cambiado (Figura 101), pues se corresponde con un plano concreto del dibujo. Puede tratarse de un plano predefinido en el propio entorno de *PART DESIGN* (*xy plane*, *yz plane* o *zx plane*), y también, es posible en CATIA crear planos a partir de diferentes elementos o emplear superficies de sólidos ya creados. Dicha herramienta, *PLANE* (Figura 102), resulta de gran utilidad en el diseño de piezas, pues prácticamente en todas ellas es necesario definir planos auxiliares sobre los que poder trabajar. En este momento, se está en disposición de comenzar el diseño propiamente dicho.

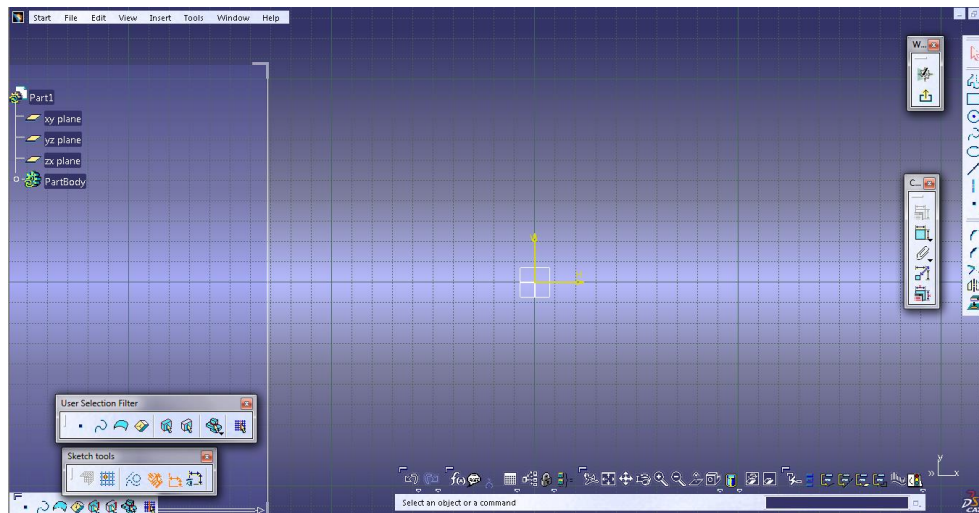


Figura 101: Pantalla de sketch

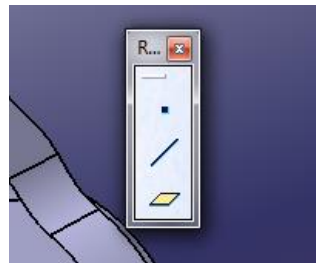


Figura 102: Barra de herramientas de PLANE

Antes de centrarse más en lo que respecta a los *sketch*, es preciso atender a alguna característica o funcionalidad que posee CATIA. Así, los diseños con frecuencia requieren de un gran número de operaciones diferentes, y estas aparecen registradas y ordenadas en lo que se conoce como árbol (Figura 103). Se trata de una herramienta fundamental, que permite desplegar y condensar las operaciones realizadas para facilitar su búsqueda en el conjunto de las mismas. De esta manera, es posible desactivar, reordenar o modificar, entre otras muchas opciones, las operaciones que forman parte de los diseños.



Figura 103: Árbol de operaciones

Para ilustrar algunas de las posibles operaciones que se pueden realizar, se va a tomar como ejemplo una de las primeras piezas que fue diseñada. La pieza en cuestión (Figura 104), es una de las barras verticales acopladas al eje inclinado encontradas al abrir la Máquina, y el

detalle de su extremo inferior (o superior, si estuviera colocada en su lugar) se muestra en la Figura 105.



Figura 104: Barra parte inferior Máquina



Figura 105: Detalle extremo inferior barra

Para realizar una pieza como esta, y en general, a cualquier pieza de la Máquina le sucederá lo mismo, es necesario crearla a partir de la adición o resta de diferentes sólidos, originados todos mediante sus respectivos sketch. De esta manera, a continuación se muestran cuatro fases diferentes en su diseño (Figuras 106 a 110).

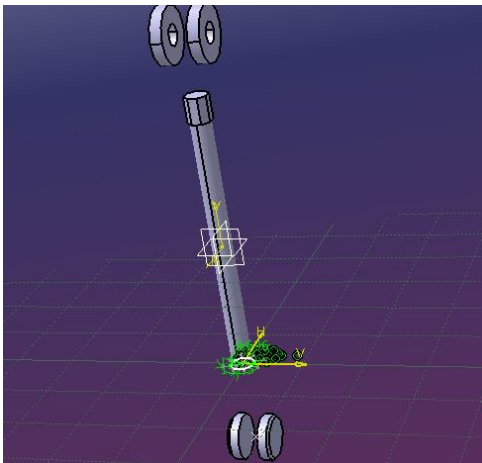


Figura 106: Diseño pieza ejemplo (1)

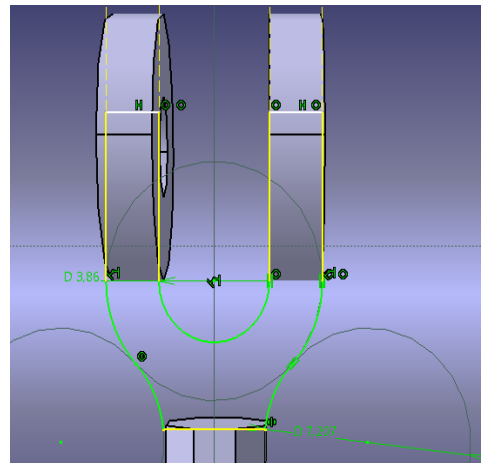


Figura 107: Diseño pieza ejemplo (2)

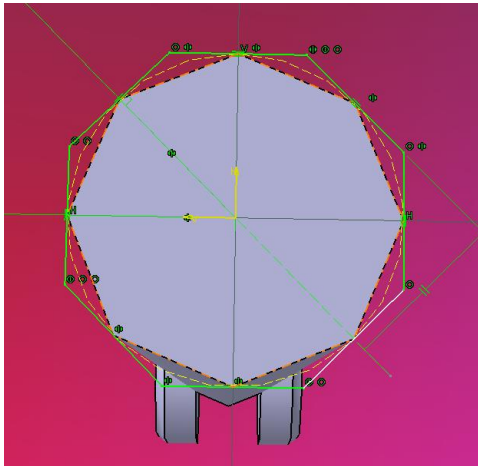


Figura 108: Diseño pieza ejemplo (3)

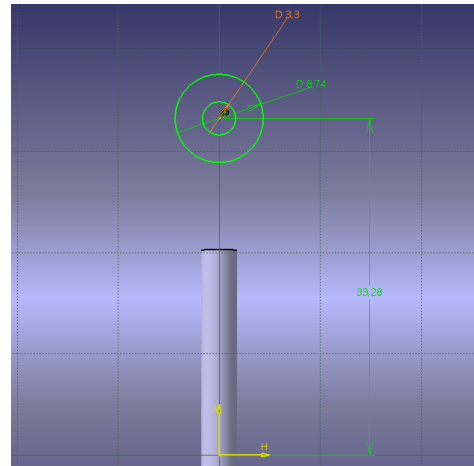


Figura 109: Diseño pieza ejemplo (4)

En las imágenes anteriores, se han podido observar líneas de sketch de varios colores. Cada uno de ellos tiene unas implicaciones en lo que concierne a la solidez del mismo, es decir, si los diferentes elementos están correctamente determinados espacialmente por las restricciones del dibujo. Como consecuencia, algunas de las posibilidades que existen son:

- Blanco. Las restricciones del dibujo no son suficientes para acotar correctamente todas las dimensiones de los elementos geométricos. Así, existen libertades en cuanto al desplazamiento de los elementos, lo que a la larga puede ocasionar problemas importantes.
- Verde. El diseño es consistente, todas las posiciones absolutas y relativas de los elementos están perfectamente delimitadas. Como consecuencia, se busca que todos los diseños adquieran esta condición.
- Morado. El *sketch* presenta restricciones redundantes que pueden y deben ser eliminadas. Se produce por ejemplo en el caso de acotar las diferentes alturas de un edificio además de la total.
- Rojo. Las diferentes cotas del dibujo son incoherentes, dando lugar a una Figura imposible de dibujarse. No es posible indicar relación de paralelismo con dos ejes perpendiculares, por ejemplo.
- Amarillo. En este caso, los elementos son sólidos porque responden a proyecciones de sólidos ya diseñados en el plano del *sketch*, por lo que están perfectamente caracterizados y no necesitan de cotas adicionales. Pueden emplearse como puntos de referencia para el resto de los elementos que se incluyan en el diseño. Como consecuencia, la herramienta que permite realizar dichas proyecciones, llamada *PROJECT 3D ELEMENTS*, resulta de gran utilidad en prácticamente cualquier caso de diseño. Sin embargo, esta funcionalidad presenta un grave problema, que se pone de manifiesto al realizar correcciones en una operación previa al empleo de esta herramienta. La consecuencia es la necesidad inmediata de cambiar el *sketch* en el que se encuentra la proyección, en el caso de que su referencia haya cambiado.

Para crear en cualquier caso sketches que se sean consistentes, el programa dispone de una herramienta de ayuda, pues en muchos casos no es sencillo conocer dónde se ha cometido el error en las restricciones. Además esto no afecta únicamente a las restricciones, sino también a la posibilidad de crear sólidos a partir de los mismos. De esta manera, es posible conocer si el *sketch* creado no constituye un polígono o curva cerrada, a lo que se une la posibilidad de ver los puntos en los que se encuentra el problema. La herramienta en cuestión es accesible por medio de *Tools > Sketch Analysis*, y constituye un proceso a realizar prácticamente de forma obligada después de terminar un *sketch*.

Para diseñar es fundamental emplear herramientas que sitúen los diferentes elementos en los *sketch*, para conseguir que se encuentren perfectamente delimitados. Para ello, existen dos muy importantes y básicas pertenecientes a la misma barra de herramientas. Estas son *CONSTRAINT* y *CONSTRAINT IN A DIALOG BOX*, y permiten acotar dimensiones de cualquier carácter, tanto de un elemento como de dos y tres. El cuadro de la última de ellas, representado en la Figura 110, muestra las relaciones que pueden establecerse entre diferentes elementos, no reduciéndose por tanto únicamente a dimensiones.

Además de estas herramientas, CATIA ofrece la posibilidad de realizar restricciones automáticas al crear un elemento geométrico. Esta funcionalidad, conocida con *SMARTPICK*, permite por ejemplo aplicar condiciones de coincidencia, paralelismo o tangencia sin necesidad de recurrir a las herramientas anteriormente mencionadas.

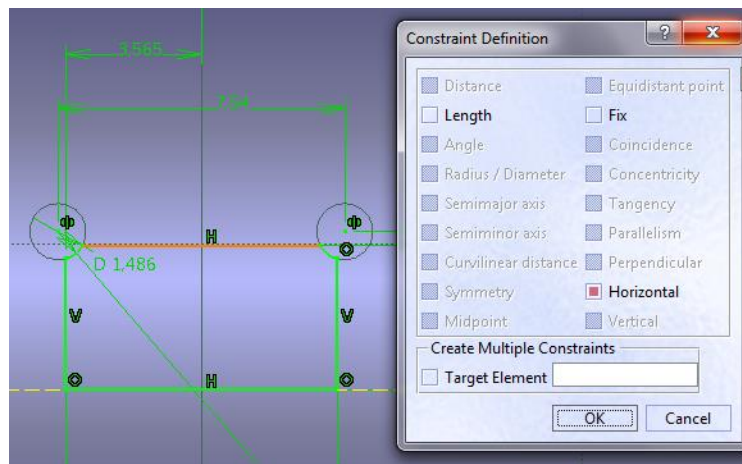


Figura 110: Cuadro para añadir restricciones

Otras herramientas frecuentemente empleadas son: *RECTANGLE*, *MIRROR*, para poder copiar elementos simétricamente respecto de otro; *CORNER*, para radios de acuerdo; o *QUICK TRIM*, que permite borrar líneas que no interesen al diseño.

Por otro lado, las herramientas principales que permiten transformar un sketch en un sólido, son *PAD* (Figura 112), que proyecta el dibujo del sketch y le aporta profundidad, y *SHAFT* (Figura 113), que permite obtener sólidos por revolución de un sketch alrededor de un eje. Además, suele ser necesario realizar operaciones para restar material a dichos sólidos, para lo cual se emplea la herramienta *POCKET* (Figura 114). Otras operaciones del mismo carácter se muestran en barra de herramientas de la Figura 111, en la cual hay una que también merece ser destacada. La herramienta en cuestión, *MULTI-SECTIONS SOLID* (115), permite crear sólidos a partir de distintos *sketch* en diferentes planos, por lo que resulta muy útil para definir, mediante una única operación, piezas que dispongan a lo largo de su longitud, de una sección variable.



Figura 111: Herramientas para transformar un sketch

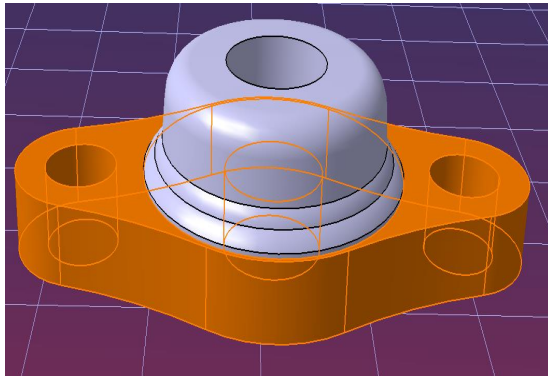


Figura 112: Ejemplo PAD

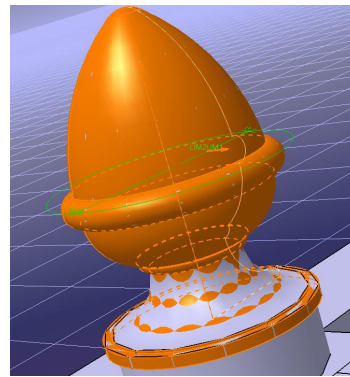


Figura 113: Ejemplo SHAFT

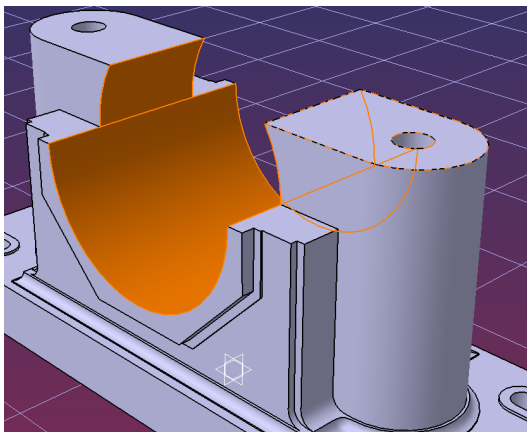


Figura 114: Ejemplo POCKET

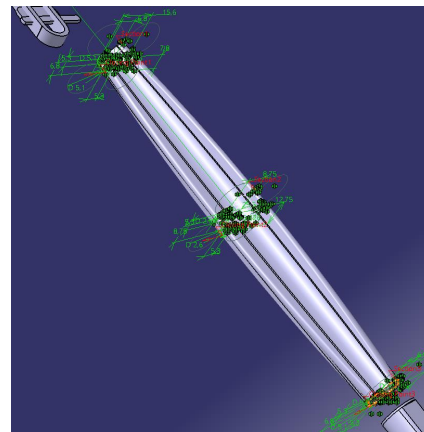


Figura 115: Ejemplo MULTISECTION

Estas operaciones, y en general cualquier otra, demandan una serie de parámetros de entrada sin los cuales no pueden hacerse efectivas. Para ello, al seleccionarlas despliegan un cuadro con las diferentes especificaciones que es posible asignarlas (Figura 116). Esto algo que es necesario para las herramientas de los diferentes módulos, y permite además previsualizar el resultado de la operación.

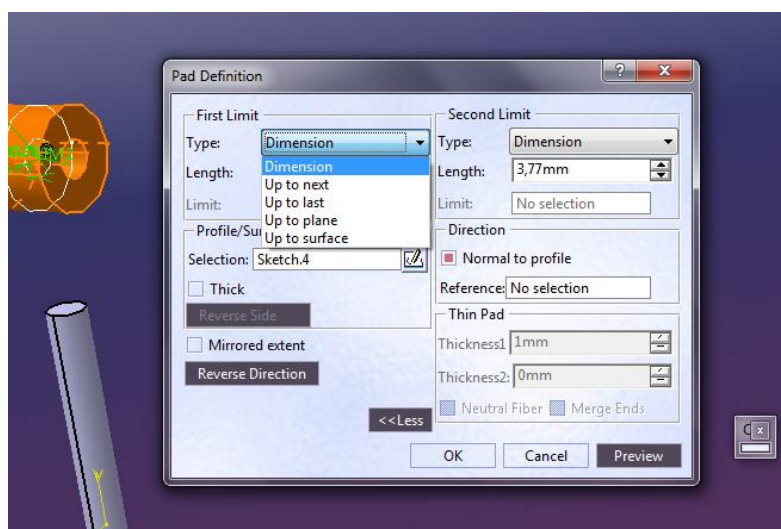


Figura 116: Cuadro de parámetros de una operación

No se va a entrar en el cuadro de cada una de las herramientas porque, además de que no entra en lo que se pretende explicar, suelen ser autoexplicativos. Por poner un ejemplo, en el caso de *PAD* y de la Figura 116, es posible extender la proyección del sketch una dimensión determinada (*dimension*), hasta un plano (*up to plane*), hasta una superficie (*up to surface*)

Otras herramientas que se emplean, con cierta frecuencia, fuera del entorno de *sketch*, pero dentro aún de *PART DESIGN*, son *MIRROR*, con la misma funcionalidad que en *sketch* pero para sólidos; *PATTERN*, para crear sólidos que sigan un patrón determinado (de posición); *PLANE*, ya explicado; *EDGE FILLET*, que al igual que en *sketch*, construye radios de acuerdo; o *THREAD/TAP*, empleado para la creación de elementos roscados, tanto tornillos como agujeros roscados. Respecto a esta último, en este programa no es posible visualizar el resultado de aplicar roscas a los elementos, por lo que se verán como cilindros y agujeros lisos, respectivamente.

Con las herramientas mencionadas es posible realizar gran parte del trabajo de diseño de las piezas, si bien es verdad que cada pieza es un mundo y puede ser que requieran de operaciones diferentes. El resultado del diseño de la pieza de ejemplo se muestra a continuación (Figura 117). La barra en cuestión se corresponde con la tipología que predomina en la Máquina, puesto que tanto la barra encontrada al lado de esta misma, como la mayoría de las que componen el paralelogramo, presentan una disposición realmente similar.



Figura 117: Diseño pieza ejemplo

4.5 MÓDULO ASSEMBLY DESIGN

Una vez explicado en líneas generales el diseño de las piezas en el módulo *PART DESIGN*, y tras compartir algunos resultados del mismo, el siguiente paso en el proyecto fue proceder al ensamblaje de las mismas. En realidad, esta podría haberse tratado de una actividad desarrollada en paralelo con el diseño individual de las piezas, pero se optó por hacerlo prácticamente de forma secuencial debido a la necesidad de emplear otro módulo, con otras herramientas y particularidades que difieren del anterior.

Además, es en el ensamblaje dónde se manifiestan todos los problemas debidos a incertidumbres que se comentaban en el apartado anterior. Por lo tanto, al juntar determinadas piezas surgió con relativa frecuencia la necesidad de corregir el diseño de una de ellas para que su ensamblaje pudiera llevarse a cabo. Afortunadamente, y como se explicará en mayor detalle, este módulo ofrece la posibilidad de realizar esta corrección *in situ*, es decir, en el propio entorno del módulo.

De este modo, el módulo necesario para acometer esta fase del proyecto es *ASSEMBLY DESIGN*. Su empleo está extendido por su utilidad y su facilidad de uso, permitiendo el trabajo simultáneo con numerosas piezas.

Por otro lado, los archivos que se generan en *ASSEMBLY DESIGN*, difieren en lo que a su extensión se refiere, siendo este caso *CATProduct*. Esto tiene una serie de implicaciones respecto a la información que se guarda en ellos respecto a los *CATPart*, pues en estos, todas las relaciones que se establecían entre los elementos de dicho diseño, junto con los propios elementos en sí, quedaban recogidas. En contrapartida, en este nuevo tipo de archivos, solo se mantienen las restricciones que se establezcan entre los elementos que lo conformen.

El aspecto anterior condiciona así la estructuración de los diferentes archivos que se vayan generando. Por si aún no había quedado claro, en *ASSEMBLY DESIGN*, en lo que respecta a este proyecto, se ha trabajado con las piezas diseñadas en el módulo *PART DESIGN*, aunque también con otros *product* que se hayan creado en este segundo módulo en otra sesión.

De este modo, lo que se guarda en archivos *CATProduct* son las diferentes relaciones que se hayan establecido entre los elementos, sean *parts* o *products*, mientras que la información referida a la configuración de cada uno de esos elementos individuales se mantiene en sus respectivos archivos individuales. Obviamente, a estos *products* secundarios les sucederá lo mismo con las diferentes piezas que los constituyan.

Como consecuencia de lo anterior, esta configuración de CATIA obliga a disponer los *product* y los archivos que contengan la información de sus elementos, en la misma carpeta. Con esto se debe ser muy cuidadoso, pues de otro modo no se podría trabajar con los archivos *CATProduct*.

Si esto es tan problemático, ¿por qué no juntar las piezas en un mismo archivo? Las razones son varias, y es que resulta mucho más cómodo trabajar con el menor número de elementos posible en la misma sesión. De esta manera, se pueden evitar muchos errores y la facilidad para encontrar o modificar un elemento se incrementa enormemente. Además, para mostrar las diferentes partes de la Máquina con sus respectivos ensamblajes, la solución pasa por realizar estos por separado.

Por lo tanto, para llegar a un conjunto de la Máquina en el que se incluyan todas las piezas diseñadas, el proceso implica jerarquizar las diferentes partes, de tal manera que vayan incluyendo unos ensamblajes dentro de otros. Así, en este apartado se mostrarán las piezas ilustradas en el epígrafe anterior, dispuestas en conjuntos más grandes y cobrando mayor sentido que por sí solas.

Sin embargo, antes de realizar lo anterior, es necesario realizar una explicación, aunque breve, del entorno de trabajo para el presente caso. Este entorno (Figura 118), se diferencia a simple vista con el correspondiente al *PART DESIGN*, por la existencia de barras de herramientas diferentes. Una de ellas, *Product Structure Tools* (Figura 119), que es la que se ha empleado, es la que permite importar un archivo para comenzar a trabajar con él, aunque existen otras opciones, con herramientas de la misma barra, para realizar la misma operación. Para llevar a cabo la operación, es necesario seleccionar en el árbol el lugar al que se quiere importar el archivo, es decir, el *product* en el cual se pretende importar el archivo.

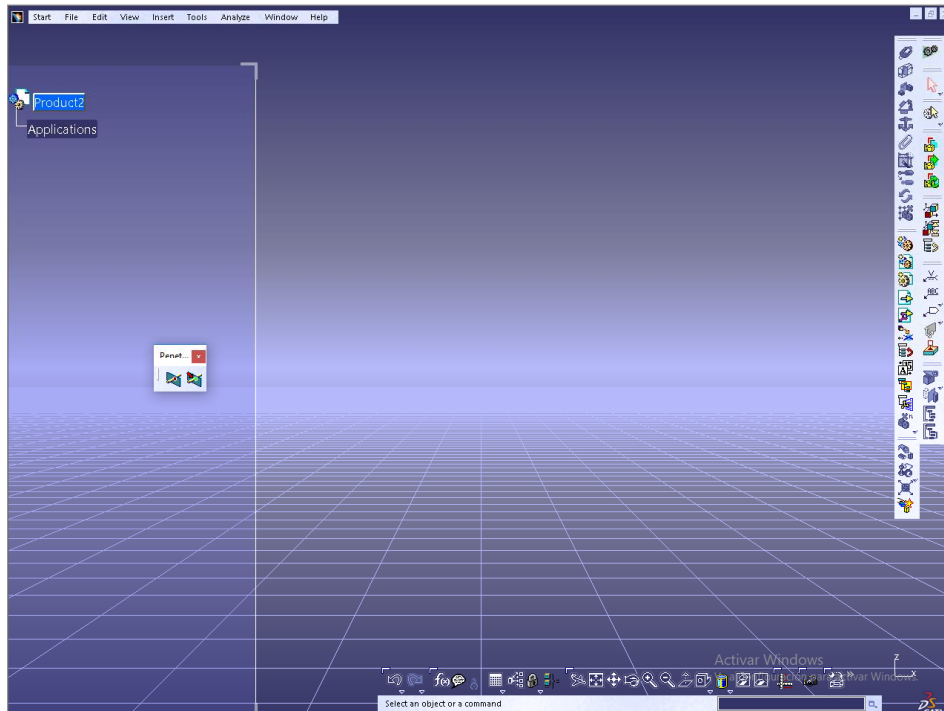


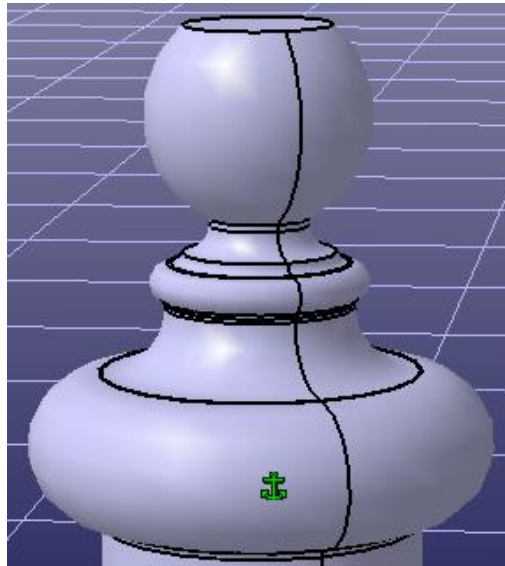
Figura 118: Pantalla ASSEMBLY DESIGN



Figura 119: Barra de herramientas para importar archivos

Una vez se disponen de los archivos necesarios en la sesión, es posible comenzar su ensamblaje. En realidad, esto se puede realizar importando los archivos de uno en uno, evitando así la presencia de otras piezas que puedan molestar y entorpecer las operaciones. Salvo que se disponga de un elevado número de piezas, esto no supone un grave problema.

Por otro lado, a la hora de realizar los conjuntos, es importante saber y establecer cómo se desea que se mueva una pieza. Esto no es otra que los grados de libertad de la misma, y que son muy importantes de cara a conseguir un diseño fiel a la realidad. Para empezar a trabajar con ellos, es prioritario utilizar la herramienta *FIX*, representada por medio de un ancla (Figura 120), que como su propio nombre indica permite fijar una pieza. De este modo, todos los grados de libertad quedan bloqueados, y así es posible situar el resto de las piezas con respecto a la primera.

Figura 120: Ejemplo de empleo de *FIX*

Volviendo a los grados de libertad, es posible comprobar, y de varias maneras además, aquellos que son posibles para una pieza concreta, representados por vectores que representan direcciones y giros en el espacio, y por flechas en el propio entorno que facilitan su visualización. A continuación se incluye cómo acceder a ellos (Figura 121) y cómo están representados (Figura 122). Este acceso es a través del árbol, pinchando (botón derecho) con el ratón sobre el elemento del que se quieran conocer sus grados de libertad. En la Figura 121 puede observarse las pestañas a abrir para llegar ellos, y en ella se puede reparar también en la posibilidad que ofrece de conocer las restricciones a las que está sometida un elemento (*COMPONENTS CONSTRAINTS*).

