



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Conocimiento de Ingeniería de los Procesos de Fabricación

TRABAJO FIN DE GRADO

DIGITALIZACIÓN DE MÁQUINAS-HERRAMIENTA HISTÓRICAS COMO MEDIO DE CONSERVACIÓN Y TRANSMISIÓN DEL PATRIMONIO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: D. Javier Ignacio Galarza González

Tutor: D. Sergio Martín Béjar

Cotutor: D. Francisco Javier Trujillo Vilches

MÁLAGA, Julio de 2025

Resumen

La conservación del patrimonio industrial resulta esencial para comprender la evolución tecnológica y los procesos que impulsaron el desarrollo de la sociedad y de la economía. En este marco histórico, la máquina-herramienta se consolidó como un elemento clave en la transformación de los sistemas productivos, facilitando el paso de talleres artesanales a procesos industriales estandarizados.

La digitalización se presenta como una herramienta eficaz para preservar y difundir bienes industriales históricos, permitiendo su documentación, estudio y divulgación sin comprometer su integridad física.

Este trabajo se centra en la digitalización de dos máquinas-herramienta emblemáticas del siglo XVIII: el torno de Jacques de Vaucanson (1751) y el torno de Henry Maudslay (1797), seleccionadas por su contribución fundamental al desarrollo de las posteriores máquinas-herramienta y su influencia en el progreso de la Revolución Industrial.

La metodología empleada se basa en el modelado 3D mediante diseño asistido por ordenador (CAD), partiendo de documentación histórica, imágenes y fuentes técnicas. A través de este proceso, se ha buscado no solo reproducir su geometría con la mayor fidelidad posible, sino también facilitar su comprensión estructural y funcional. El objetivo final es contribuir a la valorización del patrimonio industrial mediante herramientas digitales que permitan su conservación, estudio y difusión en ámbitos educativos.

Palabras clave

Patrimonio industrial, conservación, digitalización, modelado 3D, máquinas-herramienta, torno de Vaucanson, torno de Maudslay, Revolución Industrial.



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Digitalización de máquinas-herramienta históricas como medio
de conservación y transmisión del patrimonio industrial





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Digitalización de máquinas-herramienta históricas como medio
de conservación y transmisión del patrimonio industrial



Índice de contenido

1	Introducción.....	1
2	Objetivos	3
3	Patrimonio Industrial.....	5
3.1	Concepto.....	5
3.2	Componentes.....	5
3.3	Importancia de su conservación y transmisión	6
4	Historia y evolución del torno	7
4.1	Introducción a la historia del torno.....	7
4.2	Orígenes	7
4.3	Evolución técnica a lo largo de los siglos	9
5	Máquinas-herramienta seleccionadas para el estudio	23
5.1	Torno de Jacques de Vaucanson	23
5.1.1	Introducción	23
5.1.2	Descripción técnica	25
5.1.2.1	Cuerpo del torno	27
5.1.2.2	Carro longitudinal	28
5.1.2.3	Centro fijo y móvil.....	35
5.1.3	Impacto de las innovaciones introducidas	39
5.2	Torno de Henry Maudslay	40
5.2.1	Introducción	40
5.2.2	Descripción técnica	42
5.2.2.1	Cuerpo	44
5.2.2.2	Sistema de giro y desplazamiento.....	46
5.2.2.3	Carro longitudinal	49
5.2.2.4	Portaherramientas.....	50
5.2.2.5	Contrapunto y elementos auxiliares	50
5.2.3	Impacto de las innovaciones introducidas	52
5.2.4	Estimación de la fuerza de corte	53
5.2.4.1	Ejemplo práctico de cálculo.....	56



6	Metodología	59
6.1	Recopilación y análisis de información	59
6.1.1	Datos y referencias para la construcción de los modelos	59
6.1.2	Análisis de piezas y funcionamiento conjunto	60
6.1.2.1	Obtención de dimensiones	61
6.1.2.2	Croquis de los componentes	61
6.2	Modelado 3D	62
6.2.1	Software utilizado	62
6.2.2	Modelado individual de las piezas	62
6.2.3	Ensamblaje de los conjuntos	63
7	Modelos 3D obtenidos	65
7.1	Torno de Jacques de Vaucanson	65
7.2	Torno de Henry Maudslay	79
8	Validación de los modelos	95
9	Conclusiones	99
10	Líneas futuras	101
11	Bibliografía	103

Índice de figuras

Figura 4.1. Tallado en bajorrelieve de un torno manual en la tumba de Petosiris (Egipto, siglo IV a.C.) [17].	8
Figura 4.2. Reproducción gráfica del bajorrelieve en la tumba de Petosiris. Imagen recortada [18].	8
Figura 4.3. Torno de arco o violín [21].	9
Figura 4.4. Torno de pértiga [22].	10
Figura 4.5. Torno de pértiga de madera. Museo de Seiffen, Alemania [23].	11
Figura 4.6. Torno de gran rueda [25].	12
Figura 4.7. Representación de un torno de corte de roscas con tornillo maestro, 1483 [26].	13
Figura 4.8. Detalle del portaherramientas [26].	13
Figura 4.9. (a) Boceto de torno de roscar de giro alternativo, accionado por pedal y doble pértiga. (b) Boceto de torno de giro continuo, con pedal y mecanismo de biela-manivela. Imágenes recortadas [27].	14
Figura 4.10. Tornos de pedal y rueda [28].	15
Figura 4.11. Torno de Jacques Besson [30].	16
Figura 4.12. Torno metálico de Jacques de Vaucanson, 1751 [4].	17
Figura 4.13. Torno de roscar de precisión, de Jesse Ramsden, 1777 [28].	18
Figura 4.14. Torno de Henry Maudslay, 1797 [33].	18
Figura 4.15. Representación del torno paralelo de Joseph Whitworth, 1839 [28].	19
Figura 4.16. Torno paralelo de Joseph Whitworth [28].	19
Figura 4.17. Representación del mecanismo de caja Norton.	20
Figura 4.18. Torno Porter-McLeod con mecanismo de caja Norton, 1904 [36].	20
Figura 4.19. Máquina-herramienta CN presentada en el Machine Tools Show, Chicago, 1955 [39].	21
Figura 4.20. Torno paralelo CNC [40].	22
Figura 5.1. Retrato de Jacques de Vaucanson (1709-1782) [44].	24
Figura 5.2. Tela con efecto moiré [46].	24
Figura 5.3. Torno de Jacques de Vaucanson, 1751 [48].	26
Figura 5.4. Vistas y detalles del torno completo de Vaucanson [49].	27
Figura 5.5. Detalle de una tuerca de sección cuadrada utilizada en el torno de Vaucanson. Imagen recortada [50].	28
Figura 5.6. Estructura del carro de desplazamiento longitudinal [45].	29
Figura 5.7. Detalle del carro y el portaherramientas. [45].	30

Figura 5.8. (a) Soporte de unión o "pilar" entre las barras superior e inferior del carro longitudinal [45]. (b) Vistas principales del "pilar". Imagen recortada [4].	30
Figura 5.9. Carro longitudinal y portaherramientas. Captura de pantalla del vídeo "La máquina de 1751 que lo hizo todo" [50].....	31
Figura 5.10. Vistas del carro y la pieza inferior que sirve para ajustarlo. Imagen recortada [4].	31
Figura 5.11. Vista desde un lateral del carro longitudinal. Captura de pantalla del vídeo "La máquina de 1751 que lo hizo todo" [50].....	32
Figura 5.12. Husillo de avance de paso fino. Captura de pantalla del vídeo "La máquina de 1751 que lo hizo todo" [50].	32
Figura 5.13. Conexión entre el extremo del husillo de avance y el casquillo [45].	33
Figura 5.14. Posición destinada a la manivela en uno de los extremos del husillo de avance. Imagen recortada [45].	33
Figura 5.15. Portaherramientas fijado en el carro longitudinal. Captura de pantalla del vídeo "La máquina de 1751 que lo hizo todo" [50].....	34
Figura 5.16. Detalle de la herramienta de corte; de tipo plaquita. Captura de pantalla del vídeo "La máquina de 1751 que lo hizo todo" [50].	35
Figura 5.17. Estructura del anclaje desplazable. Imagen recortada [48].	36
Figura 5.18. Detalle del tornillo para ajustar la pieza a mecanizar [45].	37
Figura 5.19. Soportes transversales de la estructura del contrapunto [45].....	38
Figura 5.20. Contrapunto ligeramente ornamentado [45].....	39
Figura 5.21. Vista de planta del torno de Vaucanson [4].	39
Figura 5.22. Retrato de Henry Maudslay (1771-1831) [57].	41
Figura 5.23. Torno de corte de tornillos de Henry Maudslay, 1797 [59].	43
Figura 5.24. Torno de corte de tornillos de Henry Maudslay, 1800 [60].	44
Figura 5.25. Detalle de un soporte del cuerpo del torno. Imagen recortada [59].	45
Figura 5.26. Detalle del soporte del cuerpo situado en el extremo del cabezal. Imagen recortada [59].	46
Figura 5.27. Detalle del sistema de giro y movimiento. Imagen recortada [59].	47
Figura 5.28. Detalle del sistema de engranajes del torno de Henry Maudslay, 1800. Imagen recortada [60].	48
Figura 5.29. Husillo de avance. Imagen recortada [33].	48
Figura 5.30. (a) Soporte de husillo desplazable. (b) Soporte de husillo que acopla con el sistema de movimiento. Imágenes recortadas [59].	49
Figura 5.31. Carro longitudinal portaherramientas. Imágenes recortadas [2], [59].	49
Figura 5.32. Detalle del carro y el portaherramientas [61].	50

Figura 5.33. Contrapunto. Imágenes recortadas [2], [59].	51
Figura 5.34. Soporte guía de la pieza a mecanizar. Imagen recortada [59].	52
Figura 5.35. Modelo 3D del torno de Henry Maudslay. Hipótesis del tren de engranajes.	54
Figura 7.1. Diferentes piezas que conforman el cuerpo del torno de Vaucanson.	66
Figura 7.2. Ensamblaje de las piezas principales del cuerpo del torno.	67
Figura 7.3. (a) Barra que se coloca transversalmente en el cuerpo del torno y sirve para ajustar la posición de los centros. (b) Soporte guía para ajustar levemente la posición de la estructura del contrapunto.	67
Figura 7.4. Pletina que fija los centros contra la estructura del cuerpo.	68
Figura 7.5. (a) Cuerpo del torno. (b) Vista de planta del cuerpo.	68
Figura 7.6. Estructura de los centros del torno.	69
Figura 7.7. Estructura completa del contrapunto. (a) Vista Frontal. (b) Vista posterior.	70
Figura 7.8. Contrapunto.	70
Figura 7.9. Estructura completa del centro móvil.	71
Figura 7.10. Tornillo de ajuste del centro móvil. (a) Cuerpo completo. (b) Detalle.	71
Figura 7.11. Subensamblajes añadidos al cuerpo.	72
Figura 7.12. Vista de un perfil del cuerpo.	72
Figura 7.13. Estructura del carro longitudinal sin las barras superiores.	73
Figura 7.14. Estructura del carro longitudinal.	73
Figura 7.15. Cuerpo del carro longitudinal.	74
Figura 7.16. Pieza inferior que sujeta el carro.	74
Figura 7.17. Carro y pieza de sujeción.	75
Figura 7.18. Carro atravesado por el husillo.	75
Figura 7.19. Carro con portaherramientas.	76
Figura 7.20. Vista lateral del carro con el portaherramientas.	76
Figura 7.21. Ensamblaje completo del Torno de Vaucanson (1).	77
Figura 7.22. Ensamblaje completo del Torno de Vaucanson (2).	77
Figura 7.23. Vista de un perfil del torno completo.	78
Figura 7.24. Vista de la planta del torno completo.	78
Figura 7.25. Ensamblaje completo del torno de Vaucanson con igual apariencia al original.	79
Figura 7.26. Conjunto de bancada correspondiente a uno de los extremos.	80
Figura 7.27. Conjunto de la bancada con el soporte del cabezal y del husillo de avance.	80
Figura 7.28. Conjunto de la bancada con el cabezal, el plato y el husillo de avance integrados.	81
Figura 7.29. Detalle de la pieza de acoplamiento del husillo.	81

Figura 7.30. Soporte deslizante para el extremo del husillo.	82
Figura 7.31. Detalle del soporte deslizante con el husillo conectado.	82
Figura 7.32. Barras guía.	83
Figura 7.33. Conjunto de bancada con el cabezal y el husillo ensamblados.	83
Figura 7.34. Cuerpo del carro longitudinal sin el portaherramientas.	84
Figura 7.35. Estructura portaherramientas.	84
Figura 7.36. Vista del conjunto del carro y el portaherramientas.	85
Figura 7.37. Cuerpo del carro completo.	85
Figura 7.38. Vista de perfil del carro completo.	86
Figura 7.39. Carro longitudinal ensamblado en el cuerpo del torno.	86
Figura 7.40. Detalle de la disposición del carro con el portaherramientas.	87
Figura 7.41. Sistema de movimiento mediante tren de engranajes.	88
Figura 7.42. Manivela conectada al eje del cabezal.	88
Figura 7.43. Cuerpo del contrapunto.	89
Figura 7.44. Tornillos de ajuste y fijación.	89
Figura 7.45. Soporte para alineación durante mecanizado de tornillos de gran longitud.	90
Figura 7.46. Ensamblaje del torno completo (1).	90
Figura 7.47. Ensamblaje del torno completo (2).	91
Figura 7.48. Vista de planta del torno completo.	91
Figura 7.49. Ensamblaje completo del torno con apariencias originales de las piezas.	92
Figura 7.50. Disposición del carro longitudinal en el torno.	92
Figura 7.51. Sistema de transmisión de movimiento mediante engranajes.	93
Figura 8.1. Torno de Jacques de Vaucanson (1751).	96
Figura 8.2. Modelo 3D del torno de Jacques de Vaucanson (1751).	96
Figura 8.3. Torno de Henry Maudslay (1797).	97
Figura 8.4. Modelo 3D del torno de Henry Maudslay (1797).	97



Índice de tablas

Tabla 1: Resistencia específica de corte K_c de diferentes materiales.....	57
---	----

1 Introducción

La conservación del patrimonio industrial es fundamental para comprender el desarrollo y la evolución que ha tenido el sector de la industria a lo largo de la historia [1]. Gracias al avance de las tecnologías, esta tarea es más sencilla. En este trabajo se aborda la digitalización de dos máquinas-herramienta significativas del siglo XVIII, en concreto dos tornos, mediante diseño asistido por ordenador (CAD).