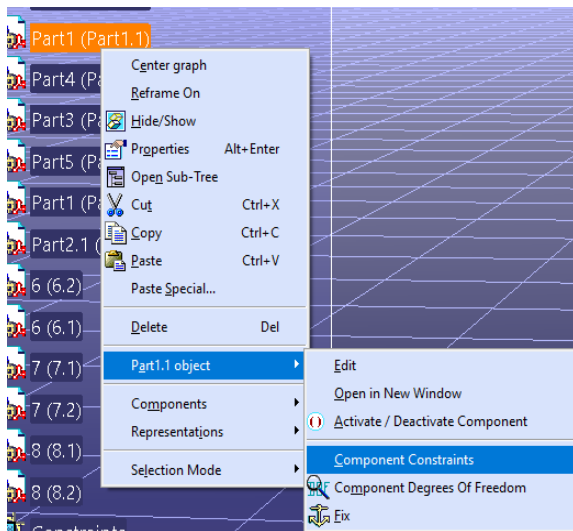


Figura 121: Acceso a grados de libertad

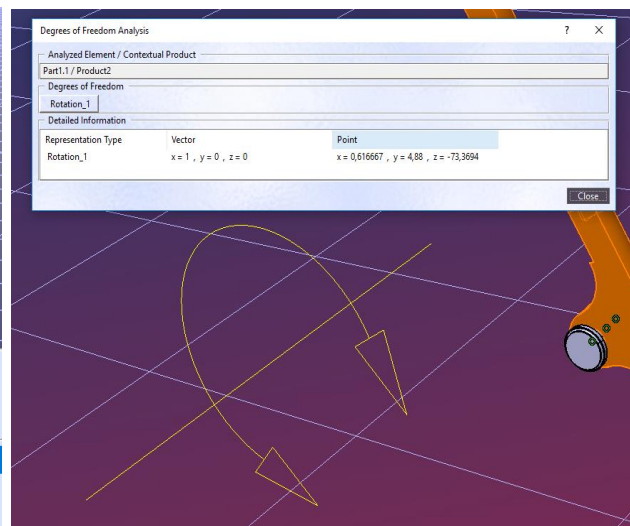


Figura 122: Representación grados de libertad

Por consiguiente, ya se está en disposición de modificar por medio de restricciones estos grados de libertad. Sin embargo, previamente a dicha explicación se requiere una introducción a dos herramientas muy útiles a la hora de crear conjuntos. Por un lado, *COMPASS* (Figura 123), que consiste en un sistema de ejes coordenados, móvil, que permite al situarse sobre una pieza, moverla según las necesidades de cada momento. De este modo es posible realizar traslaciones o giros, según los planos y ejes de la pieza (aquellos empleados en su diseño), de una manera muy sencilla y visual. Si no se asocia a ninguna pieza, permite desplazarse por el entorno conjunto, siguiendo las mismas pautas que en el caso anterior.

Por otro lado, se dispone de la herramienta *MANIPULATE*, de funcionalidad muy similar al anterior. Como se observa en la Figura 124, ofrece la posibilidad de mover una pieza según la dirección, plano o giro que se indique, y además permite tener en cuenta u obviar, las restricciones que la pieza tenga impuesta.

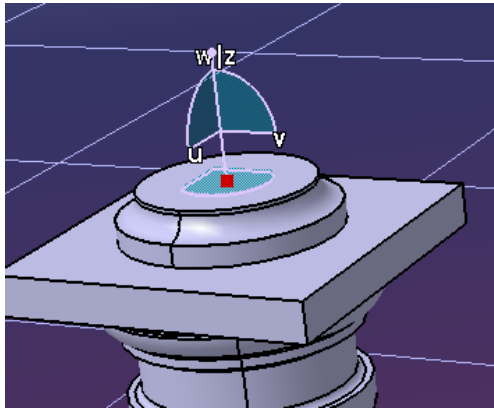


Figura 123: COMPASS



Figura 124: MANIPULATE

Las restricciones o *constraints* que pueden aplicarse sobre una pieza son muy variadas y pueden ser de muchos tipos. Sin embargo, es posible con muy pocas de las herramientas disponibles para ello (Figura 125), conseguir aquello que se busca.

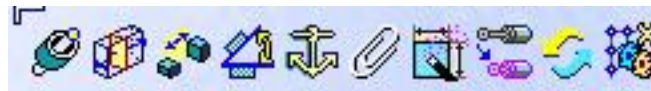


Figura 125: Restricciones posibles

De entre todo el abanico de opciones, las que más se han empleado son dos de ellas: *COINCIDENCE CONSTRAINT* y *OFFSET CONSTRAINT*. La primera de ellas se emplea constantemente y resulta muy versátil, pues su empleo permite ahorrarse muchas restricciones de otro tipo. En este sentido, su funcionalidad da lugar a restricciones tan variadas como hacer coincidir ejes con ejes, superficies con superficies, cara de una pieza con un plano del conjunto. En cuanto a la segunda, permite situar elementos a la distancia especificada.

Con estas pocas herramientas es posible realizar ensamblajes de cierta entidad, consistentes y congruentes con los grados de libertad reales. Además de lo anterior, es una actividad común en *ASSEMBLY DESIGN* realizar diseños de piezas in situ, es decir, que durante el ensamblaje puede requerirse una pieza con unas dimensiones dadas por la colocación del resto de elementos. En estos casos, resulta más sencillo llevar a cabo el diseño, teniendo en cuenta todas las piezas colocadas, que realizarlo en una sesión distinta. Esta posibilidad, a la que se ha recurrido en el proyecto sobre todo para la realización de ciertas uniones, no está exenta de particularidades. Estas guardan relación con lo que se comentó anteriormente sobre los archivos y extensiones de los módulos.

ASSEMBLY DESIGN permite cambiar fácilmente al entorno de *PART DESIGN*, pues basta con hacer doble *click* sobre el elemento importado o creado en la sesión de trabajo para acceder a él. Además, la pieza diseñada ocupará un lugar concreto en el espacio y en el conjunto. Sin embargo, aunque su posición sea la deseada, es necesario aun así definir restricciones para mantenerla en dicha posición, pues la pieza creada es un *CATPart* al fin y al cabo sin relación espacial con el resto de elementos. Como consecuencia, a la hora de guardar el conjunto se deberá salvar primero la pieza creada, que se guardará como un *part*

en el mismo destino que el conjunto que se está creando. Sus restricciones respecto a los demás elementos serán guardados en el *product* correspondiente.

5 RESULTADOS

5.1 DISEÑO DE PIEZAS

A continuación, se va mostrar el resultado del diseño de algunas de las piezas que concentran mayor interés, o bien por su complejidad o bien por su impacto visual. No tendría mucho sentido incluir cada una de ellas, ya que son muy numerosas, y además hay muchas de ellas que se repiten a lo largo de la Máquina, como pueden ser tuercas o tornillos. El objetivo principal es poder disponer de una imagen que permita realizar la comparación con los elementos presentes en la Máquina.

Por otro lado, la visualización en este apartado será la que CATIA presenta por defecto, salvo por el hecho de cambiar el fondo para apreciar mejor los diseño. Además, en este proyecto no tendría mucho sentido aplicar un material a las piezas (herramienta *APPLY MATERIAL*), puesto que no se va a incluir simulación del comportamiento y respuesta de las mismas ante los esfuerzos a los que estuvieran sometidas.

En este apartado se van a mostrar las piezas por sí solas y no formando parte de conjuntos y ensamblajes, pues eso será objeto del siguiente epígrafe. Junto a lo anterior, tampoco se van a nombrar cada una de las piezas con etiquetas diferentes, lo que podría suponer una fuente de confusión importante. En lugar de lo anterior, se enmarcan dentro de lo que correspondería a su ensamblaje, es decir, a la parte principal de la Máquina a la cual pertenecen.

Por último, en alguna de ellas se incluirán comentarios que recogen dificultades o particularidades que estén relacionadas con las piezas en cuestión, tanto a la hora de su medición, como a la hora de su diseño. Además, se tratará de mostrar el nivel de detalle conseguido, que como se ha mencionado, forma parte de los objetivos del proyecto. De este modo, a continuación se incluyen las piezas seleccionadas:

- **Regulador:** Constituye una de las partes más accesibles y de mayor facilidad para ser medida, al menos en lo que se refiere a la parte visible. En cuanto a la parte correspondiente al interior de la Máquina, la complejidad en la medida y diseño depende del elemento concreto del mismo. Así, los elementos en la parte inferior del regulador no tienen mayor problema para ser representados, mientras que los que se corresponden con la conexión entre este y el árbol suponen una dificultad elevada. Tanto el engranaje cónico como el sistema de ranuras a las que iban acopladas las correas, y el sistema de conexión entre estos últimos, son difícilmente accesibles, por lo que el diseño será cuanto menos aproximado.
Por otro lado, en esta parte conviene recordar que la antigüedad de la Máquina dificultó enormemente la distinción entre unas partes y otras del mismo. De esta manera, que es posible que exista alguna desviación con la realidad.
En lo que concierne al regulador, se muestran las barras con los pesos centrífugos (Figura 126), y el sistema de acople de correas (127).

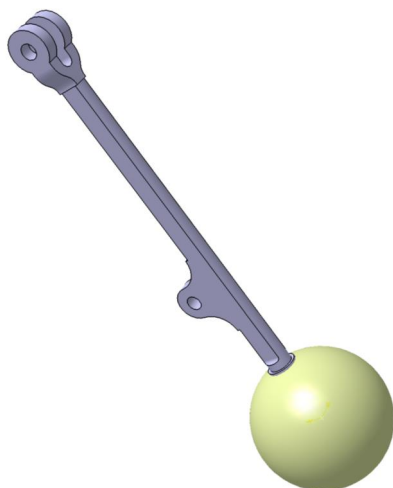


Figura 126: Barras con pesos centrífugos

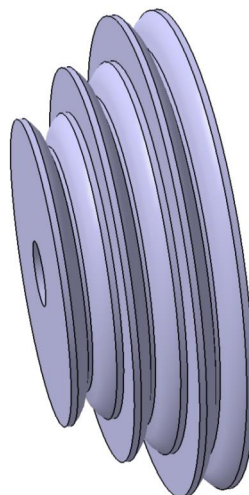


Figura 127: Ranuras para correa

- Cilindro. Representa una de las partes más complejas de la Máquina para su diseño. Por un lado, su medida no es sencilla por la irregularidad de su superficie, que impide obtener un diámetro con total precisión. Por otro lado, el cilindro presenta otras piezas acopladas al mismo y cuya unión con el mismo no es visible. A lo anterior se une el hecho de presentar elementos intrínsecamente complejos que se combinan con la dificultad para apreciarlos con claridad debido a la pintura de la pieza.

Como se ha comentado anteriormente, tampoco es visible su interior, por lo que todo lo que se diseñe en este aspecto será una mera hipótesis que desde luego no tiene por qué ser la real. Además, en este apartado, se va a incidir únicamente sobre el cilindro, por lo que otras partes, como puede ser la distribución, se mostrarán aparte. Sin embargo, tanto la tapa del cilindro, como los instrumentos que la misma tiene acopladas sí que se van a mostrar aquí. El motivo es que su funcionalidad es directamente relacionada con el propio cilindro. También la caja distribuidora irá junto al cilindro, aunque sin ningún tipo de elemento de la distribución añadida, puesto que estas dos partes se pueden considerar como un único sólido.

De esta manera, a continuación se muestra el cilindro desde dos ángulos diferentes (Figura 130 y 131), para poder apreciarlo en mayor detalle, y la tapa del cilindro y los instrumentos (Figura 132 y 133). Estos últimos, para no incurrir en un número excesivo de imágenes, se muestran ya ensamblados. Otro motivo es el hecho de que los propios instrumentos constan de varias partes en sí mismos, por lo que, ya que para mostrarlos sería necesario recurrir a su ensamblaje, se aprovecha esta situación para incluirlos junto con la tapa del cilindro. Además, a esto se une el hecho de que incluir piezas de los mismos, de pequeño tamaño, no supondría una ayuda a la comprensión y a la visualización de la Máquina real. Por último en la figura 134, se incluye la tapa de la caja distribuidora.

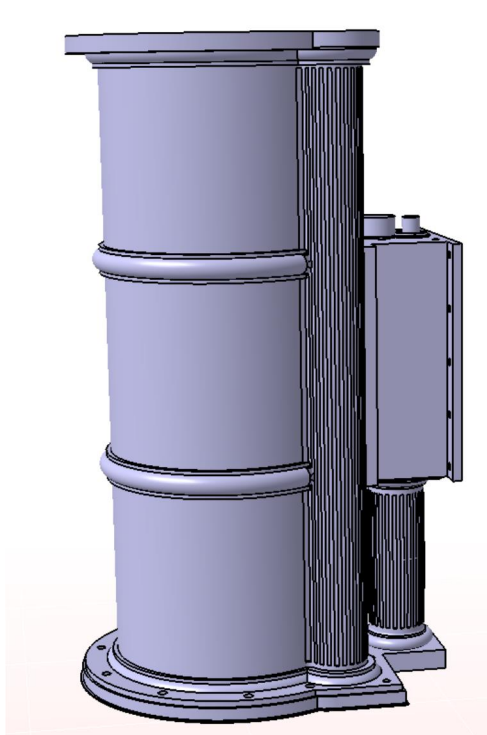


Figura 128: Diseño cilindro (1)

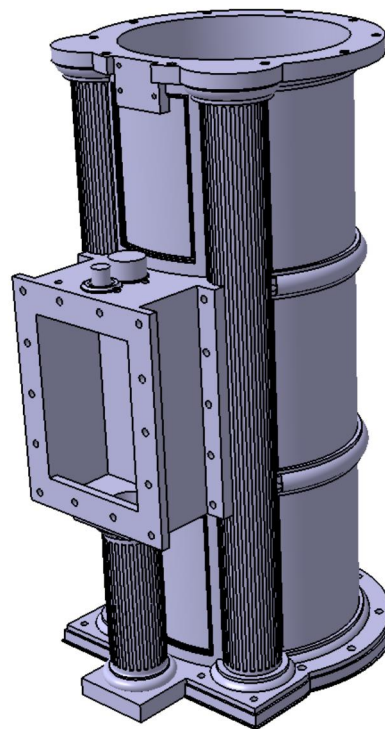


Figura 129: Diseño cilindro (2)

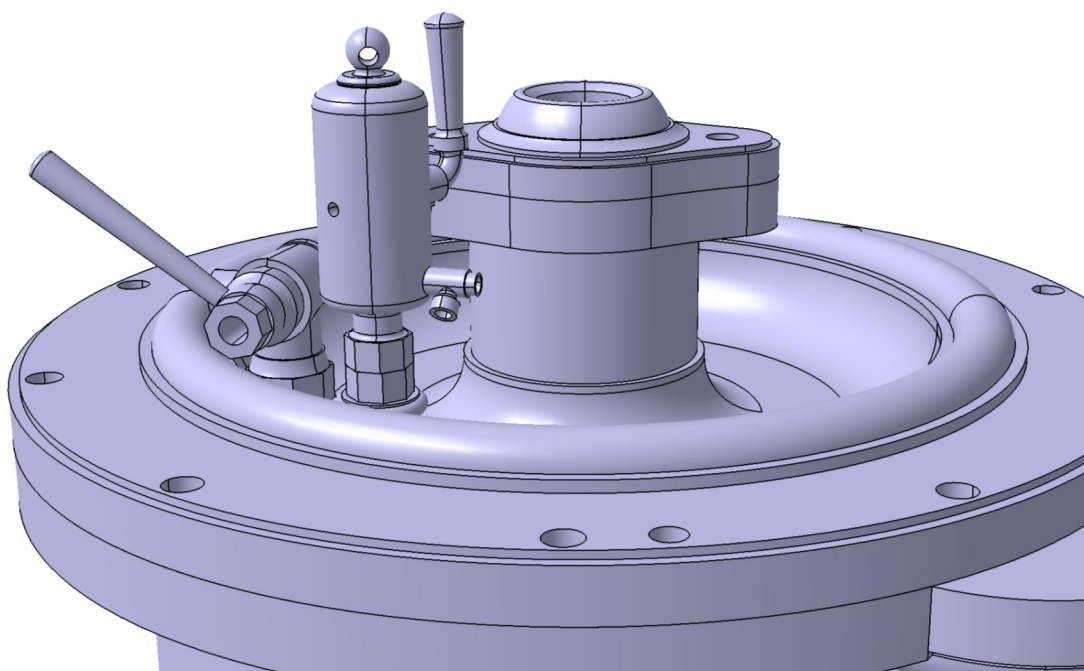


Figura 130: Instrumentos cilindro (1)

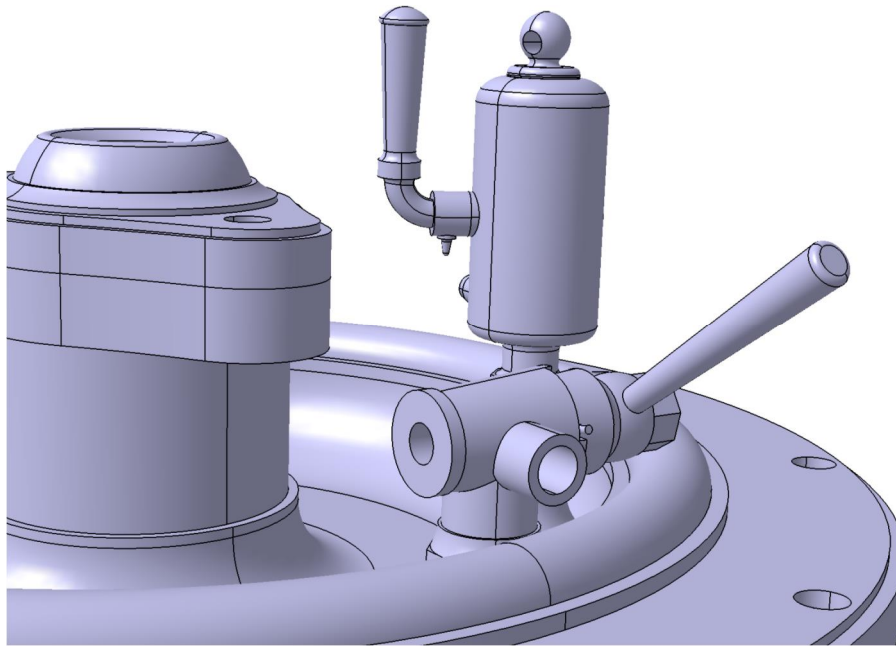


Figura 131: Instrumentos cilindro (2)

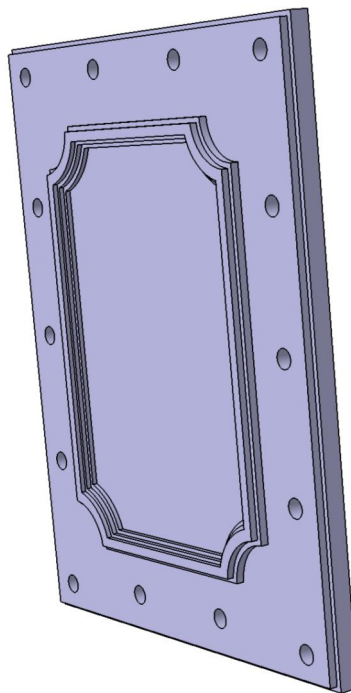


Figura 132: Tapa caja distribuidora

- Base de la Máquina. Se entiende como base aquello sobre lo que se apoya la Máquina. Sin embargo, no se hace referencia con ello al cemento que da forma a los habitáculos interiores de la Máquina y que constituye la verdadera sustentación de la misma. De esta manera, se ha denominado base a la parte de la Máquina en contacto directo con la plataforma que actualmente se observa en la Sala de la Máquina, y que por tanto es visible.
Sobre esta parte no hay mucho que comentar. Simplemente se podría destacar que no es simétrica, pues presenta un extremo recto y el opuesto de forma semicilíndrica. No se ha incluido en el diseño ni la placa informativa ni las letras grabadas, ambas mostradas previamente. Por otro lado, debido al mecanismo biela-manivela, en dicha parte la base incorpora la mitad de un cojinete para acoger el árbol de la Máquina.

En cuanto a las medidas, a pesar de las muchas que requiere, se puede afirmar que son altamente precisas, al menos las que respectan a la parte visible. Esto es importante, porque tratándose de una parte fija de la Máquina, permite en muchos casos servir como referencia a otros elementos.

Respecto a su diseño, las operaciones para llevarlo a cabo no son muy complejas, pero el proceso del mismo podría tildarse de tedioso, debido a la disposición de la base. Un ejemplo de ello, se incluye a en la Figura 135:

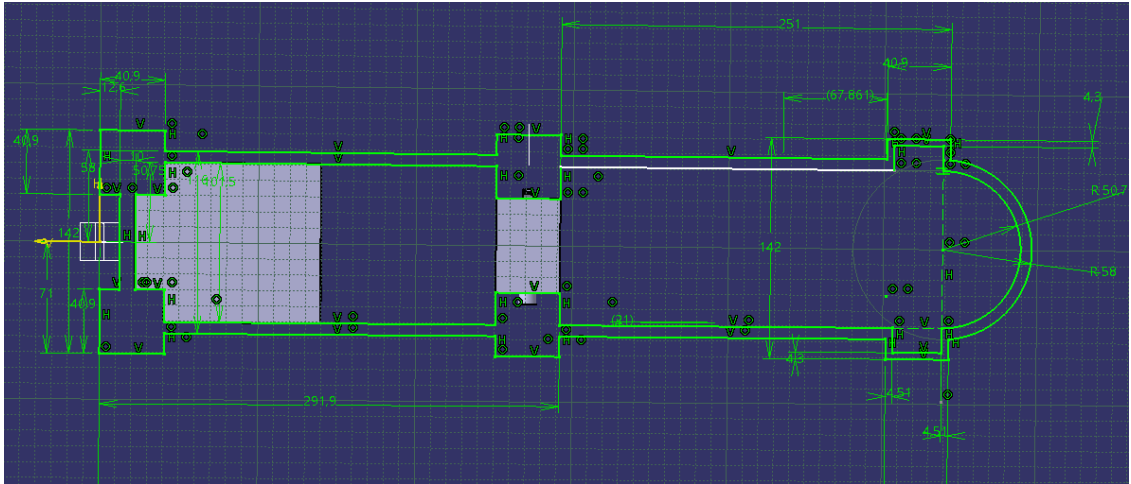


Figura 133: Proceso de creación de la base

A continuación se incluye el diseño de la base también desde varios ángulos (Figuras 136 a 139), para poder apreciar los detalles comentados anteriormente.

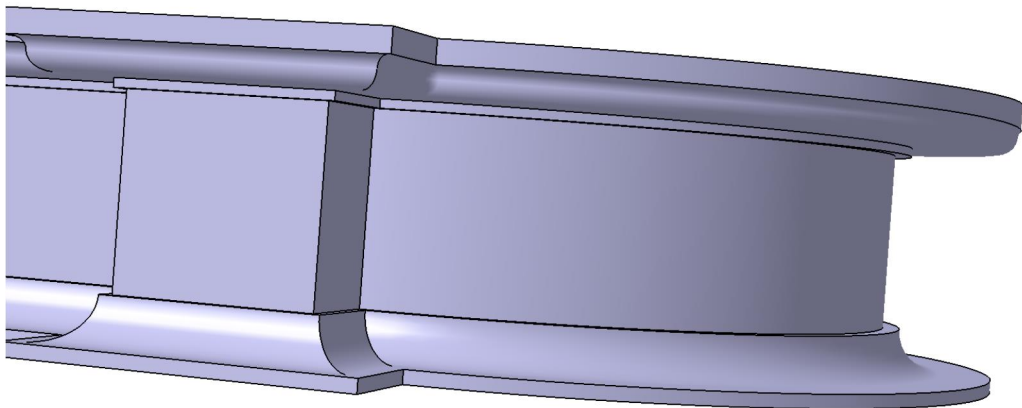


Figura 134: Diseño de la base (1)

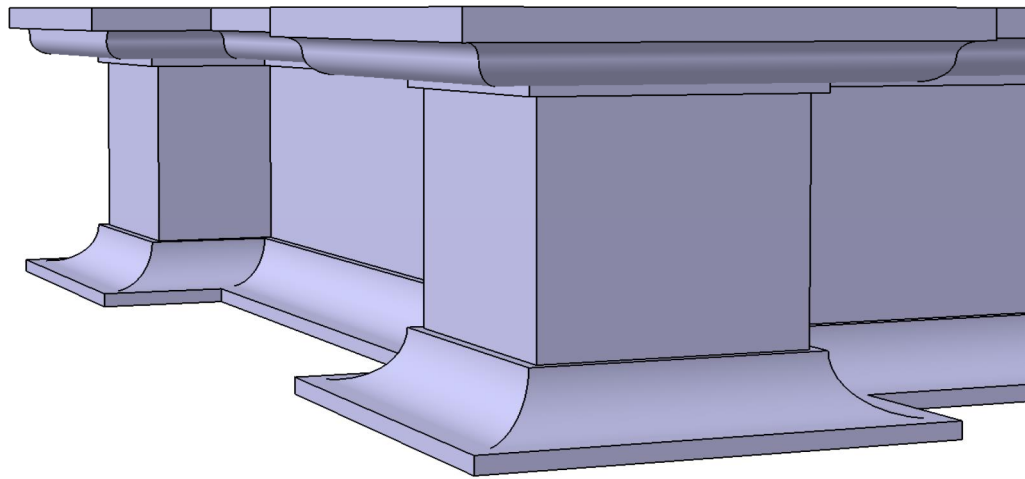


Figura 135: Diseño de la base (2)

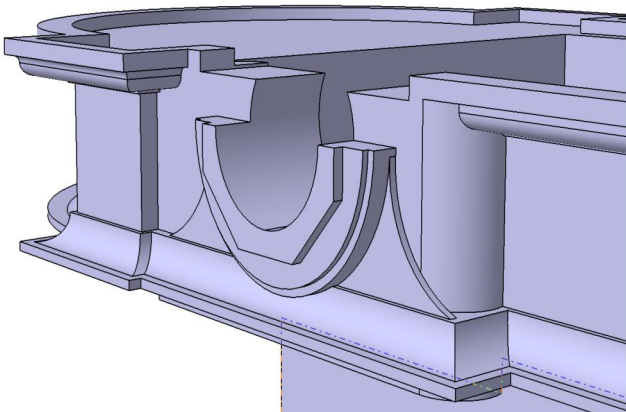


Figura 136: Diseño de la base (3)

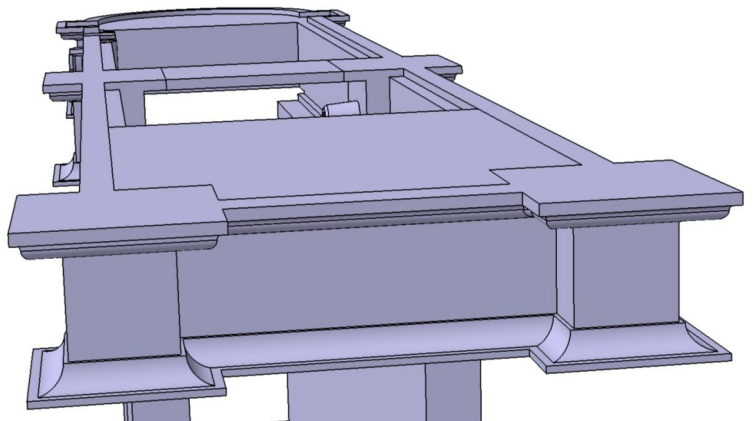


Figura 137: Diseño de la base (4)

- Cornisa. Si previamente se ha hablado de la base como la parte inferior de la Máquina que es visible, la cornisa se corresponde con la parte superior de la misma. Como la anterior, es fija, pero a diferencia de la anterior sí que se trata de una pieza simétrica. La función de la cornisa, apoyada en las seis columnas de la Máquina, es servir de sustento al balancín, por medio de un eje, en el centro de este último, y de dos cojinetes de considerable tamaño, cuyo asiento se puede observar en el diseño de la cornisa.

Esta pieza, mejor dicho, conjunto de piezas, constituyó un verdadero desafío. Se habla de conjunto porque sí que es posible observar la presencia de uniones entre diferentes piezas. Sin embargo, aquí se muestra como un único sólido, aunque en el diseño sí que se ha tenido en cuenta, en la medida de lo posible, esta situación.

Las dificultades que acompañan al diseño de la cornisa, además de las inherentes al propio diseño, que no son pocas, se refieren especialmente a la medida de las múltiples y variadas dimensiones que requería una pieza como esta. No solo su elevación afectaba a la toma de datos, sino que también a la propia observación, tanto a simple vista como por medio de fotografías. Por lo menos, se disponía de la ventaja

de haber diseñado previamente la base de la Máquina, y con un poco de observación es posible detectar un parecido importante en ciertas partes. Además, la posibilidad que ofrece la Sala de la Máquina de ser contemplada desde un piso superior (da Rotonda), permitió observar la misma desde un punto de vista diferente que ayudó en el diseño de la pieza.

Es precisamente desde aquel lugar, desde el cual es posible observar uno de los ejemplos más claros de la finalidad decorativa que presenta la Máquina. Se trata de una especie de pivote de forma ovalada que no presenta finalidad alguna. Este elemento, del cual se encuentran cuatro en la Máquina, uno en cada esquina de la cornisa, se ha representado en su estado ideal, puesto que, en la actualidad, más de uno de ellos muestra signos claros de deterioro.

A pesar de las dificultades, el resultado del diseño de esta parte se ha considerado como positivo, pues la geometría y el detalle están plasmados adecuadamente en el modelo. En cuanto a la validez de las dimensiones, en líneas generales y gracias al ejemplo de la base, se adaptan de manera fidedigna a la realidad. Esto sobretodo es cierto para las dimensiones que no incluyen alturas, puesto que las medidas en este sentido no fue posible llevarlas a cabo. Junto a lo anterior, quizás la parte del diseño más imprecisa sea la correspondiente a la vigueta central, perpendicular al plano longitudinal de la Máquina. Esto se debe a la curvatura que presenta en su parte superior y a la dificultad de observación de sus extremos.

Dicha curvatura responde a la necesidad de permitir el movimiento oscilatorio del balancín. Una vez diseñado el balancín, fue necesario comprobar si los parámetros que rigen dicha curvatura son los adecuados. En este sentido, no hay una medida mejor que otra, es decir, el balancín, como se verá posteriormente, tampoco se puede medir, por lo que el diseño tendrá que mantener la coherencia, antes que ceñirse a una realidad que no es posible plasmar perfectamente.

De esta manera, a continuación se incluyen diferentes imágenes que responden a los aspectos comentados anteriormente, mostrando así la cornisa al completo (Figura 140), los pivotes (Figura 141), el asiento de los cojinetes (Figura 142) y la vigueta central (Figura 143).

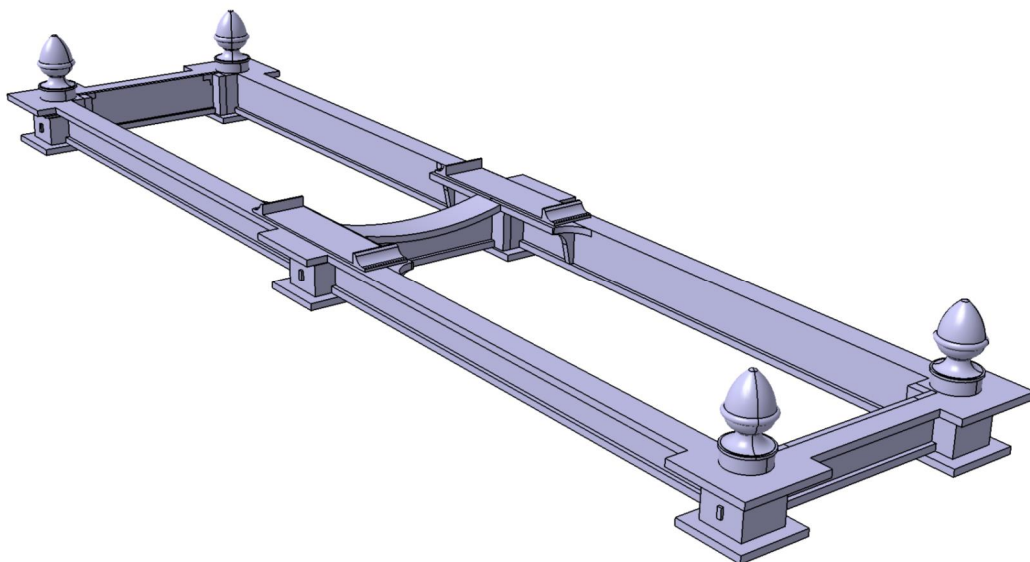


Figura 138: Diseño cornisa

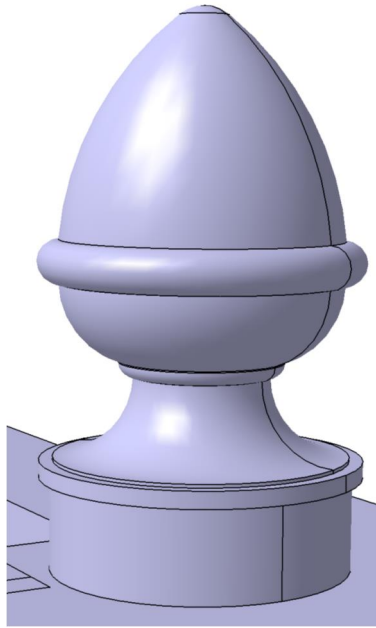


Figura 139: Pivote

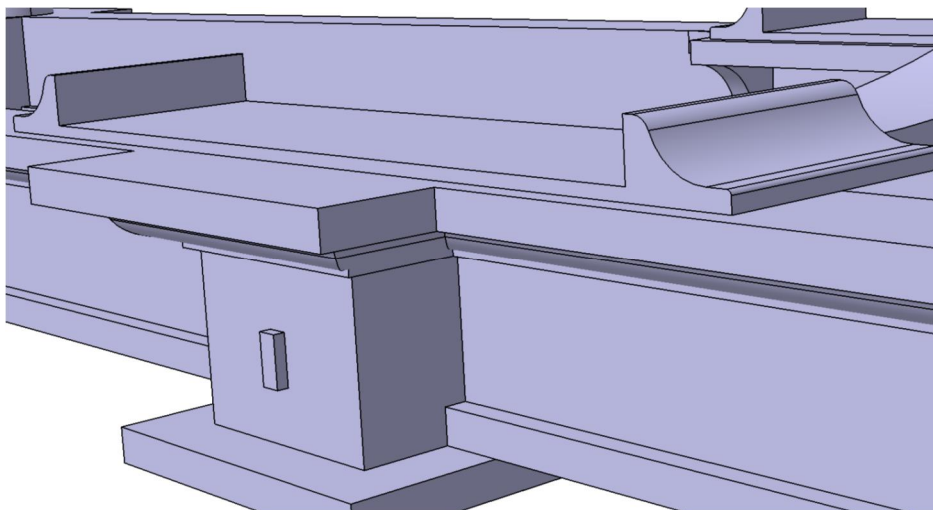


Figura 140: Asiento cojinete

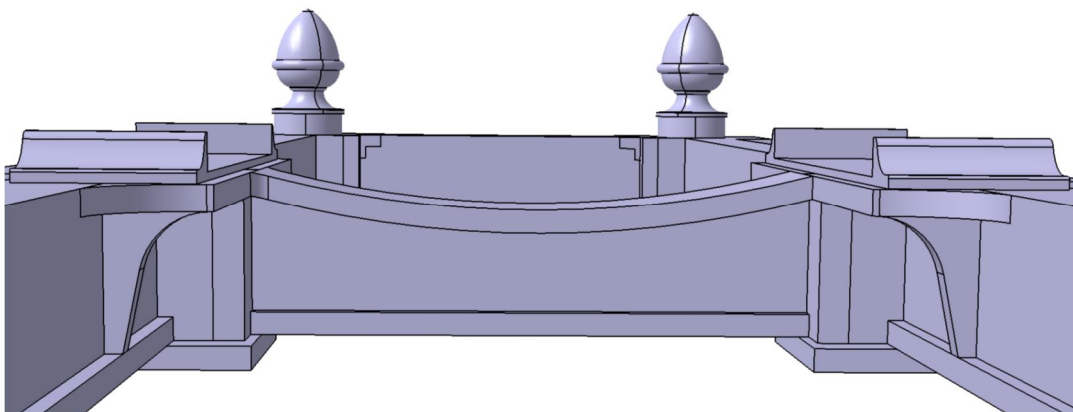


Figura 141: Vigueta central

- **Balancín.** Al igual que sucedía con la cornisa, el balancín no es medible con los medios de los que se dispuso para el proyecto. Sin embargo, se diferencia con la anterior en que este último no tiene otra parte con la que compararse. No tiene referencia alguna para su diseño. Además, existe una dificultad que se añade a las ya comentadas, y es el hecho de la criticidad de las dimensiones del balancín. En el caso de la cornisa, que el pivote decorativo o la anchura de sus vigas fuesen sensiblemente diferentes a sus correspondientes diseños, aunque afectaba al objetivo del detalle del proyecto, no afectaba para nada al posible ensamblaje o movimiento de la Máquina. Por lo tanto, la dimensión crítica del balancín es su longitud, y más concretamente la distancia entre los ejes de los extremos a los que se conectan, la biela en uno, y el paralelogramo en el opuesto. También es importante la separación del otro eje que sujeta al paralelogramo de Watt, pues condiciona el funcionamiento de este elemento. En menor medida, en realidad con relevancia nula para el modelo de la Máquina, debe conocerse la distancia con el otro eje que va sujeto al balancín. Este sirve de sujeción para la barra colgante que carecía de conexión en su extremo inferior. Para el diseño, se ha supuesto que los ejes se disponen de manera simétrica con respecto al centro del balancín. De este modo, es posible comprender la importancia del balancín como pieza clave en el desempeño de la máquina. A esto se une también la compleja forma que presenta, con una curvatura de la cual no es posible tomar medida alguna, además de los múltiples detalles que ostenta. De esta manera el balancín constituye una de las piezas más importantes, y al mismo tiempo, es una de las que aglutina mayor incertidumbre. Por otro lado, existe un condicionante más que afecta al desempeño, y en este caso a la posición del balancín. ¿A qué altura se sitúa el balancín? Para determinarla, hay que observar cual es el punto de conexión del mismo con la estructura de la Máquina. De la observación resulta que esta pieza se sustenta gracias a un eje en su centro, acoplado en sus extremos a sendos cojinetes anclados en la cornisa de la Máquina. Cojinetes que tampoco es posible medir, y cuya mayor información se ha obtenido a partir de la observación a varios metros de distancia. Como consecuencia, no solo las dimensiones del balancín se ven comprometidas, sino que también su posición, en lo que a la altura se refiere, no está exenta de errores. De este modo, es fácilmente darse cuenta de la pésima combinación de importancia en el funcionamiento, con incertidumbre en su diseño, que presenta el balancín. Esto provocó que el balancín tuviera que ser rediseñado mediante un proceso iterativo con el que se pretendía ir satisfaciendo cada una de las restricciones que le imponían cada una de sus conexiones. Por último, del balancín es necesario destacar también su belleza, basada en la multitud de detalles que posee, los cuales sí que es posible decir que se han plasmado de forma correcta en el diseño. A diferencia de piezas previas, en este caso el balancín se erige como un único cuerpo, sin piezas adicionales, lo que contribuye a destacar aún más el trabajo de metalurgia realizado hace casi dos siglos. A continuación como en el caso de piezas anteriores, se incluyen varias perspectivas del mismo (Figuras 144 a 147) para transmitir diferentes aspectos que se han conseguido plasmar en su diseño.

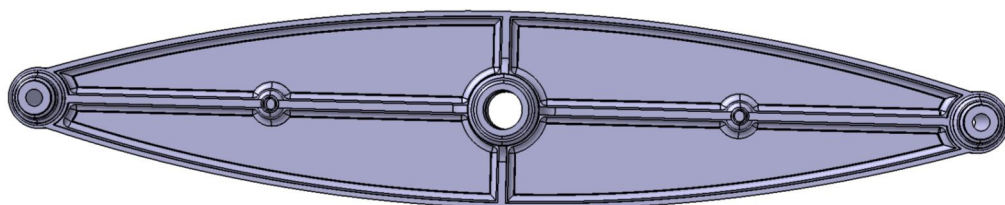


Figura 142: Diseño del balancín (1)

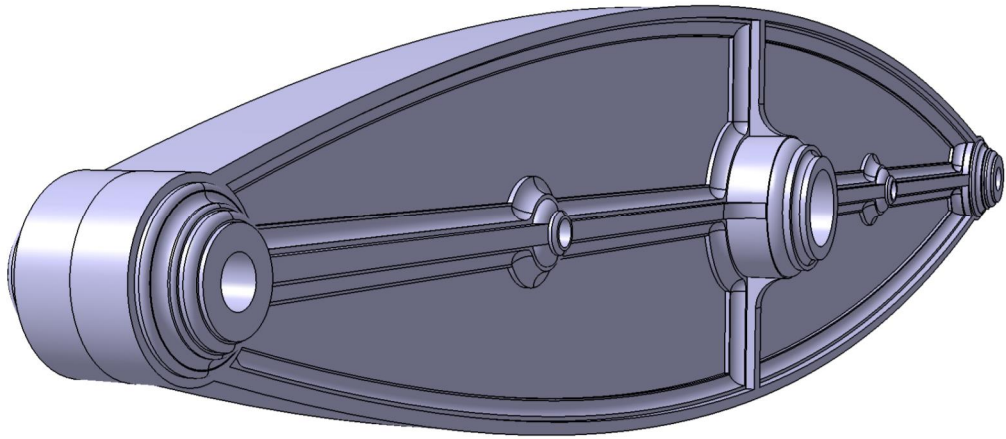


Figura 143: Diseño del balancín (2)

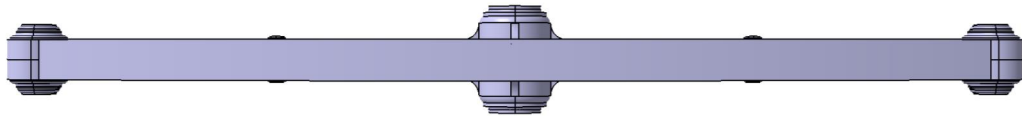


Figura 144: Diseño del balancín (3)

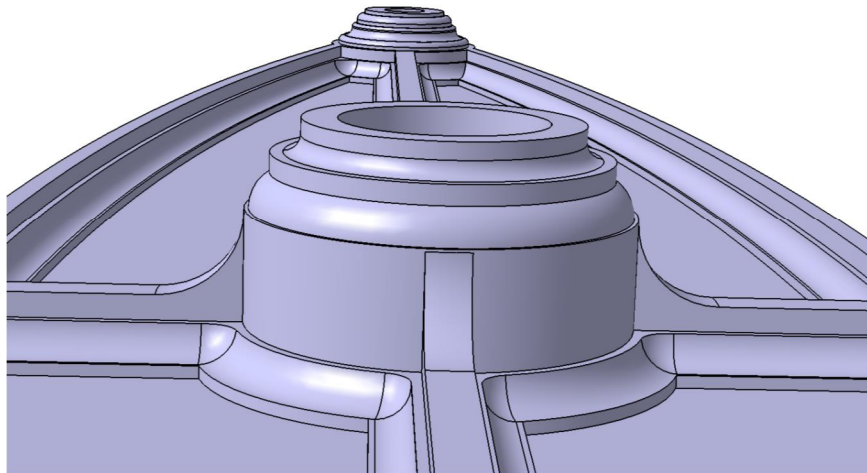


Figura 145: Diseño del balancín (4)

- Paralelogramo de Watt. En este caso, como se trata de una estructura de por sí compuesta por varias piezas, se va a incluir, además de algún componente como ejemplo, el ensamblaje completo. Como se mencionó anteriormente, algunas de las barras que lo componen tienen una forma muy similar a aquella que se puso de ejemplo en páginas previas. Como consecuencia, únicamente se van a mostrar aquellas de una tipología diferente. Además, debido a las elevadas inercias y esfuerzos que se llegan a generar en el funcionamiento de un artefacto como la Máquina, el paralelogramo presenta una estructura doble, es decir, que cada uno de sus elementos del mismo está duplicado, de tal manera que a cada lado del balancín se encuentra una estructura de las mismas características. Estas disposiciones, paralelas por supuesto, trabajan al mismo tiempo y del mismo modo por medio de puntos de unión comunes.

Por otro lado, en lo que respecta a las medidas, vuelve a darse el mismo caso que con las piezas anteriores, puesto que la mayoría de los componentes del paralelogramo carece de accesibilidad alguno. De la misma manera que en dichos casos, el desempeño del paralelogramo está supeditado por la posición de sus puntos de apoyo, que dependen principalmente del balancín. Un desempeño que tampoco es fácil de determinar cómo era exactamente, al menos por medio de la observación del propio paralelogramo. Esto se debe a la dificultad de determinar en ocasiones qué piezas se mantienen fijas y cuáles pueden girar relativamente a las demás. Dicha dificultad, debida a las ya mencionadas condiciones de la Máquina, suponen un impedimento importante para deducir el funcionamiento concreto del mismo.

En cuanto a su diseño, este no ha implicado en general una complejidad muy elevada, pues muchos elementos son barras con una forma específica de la que ya se tenía experiencia al diseñar.

El funcionamiento general ya se explicó, y lo cierto es que ejemplos de paralelogramos son ciertamente sencillos de encontrar. Por ello, lo que resta es aplicar las nociones generales a aquello que se tiene en la Máquina. Por lo menos en este caso, al disponer del ejemplar de La Esfera de 1914, es posible, al ampliar la misma (Figura 148) y comparar con la posición actual del paralelogramo (Figura 149), deducir con una base más sólida cómo se movía exactamente dicho mecanismo.

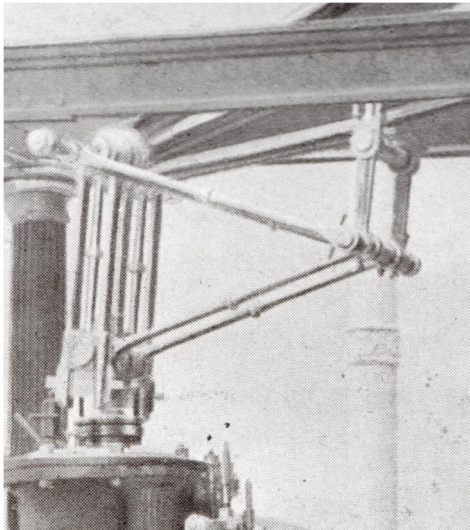


Figura 146: Paralelogramo 1914

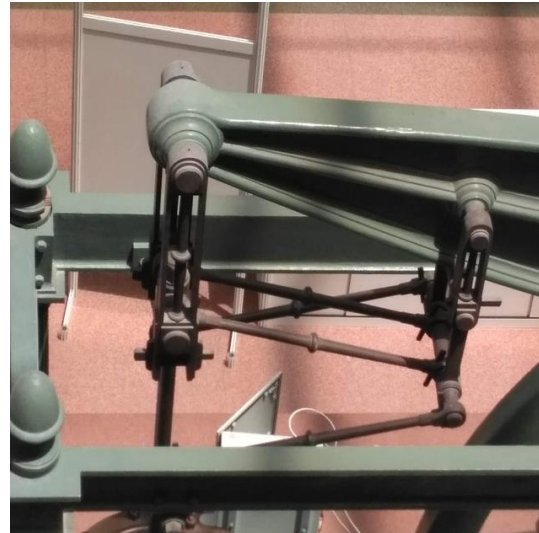


Figura 147: Paralelogramo actual

En cuanto a las piezas que se van mostrar, destacan, por su particularidad dentro de la Máquina, un cojinete atornillado por la parte inferior de la propia cornisa (Figura 150), y unas barras prácticamente verticales, que forman parte de una pieza de mayor tamaño (Figuras 151 y 152), así como la estructura ensamblada (Figura 153).

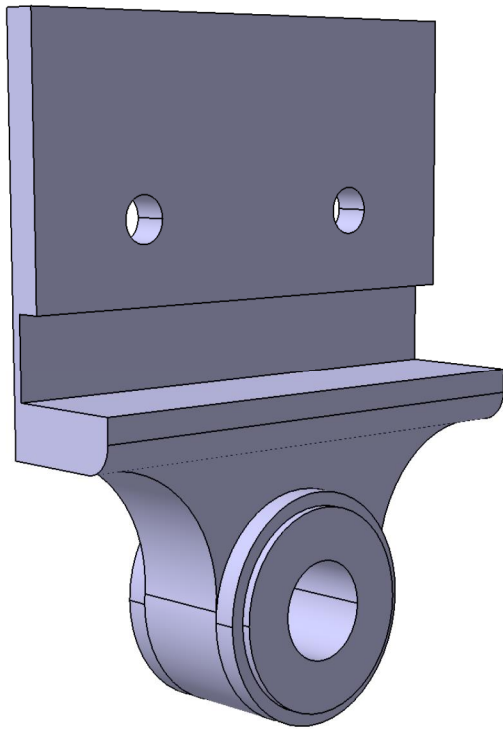


Figura 148: Diseño cojinete

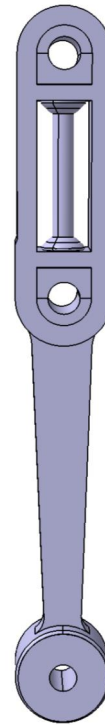


Figura 149: Barra vertical (1)

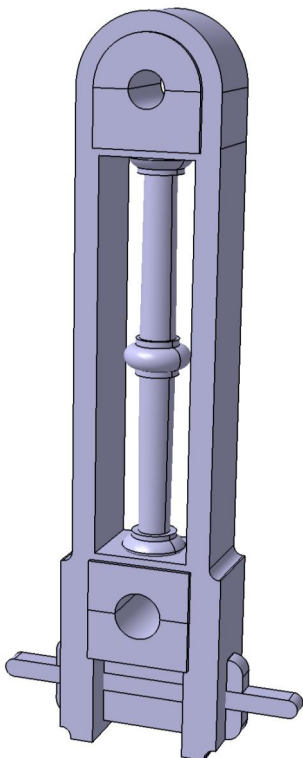


Figura 150: Barra vertical (2)

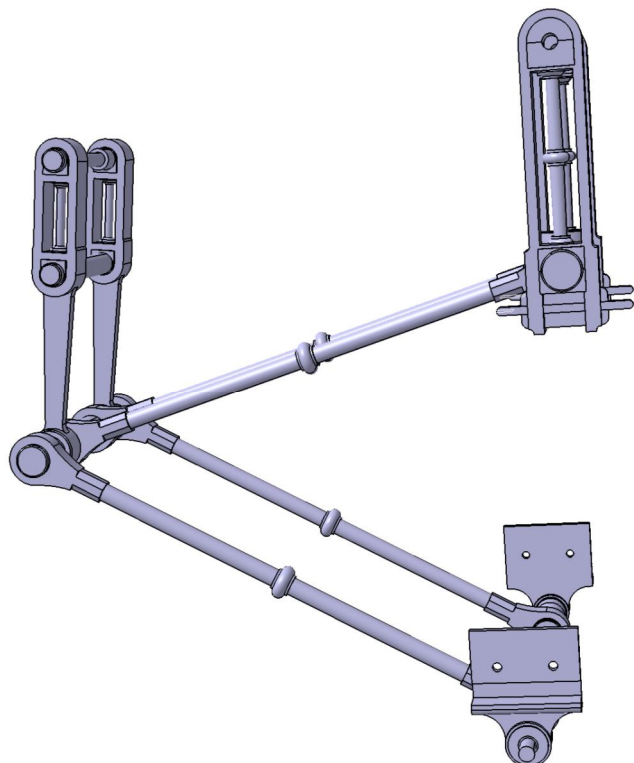


Figura 151: Paralelogramo completo (1)

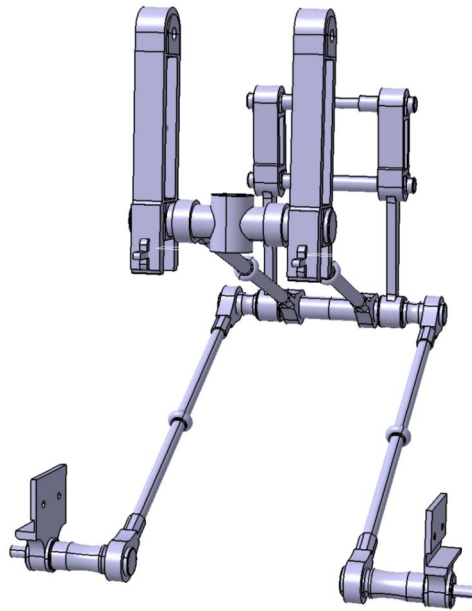


Figura 152: Paralelogramo completo (2)

- **Cojinetes.** Se dedica una sección entera para los cojinetes por su importancia en la Máquina y por las diferentes formas que adoptan en función de las diferentes partes en las que se encuentren. De este modo, allí donde hay un eje o árbol que gira aparece un cojinete (en realidad dos). Como consecuencia, los tamaños también son muy variados, dependiendo del diámetro del eje, y aunque entre ellos se observan ciertas diferencias en cuanto a su disposición, lo cierto es que son de tipología similar, a excepción del que forma parte del paralelogramo (Figura 150).

El número total de ellos asciende a diez, contando el cojinete desaparecido, lo que responde por tanto a cinco tipos diferentes de cojinetes. Estos podrían ser seis si se diferencia entre aquellos que alojan al árbol de la Máquina (Figura 155), puesto que hay que recordar que uno de ellos se encontraba embebido en la base de la misma, formando parte de ella (Figura 156). Además de los anteriores, se pueden encontrar cojinetes dando apoyo al balancín (Figura 157); sosteniendo al paralelogramo de Watt (Figura 150); alojando los ejes visibles de la distribución (Figura 158); y por último, sirviendo de apoyo al eje en la actualidad inclinado (Figura 159).

Como consecuencia, cada uno de ellos presenta diferente dificultad en lo que a tomar medidas se refiere. Así, aquellos más expuestos, como el relacionado con el árbol y no está en la base, y los que albergan a los ejes de la distribución, no mostraron ningún problema para facilitar sus medidas, dando lugar a unos diseños sólidos y fiables. El siguiente en liza sería el cojinete del eje inclinado, pues a pesar de las dificultades derivadas del habitáculo, sus medidas y detalles se podían captar con facilidad. Al anterior se uniría el que se encuentra en la base de la Máquina, pues los diferentes elementos acoplados al propio árbol como las excéntricas, impedían una toma de datos refinada. Por último, los que presentan mayor incertidumbre en las medidas son los que se encuentran acoplados a la cornisa, como se ha visto anteriormente.

Por último, el traslado de estos elementos al programa ha sido muy similar, y, aunque no se haya requerido el empleo de operaciones complicadas para el diseño, el detallismo que muestran sí que obligó a un elevado número de ellas.