Las máquinas-herramienta han sido clave en la evolución de la industria, con ellas se ha podido manufacturar piezas con mayor precisión que con otros métodos de fabricación. Esto favoreció a su vez la mejora de las propias máquinas-herramienta. Esta retroalimentación constante contribuyó directamente al desarrollo y expansión de la Revolución Industrial [2-3].

Este trabajo es fundamental, dado que contribuye a la documentación, conservación y transmisión del patrimonio industrial. La digitalización permite de una manera más didáctica y sencilla la transmisión de conocimiento, gracias a las posibilidades que ofrece la tecnología, como la reconstrucción virtual de máquinas que se encuentran en un estado de deterioro parcial o total y que de otra manera su estudio resultaría complicado. Además, disponer de esta información en formato digital posibilita una distribución y divulgación más rápida y eficaz que por otros métodos convencionales.

En este caso, la digitalización de máquinas-herramienta ofrece diversas posibilidades de estudio. Al modelar individualmente cada uno de los componentes que las conforman y ensamblarlos en un entorno virtual, es posible generar distintas vistas, realizar despieces o vistas explosionadas y facilitar así un análisis detallado de su estructura. Además, mediante software específico, se puede simular su funcionamiento. Asimismo, este trabajo proporciona una metodología replicable para la reconstrucción digital de otras máquinas históricas.

Para llevar a cabo este trabajo, se ha realizado el modelado digital de dos máquinas-herramienta significativas del siglo XVIII mediante software CAD: el torno de Jacques de Vaucanson (1751) y el torno de Henry Maudslay (1797). Ambas constituyen hitos en la historia de la manufactura [2, 4], y su digitalización contribuye tanto a su conservación como a facilitar su estudio técnico e histórico.

Este documento se organiza en varios capítulos. En primer lugar, se presentan los objetivos del estudio. A continuación, se analiza el concepto de patrimonio industrial y la relevancia de su conservación. Luego, se expone la historia del torno y su evolución a lo largo del tiempo. Más adelante, se describen en detalle las dos máquinas-herramienta seleccionadas, tanto sus



características técnicas como las innovaciones que incorporan y el impacto tecnológico asociado. Finalmente, se detalla la metodología empleada para su digitalización y se recogen las conclusiones obtenidas, junto con posibles líneas de trabajo futuro.

2 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal la digitalización de dos máquinas-herramienta significativas en la historia de la industria, ambas correspondientes al siglo XVIII, con el fin de preservar y facilitar el estudio de su diseño y funcionamiento. Para lograr esto, se han determinado los siguientes objetivos parciales:

- Ubicar el contexto histórico y la situación de las máquinas-herramienta en el siglo XVIII.
- Analizar las innovaciones técnicas introducidas por las máquinas seleccionadas y su repercusión en la industria de la época y en desarrollos posteriores.
- Investigar sobre las máquinas-herramienta seleccionadas, comprender su funcionamiento y sus características mecánicas.
- Recopilar documentación técnica (planos, descripciones e imágenes) necesaria para la reconstrucción digital.
- Realizar croquis de los distintos componentes que conforman las máquinas-herramienta, como paso previo para facilitar el posterior modelado 3D.
- Modelar y ensamblar digitalmente las piezas mediante software de diseño asistido por ordenador (CAD).
- Simular mediante software el funcionamiento de los mecanismos, para validar el modelo y comprender su operatividad.
- Comparar las características y principios de funcionamiento de estas máquinas históricas con tornos actuales para identificar similitudes y diferencias.
- Proponer una metodología replicable para la digitalización y estudio de otras máquinas históricas.



3 Patrimonio Industrial

3.1 Concepto

La Carta de Nizhny Tagil sobre El Patrimonio Industrial (Moscú, 2003) [1], aprobada por el Comité Internacional para la Conservación del Patrimonio Industrial (TICCIH), lo define como: “Los restos de la cultura industrial que poseen un valor histórico, tecnológico, social, arquitectónico o científico”.

3.2 Componentes

Los restos de patrimonio industrial comprenden diversos elementos que reflejan la evolución de la ingeniería, la tecnología y los sistemas de producción. Se pueden clasificar de la siguiente manera [1]:

- **Arquitectura industrial:** Engloba edificios e infraestructuras vinculadas a la actividad industrial, como fábricas, talleres, almacenes, depósitos y áreas destinadas a la extracción y refinado de minerales.
- **Maquinaria:** Incluye las máquinas, así como los sistemas y conjuntos mecánicos utilizados en los procesos industriales.
- **Generación, transmisión y uso de energía:** Lugares donde se produce, transmite y utiliza energía con fines industriales.
- **Medios de transporte:** Abarca todos los medios de transporte utilizados en la industria y la infraestructura necesaria para su funcionamiento.
- **Actividades sociales:** Espacios donde se desarrolla la socialización industrial, como viviendas, lugares de culto religioso y de educación.

3.3 Importancia de su conservación y transmisión

El hecho de conservar está relacionado con mantener o cuidar la permanencia de algo o de alguien [5]. Conservar el patrimonio industrial, que es la huella del pasado de la sociedad, está directamente vinculado con preservar la historia. El estudio del patrimonio industrial permite conocer y entender el desarrollo histórico, tecnológico y económico de las sociedades industriales del pasado [6].

Asimismo, contribuye al avance de la sociedad actual, permitiendo el desarrollo de nuevas tecnologías, procesos de producción y fabricación mediante el estudio y análisis de las actividades y sistemas técnicos empleados en épocas anteriores [1, 7].

Preservar el patrimonio industrial no solo implica la protección física de los bienes tangibles, sino también la documentación, interpretación y difusión del conocimiento técnico asociado a ellos. En este contexto, los proyectos orientados a la digitalización, reproducción o reconstrucción de máquinas-herramienta históricas mediante técnicas como el modelado 3D se presentan como estrategias eficaces para complementar los métodos tradicionales de conservación [8].

La transmisión del legado del patrimonio industrial a las generaciones futuras les permite comprender los avances tecnológicos y las condiciones laborales del pasado, fomentando así el reconocimiento de su valor histórico. La integración de estos temas en programas educativos facilita el estudio de la historia industrial y del impacto que esta ha tenido en la sociedad [1, 9].

Además, el patrimonio industrial posee un valor turístico, sirviendo como base para su exposición en museos y centros educativos, lo cual ayuda a promover la cultura científica en la sociedad [10].

Por tanto, se considera de vital importancia continuar impulsando acciones que garanticen la documentación, conservación activa y transmisión del patrimonio industrial, asegurando su integración como parte esencial de la memoria colectiva y permitiendo así el desarrollo tecnológico, económico y cultural de la humanidad [11].

4 Historia y evolución del torno

4.1 Introducción a la historia del torno

El torno ha sido, a lo largo de la historia, una de las máquinas-herramienta más representativas del desarrollo tecnológico y de la evolución de los sistemas de manufactura [12]. Su principio de funcionamiento es sencillo: se basa en rotar la pieza a mecanizar sobre un eje mientras una herramienta de corte actúa sobre ella [13]. Este principio ha permanecido invariable, mientras que sus formas, mecanismos y aplicaciones han ido transformándose según el avance de la técnica.

El torno ha acompañado a la humanidad en su progreso técnico, desempeñando un papel fundamental tanto en la producción de objetos de uso cotidiano como en la de componentes de precisión, llegando a ser empleado en la fabricación de elementos de otras máquinas-herramienta. Por esta razón, su estudio resulta fundamental para entender una parte esencial de la historia del desarrollo de la industria y la transición de los procesos artesanales a los industriales [3].

En el contexto del presente trabajo, comprender la evolución funcional y estructural del torno resulta esencial para llevar a cabo una reconstrucción digital rigurosa, que respete tanto la integridad técnica como el valor cultural de los modelos originales.

A continuación, se presenta una revisión cronológica de la evolución del torno, desde sus primeras manifestaciones en la Antigüedad hasta las variantes modernas, analizando el papel que ha desempeñado en los diferentes periodos históricos y su contribución al desarrollo industrial.

4.2 Orígenes

Debido a los aparatos que se han encontrado en diversos yacimientos arqueológicos se puede estimar que el torno data de alrededor del 850 a.C., lo que le otorga casi tres mil años de historia [12, 14]. El primer concepto de un torno del cual se tiene constancia se encontró representado en un tallado en técnica bajorrelieve (Figura 4.1) en la tumba de Petosiris, en Egipto, y data del siglo IV a.C. [15-16]. Este concepto se corresponde con un torno de cuerda, denominado así por su similitud con la técnica ancestral utilizada para encender fuego, en la

que el movimiento rotatorio se generaba mediante una cuerda enrollada alrededor de un eje. En la Figura 4.2 se muestra una reproducción gráfica que permite apreciar con mayor claridad el tallado representado en la Figura 4.1.



Figura 4.1. Tallado en bajorrelieve de un torno manual en la tumba de Petosiris (Egipto, siglo IV a.C.) [17].

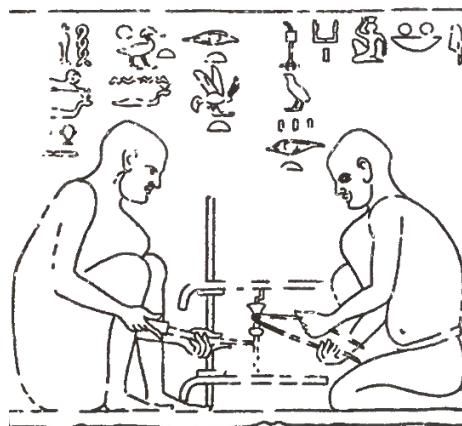


Figura 4.2. Reproducción gráfica del bajorrelieve en la tumba de Petosiris. Imagen recortada [18].

En la Figura 4.2 se observa una barra vertical que representaría la bancada o la estructura del torno. Esta barra atraviesa dos soportes transversales, los cuales podrían desplazarse para modificar la altura y ajustarse a la pieza a mecanizar. Estos soportes se pueden comparar con el cabezal y contrapunto de un torno actual. En medio, se encuentra la pieza a mecanizar. El movimiento de corte era generado por uno de los operarios, con una cuerda enrollada sobre

la pieza que, al tirar alternativamente de los extremos, producía el giro. Mientras tanto, el otro operario se encargaba de cortar la pieza con una herramienta afilada mientras esta giraba.

Este principio de generar el movimiento de corte con una cuerda continuó utilizándose posteriormente. Un ejemplo representativo es el torno de arco o violín (Figura 4.3), que generaba el movimiento de la pieza mediante un arco con una cuerda. Este producía un movimiento alterno o de vaivén, por tanto, el corte se generaba de manera intermitente, solo cuando la pieza giraba en la dirección del filo de la herramienta. El uso de este tipo de torno se documenta durante toda la Antigüedad clásica y la Alta Edad Media [19-20].

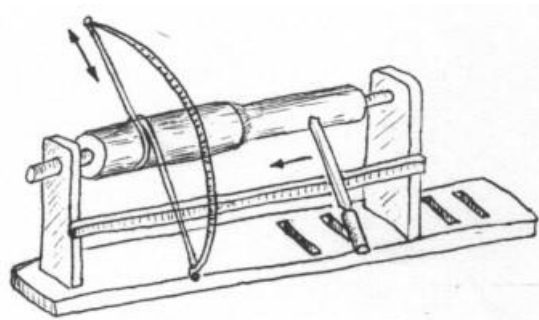


Figura 4.3. Torno de arco o violín [21].

4.3 Evolución técnica a lo largo de los siglos

A continuación, se presentan los principales avances técnicos que ha experimentado el torno a lo largo del tiempo. Desde sus formas más rudimentarias, accionadas manualmente, hasta mecanismos más complejos que introdujeron mejoras en la eficiencia, la precisión y la autonomía del operario.

Tras los primeros tornos manuales, como el torno de arco, que requerían la acción directa de las manos para generar el movimiento, surgieron soluciones más eficientes que permitieron liberar las manos del operario y mejorar la continuidad del trabajo. Hacia el año 1250, ya en la Plena Edad Media, se sitúa el desarrollo del torno de pértiga (Figura 4.4), que permitió al artesano utilizar ambas manos para cortar la pieza, mientras que, con el pie, generaba el movimiento rotativo. Este torno utilizaba el mismo principio de generación de movimiento rotatorio mediante una cuerda que el torno de arco. Sin embargo, en este caso, la cuerda estaba conectada por un extremo a una pértiga elástica y, por el otro, a un pedal ubicado en el suelo. Al accionar el pedal con el pie, se generaba tensión en la cuerda, que tiraba de la pértiga apoyada en dos puntos, provocando la rotación de la pieza en un sentido determinado.

Al liberar el pedal, la pértiga regresaba a su posición inicial, invirtiendo el giro y haciendo que la pieza rotase en sentido contrario. El corte seguía realizándose únicamente en la dirección de giro correspondiente al filo de corte de la herramienta [19].

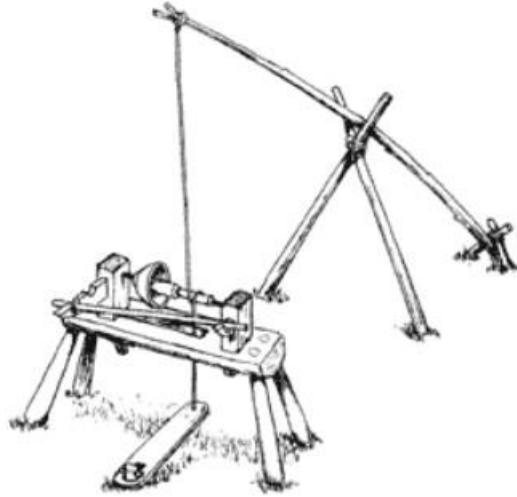


Figura 4.4. Torno de pértiga [22].

En la Figura 4.5 se presenta un torno de pértiga construido completamente en madera, cuya antigüedad se desconoce, aunque ilustra las características típicas de este tipo de torno. En este caso, el pedal situado en el suelo se extiende a lo largo de toda la bancada, permitiendo al operario accionarlo desde cualquier posición a lo largo de la pieza a mecanizar. La cuerda es un elemento de desgaste, como se observa en la zona de contacto con el eje de giro.



Figura 4.5. Torno de pértiga de madera. Museo de Seiffen, Alemania [23].

A comienzos del siglo XV se pudo proporcionar al torno un movimiento continuo gracias a un sistema de transmisión por correa. Este mecanismo consistía en una gran rueda accionada manualmente mediante una manivela, conectada al eje que portaba la pieza a través de una correa cruzada, lo que permitía generar un movimiento rotativo constante en una única dirección (Figura 4.6). Este tipo de torno, conocido como “torno de gran rueda”, requería la presencia de dos operarios para utilizarlo, uno de ellos generaba el movimiento de giro accionando la manivela de la rueda y el otro se encargaba de cortar la pieza. La difusión de este torno fue limitada, debido al elevado esfuerzo humano que requería el accionamiento de la rueda [24].

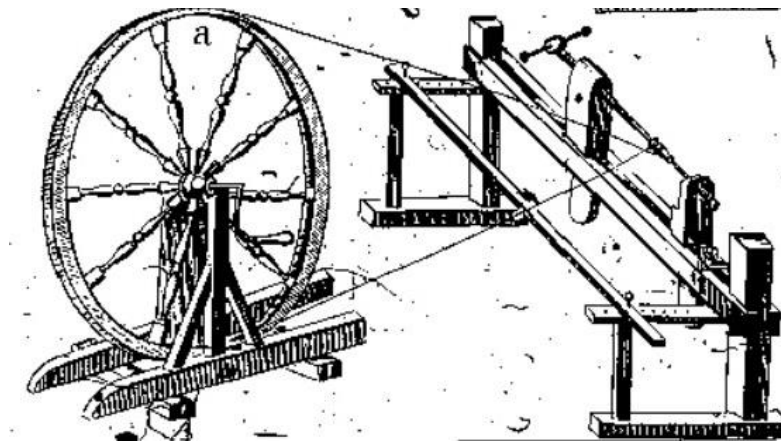


Figura 4.6. Torno de gran rueda [25].

Entre los primeros ejemplos conocidos de tornos para cortes de rosca, mediante tornillo maestro, se encuentra uno representado en *Das mittelalterliche Hausbuch* (Bossert y Storck, 1912), fechado en 1483 y conocido únicamente a través de ilustraciones (Figura 4.7). En este torno se describe un sistema de control del desplazamiento de la herramienta, la cual se fijaba a un carro portaherramientas transversal (Figura 4.8), sustituyendo por primera vez la sujeción manual utilizada por el tornero [26].

El carro portaherramientas cuenta con un husillo de avance que permite su desplazamiento transversal respecto al cuerpo del torno y, al combinarse con el desplazamiento longitudinal respecto a la pieza, conforma una configuración de movimiento en dos coordenadas.

No obstante, algunas inconsistencias observables en la ilustración, como la representación simultánea de roscas a derechas e izquierdas tanto en el husillo maestro como en la pieza trabajada, sugieren que el artista no comprendía completamente el funcionamiento del mecanismo [26].

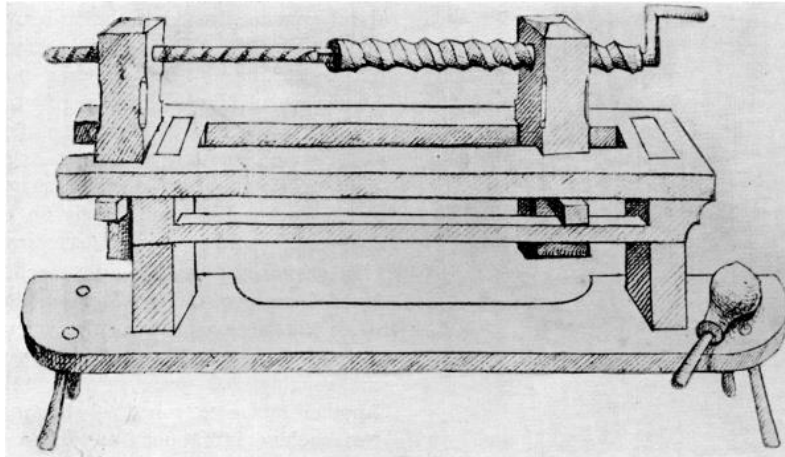


Figura 4.7. Representación de un torno de corte de roscas con tornillo maestro, 1483 [26].

En la Figura 4.8 se observa la herramienta de corte sujeta al carro portaherramientas mediante un tornillo. También se aprecia el husillo que permite el desplazamiento transversal de la herramienta con respecto a la pieza a mecanizar.

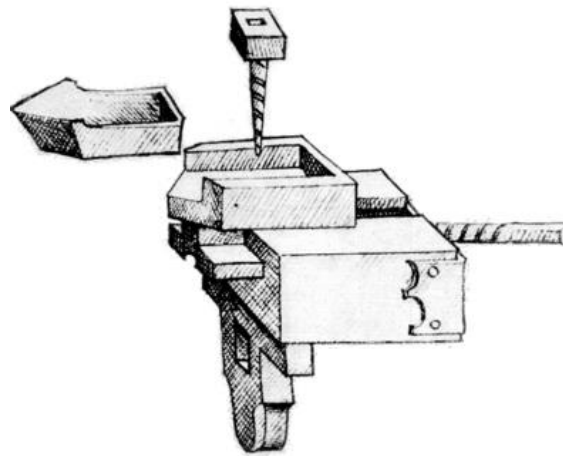
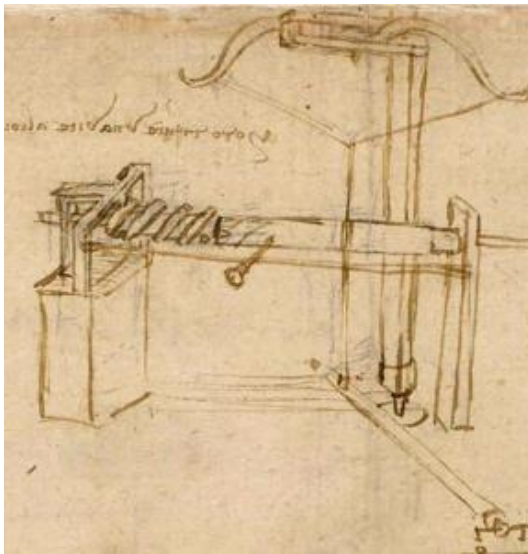


Figura 4.8. Detalle del portaherramientas [26].

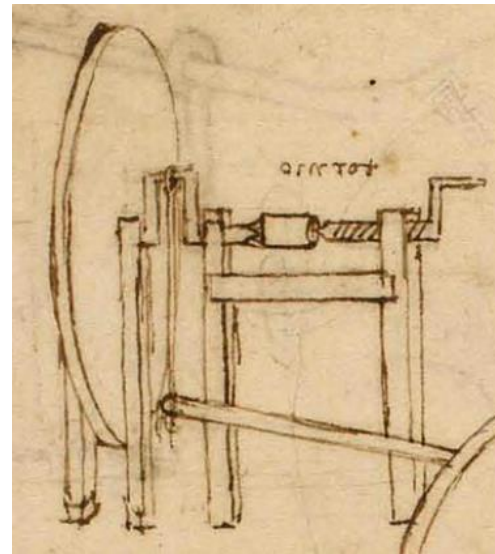
Cabe destacar que este torno es conocido únicamente a través de ilustraciones, sin evidencia que confirme su implementación práctica en máquinas-herramienta de la época [26].

Paralelamente, hacia finales del siglo XV, en torno al año 1480, se introdujo una mejora significativa en el torno de pedal mediante la incorporación del mecanismo biela-manivela. Esta innovación dio lugar al torno de accionamiento continuo, que requería su combinación con un volante de inercia para evitar los puntos muertos durante el movimiento ascendente y descendente del pedal [12].

Entre 1480 y 1495, Leonardo da Vinci elaboró varios bocetos de tornos con distintas configuraciones (Figura 4.9), entre los que destacan un torno de roscar de giro alternativo accionado por pedal y doble pértiga, así como un torno de giro continuo con pedal y mecanismo de biela-manivela. Estos diseños formaban parte de su *Códice Atlántico*, una extensa recopilación de estudios y esquemas técnicos. En dicho manuscrito se incluían también otras variantes de tornos que, aunque no llegaron a construirse, constituyeron una valiosa fuente de inspiración para el desarrollo de soluciones mecánicas en épocas posteriores [27].



(a)



(b)

Figura 4.9. (a) Boceto de torno de roscar de giro alternativo, accionado por pedal y doble pértiga.
(b) Boceto de torno de giro continuo, con pedal y mecanismo de biela-manivela. Imágenes recortadas [27].

A finales del siglo XVI se introdujo una mejora clave en el diseño de los tornos accionados por pedal: la posibilidad de variar la velocidad de giro de la pieza mediante un sistema de poleas escalonadas y transmisión por correa. Este avance técnico, que seguía basándose en el mecanismo biela-manivela combinado con un volante de inercia, permitió alcanzar un giro continuo y ajustar la velocidad en función de la disposición de la correa sobre poleas de distinto diámetro. Además, durante este periodo comenzaron a emplearse componentes de fundición en partes estructurales del torno, como el cabezal, el contrapunto, la rueda motriz o el soporte de herramienta. Estas innovaciones supusieron un paso decisivo en el mecanizado de metales no férreos como el latón, el cobre y el bronce, y sentaron las bases de la evolución posterior de las máquinas-herramienta [3]. En la Figura 4.10 se muestran tornos accionados

por pedal y rueda, en los cuales pueden apreciarse las configuraciones de ruedas con distintos diámetros.

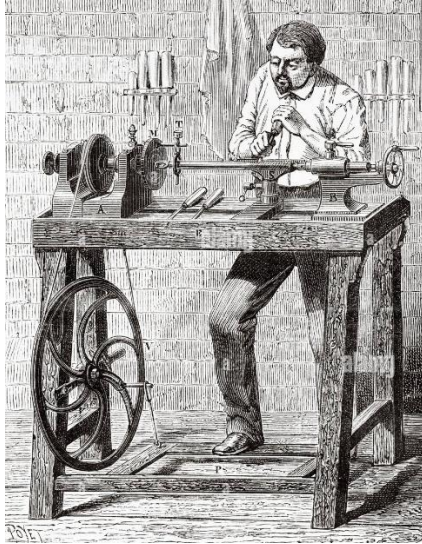


Figura 4.10. Tornos de pedal y rueda [28].

En 1578, Jacques Besson publicó el tratado ilustrado *Theatrum Instrumentorum*, en el que introdujo relevantes avances en el diseño del torno (Figura 4.11), especialmente para el corte de tornillos. Entre sus aportaciones destaca el uso de levas y plantillas, que permitieron un mayor control mecánico sobre la herramienta y la pieza, posibilitando así trabajos más precisos y complejos en materiales metálicos. Asimismo, mejoró el sistema de accionamiento y el mecanismo de avance de tornos ornamentales [29].

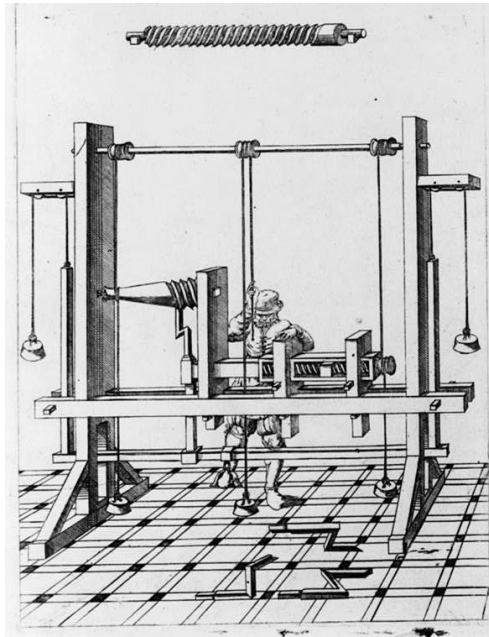


Figura 4.11. Torno de Jacques Besson [30].

En 1751, Jacques de Vaucanson diseñó y construyó el primer torno completamente metálico (Figura 4.12), equipado con un carro portaherramientas deslizante sobre guías, accionado mediante un husillo de avance. Con este desarrollo, Vaucanson sentó las bases del torno orientado a la producción industrial a gran escala, introduciendo principios fundamentales que marcarían el rumbo de la mecanización en la industria. Este modelo incorporaba ya los movimientos de traslación característicos de los tornos modernos [4].

Sus características, así como el impacto que tuvieron en el desarrollo industrial, se analizan en detalle en los apartados posteriores.

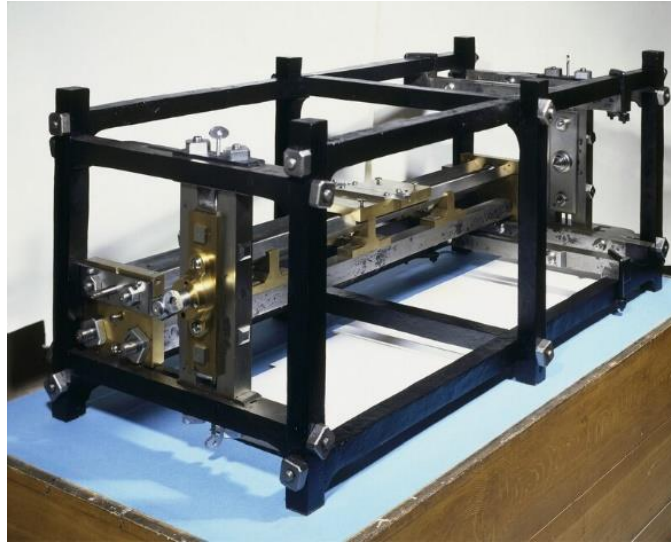


Figura 4.12. Torno metálico de Jacques de Vaucanson, 1751 [4].

En 1777, Jesse Ramsden desarrolló un torno de corte de precisión (Figura 4.13) que incorporaba un husillo de avance accionado mediante ruedas dentadas para controlar con exactitud el desplazamiento del carro portaherramientas. Este se desplazaba sobre una bancada con guía triangular, y el cabezal incluía un plato perforado para la sujeción de la pieza. Aunque el torno permitía cortes de gran precisión, el roscado no se realizaba de forma automática: en ausencia de una sincronización directa entre el giro del cabezal y el husillo de avance, el proceso se llevaba a cabo manualmente, combinando el desplazamiento controlado del carro con el uso de platos divisores para girar la pieza en pasos exactos. Esta técnica, complementada con instrumentos ópticos de verificación, permitía obtener roscas de paso uniforme, aunque de manera laboriosa. Si bien no estaba concebido para la producción en serie ni para el roscado continuo, su diseño representó un avance notable en la fabricación de componentes de alta precisión para instrumentos científicos [31-32].