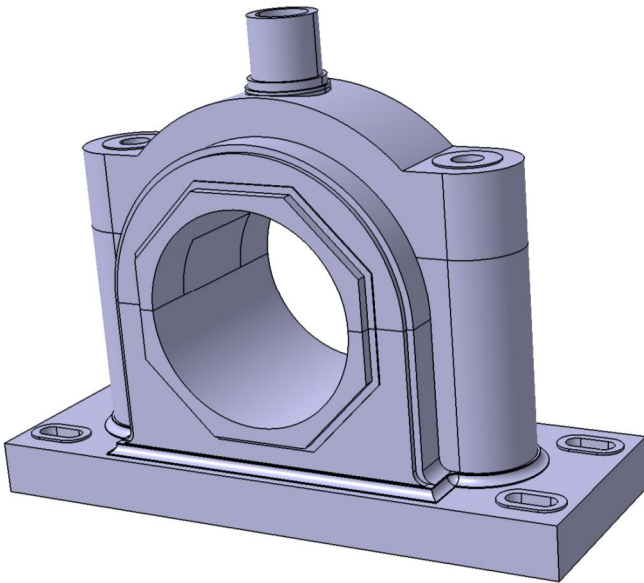


Figura 153: Cojinete del árbol

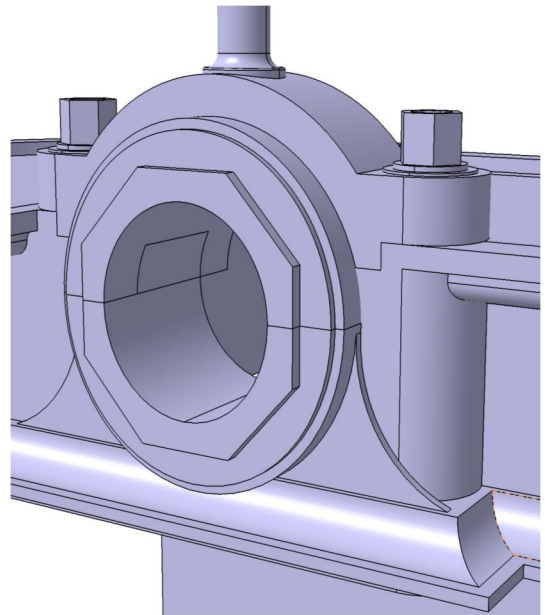


Figura 154: Cojinete del árbol en la base

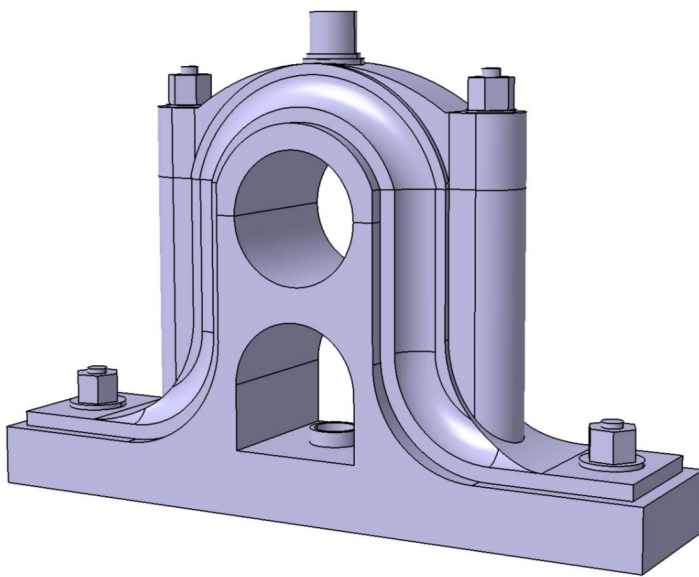


Figura 155: Cojinete balancín

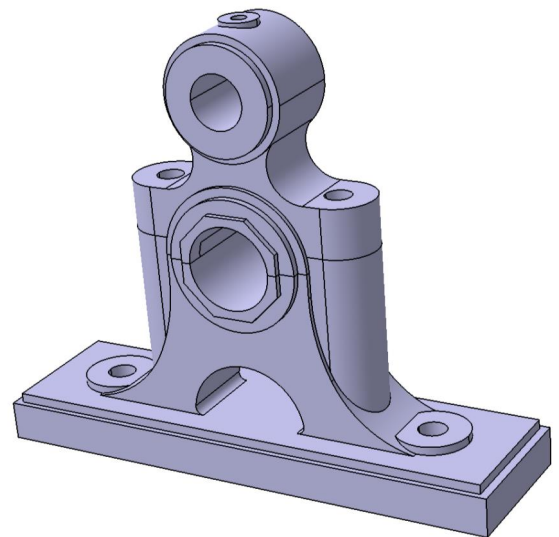


Figura 156: Cojinete ejes distribución

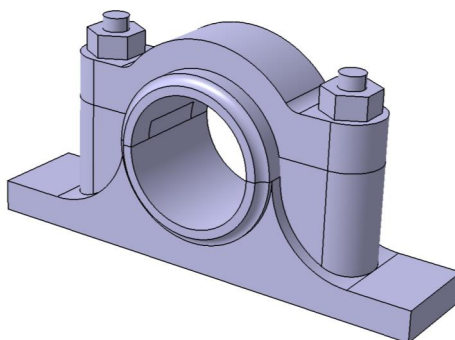


Figura 157: Cojinete eje subterráneo

- **Distribución.** Esta parte de la Máquina es la que mayor complejidad presenta en lo que al movimiento de su mecanismo se refiere. Esto se debe en parte al elevado de piezas implicadas en él, comenzando el mismo en las propias excéntricas y terminando por el movimiento de las válvulas de corredera. Como consecuencia, esta es la estructura en la que más incertidumbres se acumulan, incluyendo aquellas procedentes de una parte que apenas es visible y que desde luego no es accesible, como es la conexión de las excéntricas con el eje (o eje doble) inclinado. Otras partes en cambio, son perfectamente accesibles y permiten alcanzar una precisión muy elevada. Estas incertidumbres complican desde luego el ensamblaje de las distintas piezas de la distribución, pero sobretodo, complican de sobremanera que se produzca un movimiento coherente con el resto de partes de la Máquina. El primero es más sencillo de solucionar, puesto que consiste en adaptar unas piezas a otras para que el ensamblaje salga adelante. El segundo no es tan directo, puesto que el movimiento que deberían realizar las piezas ni siquiera se conoce. Independientemente de lo anterior, ya que la última cuestión pertenece más a otro apartado posterior, las piezas se van a presentar de diferentes maneras. La excéntrica se va mostrar por sí misma (Figuras 160 y 161), sin ensamblar con ninguna otra pieza, mientras que la parte de la distribución a ambos lados de la caja distribuidora se presentará conjuntamente (Figura 162 y 163). Esto quiere decir, que no se va a presentar el mecanismo correspondiente a cada una de las válvulas de forma separada, pues, al fin y al cabo, su disposición espacial es muy similar. Para mostrar debidamente estas últimas piezas son necesarias al menos dos vistas. No en vano, es en este punto en el que es posible apreciar el eje que se encuentra invertido, además de la biela multi-agujereada, en su sitio adecuado. Volviendo a la excéntrica, no es necesario mostrar ambas, puesto que son iguales en forma, y sorprendentemente similares en dimensiones. De hecho, son tan parecidas, que aparece la cuestión de si sus pequeñas diferencias son a propósito por la existencia de un doble eje. También, es posible que sean diferencias resultantes de los procesos de fabricación, cuya incertidumbre podría haber derivado en ellas fácilmente. Por otro lado, las piezas que en un principio no son visibles pero que se descubrieron una vez abierta la caja distribuidora, es decir, las válvulas (Figura 164 y 165), se incluyen por separado, para poder apreciarlas correctamente. No es que muestren excesivo detalle, pues al fin y al cabo no son partes visibles de la Máquina, pero una vez estén ensambladas es complicado distinguirlas con claridad.

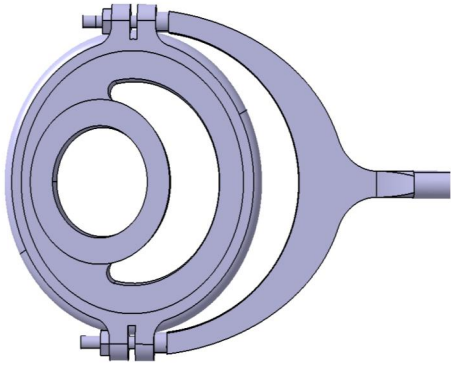


Figura 158: Excéntrica (1)

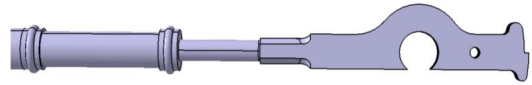


Figura 159: Excéntrica (2)

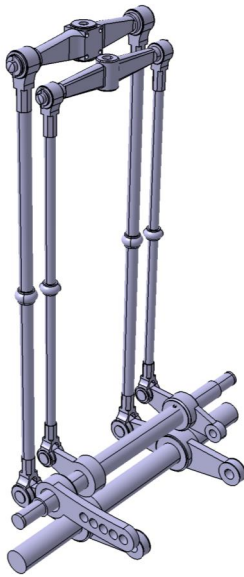


Figura 160: Distribución (1)

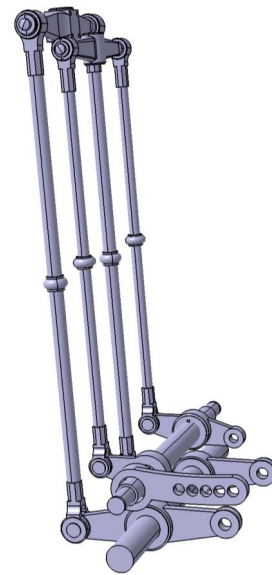


Figura 161: Distribución (2)

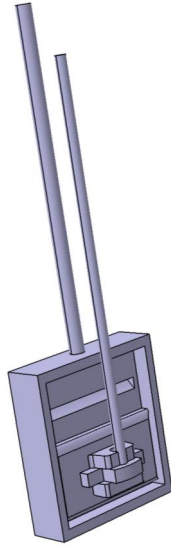


Figura 162: Válvula (1)

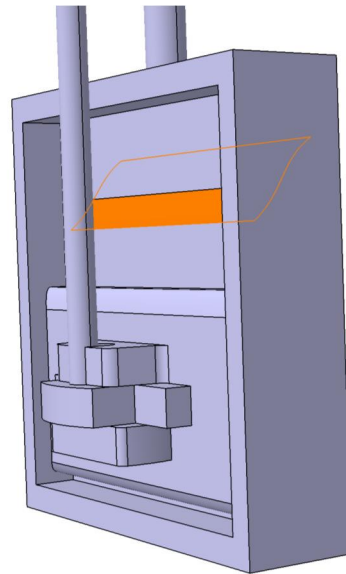


Figura 163: Válvula (2)

Además, también se incluyen ciertos detalles de algunas de estas partes, como son la pieza de unión entre barras de la misma válvula que se disponen a los lados de la caja distribuidora (Figura 166 y 167), y la unión rígida en entre esta última pieza y las barras verticales (Figura 168). Para comprender mejor lo anterior, se incluyen los diseños junto con las piezas reales (Figuras 169).

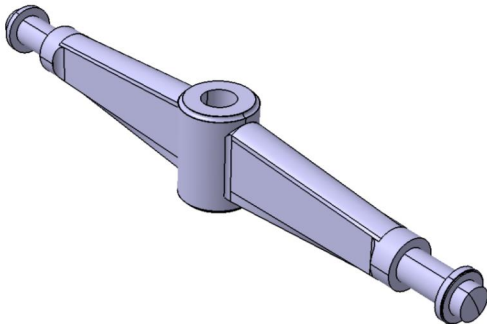


Figura 164: Diseño unión entre barras cortas

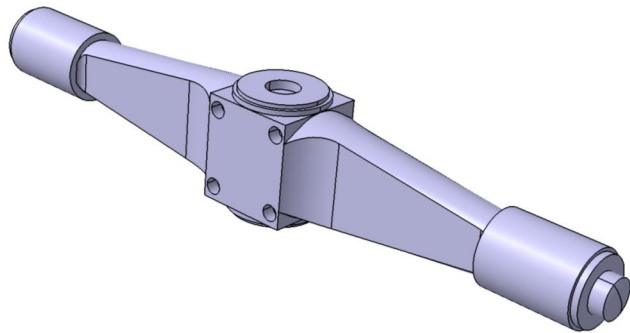


Figura 165: Diseño unión entre barras (1)

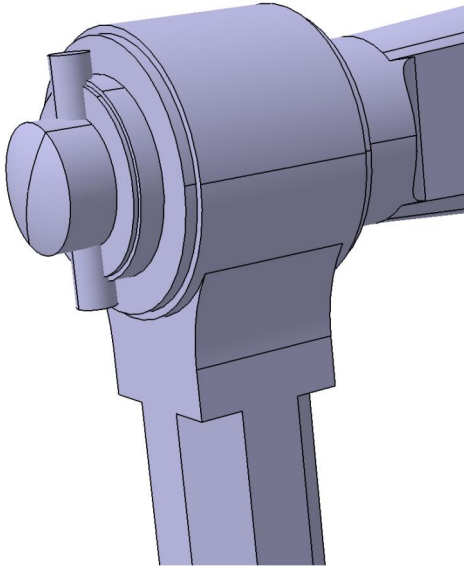


Figura 166: Diseño unión rígida



Figura 167: Disposición real

- Biela. Se incluye esta pieza en sí misma debido a la dificultad que la realización de su diseño implicó. Su función está clara, y su principal problema en lo que respecta a las medidas es la parte no visible, que supone su unión con la biela del árbol, así como su extremo superior, de difícil acceso. Volviendo al diseño (Figura 170), las formas que incluye esta pieza, que de nuevo demuestran la intención decorativa de la Máquina, presentan ciertos problemas para ser plasmadas en el programa. Se trata de una pieza cuya sección es variable a lo largo de su longitud, lo que obliga a definir varios sketch que representen estas secciones para poder aplicar la herramienta *MULTISECTION*. Sin embargo, estas secciones no son sencillas de determinar, y en ocasiones no han podido ser más que una aproximación.

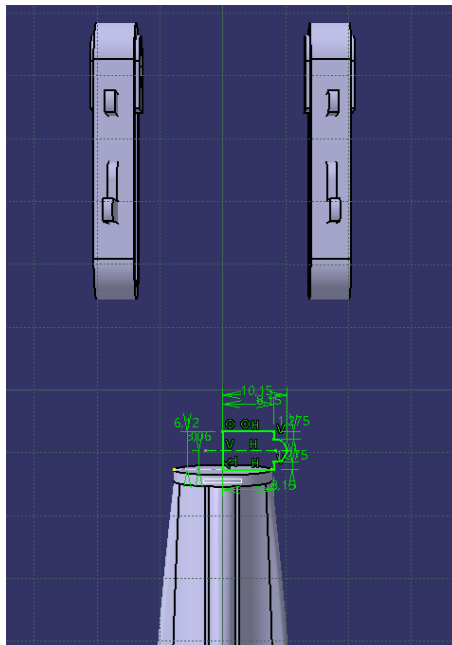


Figura 168: Proceso diseño biela

A lo anterior se une el hecho de la dificultad para determinar dónde termina exactamente la pieza en su extremo superior, pues la unión que presenta en el mismo no es especialmente visible. Y la poca accesibilidad a ella tampoco ayudó a determinar cómo es exactamente. Esto se aplica también a su extremo inferior (Figura 83 y 84), ilustrado anteriormente, cuyo diseño se ha realizado en base lo observado en base únicamente a dichas fotografías.

Por otro lado, se trata de una pieza cuya longitud, que constituye su dimensión crítica, es fácilmente modificable en función de las restricciones que vengan impuestas a partir de otras como el balancín o el árbol. Se puede adaptar de forma más sencilla que otras estructuras, y además su movimiento está mucho más claro que en los casos anteriores, regido por ecuaciones conocidas y estudiadas, pues forma parte de un mecanismo con amplia aplicación hoy en día.

De este modo, se incluyen varias perspectivas de la biela (Figura 171 a 174), de tal forma que se pueda apreciar en todo su conjunto, así como los diferentes detalles que incluye.

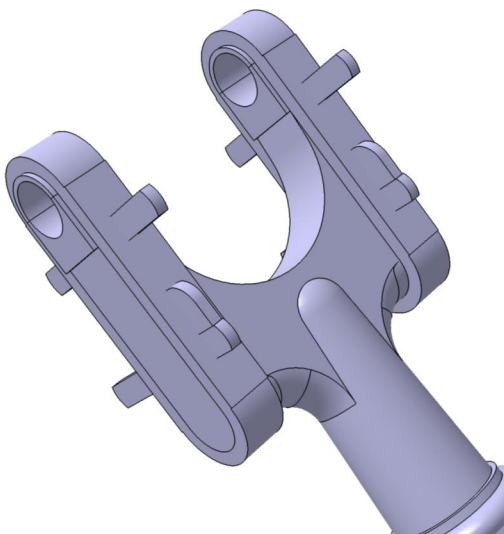


Figura 169: Diseño biela (1)

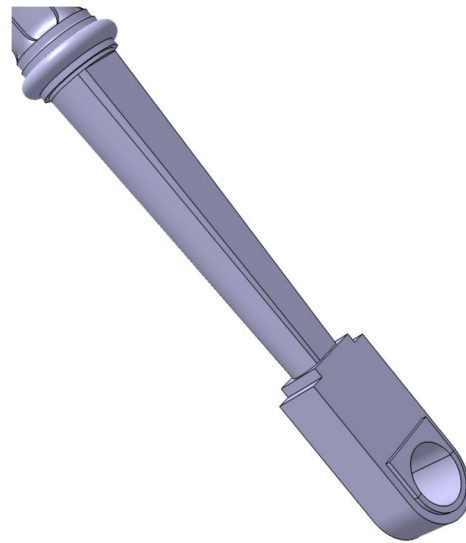


Figura 170: Diseño biela (2)

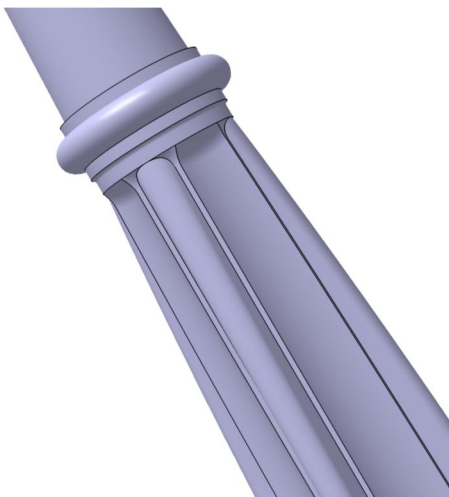


Figura 171: Diseño biela (4)



Figura 172: Diseño biela (4)

Son muchas más las piezas diseñadas en el presente proyecto. Sin embargo, algunas, aunque importantes, como el volante de inercia o la rueda dentada del árbol, no tiene mucho sentido introducirlas individualmente, ya que, aunque tengan sus particularidades en el diseño, cobran mayor sentido al introducirse en el conjunto completo de la Máquina.

Por otro lado, a lo largo de este apartado se ha repetido en multitud de ocasiones la problemática con la incertidumbre de las medidas. Esta, incluso en aquellas partes visibles, no puede ser nunca totalmente evitada, es algo inherente al proceso de medida. Puede ser estimada, por supuesto, pero no es una actividad que forme parte este proyecto. Dicha problemática, no sería tal si se dispusiera de elementos de referencia, fijos, además de un conocimiento exhaustivo del funcionamiento de la Máquina.

Respecto a los primeros, es posible y al mismo tiempo necesario, definir dimensiones que, pase lo que pase a la hora del ensamblaje, no se vayan a cambiar, otorgando así fiabilidad a la medida detrás de dicha dimensión del diseño. Este el caso de la base de la Máquina, que se asume como inamovible, y los demás elementos se deberán adaptar a la misma. El cilindro por su parte, constituirá otra de las piezas cuyo diseño no se cambiará. Sin embargo, su posición sí que será susceptible de ser modificada a posteriori, pues corregir elementos como el paralelogramo o el balancín a partir de la posición del cilindro es cuanto menos cercano a la locura. ¿Cuál es la ecuación que relaciona las dimensiones del balancín y de la multitud de elementos que constituyen el paralelogramo, con la posición del cilindro? Aunque fuera posible obtener expresiones para determinarlo, no entra en los objetivos del proyecto realizar el cálculo de las dimensiones de elementos de máquinas de vapor.

Por otro lado, el balancín, una vez diseñado, se buscará que no sea modificado. Esto se debe, primero, a lo recientemente comentado sobre el diseño de unas dimensiones en función de otras. Así, es preferible modificar el diseño en lo que se refiere a la posición del cilindro, que a la inversa. Además, la complejidad del diseño del balancín supondría rehacer muchos pasos cada vez que se cambiase una medida del mismo. Aparece aquí lo comentado al comienzo del epígrafe sobre la adquisición de destreza en el diseño y sobre la herramienta *PROJECT 3D MODEL*, usada en el diseño del balancín, y que, realmente, obliga a corregir las proyecciones cada vez que realiza un cambio en una operación previa a la proyección. La comodidad de la herramienta se convierte al mismo tiempo en un lastre.

5.2 RESULTADO ENSAMBLAJES

En este apartado se van a incluir los ensamblajes realizados, tratando de facilitar su visualización por medio de los documentos visuales adecuados. Del mismo modo que en el caso de las piezas aisladas, se incluirán los conjuntos con una breve explicación, que recogerá los aspectos más relevantes tanto en su proceso de ensamblaje como en el desempeño de dicha construcción en el conjunto de la Máquina.

Dichos conjuntos, no tienen por qué responder a partes concretas de la Máquina, pues el grado de interconexión entre estas lleva a la necesidad de mostrarlas en ocasiones de manera conjunta. Además, algunos conjuntos tendrán ciertas piezas o subconjuntos en común. El objetivo en este caso siempre es facilitar la visualización del resultado de los diferentes ensamblajes, y esto no se podría conseguir ni aislando cada una de las partes, ni incluyendo todas las piezas en un mismo conjunto. Esto último se mostrará una vez se hayan podido comprender y apreciar los diferentes conjuntos que es posible diseñar en torno a las diferentes partes de la Máquina.

Por otro lado, para explicar algunos de los ensamblajes será necesario incluir diseños de piezas independientes, que no se han incluido en el apartado anterior, y que permiten entender mejor el proceso que se ha seguido para lograr los diferentes conjuntos.

- Regulador. Esta parte de la Máquina se representa de manera independiente, ya que aglutina un importante número de piezas. Además, se muestra únicamente la parte del visible (Figuras 175 y 176), pues ya es sabido que los elementos de conexión hace mucho tiempo que desaparecieron, por lo que el ensamblaje se ha realizado únicamente de aquello que existe en la actualidad. Por otro lado, incluso si se tuviera en cuenta dichas conexiones, el carácter de las mismas no tendría por qué afectar en absoluto al resto de partes de la Máquinas, encontrando aquí otro argumento por el que mostrar el regulador de manera aislada.

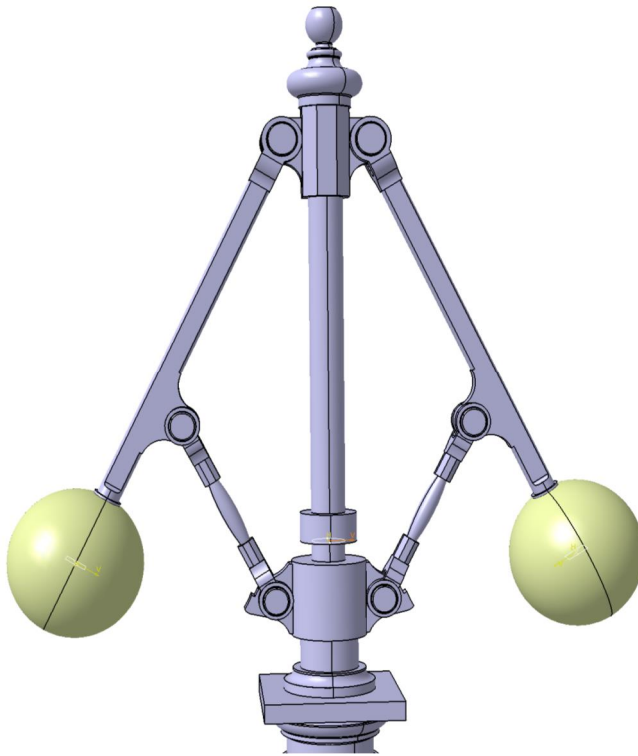


Figura 173: Ensamblaje regulador (1)

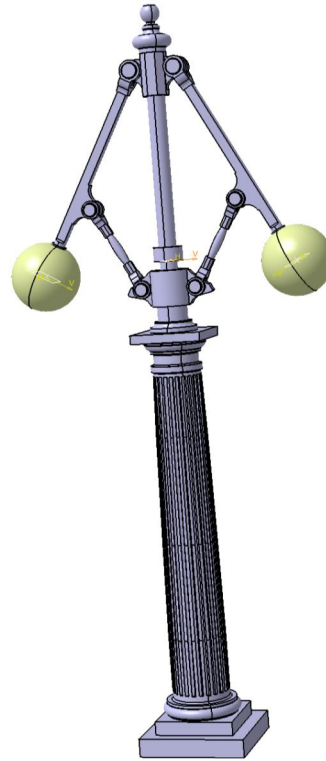


Figura 174: Ensamblaje regulador (2)

- Cilindro + distribución. Tras haber incluido ambos por separado, en este ensamblaje se ha tratado de encajar ambos. Esta tarea desde luego no ha sido sencilla, puesto que muchos diseños de diversas piezas que los unían tuvieron que ser modificados. Sin embargo, finalmente fue posible llegar a un resultado coherente, gracias en parte al propio cilindro y a dichas piezas de unión.
Por un lado, el cilindro, como se indicó también en el resultado del diseño, se tomó como referencia en lo que a dimensiones se refiere. Por otro lado, en la estructura formada por el cilindro y la distribución están presentes dos piezas que actúan como conectores.
Una de ellas (Figura 177), sirve de puente entre el cilindro y la barra de la distribución más cercana que corresponde con una de las válvulas de corredera, concretamente aquella que recordaba a un ácajônô. Realmente, el puente no es con la barra en sí misma, sino con el cilindro que la aloja. Es posible observar el diseño de esta pieza en la Figura 178, a modo de comparación. La otra pieza relacionada (Figura 179 en la realidad, Figura 180 en el diseño), conecta las dos estructuras de la distribución, es decir, las correspondientes a cada una de las válvulas.



Figura 175: Conexión cilindro barra distribución

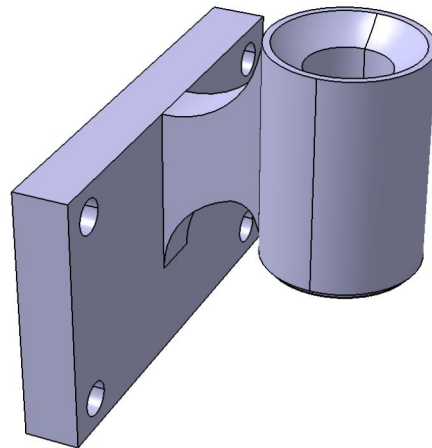


Figura 176: Diseño conexión cilindro barra distribución



Figura 177: Conexión entre barras distribución

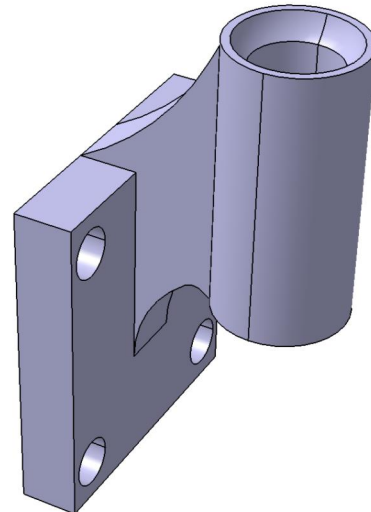


Figura 178: Diseño conexión entre barras distribución

Como consecuencia, si estas piezas se mantienen como fijas, la posición de ambas estructuras de la distribución, tanto respecto al cilindro como entre ellas, quedarán determinadas. No obstante, aún resta por conocer la posición de los apoyos de dichas estructuras, es decir, los cojinetes, puesto que no sería muy fiable recurrir al ángulo que forman las bielas que unen dichas estructuras con los ejes que recalán en los cojinetes. Para esta dimensión, el método más adecuado (y viable) es recurrir a su propia medida.

Por otro lado, establecer la referencia en dichas piezas permite también fijar la posición de las barras de las válvulas, al menos en su separación con el cilindro. Esto permite también determinar con mayor precisión las dimensiones internas de la caja distribuidora.

Lo incluido en el párrafo anterior refleja las últimas partes del ensamblaje que destacan por una precisión muy elevada. El resto de elementos de la distribución traen consigo las grandes incertidumbres que se han mencionado reiteradamente. De este modo, en

estas partes se busca más la posibilidad de ensamblar las diferentes piezas, aunque dicho ensamblaje no se ajuste del todo a la realidad. Independientemente de lo anterior, se muestra a continuación la estructura formada por el cilindro y la parte de la distribución que se encuentra directamente relacionada con él, en las Figuras 181 y 182.