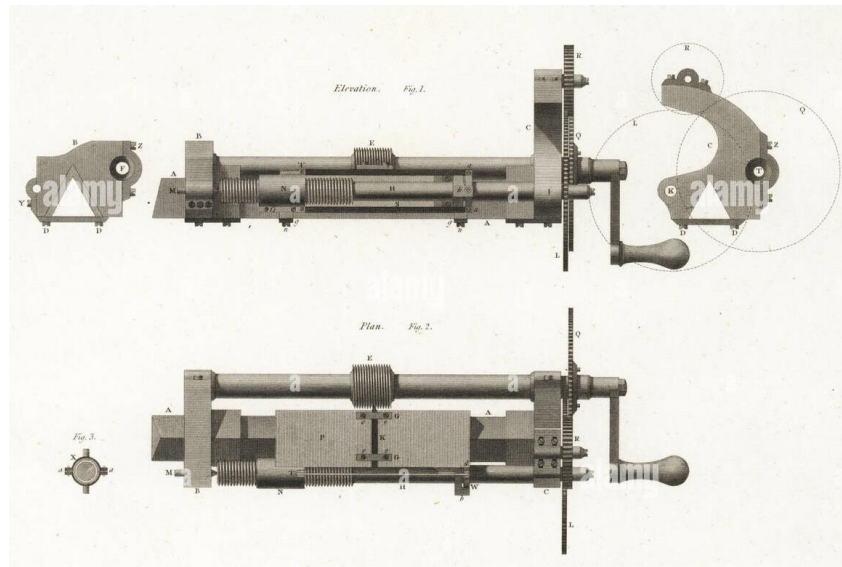


Figura 4.13. Torno de roscar de precisión, de Jesse Ramsden, 1777 [28].

Henry Maudslay perfeccionó a finales del siglo XVIII el torno de roscar, desarrollando un modelo práctico y robusto que proporcionaba gran precisión en el mecanizado (Figura 4.14). La innovación principal de Maudslay consistió en integrar un sistema de engranajes que vinculaba el giro del cabezal con el avance del carro longitudinal, logrando la sincronización exacta entre estas. Esta mejora técnica permitió por primera vez obtener roscas precisas y repetibles, habilitando el uso de piezas intercambiables, un requisito fundamental para la estandarización y la producción en masa. Sus características, así como el impacto que tuvieron en el desarrollo industrial, se analizan en detalle en los apartados posteriores [2].

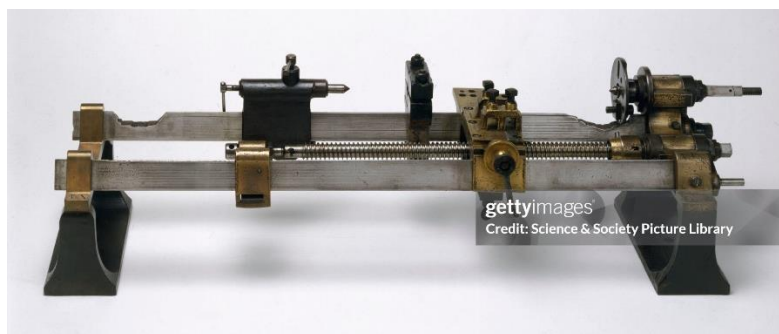


Figura 4.14. Torno de Henry Maudslay, 1797 [33].

En 1839, Joseph Whitworth diseñó y patentó un torno paralelo (Figura 4.15 y Figura 4.16) que incorporaba una bancada con guías planas y un carro transversal de accionamiento automático. Esta máquina tuvo una notable aceptación industrial y su diseño ejerció una gran

influencia en los tornos desarrollados posteriormente, tanto en Europa como en Estados Unidos, los cuales, aunque incorporaban mejoras técnicas, mantenían la estructura básica propuesta por Whitworth. Paralelamente, abordó el problema de la falta de uniformidad en los sistemas de roscado, que generaba serios inconvenientes en la intercambiabilidad de componentes. Para resolverlo, estableció un sistema de roscas estandarizado basado en la pulgada, que sería conocido como el sistema Whitworth, adoptado ampliamente por la industria británica y reconocido oficialmente por el Instituto de Ingenieros Civiles de Inglaterra [34].

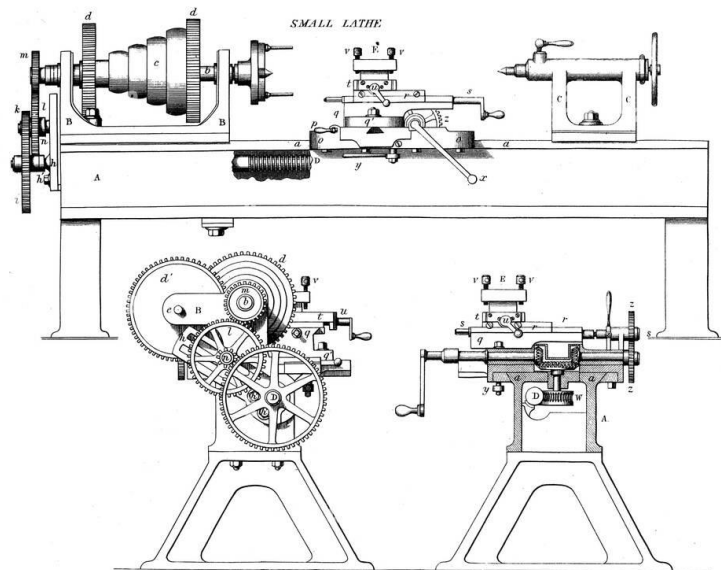


Figura 4.15. Representación del torno paralelo de Joseph Whitworth, 1839 [28].

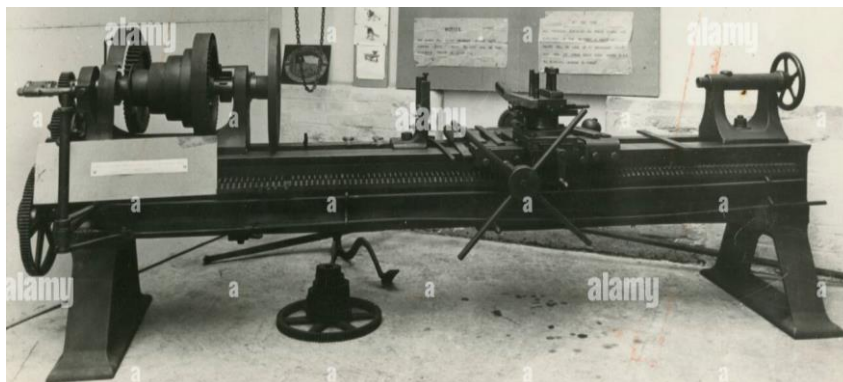


Figura 4.16. Torno paralelo de Joseph Whitworth [28].

En 1892, Whendell Phillips Norton patentó un importante avance en el diseño de tornos paralelos: la caja Norton (Figura 4.17). Este dispositivo revolucionó el mecanismo de selección

de pasos para el roscado, ya que permitía cambiar la relación de engranajes de forma rápida y sencilla mediante una palanca selectora, sin necesidad de desmontar ni sustituir engranajes manualmente como se hacía hasta entonces. La incorporación de la caja Norton supuso una mejora significativa en la eficiencia y versatilidad del torno, facilitando la fabricación de roscas con distintos pasos y reduciendo los tiempos de preparación de la máquina. Su implementación marcó un hito en el desarrollo de los tornos industriales modernos y fue adoptada ampliamente en la industria, consolidándose como un elemento estándar en los tornos paralelos a lo largo del siglo XX (Figura 4.18) [35].

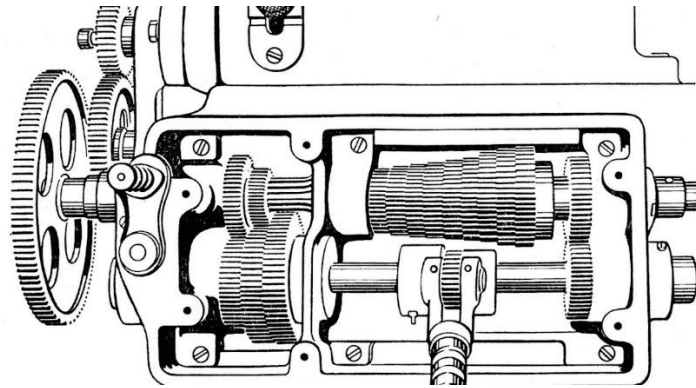


Figura 4.17. Representación del mecanismo de caja Norton.

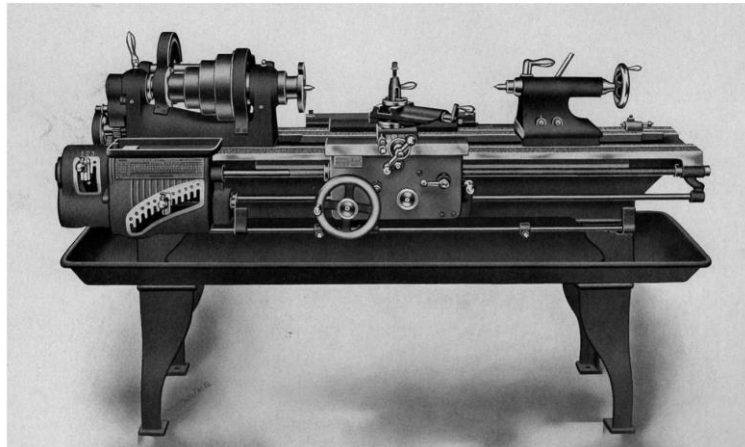


Figura 4.18. Torno Porter-McLeod con mecanismo de caja Norton, 1904 [36].

El Control Numérico (CN) se originó en la década de 1940 gracias al ingeniero estadounidense John T. Parsons, quien desarrolló un sistema basado en tarjetas perforadas para controlar con precisión los movimientos de las máquinas-herramienta. En 1948, Parsons presentó esta idea a la Fuerza Aérea de EE. UU., interesada en mecanizar modelos de aviones con geometrías complejas. Bajo este encargo, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)

desarrolló el primer torno de control numérico funcional en 1952, utilizando componentes electrónicos y controlado mediante tarjetas perforadas [37]. En la Figura 4.19 se aprecia el gran tamaño del conjunto de la máquina-herramienta CN.

En 1959 se estableció formalmente la tecnología CNC (Control Numérico por Computadora), que permitió la automatización avanzada de máquinas-herramienta. A partir de la década de 1960, diversos países comenzaron a desarrollar y fabricar tornos CNC. La incorporación de microprocesadores en 1974 aceleró la evolución y expansión global de esta tecnología, consolidando la base de la fabricación industrial moderna [38].

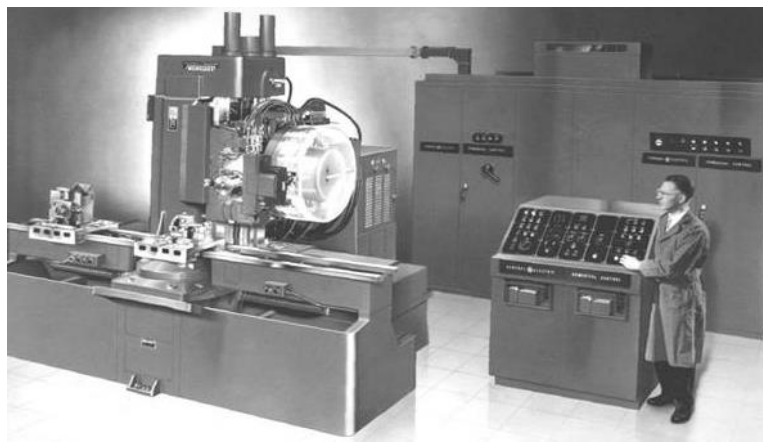


Figura 4.19. Máquina-herramienta CN presentada en el Machine Tools Show, Chicago, 1955 [39].

Finalmente, tras numerosos avances y mejoras a lo largo de su historia, el torno ha alcanzado su forma moderna como máquina-herramienta de control numérico por computadora (CNC), integrando precisión, automatización y flexibilidad para satisfacer las exigencias industriales actuales. En la Figura 4.20 se muestra un torno paralelo CNC con una cabina protectora transparente que cierra completamente la zona de trabajo para garantizar la seguridad en el momento de mecanizado.



Figura 4.20. Torno paralelo CNC [40].

La evolución del torno ha sido clave para el desarrollo de la industria manufacturera, desde sus orígenes más rudimentarios hasta la sofisticación actual con el control numérico por computadora. Cada avance tecnológico ha permitido aumentar la precisión, eficiencia y capacidad de producción en serie, fundamentales para la Revolución Industrial y la industria moderna.

Estos hitos no solo mejoraron la fabricación de piezas mecánicas intercambiables, sino que también sentaron las bases para la estandarización y la producción masiva que impulsaron la industrialización global. En definitiva, la transformación del torno refleja la evolución tecnológica y la creciente complejidad de las demandas industriales, consolidándose como una máquina-herramienta esencial en la manufactura actual.

5 Máquinas-herramienta seleccionadas para el estudio

La elección de los tornos de Vaucanson y Maudslay para este estudio se debe a las innovaciones tecnológicas que estos presentaron, las cuales transformaron los métodos de fabricación y superaron las limitaciones existentes de la época. Por estos motivos, constituyen hitos fundamentales en la historia de la ingeniería. Ambos sentaron las bases del torno moderno, contribuyeron significativamente a la mejora en la precisión y la capacidad de repetición en los procesos de fabricación industrial e impulsaron el desarrollo de la Revolución Industrial [2, 4]. A continuación, se describen en detalle sus características y funcionamiento.

5.1 Torno de Jacques de Vaucanson

5.1.1 Introducción

Jacques de Vaucanson (1709–1782) (Figura 5.1) fue un inventor e ingeniero francés ampliamente reconocido por sus aportes pioneros a la automatización en el siglo XVIII. Fue célebre por la creación de autómatas mecánicos de notable complejidad, como el “Pato con aparato digestivo” y “El Flautista”, los cuales demostraban un avanzado conocimiento de la mecánica y la transmisión de movimiento [41]. Sin embargo, su contribución más significativa al desarrollo industrial fue su implicación en la mecanización del trabajo textil, así como en el diseño de sistemas automáticos aplicables a procesos productivos [42]. En calidad de inspector general de la manufactura de la seda en Francia, desarrolló mecanismos destinados a mejorar la eficiencia y precisión de los telares, anticipándose a desarrollos posteriores como el telar de Jacquard [43]. Dentro de este contexto, su torno de 1751 representa uno de los primeros intentos documentados de automatización en máquinas-herramienta, marcando un hito en la evolución de la fabricación mecánica.



Figura 5.1. Retrato de Jacques de Vaucanson (1709-1782) [44].

En 1751, Vaucanson diseñó y construyó el primer torno industrial completamente metálico [45], incorporando una serie de innovaciones y avances tecnológicos que sentaron las bases de la automatización en la industria. Este torno supuso un avance decisivo en la evolución de las máquinas-herramienta y desempeñó un papel fundamental en el posterior desarrollo de la Revolución Industrial [4, 12].

Tradicionalmente, los tornos de madera utilizados durante siglos carecían de la estabilidad y precisión necesarias para garantizar la uniformidad en el mecanizado de piezas, especialmente en aplicaciones industriales exigentes. En el caso de la industria textil, por ejemplo, los cilindros de cobre utilizados como rodillos para prensar el tejido solían tener un acabado manual, lo que generaba variaciones en el diámetro. Estos rodillos eran esenciales para lograr el efecto moiré (Figura 5.2) sobre tejidos de seda, al pasar el material entre dos cilindros de cobre que, al comprimir el grano del tejido, generaban un brillo característico [4].



Figura 5.2. Tela con efecto moiré [46].

En Francia, en el año 1741, Jacques de Vaucanson fue nombrado inspector de la fabricación de seda. En el ejercicio de su cargo, “su atención se centró en los problemas de mecanización del tejido de la seda” [47]. Finalmente, una década más tarde, en 1751 Vaucanson diseñó y construyó el primer torno industrial completamente metálico, este supuso un cambio radical respecto a los tornos tradicionales de madera.

Este innovador diseño incorporó por primera vez un carro longitudinal que sostenía el portaherramientas, accionado por un husillo que permitía un avance constante y controlado de la herramienta de corte. Además, incorporó guías prismáticas para facilitar la evacuación de virutas y dotó al conjunto de una estructura completamente metálica, lo que garantizaba una rigidez y estabilidad muy superior a la de los tornos de madera. La rotación de la pieza se realizaba mediante un sistema de poleas y correa: una polea era externa al torno y otra estaba conectada al eje de la pieza. Aunque esta rotación seguía siendo manual, el control del mecanizado alcanzó un gran nivel de precisión y repetibilidad.

Con esta máquina, Vaucanson no solo resolvió las limitaciones de los tornos tradicionales, sino que estableció los principios fundamentales del torno moderno, convirtiéndolo en una máquina-herramienta clave para el desarrollo de los procesos industriales de fabricación [4].

5.1.2 Descripción técnica

En primer lugar, se presenta el torno completo (Figura 5.3), este posee unas dimensiones de 70 cm de altura, 163 cm de longitud y 73 mm de anchura, con una masa aproximada de 506 kg [4]. El torno es capaz de mecanizar piezas de hasta 300 mm de diámetro y 1000 mm de longitud. Este se utilizaba principalmente para mecanizar rodillos de bronce, utilizados en el procesamiento textil.



Figura 5.3. Torno de Jacques de Vaucanson, 1751 [48].

En la Figura 5.4 se presentan las vistas del torno completo, junto con detalles de algunas de sus piezas. Este plano mecánico servirá de referencia para describir los elementos que conforman la estructura del carro longitudinal, así como para comprender la disposición de la pieza a mecanizar.

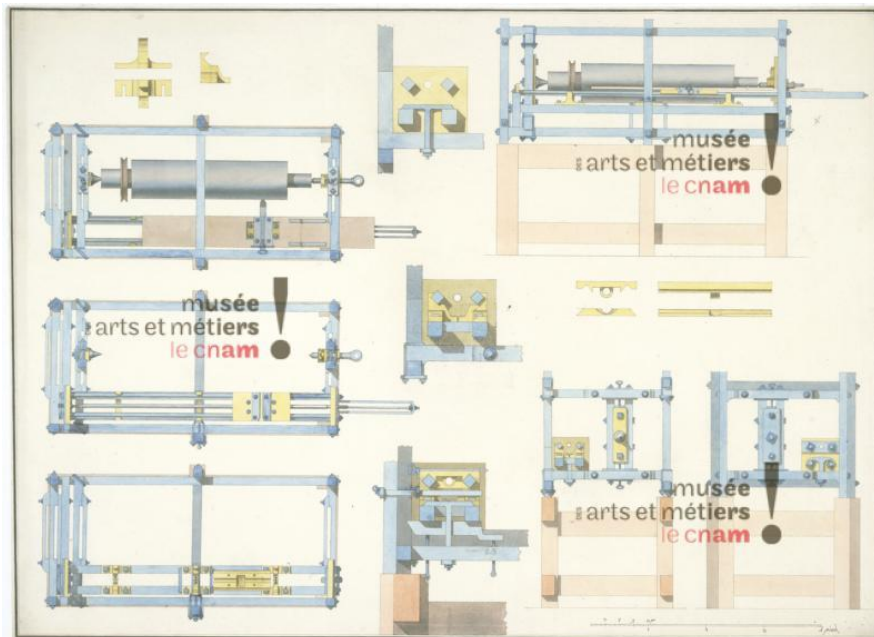


Figura 5.4. Vistas y detalles del torno completo de Vaucanson [49].

A continuación, se describirá el torno en detalle, analizando cada uno de sus componentes y destacando los avances tecnológicos incorporados.

5.1.2.1 Cuerpo del torno

La estructura exterior, o cuerpo del torno, es completamente metálico. Aunque no se ha encontrado información que especifique el material exacto, es probable que se trate de hierro fundido o forjado. Dado que las barras que conforman la estructura del carro longitudinal están fabricadas en hierro forjado y pulido [45], es razonable suponer que el cuerpo del torno también podría estar hecho del mismo material.

En la Figura 5.3 se puede distinguir el cuerpo del torno, el cual está formado por barras macizas de sección cuadrada que se unen entre sí. Las barras transversales en sus extremos poseen superficies cilíndricas roscadas; estas se conectan en los taladros pasantes (orificios) de las demás barras y se ajustan mediante tuercas de sección cuadrada (Figura 5.5). El cuerpo del torno presenta un eje de simetría longitudinal, lo que disminuye la cantidad de piezas con geometrías diferentes, que conforman el cuerpo.

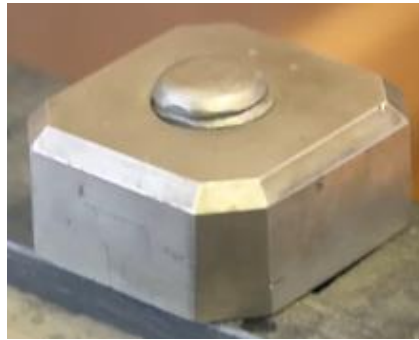


Figura 5.5. Detalle de una tuerca de sección cuadrada utilizada en el torno de Vaucanson. Imagen recortada [50].

El cuerpo completamente metálico supuso un avance con respecto a los tornos anteriores, que poseían cuerpos de madera. El cuerpo le aporta una rigidez y estabilidad mayor al torno, esto permite que, a la hora de mecanizar piezas de elevada masa, las vibraciones de esta no modifiquen la profundidad de corte a lo largo de cada pasada, lo que supone una mejora en la precisión y un acabado superficial más uniforme.

5.1.2.2 Carro longitudinal

Uno de los avances tecnológicos más representativos e importantes fue la incorporación de un carro con portaherramientas que se desplazaba sobre guías (Figura 5.6) y su avance era producido por un tornillo sin fin. A continuación, se describen sus características en detalle.



Figura 5.6. Estructura del carro de desplazamiento longitudinal [45].

La estructura del carro longitudinal está conformada por dos barras de hierro forjado y pulido [45], de sección cuadrada, situadas en la parte superior y giradas 45° respecto a la horizontal del suelo. En la parte inferior se encuentra una pieza compuesta por dos barras longitudinales paralelas, conectadas transversalmente mediante tres barras de menor longitud, formando una estructura tipo bastidor.

Los extremos de las cuatro barras, tanto en la parte frontal como en la posterior, están unidos mediante dos piezas de latón que configuran una sección cuadrada. Sobre la cara frontal de estas piezas, en la parte superior, se dispone una pletina de sección rectangular, del mismo material que las barras, que actúa como elemento de cierre del conjunto [45].

Las barras superior e inferior también están conectadas a lo largo mediante piezas de latón que actúan como pilares. Estas están unidas a las barras inferiores mediante pernos de cabeza cuadrada en los laterales, y mediante un tornillo en el centro. Las barras superiores solo se apoyan sobre el “pilar”. En total se disponen de seis “pilares”, tres a cada lado de la estructura del carro longitudinal [45].

Tanto en la Figura 5.6 como en la Figura 5.7 se puede apreciar los detalles de la estructura del carro longitudinal descrito anteriormente.

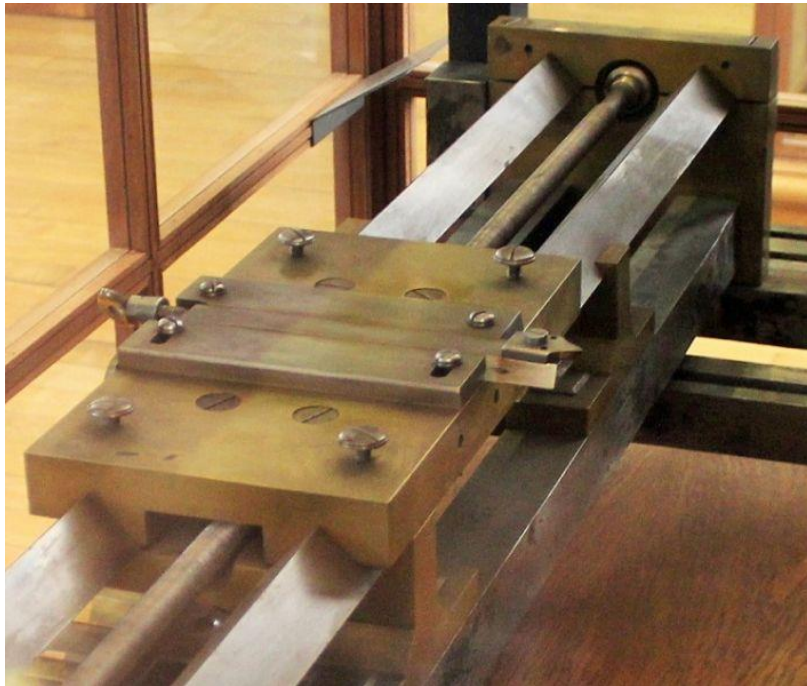
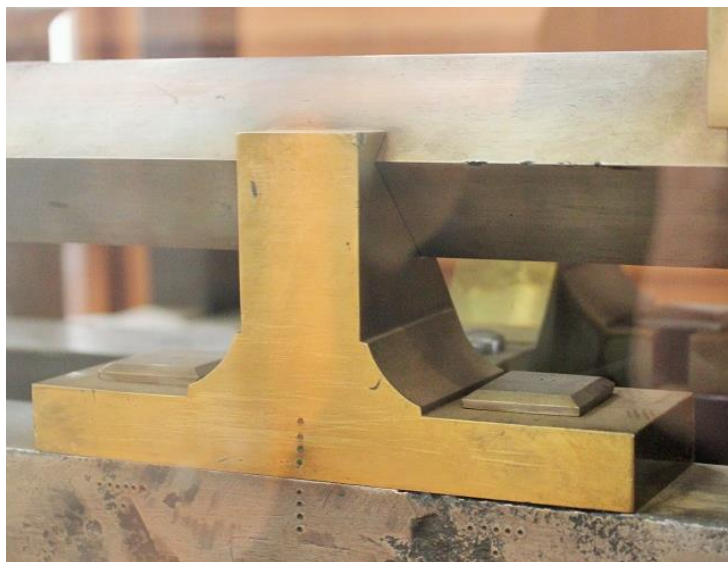
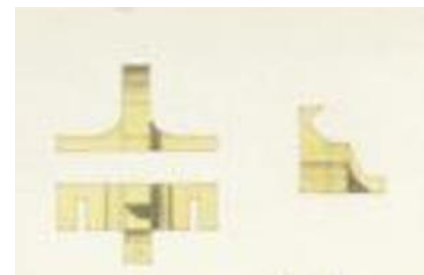


Figura 5.7. Detalle del carro y el portaherramientas. [45].

En la Figura 5.8 se observa la geometría de un “pilar”. Se pueden distinguir unos puntos marcados de forma vertical tanto en la barra inferior como en el “pilar”, que sirven para alinearlos entre sí. Además, se aprecia como la barra superior solo está apoyada sobre él.



(a)



(b)

Figura 5.8. (a) Soporte de unión o “pilar” entre las barras superior e inferior del carro longitudinal [45]. (b) Vistas principales del “pilar”. Imagen recortada [4].

El carro está fabricado en latón [45] y se desplaza linealmente, impulsado por el husillo, deslizando sobre las barras superiores de la estructura descrita anteriormente. En la Figura 5.9 se distingue cómo la zona inferior del carro se ajusta a la geometría de dichas barras.



Figura 5.9. Carro longitudinal y portaherramientas. Captura de pantalla del vídeo “La máquina de 1751 que lo hizo todo” [50].

El desplazamiento del carro se basa en un mecanismo de tornillo sin fin y tuerca, conocido en los tornos modernos como husillo de avance. La tuerca, o en este caso cilindro roscado, forma parte del carro y se encuentra su zona inferior (Figura 5.10). El husillo se acciona manualmente mediante una manivela extraíble. En la Figura 5.11 se observa una pieza adicional de latón, situada en la zona inferior del carro, atravesada por el husillo. Esta pieza, que se encuentra unida al carro mediante tornillos, permite sujetarlo firmemente a las barras guía. La geometría de esta se puede ver en la Figura 5.10. En conjunto, dicha configuración transforma el giro del husillo en un avance lineal controlado del carro a lo largo de las guías.

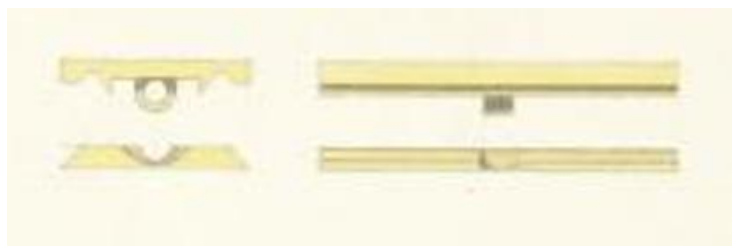


Figura 5.10. Vistas del carro y la pieza inferior que sirve para ajustarlo. Imagen recortada [4].