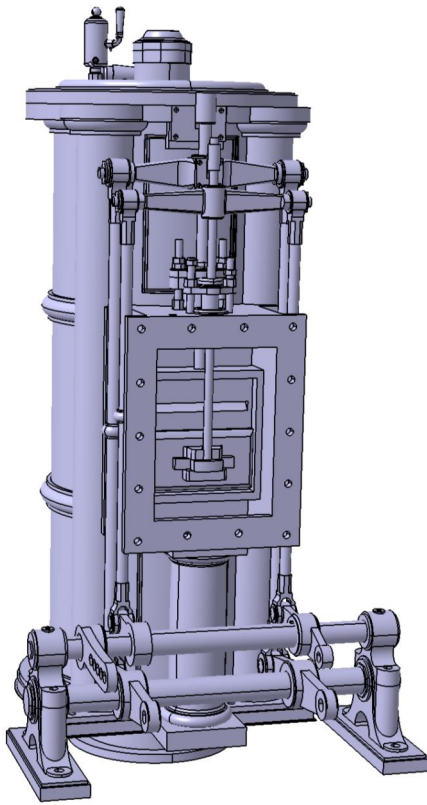


Figura 179: Cilindro + distribución (1)

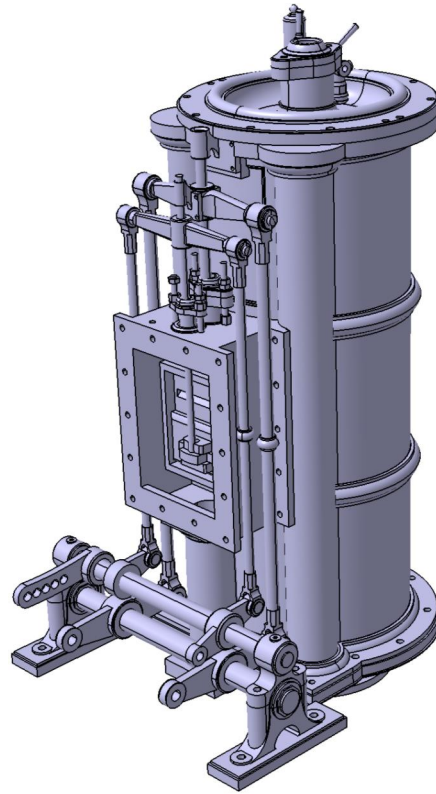


Figura 180: Cilindro + distribución (2)

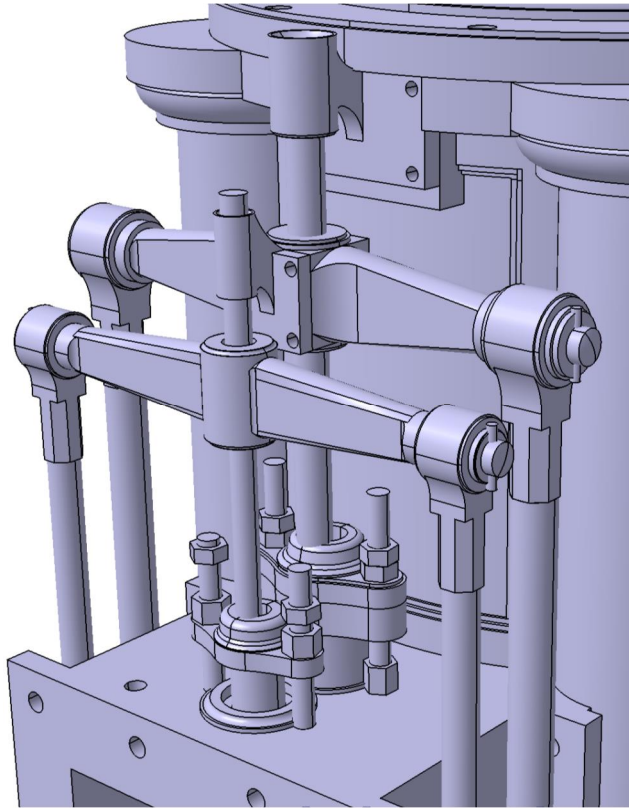


Figura 181: Cilindro + distribución (3)

- Cornisa + cojinetes + balancín. Este conjunto se establece como uno de referencia a la hora de realizar el ensamblaje completo. Una vez que las piezas que lo forman están unidas correctamente, es decir, una vez realizadas las modificaciones para que lo anterior sea así, otros conjuntos de la Máquina que se acoplen a este serán susceptibles de ser modificados para adaptarse a este ensamblaje.

En lo que respecta al conjunto cornisa-cojinetes-balancín, únicamente se modificaron la primera y la última. De este modo, la vigueta central de la cornisa tuvo que ser modificada para permitir el giro del balancín sin que estos elementos colisionasen. En cuanto al balancín, al ser acoplado a la cornisa a partir de los cojinetes requirió de un ajuste en cuanto a su longitud para adaptarse en mayor medida a las dimensiones más fiables de la cornisa.

Como consecuencia, la complejidad de este conjunto reside más en la corrección de estas piezas que en las propias operaciones de ensamblaje. Únicamente dos perspectivas se muestran del conjunto (Figura 184 y 185), puesto que cada una de las piezas fue mostrada por separado en su momento.

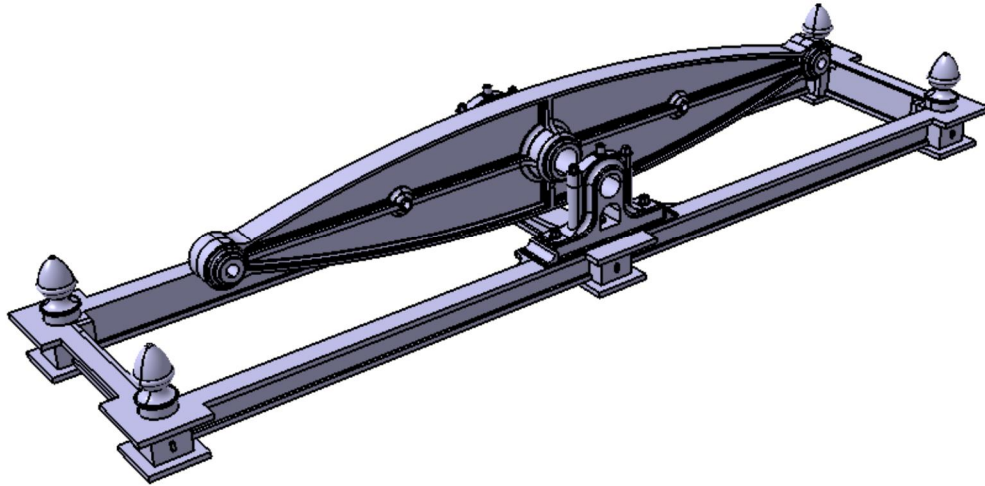


Figura 182: Cornisa + cojinetes + balancín (1)

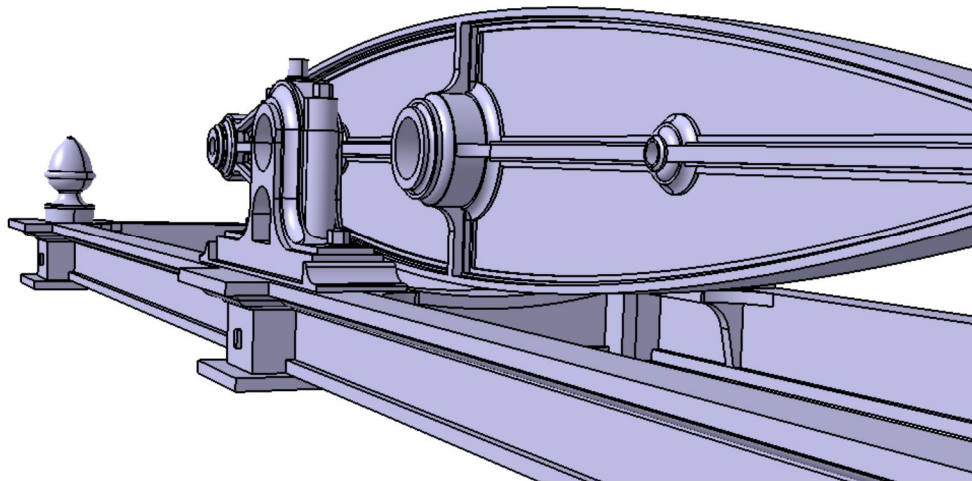


Figura 183: Cornisa + cojinetes + balancín

- Base-cornisa-columnas. Con este conjunto, además de mostrar por primera vez las imponentes columnas de la Máquina, se pretende juntar aquellos elementos que son totalmente estáticos. Además, a partir de este se irán añadiendo otros conjuntos de forma que se vaya completando la Máquina. De este modo, los sucesivos conjuntos que se incluyan, serán una ampliación de este, y se irán llamando por base + conjunto, siendo el conjunto aquel que se está incorporando.
En cuanto al proceso de ensamblaje, no tiene especial complicación, puesto que la cornisa fue diseñada a partir de la base de la Máquina. Las columnas por su parte, tampoco implican problema alguno, y respecto a ellas, simplemente hay que tener dos aspectos en cuenta. Su parte superior no es accesible para una toma de datos adecuada, pero sí su parte inferior, por lo que, dada su simetría respecto a su plano medio, fue posible diseñarlas adecuadamente. La única dificultad en lo que respecta a su diseño tiene que ver con que su superficie no es lisa, sino que presenta surcos longitudinales alrededor de todo su diámetro. Este diámetro no es constante, pues varía con la altura, incrementándose hasta su punto medio, para luego reducirse a la dimensión inicial. De esta manera, el resultado del diseño (Figura 186) de las columnas de la Máquina (Figura 187) se puede apreciar a continuación.

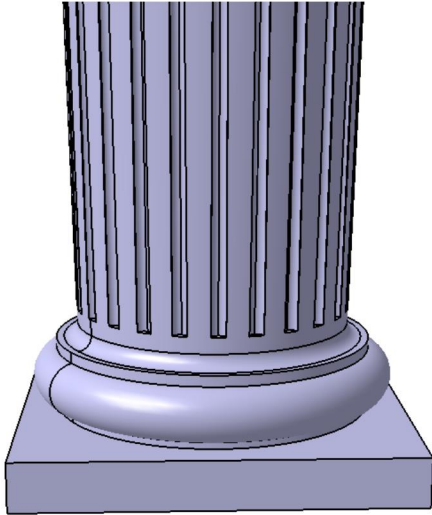


Figura 184: Diseño columnas



Figura 185: Columna

La misma geometría se observa en la alimentación de vapor a la caja distribuidora (Figura 188)

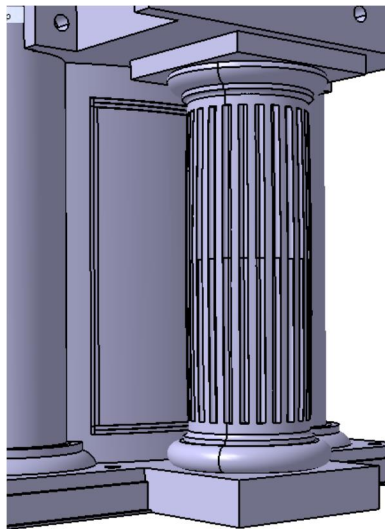


Figura 186: Columna alimentación vapor

Respecto al apoyo de las mismas, la situación es diferente. La presencia de las chapas en la parte externa, y la escasa iluminación por su parte interior, complican la determinación de las diferentes piezas que conforman la sustentación de las columnas. No está claro si esos apoyos forman parte de la propia base, o si en cambio son piezas diferentes. Desde luego, en lo que respecta al montaje global, este hecho no afecta en absoluto.

Por otro lado, en el ensamblaje se incorporan ya algunos de los aspectos observados en el interior de la Máquina en las diferentes incursiones. Así, este conjunto está representado en las Figuras 189 y 190.

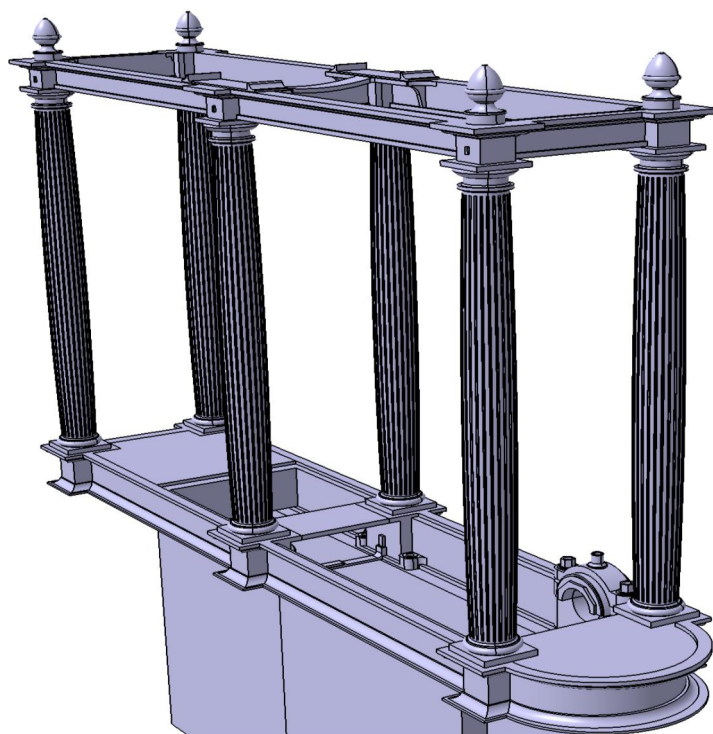


Figura 187: Base + columnas + cornisa (1)

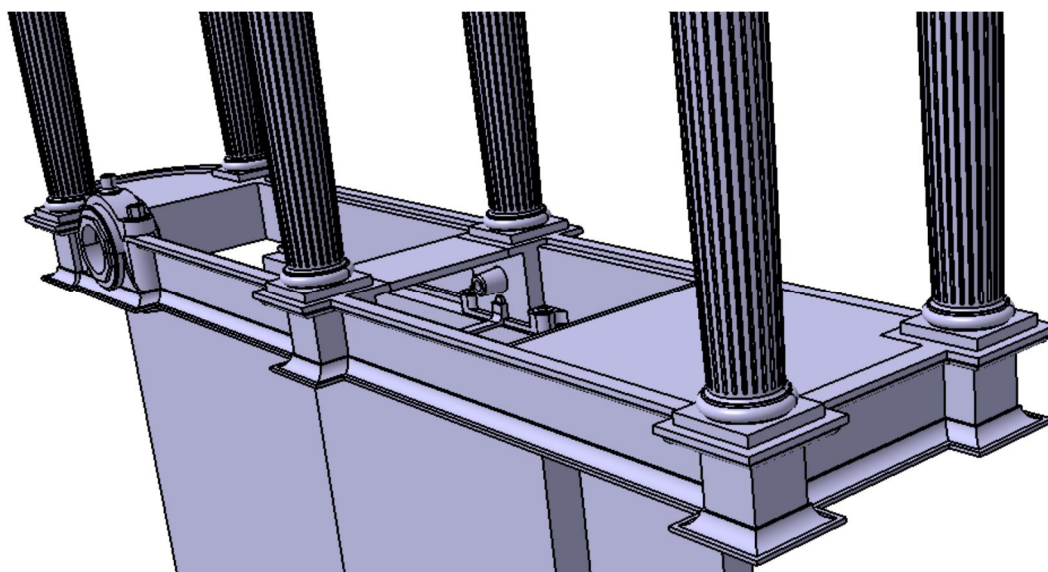


Figura 188: Base + columnas + cornisa (2)

- Base + balancín + cojinetes. En la Figura 191 se aprecia el resultado del ensamblaje de estos elementos, el cual, dada las piezas a encajar, no requirió de modificaciones adicionales.

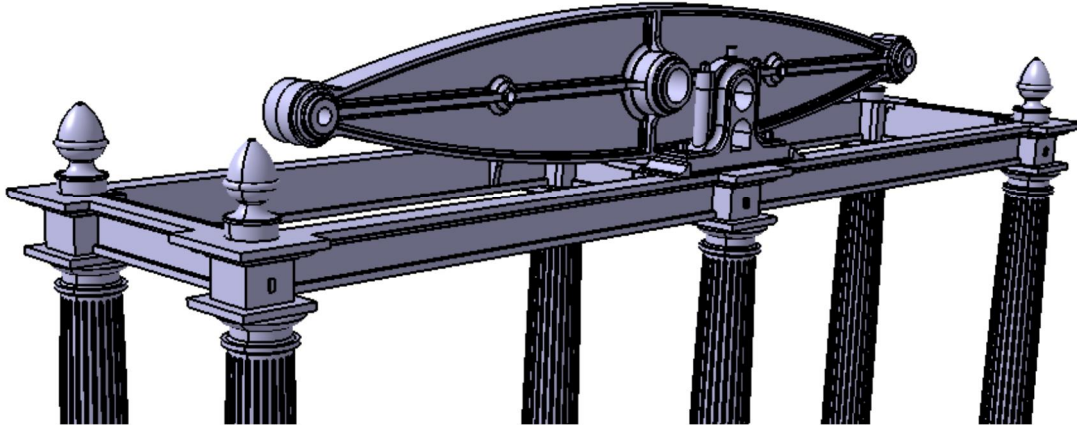


Figura 189: Base + balancín + cojinetes (1).

- Base + paralelogramo + cilindro (Figuras 192 a 194). Para el ensamblaje de esta parte fue necesario corregir en diversas ocasiones las piezas del paralelogramo, tanto por la necesidad de encajar con la disposición impuesta por el tamaño del balancín como por la necesidad de impedir el contacto entre piezas. La posición del cilindro está marcada por la imposición derivada de la posición del paralelogramo.

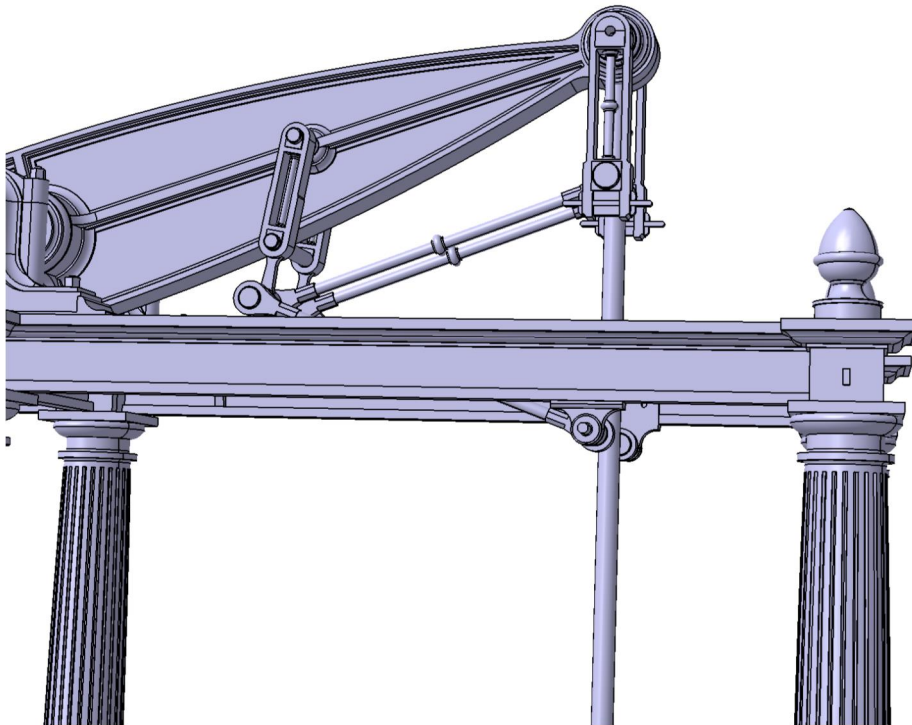


Figura 190: Balancín + paralelogramo + cilindro

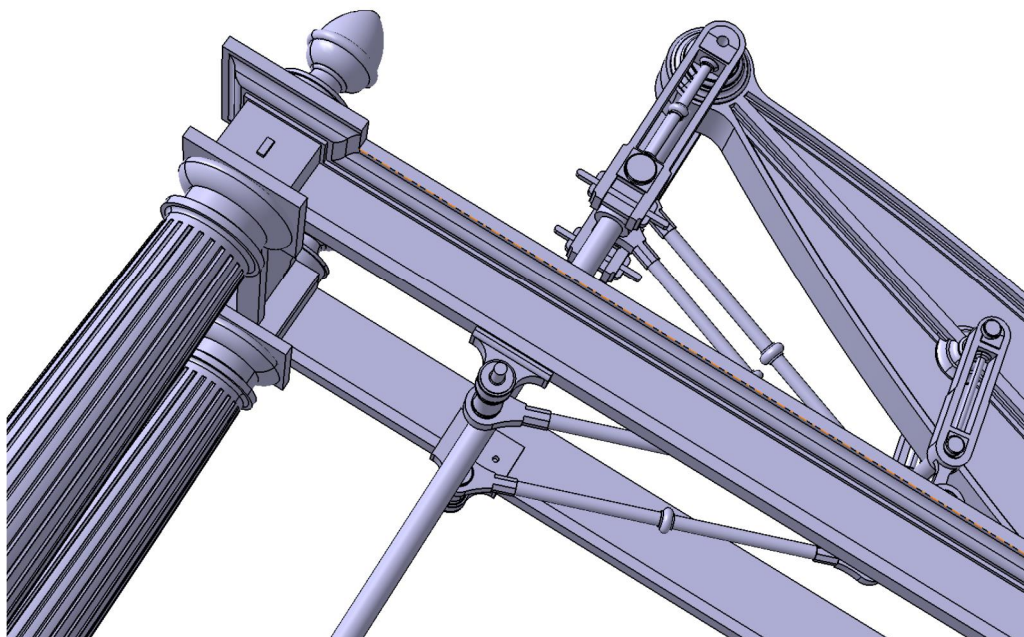


Figura 191: Base + paralelogramo + cilindro

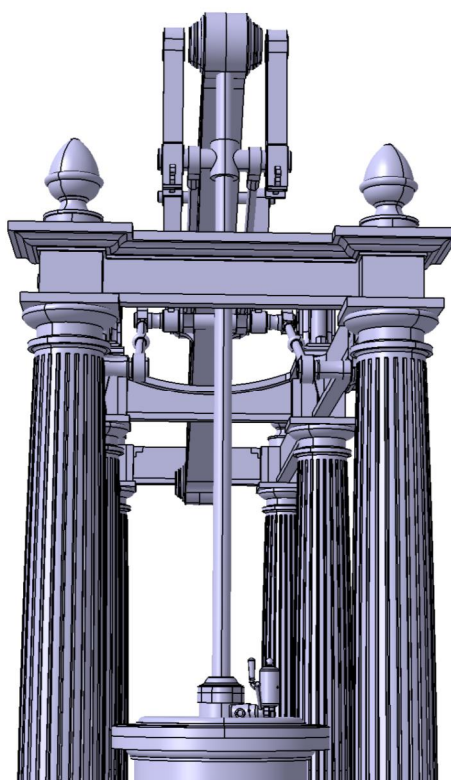


Figura 192: Base + paralelogramo + cilindro

- Base + distribución. No supone una complicación adicional, puesto la distribución ya se había añadido en un conjunto anterior.

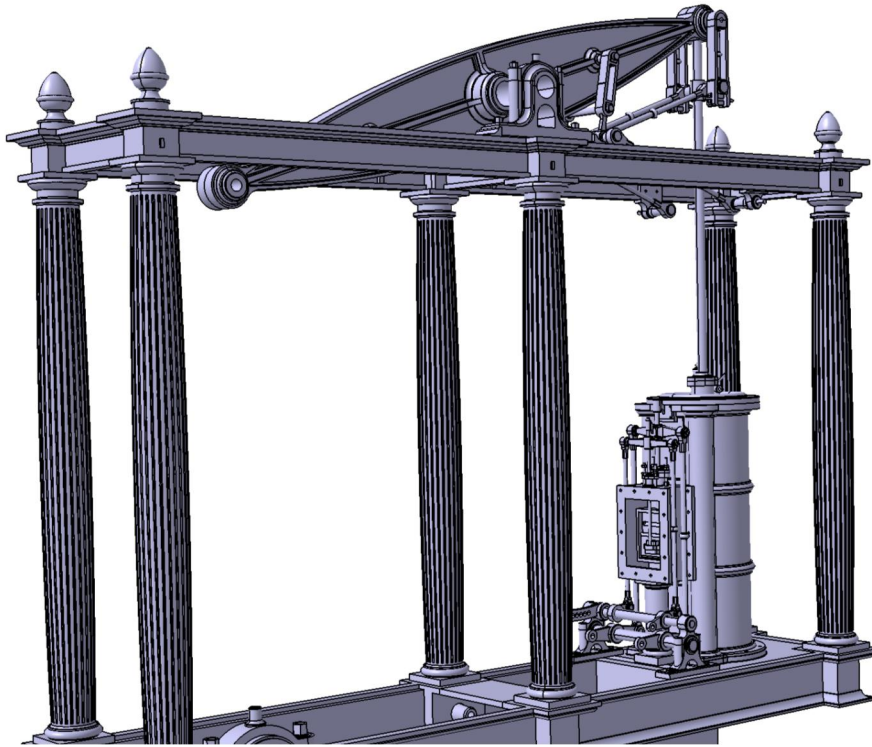


Figura 193: Base + distribución

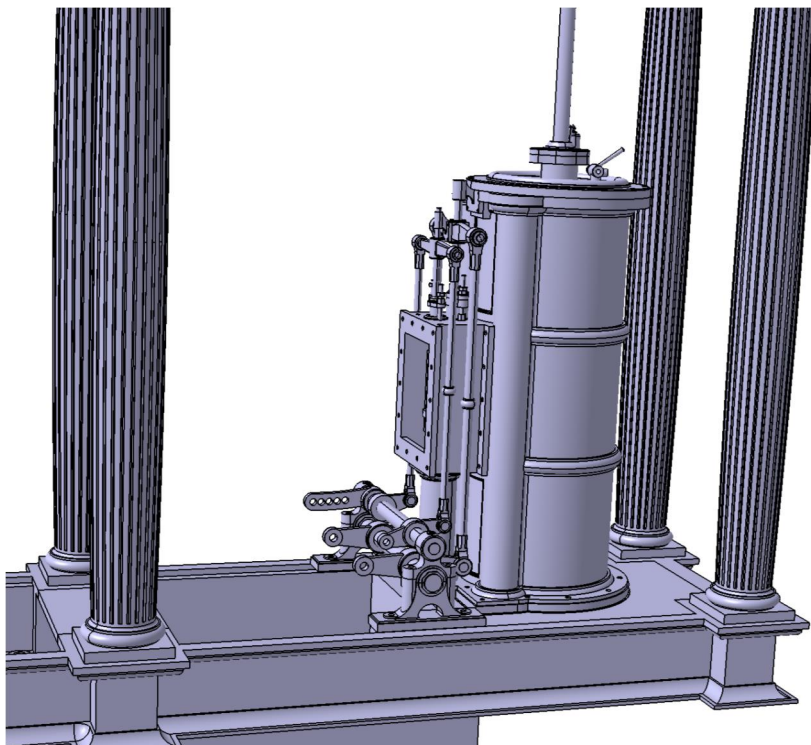


Figura 194: Base + distribución

- Máquina. Este es el conjunto completo (, el resultado que plasma la mayor parte del trabajo del proyecto, y que supone la culminación del mismo. Incluye de esta manera el árbol, con la rueda dentada, el volante de inercia, las excéntricas y el mecanismo biela-manivela, y el regulador. Las siguientes figuras tratarán de reflejar aquello que se ha conseguido, que no es otra cosa que modelizar la Máquina tal y como se encuentra actualmente, salvo por la biela de la distribución colocada en su lugar original.