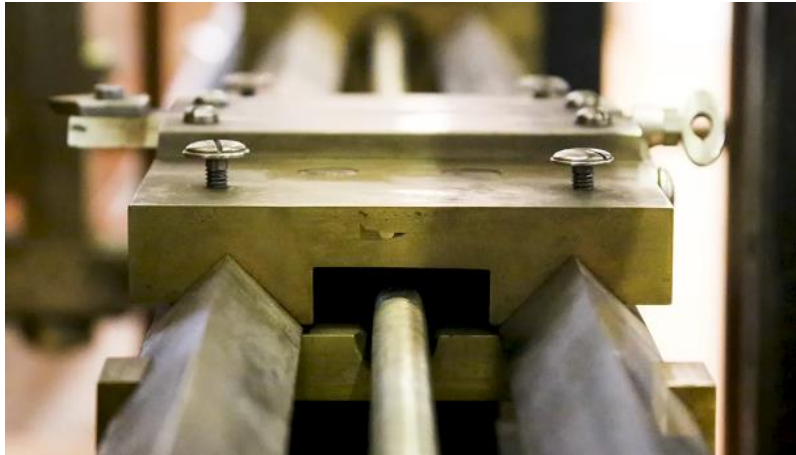


Figura 5.11. Vista desde un lateral del carro longitudinal. Captura de pantalla del vídeo “La máquina de 1751 que lo hizo todo” [50].

En lo que respecta al husillo de avance, se trata de una varilla roscada de paso fino (Figura 5.12). Esta característica permite que el avance por vuelta sea reducido, correspondiéndose con el paso del tornillo. Los avances lentos en el mecanizado se utilizan habitualmente en pasadas de acabado, ya que favorecen un mejor acabado superficial.

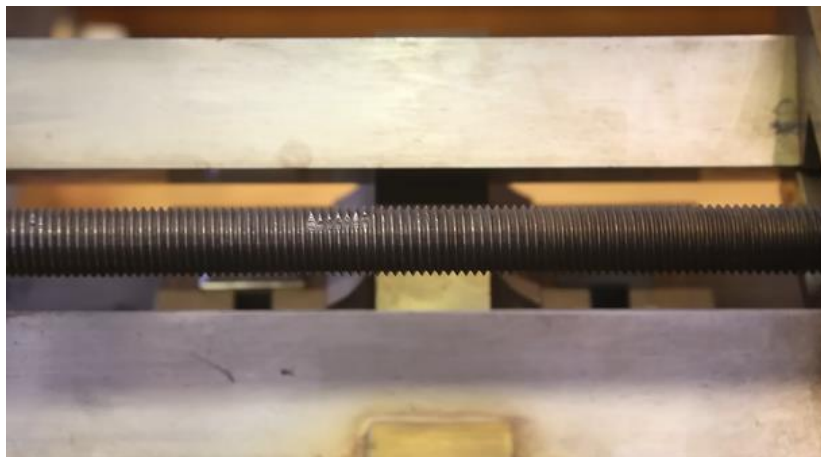


Figura 5.12. Husillo de avance de paso fino. Captura de pantalla del vídeo “La máquina de 1751 que lo hizo todo” [50].

El husillo se une, en los extremos de la estructura del carro longitudinal, a lo que parece ser un elemento esférico hueco (Figura 5.13). Esta esfera actúa como rodamiento, aunque, dado la época de construcción del torno, aún no se usaban rodamientos de bolas o rodillos. Por tanto, puede suponerse que se trata de un casquillo fabricado en un material con alta

resistencia al desgaste, como latón o bronce. Estos materiales permiten disminuir la fricción entre componentes, constituyendo una solución tecnológica común de la época [51]. Además, es probable que este elemento estuviera lubricado con grasas animales o aceites vegetales [52].



Figura 5.13. Conexión entre el extremo del husillo de avance y el casquillo [45].

El husillo se acciona mediante una manivela operada manualmente. La manivela es extraíble y se puede colocar en cualquiera de los extremos del husillo. En la Figura 5.14 se muestra uno de los extremos del husillo donde se coloca la manivela. No se conservan datos referentes a la manivela.

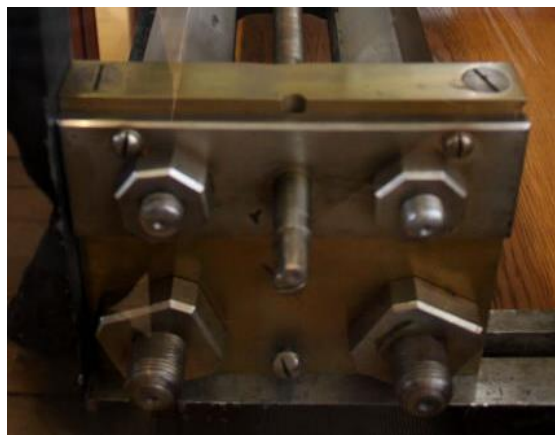


Figura 5.14. Posición destinada a la manivela en uno de los extremos del husillo de avance.
Imagen recortada [45].

Por último, respecto al carro longitudinal, la estructura del portaherramientas se encuentra fijado en la parte superior del carro (Figura 5.9). En la Figura 5.15 se aprecia como se

compone: consta de dos pletinas atornilladas al cuerpo, una de ellas es fija y la otra permite un desplazamiento para su ajuste. Entre ambas pletinas se encuentra el portaherramientas encajado (Figura 5.15), sobre la cual se monta la herramienta de corte, en este caso una plaquita que va atornillada (Figura 5.16).

El portaherramientas permite variar la distancia entre la herramienta de corte y la pieza a mecanizar, este se conoce como movimiento de penetración. Este movimiento se logra mediante el mismo principio que el husillo de avance: un tornillo en el extremo permanece fijo en posición, en contacto con una placa atornillada al lateral del carro, al girar el tornillo este rosca sobre el portaherramientas permitiendo así su desplazamiento controlado.



Figura 5.15. Portaherramientas fijado en el carro longitudinal. Captura de pantalla del vídeo “La máquina de 1751 que lo hizo todo” [50].



Figura 5.16. Detalle de la herramienta de corte; de tipo plaquita. Captura de pantalla del vídeo “La máquina de 1751 que lo hizo todo” [50].

La incorporación del carro longitudinal en el torno de Vaucanson supuso un avance fundamental en la evolución de la máquina-herramienta. Este mecanismo permitió, por primera vez, desplazar de forma controlada y lineal la herramienta de corte a lo largo de la pieza, mejorando notablemente la precisión y la repetibilidad en el mecanizado. Vaucanson fue pionero al introducir este sistema, sentando las bases de los tornos desarrollados posteriormente. Esta innovación marcó un paso decisivo en la mecanización y se consolidó como un hito importante en la historia de la fabricación industrial [4, 12].

5.1.2.3 Centro fijo y móvil

El torno cuenta con dos estructuras que alojan los centros de anclaje, donde se sujeta la pieza a mecanizar. Una de estas estructuras es fija, mientras que la otra es móvil. La estructura fija corresponde al contrapunto en un torno moderno. En la Figura 5.17 se muestra la correspondiente al anclaje móvil.

Ambas estructuras tienen una composición similar: están formadas por dos barras de sección cuadrada dispuestas verticalmente y separadas entre sí. En el espacio entre ellas, tanto en la parte frontal como en la trasera, se unen dos pletinas también dispuestas verticalmente. En estas pletinas se acoplan los mecanismos del contrapunto y del anclaje móvil, cada uno en su respectiva estructura.

Estas estructuras se fijan al cuerpo del torno mediante ranuras en la parte superior e inferior, que permiten su desplazamiento transversal respecto al carro longitudinal. Este movimiento posibilita acercar o alejar la pieza de la herramienta de corte, en función del diámetro de la pieza a mecanizar. Una vez situada en la posición deseada por el operario, las estructuras se aseguran mediante pletinas que se fijan con tuercas. Además, la altura puede ajustarse manualmente con tornillos, para centrar el eje de la pieza a la altura de la herramienta de corte.

Los materiales empleados en la fabricación de los distintos elementos mencionados son los mismos que los utilizados en las piezas descritas anteriormente: hierro forjado y pulido, y latón.



Figura 5.17. Estructura del anclaje desplazable. Imagen recortada [48].

La estructura del anclaje móvil se encuentra fijada en un extremo del cuerpo del torno. Cuenta con un tornillo (Figura 5.18) que se ajusta manualmente y permite presionar la pieza a mecanizar, aplicando la fuerza necesaria para sujetarla contra el contrapunto.



Figura 5.18. Detalle del tornillo para ajustar la pieza a mecanizar [45].

La estructura del contrapunto es similar a la móvil, esta dispone de dos posiciones predeterminadas, establecidas por unas ranuras. Además, se puede modificar su ubicación a lo largo del cuerpo del torno desplazando dos barras transversales que contienen ranuras donde se fija la estructura. Ajustar la posición del contrapunto permite mecanizar piezas de diferentes longitudes.

En la Figura 5.19 se pueden distinguir las dos posiciones predeterminadas, que se encuentran muy próximas entre sí, así como la barra transversal superior móvil. En la parte inferior se encuentra la misma barra.



Figura 5.19. Soportes transversales de la estructura del contrapunto [45].

En la Figura 5.20 se muestra el contrapunto, que está unido a un tornillo y se fija a la pletina de la estructura mediante una tuerca. Además, se aprecia una ligera decoración sin ninguna función mecánica o estructural.



Figura 5.20. Contrapunto ligeramente ornamentado [45].

El sistema que genera el movimiento de giro en la pieza, o movimiento de corte, no pertenece a la estructura principal del torno. La rotación de la pieza se realiza mediante un sistema de poleas y correa: una polea es externa al torno y otra se encuentra conectada al eje de la pieza. La rotación de la polea exterior sigue siendo manual. En la Figura 5.21 se observa la polea situada en el extremo izquierdo del torno, unida al cilindro que se va a mecanizar.

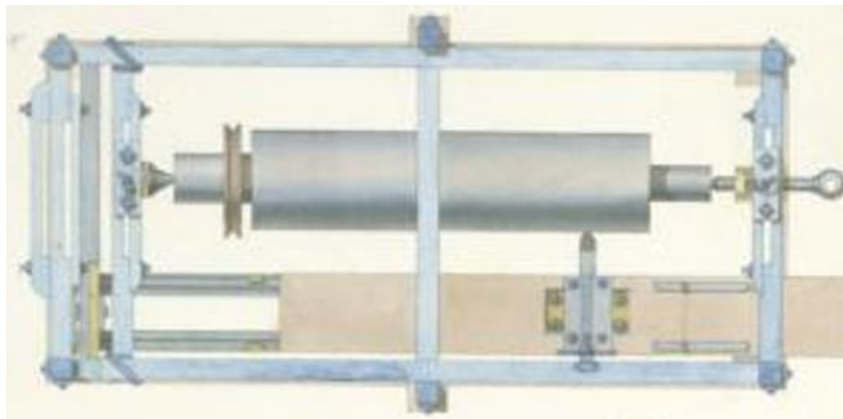


Figura 5.21. Vista de planta del torno de Vaucanson [4].

5.1.3 Impacto de las innovaciones introducidas

Las innovaciones introducidas por Jacques de Vaucanson en su torno de 1751 marcaron un punto de inflexión en la historia de las máquinas-herramienta. La incorporación de un carro

longitudinal guiado sobre bases prismáticas y accionado mediante un tornillo sin fin de paso fino (mecanismo considerado el antecedente directo del husillo de avance de los tornos modernos) permitió por primera vez el desplazamiento controlado de la herramienta de corte respecto a la pieza. Esta solución aportó una precisión, repetitividad y calidad en los acabados superficiales inalcanzables hasta entonces con los tornos tradicionales de madera [4, 45].

Este avance técnico supuso el inicio de una nueva concepción del mecanizado, en la que el movimiento de la herramienta dejaba de depender exclusivamente de la destreza manual del operario para ser controlado por sistemas mecánicos [4]. De este modo, Vaucanson sentó las bases del torno moderno y anticipó principios clave de la automatización, influyendo directamente en los desarrollos posteriores de las máquinas-herramienta que impulsaron la Revolución Industrial [12].

Además, es uno de los primeros ejemplos de máquina-herramienta completamente metálica, concebida específicamente para un uso comercial intensivo. Esto contrasta con otras máquinas de la época, que solían fabricarse para el disfrute personal de propietarios adinerados. Este carácter funcional se refleja en el enfoque racional del acabado de los componentes: se aplicó un alto nivel de detalle allí donde era necesario, sin dedicar esfuerzos innecesarios a las partes sin función crítica [45].

Por último, cabe mencionar que el torno permitía el desplazamiento de los centros, lo que facilitaba el ajuste de la pieza a mecanizar y ampliaba la versatilidad operativa de la máquina.

5.2 Torno de Henry Maudslay

5.2.1 Introducción

Henry Maudslay (1771–1831) (Figura 5.22) fue un ingeniero e inventor británico reconocido como uno de los fundadores de la ingeniería mecánica moderna y pionero en la estandarización y precisión en la fabricación de máquinas-herramienta [53]. Su trabajo en el desarrollo de tornos para el corte de tornillos supuso una revolución en el mecanizado, al permitir realizar cortes precisos y repetibles, sentando las bases para la producción en serie [54]. Además, Maudslay introdujo el uso de planos de trabajo y sistemas de medición estandarizados, contribuyendo de manera significativa a la industrialización y a la mejora de la calidad en la manufactura [55]. Su taller fue un centro de formación para numerosos ingenieros, entre ellos Richard Roberts, James Nasmyth y Sir Joseph Whitworth, quienes

posteriormente desempeñaron un papel clave en la Revolución Industrial, consolidando así el legado de Maudslay en la historia de la industria [56].



Figura 5.22. Retrato de Henry Maudslay (1771-1831) [57].

En 1797, Henry Maudslay construyó un torno que representó un avance crucial en la evolución de las máquinas-herramienta. Su principal innovación fue la incorporación de un sistema de engranajes que conectaba el husillo de avance con el eje del cabezal, permitiendo así la sincronización entre el giro de la pieza y el desplazamiento del carro. Esta mejora técnica permitió, por primera vez, el roscado preciso y repetible de tornillos, lo que permitió el uso de piezas intercambiables, requisito previo a la estandarización y producción en masa. Por ello, consolidó el torno como una herramienta clave en la fabricación en serie durante la Revolución Industrial [2, 12].

Aunque otros ingenieros e inventores, incluidos Jesse Ramsden y David Wilkinson, habían construido tornos antes que Maudslay, su máquina-herramienta era más precisa y presentaba mejoras de funcionalidad [2].

La primera versión del torno de Maudslay requería que el operario desmontara el torno para cambiar la configuración, posteriormente añadió mejoras de diseño que permitieron modificar la configuración simplemente cambiando los engranajes del sistema de movimiento [2].

5.2.2 Descripción técnica

A continuación, se describirán brevemente los elementos que conforman el torno. En primer lugar, en la Figura 5.23 se presenta una vista general del torno completo.

La bancada está formada por dos soportes situados en los extremos del torno, unidos entre sí mediante dos barras con sección de prisma triangular. Este conjunto constituye el cuerpo principal del torno.

En uno de los extremos se encuentra el cabezal, encargado de proporcionar el movimiento de rotación a la pieza a mecanizar. Dicho movimiento se genera manualmente mediante una manivela extraíble. El cabezal está conectado al husillo de avance a través de un sistema de engranajes. Este husillo impulsa el carro longitudinal, que se desliza sobre las barras prismáticas que actúan como guías. A su vez, el portaherramientas se encuentra acoplado al carro.

El contrapunto está montado sobre una pieza de cuerpo único que puede deslizarse a lo largo de una de las guías prismáticas, lo que permite ajustarlo en función de la longitud de la pieza a mecanizar.

Por último, el torno dispone de un elemento auxiliar que también se desplaza sobre las guías. Este componente se utiliza para proporcionar estabilidad a piezas de gran longitud durante el mecanizado, evitando su desalineación respecto al eje del cabezal.

Aunque no se conservan muchos detalles precisos sobre la composición de los distintos elementos, la evidencia disponible sugiere que se emplearon los mismos materiales característicos de finales del siglo XVIII, que Maudslay también utilizó en sus tornos posteriores. Estos materiales son el hierro fundido, el hierro forjado, el bronce y el latón [58].

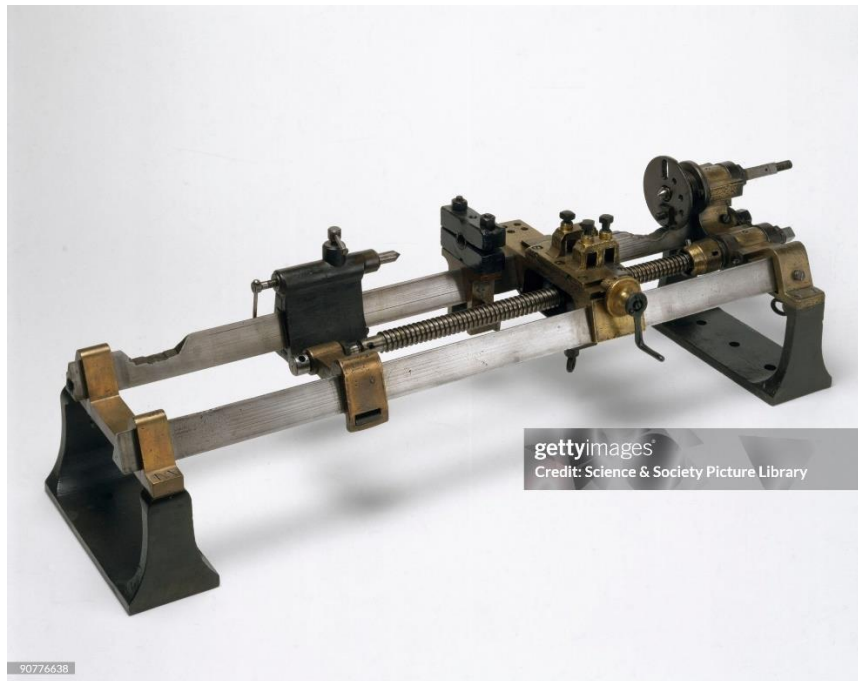


Figura 5.23. Torno de corte de tornillos de Henry Maudslay, 1797 [59].

No se dispone de registros detallados de las dimensiones exactas del torno original, pero existe una versión posterior del año 1800 (Figura 5.24) que se conserva en el Museo Henry Ford en Estados Unidos. Las dimensiones de este torno son de aproximadamente 223,52 cm de longitud y 69,85 cm de anchura (88 in y 27,5 in, respectivamente) [60].

Se sabe que, para demostrar el buen funcionamiento del torno, Maudslay mecanizó un tornillo de aproximadamente 152,4 cm de longitud y 5,08 cm de diámetro (5 ft y 2 in, respectivamente) [2].

Teniendo en cuenta las dimensiones del torno posterior y del tornillo mecanizado, es posible estimar cuáles podrían ser las dimensiones aproximadas del torno de Maudslay de 1797.



Figura 5.24. Torno de corte de tornillos de Henry Maudslay, 1800 [60].

5.2.2.1 Cuerpo

El cuerpo está constituido por los dos soportes que sujetan el conjunto del torno y las dos barras con forma de prisma triangular. En la Figura 5.25 se observa uno de los soportes situados en un extremo, este tiene una geometría compleja, se aprecian redondeos y optimización de material al fabricar. También posee dos taladros pasantes en la parte inferior que sirven para anclarlo a una mesa de trabajo. En la parte superior de este, se encuentra otro soporte fijado mediante tornillos, el cual tiene en los extremos la forma para que las barras prismáticas encajen en él.



Figura 5.25. Detalle de un soporte del cuerpo del torno. Imagen recortada [59].

El soporte ubicado en el extremo opuesto del cuerpo del torno presenta una geometría muy similar al anteriormente descrito. En su parte superior se encuentra un segundo soporte, de diseño más complejo que el del otro extremo. Este componente no solo cuenta con los alojamientos necesarios para encajar las barras prismáticas, sino que también incorpora la geometría requerida para fijar los mecanismos del husillo de avance y del cabezal (Figura 5.26).



Figura 5.26. Detalle del soporte del cuerpo situado en el extremo del cabezal. Imagen recortada [59].

5.2.2.2 Sistema de giro y desplazamiento

El movimiento principal de giro de la pieza se genera manualmente mediante una manivela extraíble acoplada al cabezal. Este transmite directamente la rotación a la pieza a mecanizar. A su vez, el movimiento de rotación del cabezal está conectado, mediante un sistema de engranajes, al husillo de avance. Esta configuración permite que el carro longitudinal, junto con el portaherramientas, avancen a velocidad constante, lo que garantiza un mecanizado uniforme de tornillos con paso definido, tanto en el espaciado como en el ángulo.

Además, el cabezal incorpora un plato con una serie de orificios diseñados para insertar elementos de sujeción de la pieza. Este componente puede considerarse un como un plato de garras utilizado en los tornos modernos.

En la Figura 5.26 y la Figura 5.27 se muestran el mecanismo del cabezal y el sistema del husillo de avance.



Figura 5.27. Detalle del sistema de giro y movimiento. Imagen recortada [59].

El conjunto de engranajes original no se conserva. Sin embargo, al observar la disposición del cabezal y del husillo de avance, y teniendo en cuenta el diseño del torno construido posteriormente por Maudslay (Figura 5.28), es posible hacer una suposición fundamentada sobre la ubicación de los engranajes.

Se estima que el sistema estaría compuesto por tres engranajes (a diferencia del torno de la Figura 5.28 que posee dos), dispuestos en un mismo plano: uno en el eje del cabezal, otro en la parte inferior de este, y un tercero en el eje del husillo de avance. Esta hipótesis se apoya en la presencia visible de un eje situado en la parte inferior del cabezal, lo que sugiere la necesidad de un engranaje intermedio.

Estos engranajes podrían haber tenido diferentes tamaños, lo que habría permitido modificar la relación de transmisión entre el cabezal y el husillo de avance. De este modo, sería posible ajustar la velocidad de rotación o el par transmitido, adaptando el mecanizado a distintas condiciones de trabajo.

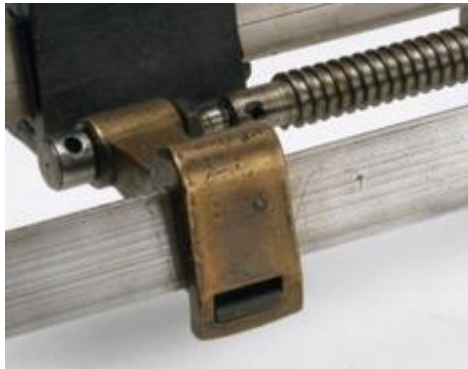


Figura 5.28. Detalle del sistema de engranajes del torno de Henry Maudslay, 1800. Imagen recortada [60].

El husillo de avance (Figura 5.29) está fijado en uno de sus extremos a un elemento de unión que lo conecta con el soporte del cabezal. En el otro extremo, se acopla a un soporte guía que se apoya sobre una de las barras prismáticas del cuerpo del torno (Figura 5.30). Este segundo soporte es desplazable, lo que permite sustituir el husillo por otro de diferente longitud. De este modo, la máquina puede adaptarse al mecanizado de piezas de distintas longitudes.



Figura 5.29. Husillo de avance. Imagen recortada [33].



(a)



(b)

Figura 5.30. (a) Soporte de husillo desplazable. (b) Soporte de husillo que acopla con el sistema de movimiento. Imágenes recortadas [59].

5.2.2.3 Carro longitudinal

El carro longitudinal (Figura 5.31) se desplaza a lo largo del torno mediante el husillo de avance, cuyo mecanismo de tuerca se encuentra en la parte inferior del propio carro (Figura 5.32). Además, el carro se apoya y desliza sobre las guías prismáticas, siguiendo un recorrido lineal. Para evitar movimientos verticales durante el desplazamiento, en su parte inferior se encuentra fijado mediante una pletina ajustada con un tornillo.

En uno de sus extremos presenta una serie de orificios (Figura 5.31) cuya función no puede determinarse con certeza. Pueden suponerse, que podrían haber servido para acoplar elementos auxiliares que facilitarían la sujeción de la pieza.

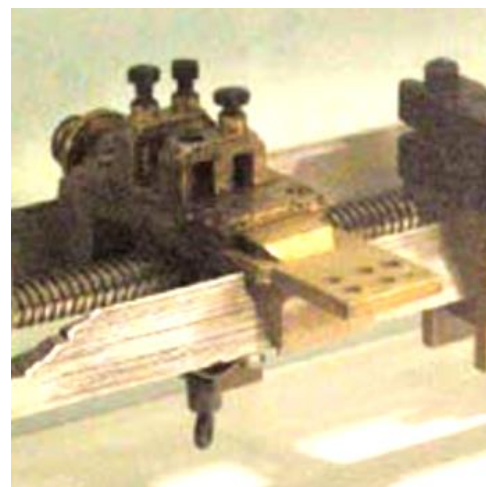
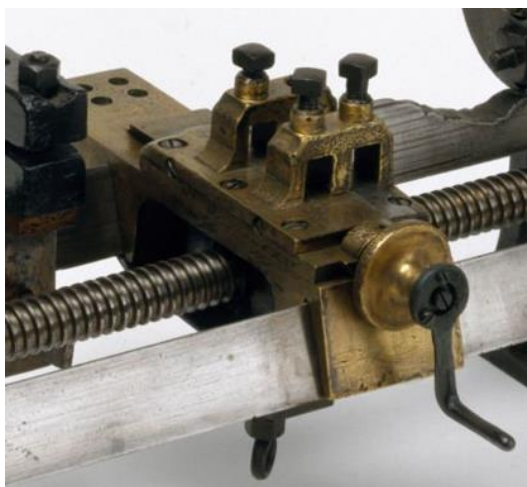


Figura 5.31. Carro longitudinal portaherramientas. Imágenes recortadas [2], [59].



Figura 5.32. Detalle del carro y el portaherramientas [61].

5.2.2.4 Portaherramientas

El portaherramientas se encuentra unido a la parte superior del carro longitudinal (Figura 5.31). Su función es sujetar la herramienta de corte y permitir el movimiento de penetración, basado en el mismo principio de tornillo sin fin y tuerca (husillo). El tornillo está ubicado entre la parte superior del carro y la base del portaherramientas (Figura 5.32), y se acciona manualmente mediante una manivela conectada a este, la cual desliza sobre una guía central.

En la parte superior del portaherramientas se encuentran los soportes donde se inserta la herramienta de corte (Figura 5.32). Este componente ofrece dos posiciones para el montaje de la herramienta, la cual se fija firmemente mediante tornillos. El conjunto de elementos que conforman el carro y el portaherramientas permite regular con precisión la profundidad de corte.

5.2.2.5 Contrapunto y elementos auxiliares

El contrapunto está conformado por una única pieza, este se inserta atravesada por una de las barras prismáticas que constituyen el cuerpo del torno. Esta configuración permite que el

contrapunto se desplace longitudinalmente a lo largo de la barra, facilitando su ajuste según la longitud de la pieza a mecanizar.

El sistema de fijación del contrapunto se compone de varios elementos: un tornillo en posición longitudinal que desplaza el contrapunto para presionarlo contra la pieza, un tornillo superior que evita el movimiento indeseado de este durante el mecanizado, y un tercer tornillo en la parte inferior que se aprieta contra la barra prismática para fijar la posición del conjunto una vez realizado el ajuste.

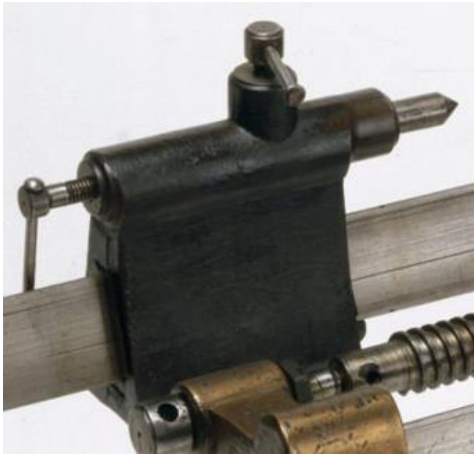


Figura 5.33. Contrapunto. Imágenes recortadas [2], [59].

Además, se incorpora un conjunto compuesto por dos elementos principales: una pieza inferior que actúa como soporte y permite el desplazamiento sobre la barra prismática, y un conjunto superior formado por dos piezas que se ensamblan por mitades. Entre estas mitades se encuentra un orificio pasante (Figura 5.34).

Este conjunto tiene como función principal estabilizar la pieza a mecanizar, especialmente cuando es de gran longitud. El tornillo atraviesa el orificio, lo que evita su desplazamiento radial durante el mecanizado, garantizando así que la profundidad de corte se mantenga constante en cada pasada.



Figura 5.34. Soporte guía de la pieza a mecanizar. Imagen recortada [59].

5.2.3 Impacto de las innovaciones introducidas

El torno desarrollado por Henry Maudslay a finales del siglo XVIII marcó un punto de inflexión en la historia de las máquinas-herramienta y supuso una contribución decisiva al progreso técnico de la Revolución Industrial [2]. Entre sus innovaciones más destacadas se encuentra la incorporación de un sistema de avance automático mediante husillo, sincronizado con el giro de la pieza a través de un tren de engranajes. Esta mejora permitió mecanizar con alta precisión, esto transformó radicalmente los procesos de fabricación [43].

A diferencia de los tornos anteriores, el de Maudslay garantizaba una mayor repetibilidad, precisión dimensional y estandarización, elementos clave para la producción en serie. De este modo, sentó las bases del mecanizado moderno. Además, su diseño estableció una arquitectura de torno que se mantendría, con variaciones, a lo largo de los siglos XIX y XX [2-3].