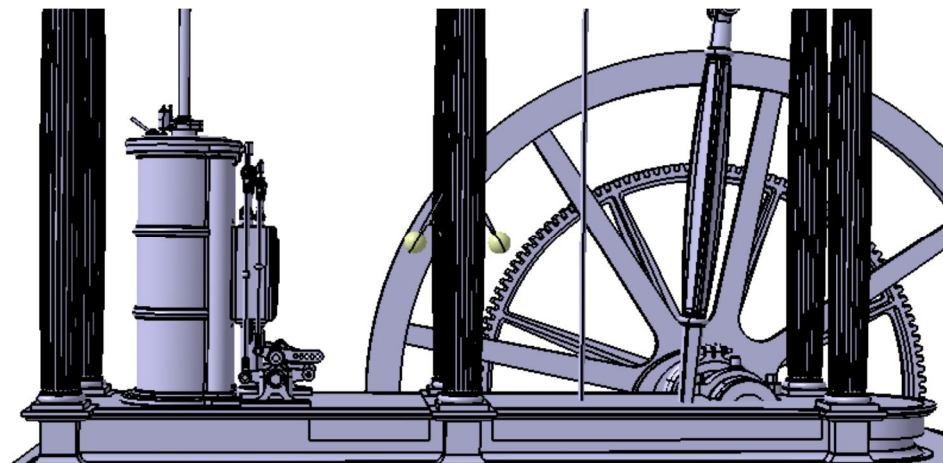


Figura 195: Máquina completa (1)

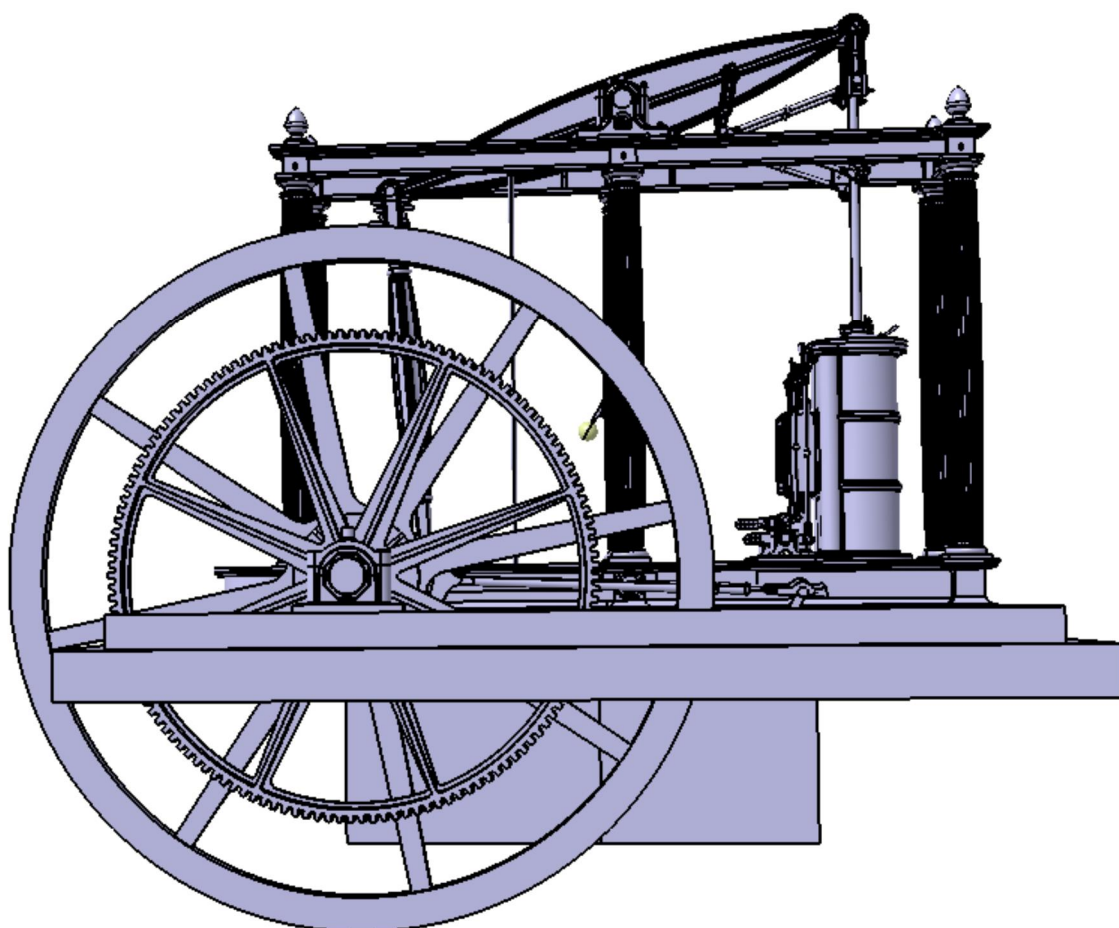


Figura 196: Máquina completa (2)

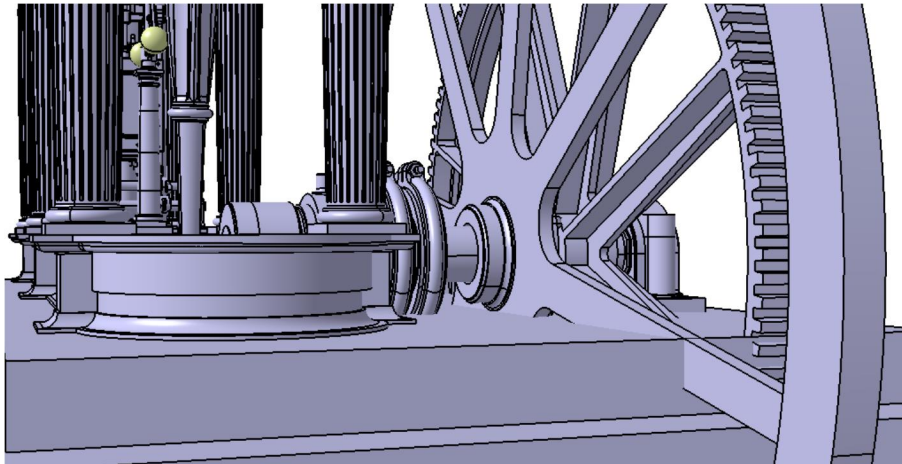


Figura 197: Máquina completa (3)

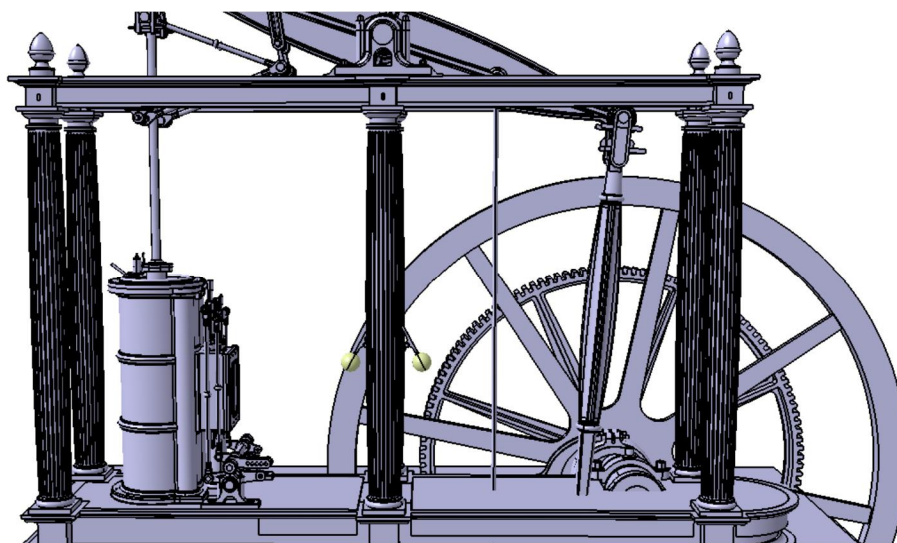


Figura 198: Máquina completa (4)

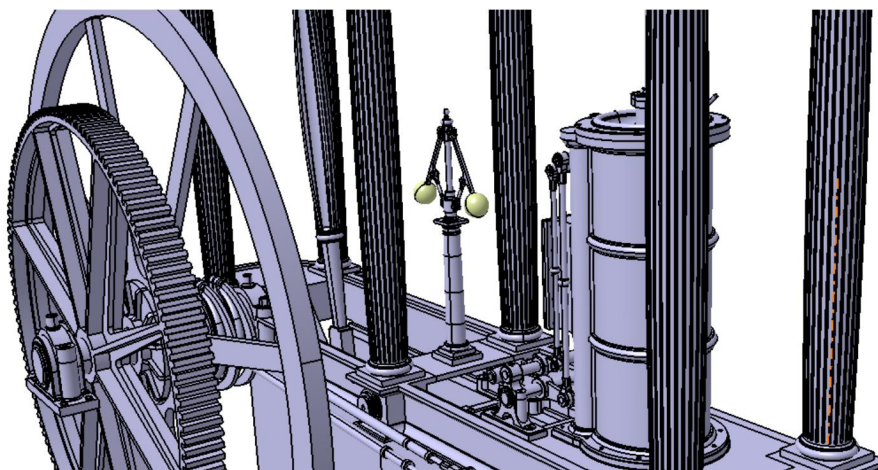


Figura 199: Máquina completa (4)

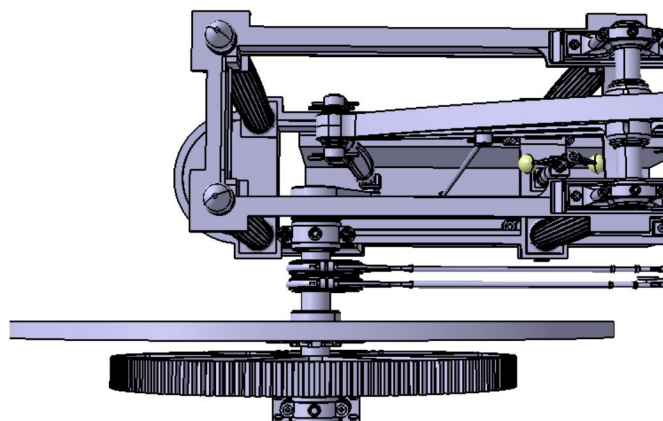


Figura 200: Máquina completa (5)

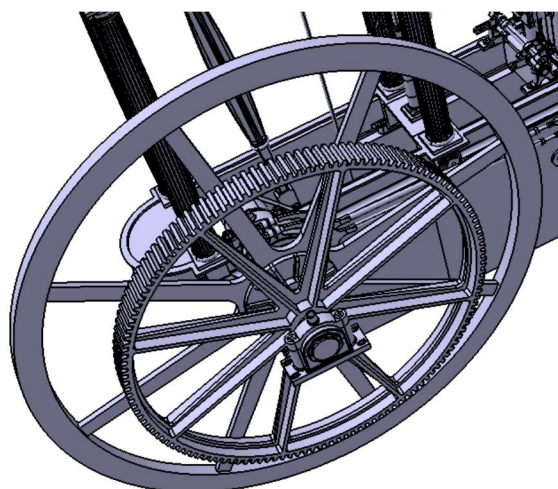


Figura 201: Máquina completa (6)

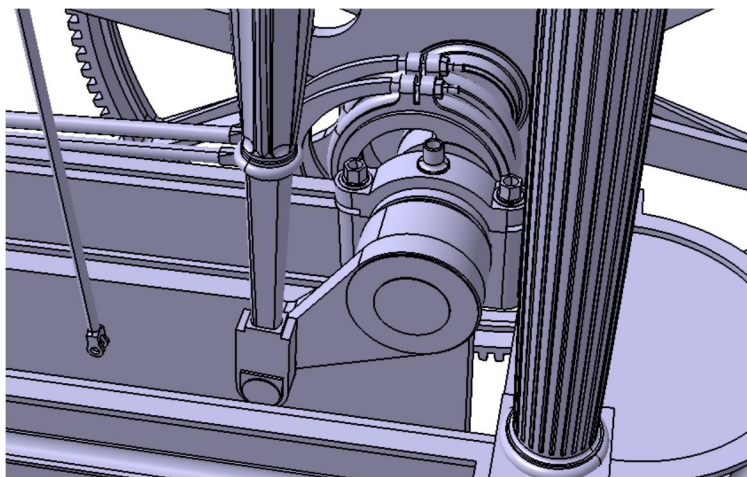


Figura 202: Máquina completa (7)

6 CONCLUSIONES

Una vez presentados los resultados obtenidos se debe analizar si estos satisfacen los objetivos planteados al comienzo del proyecto.

En lo que respecta a la primera parte del mismo, es decir, a la parte investigadora, en función del objetivo a evaluar los resultados han sido dispares. Por un lado, se pretendían conseguir los planos de la Máquina para poder afrontar con garantías el diseño de la misma. Esto, como se ha podido ver, no se ha conseguido, pues ni siquiera quiénes encargaron la construcción de la Máquina, *D. Napier & Son Limited*, conocen el paradero de los mismos.

Por otro lado, aunque tampoco se ha encontrado documento alguno en el que se refleje la donación de la Máquina a la ETSII, las referencias a la misma en diversos medios han permitido averiguar no poca información sobre la construcción y la instalación de la misma. Las diferentes fuentes consultadas han arrojado luz sobre muchos aspectos que previamente a la realización eran desconocidos.

De este modo, es posible ofrecer datos de la Máquina como el año de construcción, 1832; el año de donación, 1914; su potencia, 50 caballos; o sus años de trabajo y localización en la Fábrica Nacional de Moneda y Timbre, en torno a 30. Además, se ha descubierto que la Máquina no siempre se encontró en su estado estático actual, sino que, durante un periodo de tiempo que ha quedado acotado superiormente a 20 años, es posible que se moviera.

Por otro lado, se ha puesto de manifiesto que la disposición que presenta la Máquina en algunas de sus piezas no es la que debía ser para permitir el funcionamiento. Funcionamiento que ahora se conoce en mayor profundidad, pues se ha revelado la función general de cada una de ellas, a pesar de que aún quedan muchas incógnitas, sobretodo en el comportamiento mecánico de las piezas. Y se conoce porque se ha podido identificar la válvula que rige la distribución de vapor al cilindro, la válvula *Polonceau*.

Dicha válvula se caracteriza por ser doble, es decir, que además de la válvula principal que permite el denominado *efecto de cilindro*, incorpora una segunda válvula que permite cortar el suministro de vapor y aprovechar así al máximo la expansión del vapor, ahorrando así combustible. La Máquina se erige así como un artefacto que incorporaba algunas de las innovaciones más sofisticadas de la época.

Por otro lado, se ha (re)descubierto el interior de la Máquina, caracterizándolo, tomando consciencia de que el condensador o el mecanismo de conexión del regulador nunca estuvieron presentes. Asimismo, adentrarse en su interior ha generado nuevas incógnitas, algunas de las cuales no han podido resolverse.

No se ha podido establecer como, dada la válvula *Polonceau*, las excéntricas eran capaces de transmitirle el movimiento adecuado a la misma, pero sí que se han sugerido hipótesis, como la existencia de un doble eje concéntrico al que fueran conectadas las excéntricas. Sin embargo, las hipótesis que han realizado sobre la Máquina en multitud de ocasiones, por las condiciones de la misma, no ha sido posible comprobarlas.

En cuanto a la parte del proyecto referida al diseño, los resultados son ciertamente satisfactorios. El traslado de las piezas al entorno de CATIA, aún con las incertidumbres y dificultades derivadas de su situación, ha conseguido plasmar un elevado nivel detalle, siendo este considerablemente superior al que se aprecia con un simple vistazo de la Máquina. Este objetivo, por tanto, se ha conseguido.

Sin embargo, aunque el objetivo anterior se cumpliera, el correspondiente a conseguir unas medidas fiables solo ha podido alcanzarse en parte. Hay multitud de piezas diseñadas con una precisión en las dimensiones superior incluso a la propia de fabricación de los elementos. No obstante, otras carecen de dicha precisión por la imposibilidad de realizar las medidas adecuadas con los medios disponibles.

De este modo, el diseño de la base de la Máquina o la parte visible de la distribución y el cilindro contrasta con el propio del balancín o de la parte no visible de la distribución.

En lo que respecta a los ensamblajes, incluso con las dificultades derivadas de la incertidumbre de las dimensiones de las piezas, también se puede considerar como un resultado posible. En la mayoría de los casos, como en el cilindro o el paralelogramo de Watt se ha conseguido solventar el problema anterior y construir un conjunto que desde luego se asemeja a la realidad.

Para realizar lo anterior, se ha adquirido una destreza con CATIA que posibilita afrontar al menos el diseño y el ensamblaje de conjuntos de una complejidad elevada como es el caso de la Máquina. En este programa, la creación de planos de piezas es prácticamente automático, por lo que se disponen de todos los planos de todas las piezas diseñadas.

Por último, el trabajo realizado tanto en la investigación como en el diseño, puede considerarse sin dudas como la base sobre la que los proyectos futuros en relación a la Máquina puedan apoyarse. Tanto la aspiración de realizar simulaciones de movimiento de la Máquina o de construir una maqueta de la misma, pueden partir con seguridad del proyecto desarrollado.

7 IMPACTO DEL PROYECTO

Este apartado, en consonancia con el siguiente acerca de las posibilidades que se abren a partir del proyecto, pretende mostrar la importancia del mismo, el impacto y las consecuencias que se derivan de su realización. Sin embargo, en este sentido únicamente se tratarán aspectos relacionados con el aspecto socioeconómico, ya que realmente, el impacto ambiental del proyecto puede considerarse como prácticamente nulo. En las próximas líneas se hará referencia a esta última cuestión.

El trabajo realizado en este proyecto, tanto en lo que respecta a la parte investigadora, como en lo que se refiere a la parte práctica, tiene una gran importancia para varios grupos de interés. El primer y principal de ellos, es la propia Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, y con ella, la Universidad Politécnica de Madrid. También sería posible incluir aquí a la Napier Power Heritage Trust, por su interés en conocer los avances del proyecto.

La importancia de la Máquina, demostrada por multitud de argumentos previamente expresados, requiere disponer de toda la información posible acerca de ella. Y esta información, es la que en parte este proyecto ha podido ofrecer. Gracias a ella, y a otras investigaciones que puedan surgir a partir de la realizada, será posible acercar la Máquina y su pasado al público. Pero no a un público cualquiera, sino que todos aquellos que diariamente trabajan y estudian en la ETSII podrán conocer con detalle aquello en lo que se ven representados.

Al grupo anterior, verdaderamente nutrido, se unen todas aquellas personas que acuden a la ETSII a causa de eventos, ferias y conferencias de gran relevancia. De este modo, la Máquina podría perder esa invisibilidad que la costumbre de convivir con ella la puede rodear, recobrando un protagonismo que siempre mereció tener.

La investigación realizada en este proyecto ha vuelto a poner la Máquina ⁴debajo de los focos y ha puesto los cimientos para un conocimiento más profundo y pleno de la misma. Esto se debe no solo a lo que se ha descubierto, sino también a aquello que las investigaciones han puesto de manifiesto que no se sabe sobre la Máquina.

Cuando las maravillas se aprecian a distancia, muchas veces se comete el error de suponer que se conocen, puesto que, cuando se miran de cerca, se aprecian detalles y particularidades de las que no se conocía su existencia. Esta puede ser en ciertos casos la situación que se ha vivido con la Máquina durante mucho tiempo. Este proyecto pretende ponerla fin, arrojando luz sobre algunos de los secretos que escondía.

Todo lo anterior no hace referencia únicamente a la investigación sobre el origen de la Máquina, pues también es aplicable a la exploración de la misma, así como a su medición. El hecho de medir las piezas, caracterizarlas y diseñarlas, aporta un conocimiento de la Máquina igual o incluso más importante que todo el anterior.

En cuanto al impacto medioambiental, simplemente se debe mencionar, de un modo anecdótico, la cantidad de polvo y suciedad acumulada durante décadas en el interior de la Máquina, parte de la cual pudo ser liberada al exterior en el momento en el que se investigó dicha parte.

Por último, el presente proyecto es relevante y tiene consecuencias actuales (conocimiento de la Máquina), pero también futuras, pues ha puesto los cimientos de una serie de proyectos que se desprenden de este y que se explican en el próximo apartado.

8 LÍNEAS FUTURAS

A lo largo de este escrito sobre la Máquina se han ido introduciendo las posibilidades que se abren a partir de este proyecto. Dichas opciones, dichas líneas futuras, se desarrollan con profundidad en las siguientes líneas.

Este proyecto ha construido la base de otros trabajos que con seguridad se desarrollarán en relación a la Máquina. Entre estos trabajos, es posible identificar un objetivo primordial, y no es otro que transformar este primer modelo de la Máquina en una maqueta de la misma plenamente funcional. Dicha maqueta se construiría a partir de piezas fruto de la impresión 3D, con un material que en este momento no es posible aventurar.

Las piezas anteriores, deberán proceder de un modelo diseñado en un ordenador, y es en este punto en el que entra en juego el modelo construido. Probablemente, las piezas que aquí se han compartido, necesitarán de un proceso de refinamiento y adaptación a los requerimientos de la impresora con la que se afronte la materialización de las mismas. Previamente, se deberá alterar el diseño, con modificaciones en la dimensión y la posición de las piezas, así como con la construcción de aquellas que no están presentes en la Máquina, con la intención de conseguir un movimiento similar al que tendría en funcionamiento. Dicho cometido no será sencillo, por todas las razones esgrimidas en páginas anteriores, que colaboran para alejar al modelo de la realidad. Además, el objetivo perseguido en este proyecto, relacionado con el detallismo del modelo, deberá ser trasladado a la futura maqueta con la mayor fidelidad posible. Al fin y al cabo, la intención siempre fue la misma, es decir, disponer de una maqueta (funcional) lo más parecida posible a la Máquina de la ETSII.

Por otro lado, a la hora de realizar esta adaptación y posterior impresión, deberá tenerse en cuenta que el objetivo no es únicamente que las piezas sean capaces de moverse. La maqueta construida, deberá estar habilitada para funcionar con la aportación de trabajo de un fluido. Un fluido que podría ser vapor o aire comprimido. Entre ambos u otro fluido ya no se está en disposición de asumir nada con seguridad, pero lo que si se puede afirmar con bastante certeza, es que la maqueta carecería de condensador. No tendría mucho sentido dada su funcionalidad, además de que si el fluido es aire comprimido el condensador cobraría menos sentido aún. Lo más probable será que dicha decisión dependa de las fuentes de dichos fluidos disponibles y adaptables, por ejemplo, a una sala de exposición o a la Sala de la Máquina misma. Desde luego, la idea no será emplear una caldera en la que quemar carbón para generar vapor, y tampoco lo será para la siguiente proyección de este trabajo.

Tras la concreción del modelo diseñado en una maqueta funcional, surge un proyecto aún más ambicioso, y por tanto, también en un plazo más lejano. En apartados anteriores se ha hablado de la máquina de vapor conocida como *The Hopwas Beam Engine* de su localización y su origen. También, se ha comentado que ciertos días al año, los *steam up days*, la máquina en cuestión se pone en funcionamiento a modo de exhibición. Por lo tanto, ¿por qué no aspirar a lo mismo con la Máquina?

Desde luego, sería un espectáculo digno de contemplar, y causaría una gran expectación entre muchas personas, de Madrid, de otras regiones de España y de más lejos aún. La Sala de la Máquina estaría abarrotada de personas interesadas en deleitarse con el movimiento alternativo del émbolo y del balancín, traducido en revoluciones de un volante de inercia de proporciones asombrosas.

Obviamente, este proyecto podría ser dividido a su vez en otros de menor entidad, puesto que las actividades necesarias para conseguir el objetivo anterior son numerosas y para nada sencillas. Para empezar, habría que realizar un estudio sobre el estado real de las piezas, es decir, si estas tendrían la capacidad suficiente para soportar los esfuerzos y tensiones a los que serían sometidas. En consecuencia, habría que plantearse si sería necesario aportar algún tipo de refuerzo a las mismas, o si, directamente, se requeriría su sustitución. No en vano, hay que tener en cuenta que en la rueda dentada es posible apreciar una fractura de importante magnitud. Además, nuevas piezas tendrían que ser fabricadas, para realizar las

funciones de aquellas que faltan hoy en día. Está claro, que no harían falta todas ellas, pues la presencia del condensador no sería necesaria, al menos para un funcionamiento destinado a la exhibición.

Por otro lado, como se ha comentado también en otras ocasiones, ciertas partes de la Máquina tendrían que ser recolocadas, como en el caso del eje invertido. A esto se suma la necesidad de levantar el eje inclinado para igualar en altura ambos extremos del mismo, con la complejidad que ello implicaría. No menos complejo resultaría destapar el cilindro, cuya tapa es de cierto tonelaje, para observar el interior del mismo y el estado del émbolo. Además de todo lo anterior, y probablemente antes de muchas de las acciones comentadas, sería necesario llevar a cabo una limpieza en profundidad, en especial de la parte inferior de la Máquina. Esto podría ayudar a dilucidar algunas de las incógnitas que han rodeado al presente proyecto.

Las actividades no terminan aquí, puesto que la Máquina se encuentra actualmente inmovilizada, con su árbol bloqueado por una gruesa capa de cemento. La plataforma que la rodea y que actúa de banco y lugar de encuentro en multitud de ocasiones, tendría que ser parcial o totalmente demolida a favor de la Máquina. Estos y otros trabajos que se podrían aventurar, no son más especulaciones sobre el futuro. Especulaciones que desde el punto de vista del presente proyecto se espera que algún día lleguen a ver la luz, y de este modo se convertiría en el primer paso hacia dicha realidad.

Como consecuencia, tanto para la construcción de la maqueta, como para la movilización de la Máquina, se requiere la contribución de voluntades enfocadas a la consecución del objetivo. Son muchos los aspectos a tratar y a valorar a la hora de afrontar un proyecto como este. Además es posible que nunca llegase a ver la luz, que las dificultades fueran tantas que llegase un momento que sean insalvables.

A lo anterior se une que se trataría de un proyecto que no dejaría indiferente a nadie, es decir, que afectaría a muchas personas que en su día a día atraviesan por la Sala de la Máquina. Como consecuencia, habría que tener en cuenta este aspecto, al que se añade la disposición del permiso necesario para llevarlo a cabo. Este permiso, si es que algún día se llegase a concretar, lo más probable es que retrasara aún más el proyecto. Por supuesto, la idea de mover la Máquina siempre se encontrará en un nivel inferior a aquello que concierne a la seguridad. Hay que asumir que las diferentes tareas de reacondicionamiento pueden poner de manifiesto un peligro para la integridad de las personas inasumible. Además, también debe prevalecer la conservación de la Máquina. Habría que plantearse si es posible asumir el riesgo de perder la Máquina para siempre, por lo que, ninguna decisión tomada al respecto debería carecer de una reflexión importante detrás.

Por último, también en epígrafes previos se anticipó una posible aplicación de los conocimientos adquiridos sobre la Máquina de la ETSII. Los trabajos que se pudiesen realizar a partir de este proyecto siempre estuvieron claros desde un inicio, por así decirlo, siempre se ha pretendido aspirar ello. No obstante, durante el desarrollo del mismo se ha reparado en la desinformación y el desconocimiento que rodea a la Máquina, al mismo tiempo que se han encontrado otras máquinas alrededor del mundo, con una antigüedad similar a la misma, y que se encuentran totalmente documentadas.

No es el caso de la Máquina, pues la información que se ha podido obtener de ella no ha venido en ningún caso desde la propia ETSII. Aunque es cierto que la Máquina es un motivo de orgullo y de identificación de muchos de los que forman parte de la Escuela, no se ópresumeôlo suficiente de ella. Representa a la ETSII, se erige como una parte fundamental de su patrimonio, y como tal debería tener un sitio privilegiado.

Físicamente, dispone de él, eso es cierto, pero solo en lo que supone la ocupación de un espacio importante. Por lo tanto, ¿por qué no disponer paneles explicativos que permitan a aquellos que lo lean conocer la Máquina? Su origen, su explicación y su función, las cuales en su mayor parte se han explorado en el presente texto, podrían plasmarse con facilidad para cumplir el cometido planteado.

Por otro lado, virtualmente no dispone de espacio alguno. No existe en la página web de la ETSII, un apartado específico en el que se muestre, y se informe, de lo que supone aquello en lo que cualquier persona que entre a su edificio va a reparar. De este modo, se plantea aquí la oportunidad futura que existe de dotar a la Máquina del status que se merece dentro de la historia de una institución como la ETSII. Además, tanto en la web como en los paneles planteados podría incluirse sin ningún reparo los otros proyectos que se desprenden de este trabajo, pudiendo ser actualizados según estos fueran avanzando.

Las ideas tratadas en este apartado, pueden concentrarse en tres ideas principales:

- Adaptación del modelo creado a su impresión 3D, con la materialización del mismo en una maqueta funcional.
- Reacondicionamiento de la Máquina para posibilitar a medio-largo plazo, su movimiento, garantizando la seguridad por encima de todo.
- Disponer al público de una información profunda y precisa de los diferentes aspectos que rodean a la Máquina, como su origen y función.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. López, 9 Noviembre 2014: https://www.youtube.com/watch?v=qvS_Y1cyXP8.
- [2] O. H. W. Heepke, *La Escuela del Técnico Mecánico*, 2 ed., Barcelona-Madrid: Labor S.A, 1943.
- [3] E.Latzina, *Motores de vapor. Máquinas de émbolo*, Buenos Aires, 1928.
- [4] J.Dejust, *Machines a vapeur et machines thermiques diverses*, 12 ed., París: Dunod, 1925.
- [5] A. Guillemin, *El mundo físico*, Barcelona: Montaner y Simón, 1893.
- [6] Sibyla, «quhist,» 7 Agosto 2012.
- [7] K. Gopalakrishnan, «James Watt: Father of Steam Power,» *Resonance*, Junio 2009.
- [8] K. Grewe, *La máquina romana de serrar piedras. La representación en bajorrelieve de una sierra de piedras de la antigüedad*, en *Hierápolis de Frigia y su relevancia para la historia técnica*, 2010.
- [9] J. D. d. I. C. Cano, «MecFunNet,» 29 Enero 2000:
<http://mecfunnet.faii.etsii.upm.es/Xitami/webpages/reguwatt.html>.
- [10] G. d. M. M. F. y. P. José de Lorenzo, *Diccionario marítimo español*, 1865.
- [11] Available: <http://www.npht.org/products/4577704013>. [Último acceso: 2018].
- [12] Institution of Mechanical Engineers, 2015:
<http://archivecat.imeche.org/CalmView/TreeBrowse.aspx?src=CalmView.Catalog&field=RefNo&key=NAP>.
- [13] Institution of Mechanical Engineers, 2016:
<https://archives.imeche.org/archive/engines/boulton-watt/591791-messrs-grimshaw-webster-hills-and-scarth?>.
- [14] Museo de la Casa de la Moneda de Madrid. [Último acceso: Julio 2018].
- [15] *Cien años de historia. Fábrica Nacional de Moneda y Timbre*, 1994, pp. 33-37.
- [16] *El museo universal, El museo universal*, 2 Diciembre 1866.
- [17] Zegri, *ABC*, 11 Mayo 1914.
- [18] Duque, *ABC*, 15 Mayo 1917.
- [19] *ABC*, 16 Julio 1929.
- [20] J. J. Maluquer, *DYNA. Revista de la Asociación Nacional de Ingenieros Industriales*, nº 12, Diciembre 1944.
- [21] R. D. Cortés, «Los sueños de Jaime Watt,» *La Esfera*, 16 Mayo 1914.
- [22] Forncett Steam Museum: <http://www.forncettsteammuseum.co.uk/the-hopwas-beam-engine-spruce.html>.

- [23] T. Hawley, Steam Engine Valves. Riding Cut-Off Valves. Peculiarities And Merits Of The Different Styles.
- [24] H. Spangler, Works of Prof. H. W. Spangler. Valve-gear, Nueva York: John Wiley & Sons, 1890.
- [25] J. Weale, On the Facilities of the rotatory steam engine, Londres, 1838.
- [26] A. Gainé, *Publication industrielle des machines, outils et appareils*, 1857-1862.
- [27] E. Torrecilla, El gran libro de CATIA, MARCOMBO, 2009.

10 PLANIFICACIÓN

En primer lugar, las actividades principales del trabajo quedan recogidas en la Figura 203, que se corresponde con la Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP) del mismo.



Figura 203: EDP

En lo que respecta a la planificación temporal del proyecto, los diferentes aspectos que se han ido recogiendo a lo largo de este escrito quedan plasmados en la elaboración de un diagrama de Gantt (Figura 204). Como se puede observar en él, la duración temporal del proyecto ha abarcado un total de 266 días, en los cuales las diferentes actividades se han ido desarrollando en la secuencia que se muestra.

Los diferentes bloques en los que se han agrupado los diferentes trabajos se corresponden, como no podía ser de otra manera, con la estructura que sigue el presente documento. De esta manera, estos bloques son, por un lado, los correspondientes a investigaciones, tanto sobre máquinas de vapor, como sobre la propia Máquina. Por otro lado, se encuentran aquellos que se refieren a la parte práctica del proyecto, con la toma de datos y el diseño y ensamblaje en base a dicha toma de datos.

Debido al proceso seguido en este trabajo, es posible observar un solapamiento importante entre las diferentes actividades, pues como ya se mencionó, el diseño de una pieza tenía lugar prácticamente de forma inmediata tras su medida.

Además, se ha distinguido entre el diseño de piezas visibles y no visibles. Esto se fundamenta en la necesidad de abrir la Máquina para poder acceder a estas últimas, de tal modo que su diseño, aunque intermitente por dicha condición, se ha desarrollado en un intervalo de tiempo superior.

Por otro lado, es llamativa la duración de las actividades de investigación, que comienzan con la búsqueda de posibles fuentes de información que satisficieran las necesidades del proyecto, y terminan con las investigaciones realizadas en las sucesivas exploraciones del interior de la Máquina.

Por último, debido a la estructuración implementada en el diagrama, la existencia de actividades que se erijan como precursoras de otras es prácticamente nula. Además, se han marcado hitos que representan hechos importantes a lo largo del proyecto.

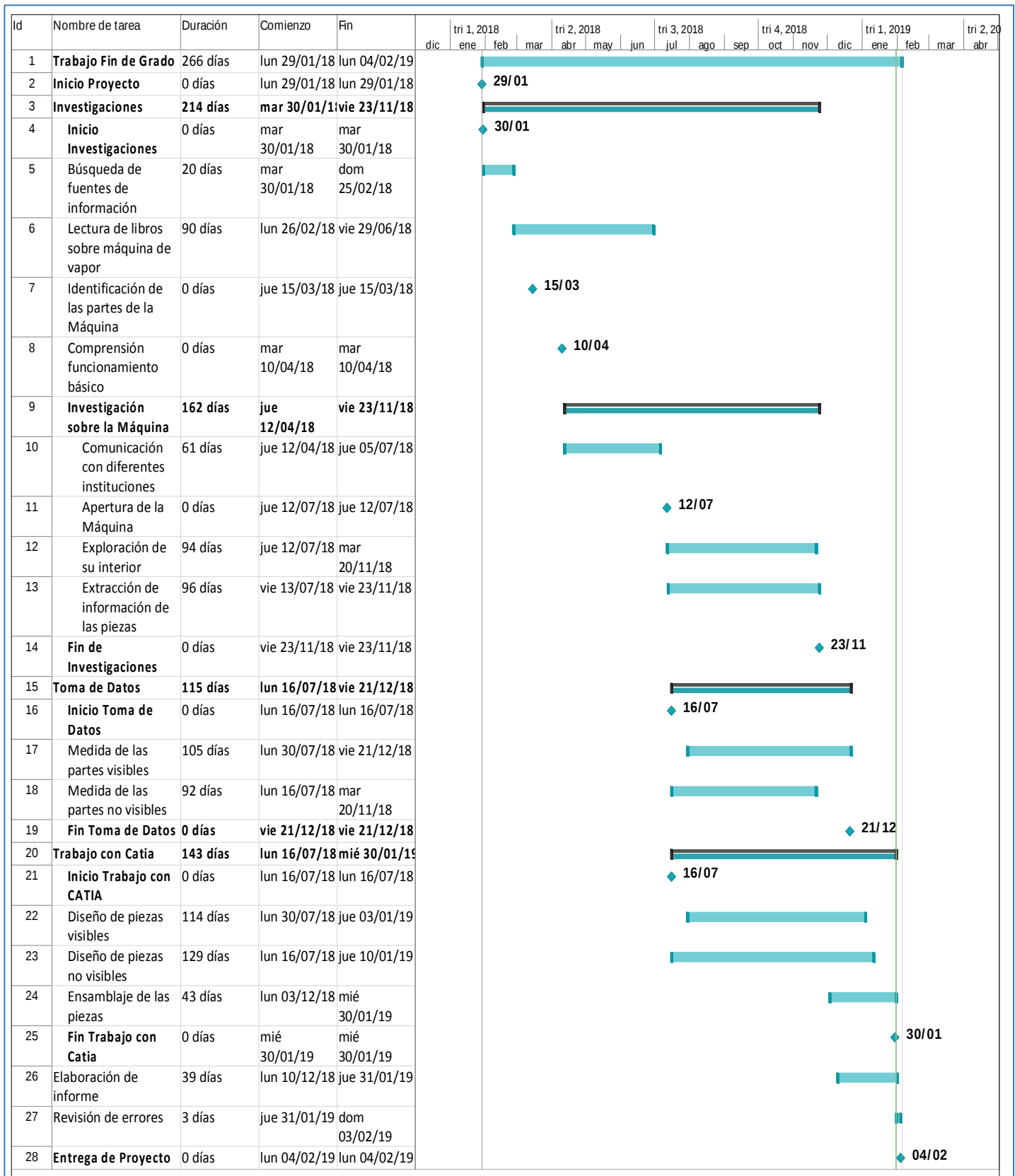


Figura 204: Diagrama de Gantt

11 PRESUPUESTO

A continuación, se realiza la descomposición en diferentes partidas del presupuesto para acometer el proyecto. De este modo, es posible distinguir entre los costes directos del mismo, en los que se agrupan, entre otros, los costes de software, amortización de los equipos y personal, e indirectos, como la iluminación y calefacción del lugar de trabajo. Este lugar de trabajo, ha sido fundamentalmente el Laboratorio de Motores Térmicos.

En cuanto a los recursos materiales, se consideran tres partidas distintas. Por un lado, la correspondiente a las herramientas empleadas para la medición, como son el pie de rey y el metro, aunque también desatornilladores, llaves inglesas y dinamométricas, y los boroscopios. En este caso, se consideran precios orientativos entre varios modelos de herramientas posibles.

Por otro lado, la amortización del ordenador del laboratorio empleado se estima en 30€, teniendo en cuenta el coste del mismo, los años de amortización y las horas empleadas en el mismo. Por último, se considera el coste de la licencia de CATIA, con la particularidad de la rebaja que supone su empleo como estudiante.

Tabla 1: Recursos materiales

COSTES DIRECTOS RECURSOS MATERIALES	
Herramientas (total)	375 €
Metro	5 €
Pie de rey	10 €
Desatornillador	5 €
Llave inglesa	30 €
Llave dinamométrica	25 €
Boroscopio (x2)	300 €
Amortización ordenador sobremesa	30 €
Software (Licencia CATIA)	100 €
TOTAL	505 €

En lo que respecta a los recursos humanos, en la Tabla 2 se incluyen las horas trabajadas por las diferentes personas del proyecto, junto el coste horario de cada una de ellas, dando lugar al total requerido.

Tabla 2: Recursos humanos

COSTES DIRECTOS RECURSOS HUMANOS			
	HORAS	COSTE HORARIO	Coste total
Alumno	550	16 €/h	8.800 €
Tutor del proyecto	55	38 €/h	2.090 €
Personal Técnico de Laboratorio	20	22 €/h	440 €
TOTAL	-	-	11.330 €

Por último, el presupuesto total del proyecto se incluye a continuación, incorporando a los subtotales anteriores los costes indirectos y el IVA (21%).

Tabla 3: Costes totales

COSTES TOTALES PROYECTO	
Costes directos RECURSOS MATERIALES	505 ü
Costes directos RECURSOS HUMANOS	11.330 ü
TOTAL costes directos	11.835 ü
Costes indirectos (3% costes directos)	355,05 ü
Total sin IVA	12.190,05 ü
IVA (21%)	2.559,91 ü
TOTAL	14.749,96 ü

12 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Revista encontrada.....	9
Figura 2: Diseño Máquina	11
Figura 3: Escudo de la ETSII.....	15
Figura 4: Escudo de la ETSII en una de sus ventanas	15
Figura 5: Maqueta de una máquina de vapor tipo Watt	16
Figura 6: Eolipila de Herón de Alejandría [6]	22
Figura 7: Artefacto de Papin [5]	23
Figura 8: Amigo del Minero de Savery [5].....	23
Figura 9: Máquina de Newcomen [5]	24
Figura 10: Máquina de la ETSII con numeración de sus diferentes partes (1)	27
Figura 11: Máquina de la ETSII con numeración de sus diferentes partes (2)	27
Figura 12: Biela-manivela.....	28
Figura 13: Regulador de Watt (1)	29
Figura 14: Regulador de Watt (2)	29
Figura 15: Esquema regulador de Watt [9]	30
Figura 16: Balancín (1)	31
Figura 17: Balancín (2)	31
Figura 18: Balancín (3)	31
Figura 19: Trayectorias balancín	31
Figura 20: Cilindro doble-efecto.....	32
Figura 21: Instrumentos cilindro	32
Figura 22: Distribución (1)	32
Figura 23: Distribución (2)	32
Figura 24: Secuencia de la distribución del vapor.....	33
Figura 25: Excéntrica (1)	34
Figura 26: Excéntrica (2)	34
Figura 27: Paralelogramo de Watt.....	34
Figura 28: Esquema del paralelogramo	34
Figura 29: Placa situada en la Máquina de la ETSII	35
Figura 30: Plano de una máquina de vapor tipo Watt [5]	36
Figura 31: Página principal de la Napier Power Heritage Trust.....	37
Figura 32: Archivos de D. Napier & Sons del Institute of Mechanical Engineers [12].....	38
Figura 33: Máquina de vapor [13].....	39
Figura 34: ÓActon Worksô[13].....	39
Figura 35: Patio de la Máquina de Vapor de la FNMT de Colón [14]	41

Figura 36: Local de la antigua máquina "Watt" [14]	41
Figura 37: Caldera FNMT [14]	42
Figura 38: Calderas de la Máquina de Vapor de la FNMT [14]	42
Figura 39: Máquina de Vapor de la FNMT [14]	43
Figura 40: ABC [17]	44
Figura 41: ABC [18]	45
Figura 42: ABC [19]	45
Figura 43: Avión junto a la Máquina [20]	46
Figura 44: La Esfera, 16 de Mayo de 1914 [21]	46
Figura 45: Inscripción presente en la base de la Máquina	47
Figura 46: Fecha de construcción de la Máquina	47
Figura 47: Máquina de la ETSII en 1914 [21]	48
Figura 48: Máquina en la actualidad	48
Figura 49: Fractura observable en la rueda dentada	49
Figura 50: Disposición actual de la zona inferior del cilindro	50
Figura 51: Disposición en 1914 de la zona inferior del cilindro [21]	50
Figura 52: Biela multi-agujereada	50
Figura 53: Biela multi-agujerada 1914 [21]	50
Figura 54: The Hopwas Beam Engine "Spruce" [22]	52
Figura 55: The Hopwas Beam Engine "Spruce" [22]	52
Figura 56: Válvula Gridiron	54
Figura 57: Válvula Polonceau	54
Figura 58: Metro	58
Figura 59: Pie de rey	58
Figura 60: Ejemplo de unión rígida	61
Figura 61: Ejemplo de unión articulada	61
Figura 62: Unión compleja	61
Figura 63: Vista del interior de la Máquina	62
Figura 64: Intento de ensamblaje	62
Figura 65: Ampliación vista interior de la Máquina	62
Figura 66: Conexión de excéntricas con el eje descubierto	63
Figura 67: Vista desde el interior de la conexión eje-excéntrica	63
Figura 68: Conexión eje-excéntrica	63
Figura 69: Perspectiva caja distribuidora (1)	64
Figura 70: Perspectiva caja distribuidora (2)	64
Figura 71: Tubería alimentación de vapor (1)	65
Figura 72: "Conexión" exterior con la válvula (2)	65

Figura 73: Válvula de mariposa	65
Figura 74: Escape al condensador (1).....	66
Figura 75: Escape al condensador (2).....	66
Figura 76: Escape al condensador (3).....	66
Figura 77: Parte inferior regulador (1).....	67
Figura 78: Parte inferior regulador (2).....	67
Figura 79: Parte inferior regulador (3).....	67
Figura 80: Parte inferior regulador (4).....	67
Figura 81: Ranuras para correa en múltiples posiciones	68
Figura 82: Ranura para correa en el árbol	68
Figura 83: Biela-manivela. Vista exterior	69
Figura 84: Biela-manivela. Vista interior	69
Figura 85: Máquina de vapor. Sistema de bombeo	70
Figura 86: Barra vertical conectada al balancín	70
Figura 87: Barra vertical. Vista inferior (1)	71
Figura 88: Barra vertical. Vista inferior (2)	71
Figura 89: Hueco barra vertical	71
Figura 90: Interior caja distribuidora	72
Figura 91: Doble válvula de corredera.....	72
Figura 92: Vista superior alimentación de vapor	73
Figura 93: Pantalla inicial de CATIA	77
Figura 94: Módulos de CATIA	78
Figura 95: Pantalla de PART DESIGN	78
Figura 96: Barra de introducción de comandos	79
Figura 97: Menú para configurar opciones en CATIA	79
Figura 98: Pieza con resolución baja.....	80
Figura 99: Pieza con resolución elevada	80
Figura 100: Icono para iniciar un sketch	80
Figura 101: Pantalla de sketch	81
Figura 102: Barra de herramientas de PLANE.....	81
Figura 103: Árbol de operaciones.....	81
Figura 104: Barra parte inferior Máquina	82
Figura 105: Detalle extremo inferior barra	82
Figura 106: Diseño pieza ejemplo (1)	82
Figura 107: Diseño pieza ejemplo (2)	82
Figura 108: Diseño pieza ejemplo (3)	83
Figura 109: Diseño pieza ejemplo (4)	83

Figura 110: Cuadro para añadir restricciones.....	84
Figura 111: Herramientas para transformar un sketch.....	84
Figura 112: Ejemplo PAD	85
Figura 113: Ejemplo SHAFT.....	85
Figura 114: Ejemplo POCKET.....	85
Figura 115: Ejemplo MULTISECTION	85
Figura 116: Cuadro de parámetros de una operación.....	85
Figura 117: Diseño pieza ejemplo	86
Figura 118: Pantalla ASSEMBLY DESIGN.....	88
Figura 119: Barra de herramientas para importar archivos.....	88
Figura 120: Ejemplo de empleo de FIX	89
Figura 121: Acceso a grados de libertad	89
Figura 122: Representación grados de libertad	89
Figura 123: COMPASS	90
Figura 124: MANIPULATE.....	90
Figura 125: Restricciones posibles.....	90
Figura 126: Barras con pesos centrífugos	93
Figura 127: Ranuras para correa.....	93
Figura 128: Diseño cilindro (1).....	94
Figura 129: Diseño cilindro (2).....	94
Figura 130: Instrumentos cilindro (1)	94
Figura 131: Instrumentos cilindro (2)	95
Figura 132: Tapa caja distribuidora	95
Figura 133: Proceso de creación de la base.....	96
Figura 134: Diseño de la base (1).....	96
Figura 135: Diseño de la base (2).....	97
Figura 136: Diseño de la base (3).....	97
Figura 137: Diseño de la base (4).....	97
Figura 138: Diseño cornisa.....	98
Figura 139: Pivote	99
Figura 140:Asiento cojinete	99
Figura 141: Vigüeta central.....	99
Figura 142: Diseño del balancín (1).....	100
Figura 143: Diseño del balancín (2).....	101
Figura 144: Diseño del balancín (3).....	101
Figura 145: Diseño del balancín (4).....	101
Figura 146: Paralelogramo 1914	102

Figura 147: Paralelogramo actual.....	102
Figura 148: Diseño cojinete	103
Figura 149: Barra vertical (1).....	103
Figura 150: Barra vertical (2).....	103
Figura 151: Paralelogramo completo (1).....	103
Figura 152: Paralelogramo completo (2).....	104
Figura 153: Cojinete del árbol.....	105
Figura 154: Cojinete del árbol en la base	105
Figura 155: Cojinete balancín	105
Figura 156: Cojinete ejes distribución.....	105
Figura 157: Cojinete eje subterráneo.....	106
Figura 158: Excéntrica (1)	107
Figura 159: Excéntrica (2)	107
Figura 160: Distribución (1)	107
Figura 161: Distribución (2)	107
Figura 162: Válvula (1)	108
Figura 163: Válvula (2)	108
Figura 164: Diseño unión entre barras cortas.....	108
Figura 165: Diseño unión entre barras (1)	108
Figura 166: Diseño unión rígida.....	109
Figura 167: Disposición real	109
Figura 168: Proceso diseño biela	109
Figura 169: Diseño biela (1)	110
Figura 170: Diseño biela (2)	110
Figura 171: Diseño biela (4)	110
Figura 172: Diseño biela (4)	110
Figura 173: Ensamblaje regulador (1)	112
Figura 174: Ensamblaje regulador (2)	112
Figura 175: Conexión cilindro barra distribución	113
Figura 176: Diseño conexión cilindro barra distribución.....	113
Figura 177: Conexión entre barras distribución	113
Figura 178: Diseño conexión entre barras distribución	113
Figura 179: Cilindro + distribución (1).....	114
Figura 180: Cilindro + distribución (2).....	114
Figura 181: Cilindro + distribución (3).....	115
Figura 182: Cornisa + cojinetes + balancín (1)	116
Figura 183: Cornisa + cojinetes + balancín.....	116

Figura 184: Diseño columnas	117
Figura 185: Columna.....	117
Figura 186: Columna alimentación vapor	117
Figura 187: Base + columnas + cornisa (1)	118
Figura 188: Base + columnas + cornisa (2)	118
Figura 189: Base + balancín + cojinetes (1)	119
Figura 190: Balancín + paralelogramo + cilindro.....	119
Figura 191: Base + paralelogramo + cilindro	120
Figura 192: Base + paralelogramo + cilindro	120
Figura 193: Base + distribución	121
Figura 194: Base + distribución	121
Figura 195: Máquina completa (1).....	122
Figura 196: Máquina completa (2).....	122
Figura 197: Máquina completa (3).....	123
Figura 198: Máquina completa (4).....	123
Figura 199: Máquina completa (4).....	123
Figura 200: Máquina completa (5).....	124
Figura 201: Máquina completa (6).....	124
Figura 202: Máquina completa (7).....	124
Figura 203: EDP.....	135
Figura 204: Diagrama de Gantt	137
Figura 205: La Esfera. Mayo de 1914 (1)	153
Figura 206: La Esfera. Mayo de 1914.....	154
Figura 207: Departamento estampación Fábrica de la Moneda. [16].....	155
Figura 208: Fundición Fábrica de la Moneda. [16].....	155
Figura 209: Artículo INTERIOR DE LA CASA DE LA MONEDA [16]	156

13 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Recursos materiales	139
Tabla 2: Recursos humanos.....	139
Tabla 3: Costes totales.....	140
Tabla 4: Abreviaturas	149
Tabla 5: Glosario de términos.....	151

14 ABREVIATURAS

A continuación, se incluyen las abreviaturas que se han empleado a lo largo del escrito.

Tabla 4: Abreviaturas

ABREVIATURA	NOMBRE
ETSII	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
UPM	Universidad Politécnica de Madrid
NPHT	Napier Power Heritage Trust
FNMT	Fábrica Nacional de Moneda y Timbre
EDP	Estructura de Descomposición del Proyecto

15 GLOSARIO DE TÉRMINOS

En este apartado se recogen aquellos vocablos, empleados en este escrito, cuyo significado no tenga por qué ser conocido. Como consecuencia, a continuación se incluyen herramientas y vocabulario propio de CATIA.

Tabla 5: Glosario de términos

PALABRA O EXPRESIÓN	SIGNIFICADO
PART DESIGN	Entorno de CATIA para diseñar sólidos
ASSEMBLY DESIGN	Entorno de CATIA para crear ensamblajes
CATPart	Extensión de archivos creados en PART DESIGN
CatProduct	Extensión de archivos creados en ASSEMBLY DESIGN
CatSettings	Lugar de la memoria en el que se guardan las preferencias de trabajo con CATIA
Sketch	Herramienta/Entorno básico para comenzar a diseñar sólidos
Árbol	Lugar donde se recogen las operaciones realizadas
PLANE	Herramienta para crear un plano auxiliar
PROJECT 3D ELEMENTS	Herramienta para proyectar elementos a un plano
CONSTRAINT	Herramienta para acotar longitudes, distancias, ángulos
CONSTRAINT IN A DIALOG BOX	Herramienta que permite definir relaciones de paralelismo, tangencia, simetría
SMARTPICK	Funcionalidad que ofrece CATIA para diseñar con restricciones automáticas
RECTANGLE	Herramienta que crea rectángulos
MIRROR	Herramienta para crear elementos simétricos
CORNER	Herramienta para crear radios de acuerdo en un sketch
QUICK TRIM	Herramienta para borrar elementos
PAD	Herramienta para crear sólidos a partir de un sketch
SHAFT	Herramienta para crear sólidos de revolución
POCKET	Herramienta para realizar vaciados
MULTISECTIONS SOLID	Herramienta para definir sólidos de sección variable
PATTERN	Herramienta para crear elementos siguiendo un patrón
EDGE FILLET	Herramienta para crear radios de acuerdo en sólidos
THREAD/TAP	Herramienta para crear elementos roscados
APPLY MATERIAL	Herramienta para aplicar material a un sólido
FIX	Herramienta para bloquear los grados de libertad de un sólido
COMPONENTS CONSTRAINTS	Restricciones que un elemento tiene aplicadas
COMPASS	Herramienta para mover y girar piezas
MANIPULATE	Herramienta para mover y girar piezas
COINCIDENCE CONSTRAINT	Herramienta para hacer coincidir elementos de un sólido con otros elementos de referencia
OFFSET CONSTRAINT	Herramienta para situar dos elementos a una distancia determinada

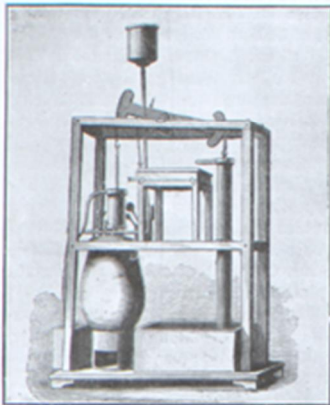
16 ANEXO

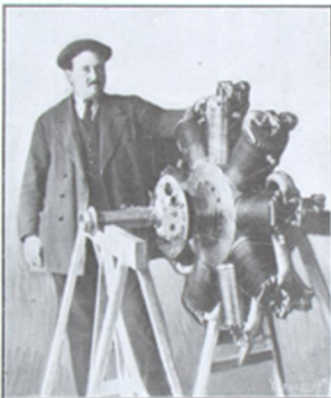
16.1 LA ESFERA. MAYO DE 1914

LA ESFERA

LA MÁQUINA DE VAPOR

LOS SUEÑOS DE JAIME WATT





Aparato de Newcomen, de cuyo arreglo fué encargado Watt y que señala el punto de partida de sus descubrimientos

Motor a vapor, de 80 caballos, que constituye la última palabra de la Mecánica en la generación de fuerza con pequeño volumen

JAIME WATT

Comenzó el año 1744 cuando la esposa del primer magistrado de Greenock, la bella población escocesa que apenas era en aquel tiempo una miseria aldea de pescadores, regresaba a su casa después de un corto viaje de que hubo precisión para recoger una pequeña herencia en su país natal. La buena señora, no queriendo dejar a su hijo en manos mercenarias, había recurrido a una amiga de cierta intimidad, confiándole su pequeño Jaime durante aquellos días de ausencia.

Era éste uno de esos niños pálidos, enfermizos, de una rebeldía pasiva para el estudio impuesto por los padres, con todos los caracteres, de una fecunda vida interior. Desarmaba en silencio sus juguetes, dibujaba círculos y paralelogramos complicados, observaba una vez y otra las gotas de vapor condensadas en la tapa de la vieja tetera, la impresión de una mancha de tinta en otro papel caído encima de ella... Para todos estos signos de la materia muda, tenía Jaime un gesto sombrío de investigador y en ocasiones una vaga sonrisa de iniciado. Tosía mucho, guardaba cama muchos días y en sus largos ratos de quietud sobre el plumón mullido por la madre, su débil imaginación volaba.

Aquel día, al regresar de su viaje la excelente dama y preguntar a su amiga noticias del niño, ésta respondió:

—Muy bueno, sí, demasiado formal; en todo el día no se le siente, pero al llegar el momento de acostarle, halla siempre la manera de entretenernos con algún cuento que trae detrás otro y otro después... Yo no puedo decirlos si él los inventa, pero esas narraciones tienen tal encanto que nos hacen olvidar el paso de las horas.

De este modo, como la de un poeta, poeta de las fuerzas y del movimiento, se abrió a la juventud el alma de Watt.

La dura realidad de una época difícil vino a encauzar más tarde los pasos errabundos del muchacho haciéndole pensar en ser útil a sí mismo. Primero en el taller de un humilde mecánico de Londres, y luego en el que le arbitrara para el arreglo de sus aparatos la Universidad de Glasgow. Jaime Watt penetró los secretos de las fuerzas que animan el mundo material y se familiarizó con el empirismo que presidía entonces toda su aplicación. Pero, sin embargo, la intensidad investigadora de Watt, no podía aceptar plenamente la rutina absoluta de su tiempo, que no pedía a las cosas explicación ninguna de su constitución y de su dinámica, limitándose a tomar aquellas fuerzas que la materia fuertemente quería ofrecer. Así le vemos absorbo un día y otro ante la vieja máquina de vapor que en la Universidad producía el asombro de los estu-

diantes escoceses con sus torpes movimientos de una lentitud desesperante, interrumpidos cada momento por misteriosos paros; era un modelo de aquella máquina que el cerrajero Newcomen y el cristallero Cowley habían producido como una maravilla de las artes mecánicas allá por los últimos años del siglo anterior.

Un día el pequeño aparato que apenas servía durante sus momentos de docilidad para insignificantes demostraciones recreativas, se paró definitivamente; su pesado émbolo no volvió a subir en el largo cilindro abierto a la luz, y la sencilla bomba unida a sus palancas dejó de elevar agua para siempre. Entonces fué cuando la Universidad encargó a Jaime Watt de su recompostura y de entonces también datan los trabajos fecundos, las inacabables meditaciones, los ingratos ensayos de su nuevo método.

La tarea era inmensa, más que suficiente para absorber a Watt todos los momentos de su existencia; no sólo en el sombrío laboratorio de la antigua casa universitaria, donde tomaban más aspecto de brujería sus artes milagrosas de mecánico, sino también durante el breve reposo que le brindaban los brazos amantes de su esposa, verdadera amiga de triunfos y desvelos, y en los solitarios paseos vespertinos por la orilla del Clyde que rodeaba la clásica ciudad como el collar de plata de una bella escocesa.

Porque Watt no fué nunca de esos hombres de ciencia hurafios, materiales, aferrados a sus teorías como parásitos de la verdad, incapaces de alentar un ensueño ni de sentir una emoción; el niño de Greenock seguía concibiendo siempre ideas poéticas y amaba sus fantasías con el mismo entusiasmo que el prestigio dorado del sol y la frescura suave del aire sobre el río.

De uno de estos paseos, según refiere el mismo en sus cartas al doctor Black, regresó un día acompañado por la primera idea feliz, que debía al cabo transformar los viejos aparatos en sus máquinas poderosas, convirtiendo en una realidad la generación de la gran fuerza. Watt tenía derecho a creer que soñaba una vez más, y en el insomnio de aquella noche memorable obsesionado con la primera presunción del triunfo, decidió que su vida entera, la obra de su vida estaba vinculada en aquel sueño.

En aquella ruda lucha valerosamente emprendida contra todo y con todos, Watt sintió muchas veces el desfallecimiento, la sensación anodante de su pequeñez, la amargura infinita de quien pelea solo y enfermo, sin otra arma que una certidumbre en la que nadie cree y de la que él mismo llegaba en ocasiones a dudar. Des-

aliento que se halla cristalizado en esta frase dirigida también a su amigo el gran químico: «De todas las locuras que podemos hacer en esta vida, la más insensata es perseguir un invento.»

Escribió esto en 1768; diez años más tarde, durante los cuales no conoció reposo, anunciaba oficialmente los felices resultados de su primera máquina, que, no obstante las naturales deficiencias, bastaba a atestiguar el paso de gigante que Jaime Watt acababa de imprimir a las máquinas de vapor y con ellas a la industria de todo el mundo.

Los pacíficos vecinos de Heatfield que recibían con tranquilo júbilo inglés noticias detalladas de la victoria definitiva lograda en Waterloo por las armas británicas y aliadas sobre los soldados del gran Bonaparte, saludaban afectuosamente a un agradable viejo que todas las tardes salía a disfrutar del sol por las afueras solitarias de la ciudad.

Aquel hombre, ingeniero ya retirado de los negocios a principios del siglo, poseía fortuna suficiente para disfrutar el resto de sus días la ociosidad que es clave de la dicha para todos los hombres; pero sin duda no participaba él de aquella opinión porque diariamente pasaba muchas horas encerrado en una gran habitación de su casa, entregado en cuerpo y espíritu a trabajos incomprensibles para aquellas buenas gentes, más atentas a sus obligaciones que a la tarea de descifrar misterios.

Contábanse de él cosas estupendas, triunfos ruidosos en las artes mecánicas, descubrimientos, ideas nuevas llevadas a la práctica con éxito asombroso. Los burgueses más ilustrados de Heatfield pronunciaban, unidas a su nombre, palabras extrañas para designar sus mejores inventos: el condensador, el regulador de fuerza centrífuga, el «paralelógramo», la prensa de copiar, las máquinas calculadoras, el volante, un modelo de coche movido por vapor... No faltaba algún vecino que había visto en Londres, al visitar la nueva fábrica de acuñar monedas, unas máquinas enormes que daban fuerza a todos los talleres y en cuyas cabezeras resaltaba el nombre del ilustre viejo.

Quien hubiera logrado penetrar en aquella vasta habitación de la casa, convertida en taller, habría encontrado multitud de objetos, venerables reliquias de antiguos trabajos o luminosas esperanzas de pensamientos nuevos, distribuidos entre sus útiles de labor cotidiana. Pero principalmente, la nota dominante en todas y cada una de las habitaciones, era el cúmulo de libros que cubrían las mesas, se alineaban en las estanterías y hasta se apilaban por el suelo junto a los viejos muebles; libros de todas clases y de todas

Figura 205: La Esfera. Mayo de 1914 (1)

LA ESFERA

tendencias, muestras fehacientes de la erudición alcanzada por el buen anciano. Un amigo suyo y gran admirador de sus talentos de ingeniero, el ya ilustre Walter Scott, hablaba de él por entonces en el prefacio de una de sus narraciones y atestiguaba con esmero que aquel soberano de los elementos, el hombre más dichosamente dotado para combinar fuerzas y calcular números, era al mismo tiempo un lector de novelas y versos tan entusiasta como una modistilla de quince años.

Por entonces el anciano se dedicaba en el misterio de su laboratorio al perfeccionamiento de una máquina de modelar en barro ideada por él. Nadie sospechaba la labor á que consagraba aquellos días el viejo maestro, y aun los más avisados pensaban en algún aparato construido con pesadas masas de hierro, sin más finalidad que girar y hacer fuerza, como aquellos otros que habían hecho célebre su nombre.

Por fin un día el buen sabio tornó á su casa acompañado de varios amigos, catedráticos y artistas de Birmingham, que venían de vez en vez á visitar en su retiro al más grande ingeniero de la época. En el taller, inundado de luz por la extensa ventana abierta como la de una chica al aire del jardín y al canto de los pájaros, el dueño de la casa les mostró complacido junto al modelo de un torso de mujer, hecho en mármol, una exacta reproducción en barro aún fresco. Detrás de ambas esculturas se desarrollaba un sencillo juego de palancas articuladas que era toda su máquina de modelar. Y la voz, ya quebrada, del gran hombre explicó entonces conosamente:



La primera máquina de vapor girata construida doscientos años antes de Jesucristo

—Señores, os presento la primera producción de un joven artista que apenas cuenta ahora ochenta y tres años.

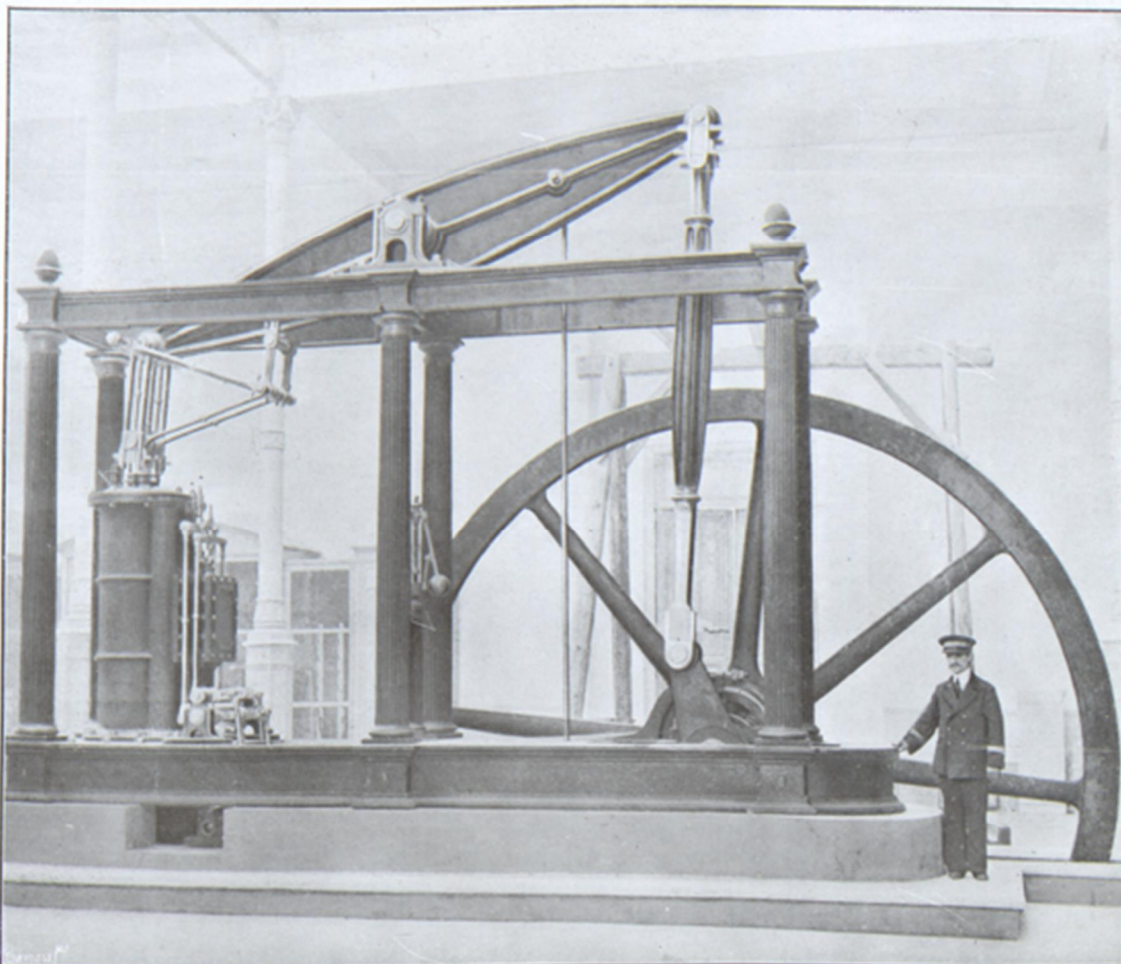
He aquí compendiada la historia de aquel niño que en Greenock interrogaba á las cosas en silencio, del hombre que más tarde recibió para su arreglo una máquina absurda é inútil y devolvió, en esencia y principios, la moderna máquina de vapor. Su ciudad natal, Glasgow, Birmingham y Londres han levantado monumentos que perpetúan el nombre y la elige del gran mecánico. El

Rey de Inglaterra, sus ministros y los nobles del reino se honraron después suscribiendo el epítalo que guarda sus restos en la Abadía de Westminster, Walhalla de los héroes ingleses.

ooo

En este mismo mes, y merced á una noble iniciativa de nuestros ingenieros industriales, ha sido montada en la nave central de su escuela, de Madrid, como reliquia histórica, la primera máquina Watt de uso industrial que funcionó en España. Construida en 1832, mereció la visita de la reina doña Isabel II y su corte, al ser instalada en la Casa de la Moneda por los años en que más enconadas eran las luchas entre moderados y progresistas. La vieja máquina, con sus recias columnas, su enorme balancín y su glorioso «paralelógramo» es otro monumento elevado á la memoria de Jaime Watt; el más elocuente porque representa el triunfo de sus amargos días hecho hierro por obra de su talento y su firmeza.

RICARDO DONOSO CORTÉS



Máquina de vapor de 25 caballos, sistema Watt, primera de sus condiciones importada á España y que ha sido instalada como curiosidad histórica en la Escuela de Ingenieros Industriales

POT. SALAZAR

Figura 206: La Esfera. Mayo de 1914

16.2 EL MUSEO UNIVERSAL, 1866



Figura 207: Departamento estampación Fábrica de la Moneda. [16]

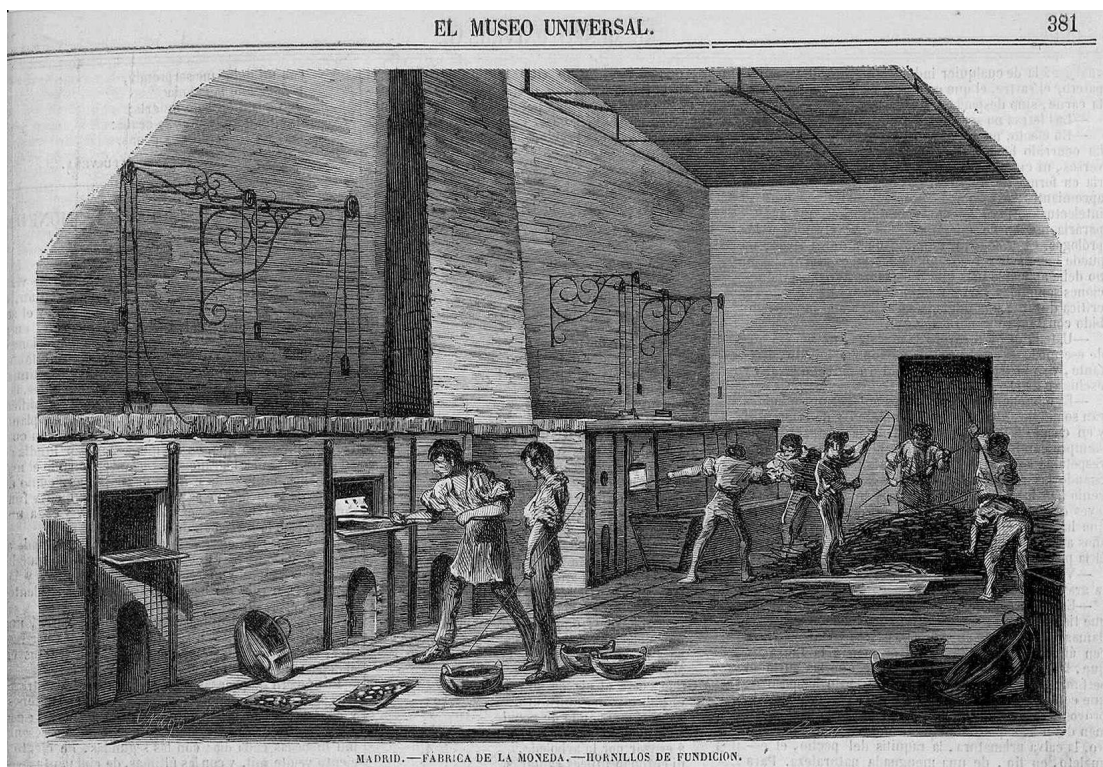


Figura 208: Fundición Fábrica de la Moneda. [16]

análoga á la de cualquier industrial. ¿Qué comen el zapatero, el sastre, el que comercia en vino y el que corta carne, sino despachan sus mercancías?

—Las letras no son artículos de primera necesidad. —En efecto, no deben asimilarse á ellos; á nadie le ha ocurrido hasta ahora matar el hambre comiendo versos, ni cubrir su desnudez con un pliego de historia en forma de montera. Las necesidades físicas son apremiantes, exigen mas pronta satisfacción que las intelectuales. Pero dejemos esta digresión, que nos separaría mucho de nuestro objeto, y volvamos á los prólogos. El prólogo, tratándose de autores vivos, no debe aplicarse mas que á personas, cuyas producciones sometidas varias veces á la piedra de toque de la crítica durante una dilatada serie de años, hayan recibido constante y general aplauso.

—Usted, que tan severo se muestra, no negará que de ese modo se establece un monopolio injusto, irritante, y se usurpa á la posteridad un derecho propio y exclusivo de ella.

—El monopolio existiría, si los autores no se hubieran sometido antes al fallo del público y de la prensa; y en cuanto á lo que dice usted de la posteridad, no siempre comienza el día en que el autor muere: esa respetable señora responde, y anticipa su aparición, cuando las repetidas obras de un autor de verdadero genio han logrado con su poderosa magia invertir las leyes que rigen el curso del tiempo, haciendo que lo que había de suceder mañana, suceda hoy. Muchos años antes de morir Quintana, había principiado para él la posteridad.

—Veo que da usted al prólogo casi la importancia y la gravedad de un delito.

—Es un error; le doy (salvas las excepciones) las que tiene, las de una engañifa; como sucede con esas damas de pega, que en salones, paseos y teatros parecen ángeles venidos por equivocación á la tierra, y que, bajo las rosas y los claveles de que las surte el perfumista para sus labios y mejillas, bajo los postizos que compran al peluquero para su cabeza, y bajo la provocativa moribidez del corsé aligodonado y el volumen del miriñaque, ocultan el color enfermizo del rostro, la calva prematura, la raquitis del pecho, el esqueleto, en fin, de una menguada naturaleza. Para concluir, el prólogo suele ser como el anuncio de un banquete babilónico, en el que las mesas, alumbradas por lámparas y candelabros de oro, estuviesen cubiertas de brillante vajilla y magníficos jarrones de flores, y en el que no se sirviese á los convidados mas que un cocido prosaico y vulgar; por principio, sardinas remojadas con un vinillo ordinario, y mal queso manchego de postre.

Después de estas palabras, levantóse mi interlocutor, tendió mi mano, que estrachó afectuosamente, fuése, y me puse á trabajar para ganarme el sustento. ¡Que si quieres! No habrían transcurrido seis minutos, cuando entró en mi despacho otro individuo, que venía con la pretensión de que le hiciese un prólogo: era sábado; magnífico fin de semana! El lunes, había asistido yo á una junta para establecer una sociedad de socorros mutuos de artistas y escritores, y compuesto un epitafio de encargo; el martes, recibí tres visitas de igual número de personas, que iban á verme; el miércoles, me invitaron para leer versos en una reunión de gente desocupada, y fui á la reunión; el jueves, oí pacientemente, por espacio de cuatro horas, la lectura de un drama, donde, por fortuna, solo morían la gramática y el sentido común; el viernes, tuve que corregir los versos de un individuo que se empeñaba en reparar al Parnaso, cuando lo que había que corregir era su entendimiento. La historia de esta semana es la historia de todo el año. ¡Dios mío, proporcióname una buena renta, ó inspírame el medio de vivir sin trabajar, para dedicarme á complacer á todo el género humano!

VENTURA RUIZ AGUILERA.

PALACIO DE MIRAMAR,

RESIDENCIA ACTUAL DE LA EMPERATRIZ DE MÉJICO.

Nuestros lectores conocerán, sin duda alguna, la triste historia de la enfermedad mental que hace poco atacó en Roma á la amable y distinguida esposa del archiduque Fernando Maximiliano de Austria, emperador de Méjico. La situación aflictiva de esta desgraciada princesa, hija del difunto rey de los belgas, Leopoldo I, parece debida á los disgustos ó inquietudes propios de la misión que la condujo á Europa, y de la cual se ha hablado en términos vagos por toda la prensa; pues la verdad es, que nadie ha podido hasta ahora hacer otra cosa que discurrir sobre suposiciones ó conjeturas, mas ó menos fundadas. La salud de la augusta enferma ha experimentado diferentes alternativas en poco tiempo, ya haciendo concebir esperanzas de próxima curación, ya, por el contrario, agravándose la dolencia en términos, según lo anunciado por varios periódicos, de hacer ilusorias aquellas esperanzas. La augusta enferma vive actualmente en un retiro absoluto, cerca de Trieste, en su palacio llamado de Mira-

mar, que se halla en un sitio pintoresco, desde el cual se dominan las playas del Adriático y el ferrocarril que conduce á Viena por el paso de Sömmerring. El grabado que hoy damos, es copia de una aguada del de un distinguido profesor alemán.

¡POBRE TERESA!

I.

¡Mirad qué grupo de gentes delante de aquella puerta!... ¡Mirad cómo están llorando las muchachas de la aldea!... ¡Oid, oid cómo dicen!... «Ayer ha muerto Teresa; ¡la mas bonita del pueblo; ¡era tan jóven, tan buena!... ¡ya no la veremos nunca, ¡dentro de poco la enterrarán!...» ¡Mirad á los fieles todos congregados en la iglesia y alzando á Dios sus plegarias por el alma de Teresa, mientras fúnebre campana de su muerte se lamenta. ¡Mirad el cielo, ¡qué triste!... ¡mirad la tierra, ¡qué seca!... ¡mirad los ojos de todos, vereis las profundas huellas de las lágrimas amargas que están vertiendo por ella!... ¡Mirad las flores marchitas, y el sol, que, oculto entre nieblas, con dolor desaparece para no alumbrarla muerta. ¡Mirad aquel arroyuelo que corre al pie de su reja: el pobre ya no murmura... ¡se está muriendo de penal... y ya ni el aire se atreve á cruzar por la arboleda, ni entonan dulces cantares las avecillas pariendo, que los pájaros no viven donde vive la tristeza. ¡Ya no bailan las muchachas, nadie rie, todos rezan... que del pueblo la alegría avergonzada se aleja, y todo muerto parece desde que murió Teresa!...

II.

¡Mirad... ya van á enterrarla: ¡cuánta gente vá tras ella!... ¡todos lloran y suspiran, y hasta los cirios que lleva, alumbrando tristemente con su luz amarillenta, tambien bañan el camino con sus lágrimas de cera!... Ya llegan al cementerio, ya la ponen en la huesa, y el sepulturero forma débil tabique de piedras, que vá á ocultar para siempre el cadáver de Teresa.

III.

Todo acabó... ya las gentes del cementerio se alejan, y todos tristes murmuran Y... nadie de mí se acuerda. ¡Y yo por ella viva, y ahora me muerdo sin ella! ¡Miradlos: ¡quizá mañana cuando la aurora aparezca y el sol sin ninguna nube á alumbrar el campo venga, y canten las avecillas, y susurre la arboleda, y el arroyuelo murmure, y aquí la alegría vuelva, ¡quizá mañana, ninguno se acordará de Teresa, que todo en el mundo acaba y mueren pronto las penas.

Sólo yo, que por su muerte estoy con mi vida en guerra, yo solo al pie de su tumba pasaré noches enteras: ¡y mientras alegres dancen las muchachas de la aldea, y no se acuerde ninguna de que se la murió Teresa yo aguardaré á que la muer-

con mi dolor me sorprenda, padeciendo la agonía de verla á mi lado muerta; que todo en el mundo acaba: mas no acabarán mis penas.

RICARDO SEPÚLVEDA.

INTERIOR DE LA FABRICA DE LA MONEDA,

DE ESTA CÔRTE.

En números anteriores de El Museo habrán visto nuestros suscritores dos grabados, que representan, el primero el esterior de la Fábrica de la moneda, y el segundo el salon ó departamento de la acuñación, en el cual, además, se ejecutan algunas otras operaciones. Con el fin de completar la idea de este notable establecimiento, hemos adquirido los datos que á continuación se espresan, y que, con los grabados restantes, llenarán cumplidamente nuestro objeto. Consta el edificio de planta baja, piso principal y dos de planta, con cuatro hornillos cada una, en los que se pueden fundir de cuatro á seis mil kilogramos diarios, dependiendo el mas ó el menos, tanto de la calidad de las pastas, como de la clase de moneda que se váya á fabricar: dichas fundiciones están servidas por once operarios, y cada una de ellas bajo la direccion de un ensayador.

Las oficinas de ensayos son tres; una, destinada al director de ensayos, que hace pocos años se titulaba ensayador general y marcador mayor del reino, y las otras dos para los dos ensayadores, con dos suplentes y cuatro operarios.

En el salon de máquinas hay ocho laminadores, una hilera, cuatro cortes y un tórculo, fabricados por Napier, con mas una hilera y ocho cortes construidos en el departamento de máquinas.

El número de prensas monetarias asciende á trece: tres para duros y escudos, seis para pesetas y centenes, y cuatro para monedas de oro y plata pequeñas; con las primeras, se pueden acuñar de cincuenta á sesenta mil monedas cada día; con las segundas, de ciento á ciento veinte mil, y con las últimas, de cincuenta á sesenta mil. De dichas prensas, ocho han sido construidas en Barcelona y las cinco restantes en el extranjero. Así estas prensas, como la maquinaria toda, corresponden á los últimos adelantos, tanto por su belleza, cuanto por lo mucho que facilitan y perfeccionan las operaciones.

Para el peso de las monedas están destinadas seis balanzas automáticas, dirigidas por el juez de balanza, un ayudante y los operarios correspondientes; para el recocho hay cuatro hornos y una oficina de blanqueamiento. El motor que impulsa todas las máquinas, es un magnífico vapor Napier, sistema Wall, de expansión varia y fuerza de veinte y cinco caballos. En este gran taller entran los metales en barras, tal cual se sacan de la fundición, y de él sale ya la moneda acuñada. El servicio de las prensas está á cargo de un guarda-cuinos, cuatro acuñadores de planta y algunos operarios, y el taller á cargo de un jefe de labores, con intervención del superintendente, contador y ensayadores. En dicho salon, se ven, además, el gran volante de linchar los troqueles y los antiguos y bien contruidos volantes con que se acuñaba en la calle de Segovia: los operarios para estos servicios son ciento, con sueldo de 10 reales diarios y seis capataces que ganan 14 y 16.

El departamento de máquinas y el beneficio de tierras tambien se hallan en la planta baja, y en él se forjan las máquinas y se construyen algunas nuevas: tienen cinco tornos generales con bancos de hierro, donde se puede hacer toda clase de roscas hasta de 6 metros de largo; otros cinco tornos sencillos para troqueles esmerilados de cilindros, etc.; taller de lima con cuatro máquinas de cepillar, en una de las cuales se pueden colocar piezas de 3 metros de largo por 4 de ancho; dos máquinas de taladrar y una tijera que puede cortar y horadar barras de un centímetro de espesor; y en fin, taller de temple con cinco hornillos y siete fra-en fin, taller de temple con cinco hornillos y siete fra-en fin, taller de temple con cinco hornillos y siete fra-en fin, taller de temple con cinco hornillos y siete fra-

Dichas máquinas, lo mismo que el beneficio de tierras, son movidas por una de vapor, vertical, de estierpas variable y ocho caballos de fuerza, construida en Barcelona. Estos talleres se hallan bajo la direccion de un maquinista, un ayudante y unos veinte operarios.

El resto de la planta baja está ocupado por las oficinas administrativas, y en él se hallan la habitacion del jefe de labores, el tesoro, y los talleres que se preparan para la acuñación del bronce. En el piso principal tienen las suyas el superintendente, el tesoro y el contador; y en el segundo el grabador general y el contador; aquí tambien se encuentra el departamento del grabado, donde se tallan los troqueles por diez grabadores y alumnos; hay, además, tres meritorios. En el referido departamento, á cargo del grabador general, se custodian los troqueles y las matrices generales, y hay algunos modelos, un pequeño monetario y una máquina de reduccion.