En conjunto, el torno de Henry Maudslay no solo introdujo avances técnicos esenciales, sino que consolidó el principio de la intercambiabilidad de piezas, facilitó la expansión de los talleres mecánicos y se convirtió en uno de los pilares tecnológicos sobre los que se construyó la Revolución Industrial [2, 43].

5.2.4 Estimación de la fuerza de corte

Con el objetivo de analizar las capacidades mecánicas del torno de Henry Maudslay, en este subapartado se estima, en primer lugar, la fuerza que se debe ejercer manualmente para cortar material, teniendo en cuenta la geometría y configuración del torno. Más adelante, se presenta un ejemplo práctico de una operación de roscado con un material específico, junto con la estimación de la fuerza de corte máxima que puede ejercerse de forma manual.

Para ello, se plantean una serie de hipótesis fundamentadas sobre la configuración de los engranajes y sus relaciones de transmisión. El cálculo se basa en principios de la mecánica de corte y en las ecuaciones fundamentales para la transmisión de potencia mediante engranajes [62].

A continuación, se describen los pasos seguidos para obtener estos cálculos, partiendo desde la pieza a mecanizar, pasando por el carro portaherramientas, que está conectado al husillo de avance, y continuando por el conjunto de engranajes vinculados al cabezal.

Paso 1: Fuerza de corte tangencial

En primer lugar, se calcula la fuerza de corte necesaria para arrancar material, según se muestra en la ecuación (1).

$$F_c = K_c \cdot A_c \quad (1)$$

Donde F_c es la fuerza de corte (N), K_c es la resistencia específica de corte del material (N/mm^2), que se obtiene experimentalmente, y A_c es el área de corte (mm^2). Esta última se calcula según la ecuación (2).

$$A_c = a_p \cdot f \quad (2)$$

Donde a_p es la profundidad de corte (mm) y f el avance de la herramienta (mm/rev).

Paso 2: Par resistente en el husillo

Se calcula el par que debe ejercer el husillo para vencer la fuerza de corte F_c , considerando que el husillo mueve el carro portaherramientas, el cual sostiene la herramienta de corte, ubicada a una determinada distancia de la pieza. El par de corte se calcula como se muestra en la ecuación (3).

$$T_c = F_c \cdot r \quad (3)$$

Donde T_c es el par de corte (Nm), F_c la fuerza de corte (N) y r es el radio de la pieza a mecanizar (m).

Paso 3: Relación de transmisión

El par que debe ejercer el husillo, T_c , se transmite a través del engranaje que posee. El sistema de transmisión de movimiento del torno consta de un tren de engranajes que conecta el cabezal con el husillo de avance. La siguiente configuración de engranajes está basada en una hipótesis mencionada en anteriores apartados (Figura 5.35). El engranaje motor (A) corresponde al del cabezal, existe un engranaje intermedio (B) que actúa como elemento de enlace entre los engranajes separados, y un tercero que corresponde al husillo (C). Todos los engranajes se encuentran en el mismo plano y cada uno en un eje diferente. Por lo tanto, la relación de transmisión se calcula como se muestra en la ecuación (4).

$$i = \frac{Z_A}{Z_B} \cdot \frac{Z_B}{Z_C} = \frac{Z_A}{Z_C} = \frac{Z_{cabezal}}{Z_{husillo}} \quad (4)$$

Donde Z es el número de dientes del engranaje.

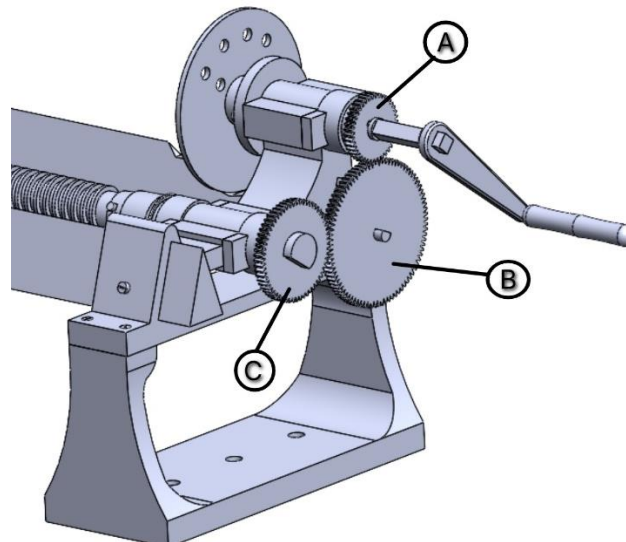


Figura 5.35. Modelo 3D del torno de Henry Maudslay. Hipótesis del tren de engranajes.

Paso 4: Par necesario en el cabezal

El par necesario en el engranaje del cabezal, teniendo en cuenta la relación de transmisión, y las pérdidas mecánicas, es el que se indica en la ecuación (5).

$$T_{cabezal} = \frac{T_c}{i \cdot \eta} \quad (5)$$

Donde T_c es el par que debe ejercer el husillo (Nm), calculado anteriormente en la ecuación (3); i es la relación de transmisión, y η es el rendimiento mecánico, que corresponde con las pérdidas mecánicas por fricción entre los engranajes.

Paso 5: Fuerza aplicada por el operario

Por último, teniendo el par en el engranaje del cabezal, $T_{cabezal}$, la fuerza necesaria que el operario debe ejercer en la empuñadura de la manivela es la siguiente (6).

$$F_{manual} = \frac{T_{cabezal}}{L} \quad (6)$$

Donde F_{manual} es la fuerza a aplicar (N) y L es la longitud de la manivela (m). La fuerza F_{manual} , expresada en unidades de kilogramo-fuerza (kgf), se presenta en la ecuación (7).

$$F_{manual}(kgf) = \frac{F_{manual}(N)}{9,81} \quad (7)$$

Donde 9,81 (m/s²) es la aceleración de la gravedad.

Relacionando todos los pasos anteriores, se obtiene la ecuación (8), que permite calcular directamente la fuerza necesaria, F_{manual} , que hay que ejercer en la manivela, en función del material a mecanizar.

$$F_{manual} = \frac{K_c \cdot a_p \cdot f \cdot r}{i \cdot \eta \cdot L} \quad (8)$$

Donde:

K_c : resistencia específica de corte del material (N/mm²)

a_p : profundidad de corte (mm)

f : avance de la herramienta (mm/rev)

r : radio de la pieza a mecanizar (mm)

i : relación de transmisión

η : rendimiento mecánico

L : longitud de la manivela (mm)

5.2.4.1 Ejemplo práctico de cálculo

Para una operación de roscado el giro del cabezal debe estar sincronizado con el avance del husillo, siendo este último el que determina el paso de la rosca. Esto se consigue mediante el tren de engranajes. La relación que deben cumplir estos es la siguiente (9).

$$i = \frac{P_{buscado}}{P_{husillo}} = \frac{Z_{cabezal}}{Z_{husillo}} \quad (9)$$

Donde P es el paso del tornillo (mm) y Z el número de dientes de los engranajes.

Para calcular la fuerza de corte que debe ejercerse manualmente para una operación de roscado de un determinado material, se presenta el siguiente ejemplo práctico:

Se ha seleccionado para mecanizar la rosca de un tornillo métrico de 24 mm (M24) con un paso $P = 3 \text{ mm}$, fabricado en bronce, cuyo valor aproximado de resistencia específica al corte es $K_c = 800 \text{ N/mm}^2$ [63], y se ha supuesto un rendimiento mecánico $\eta = 0,5$ [64].

El husillo de avance del torno se ha supuesto con un paso de rosca de 4 mm. La profundidad de pasada será de $a_p = 0,5 \text{ mm}$. En el mecanizado de roscas, se realizan varias pasadas variando la profundidad de corte hasta llegar a la deseada, esto se hace para disminuir la fuerza de corte necesaria y evitar el desgaste prematuro de la herramienta de corte. Se ha considerado una longitud de manivela de $L = 0,35 \text{ m}$. La relación de transmisión, atendiendo a la operación de roscado y según la ecuación (9), queda como $i = \frac{3}{4}$.

Haciendo uso de la ecuación (8), con los datos anteriores, se calcula la fuerza necesaria para mecanizar la rosca del tornillo. Este queda de la siguiente manera.

$$F_{manual} = \frac{K_c \cdot a_p \cdot f \cdot r}{i \cdot \eta \cdot L} = \frac{800 \cdot 0,5 \cdot 3 \cdot 0,012}{\frac{3}{4} \cdot 0,5 \cdot 0,35} = 109,71 \text{ N}$$

La fuerza estimada necesaria para el roscado del tornillo es de 109,71 N, aproximadamente 11,18 kgf, un valor considerado razonable y factible para una operación manual. Según estudios sobre ergonomía y biomecánica, una persona puede mantener esfuerzos manuales continuos de entre 50 y 100 N sin fatigarse, en tareas repetitivas o controladas [65-66]. Estos

datos respaldan la viabilidad de la fuerza calculada en esta operación de corte, aunque la tarea de mecanizado podría haberse realizado de forma no prolongada para evitar la fatiga del operario.

Si se asume una fuerza manual de 165 N para la misma operación de roscado anterior, se obtiene un valor de $K_c = 1203 \text{ N/mm}^2$. Lo que supondría mecanizar, en las condiciones supuestas, materiales como cobre, latón, bronce e incluso fundición gris. Además, si se reduce el paso y la métrica del tornillo a mecanizar, la operación se vuelve menos exigente, ya que la fuerza manual necesaria disminuye.

En la Tabla 1 se muestran valores típicos de resistencia específica al corte de distintos materiales [63].

Tabla 1: Resistencia específica de corte K_c de diferentes materiales.

Material	K_c (N/mm ²)
Cobre	100 - 200
Latón (CuZn)	400 - 800
Bronce (CuSn, CuAl)	600 - 1200
Fundición gris	900 - 1600
Acero al carbono	1600 - 2500
Acero aleado (templado)	2000 - 3500

Cabe destacar que los cálculos anteriores son una estimación orientativa de órdenes de magnitud, para ofrecer una idea aproximada de la capacidad mecánica del torno de Henry Maudslay. Estos cálculos se basan en múltiples supuestos, tanto sobre las geometrías involucradas como sobre las simplificaciones del funcionamiento del sistema y la capacidad humana para ejercer fuerza manualmente. Para realizar un estudio más preciso sería necesario disponer de información detallada sobre la configuración real de los engranajes, sus dimensiones exactas y las propiedades mecánicas del material de fabricación.



6 Metodología

El presente apartado describe el proceso seguido para llevar a cabo la digitalización de las máquinas-herramienta seleccionadas, con el objetivo de representar de forma fiel cada elemento que las componen, y su interacción entre ellos. Para ello, se ha recurrido a una combinación de investigación y obtención de información acerca de la construcción de estas. Además de un análisis dimensional mediante imágenes que se conservan. Con estos datos se procede al modelado de los distintos componentes mediante el diseño asistido por ordenador (CAD).

La metodología se estructura en distintas fases, que incluyen la recopilación de información técnica e histórica, la estimación de dimensiones a partir de imágenes reales, el modelado individual de cada componente y, finalmente, el ensamblaje completo de cada máquina-herramienta.

6.1 Recopilación y análisis de información

Antes de empezar a digitalizar las máquinas-herramientas es necesario obtener todos los datos posibles que se conserven de estas, para poder comprender su funcionamiento conjunto, así como cada pieza que lo compone. Para ello es necesario buscar imágenes, planos de las diferentes piezas, documentos técnicos que describan su funcionamiento. En los siguientes subapartados se describe en detalle los pasos seguidos para lograr este objetivo.

6.1.1 Datos y referencias para la construcción de los modelos

En el caso del torno de Vaucanson, este se conserva en el Musée des Arts et Métiers en París. Del sitio web del museo se ha obtenido información como contexto histórico, los avances que introdujo y las consecuencias que tuvo. Además de una descripción de su funcionamiento y de los materiales del que se compone, a parte de las dimensiones de la estructura del torno [4]. También se encuentra imágenes, aunque escasas, tanto del cuerpo completo como de algún elemento en concreto. Además de un plano que contiene las vistas del torno completo y detalles de algunas piezas [49].

También se han obtenido imágenes con más detalle y una descripción más extensa del funcionamiento de torno en el sitio web de Grace's Guide To British Industrial History [45].

Por último, en el vídeo de YouTube *The 1751 Machine that Made Everything* [50], se presentan más imágenes del torno, tomadas directamente del torno expuesto en el museo.

En el caso del torno de Maudslay, se conserva en el Science Museum en Londres. El inconveniente es que no se encuentran ni imágenes ni información acerca del torno de 1797 publicadas en el sitio web de este museo. Sí está disponible un modelo de torno de corte de tornillos tres años posterior al primer diseño. Este modelo resulta útil para comprender la configuración del sistema de movimiento y la conexión entre el cabezal y el husillo de avance [67].

En el artículo “Henry Maudslay, el gran innovador de la máquina herramienta” [2], publicado en la revista *Técnica Industrial*, se describe los elementos del torno y su funcionamiento. Además, se menciona las grandes dimensiones de un tornillo que se mecanizó con el torno, para demostrar el buen funcionamiento de este. Lo que sirve de referencia para estimar las dimensiones del torno. El artículo también incluye una imagen del torno completo.

Las imágenes disponibles del torno son escasas; además de la mencionada, se identifican tres imágenes adicionales que proceden de un banco de imágenes [59].

En el libro *English and American Tool Builders* [43], obra de Joseph Wickham Roe, se describe el torno, su funcionamiento y su longitud aproximada. Además, se menciona un modelo posterior que incorpora mejoras con respecto al primer diseño.

Todo este material fue esencial para comprender tanto los elementos que conforman estas máquinas-herramienta como su funcionamiento.

6.1.2 Análisis de piezas y funcionamiento conjunto

Para poder modelar cada pieza individualmente es necesario identificar y comprender la función de cada una de las piezas que conforman a estas máquinas-herramienta. Esto se ha logrado con la información recopilada anteriormente, haciendo uso de la descripción de los elementos, del funcionamiento del conjunto y con el análisis de las imágenes disponibles. Además, para identificar cada elemento y su función se ha comparado estas máquinas-herramienta del siglo XVIII con las modernas, apreciando así las similitudes y las diferencias.

Una vez realizado el análisis de los distintos componentes, es necesario determinar las dimensiones que definen su geometría.

6.1.2.1 Obtención de dimensiones

Para modelar las máquinas-herramienta es necesario conocer sus dimensiones. Para ello fue necesario estimar sus dimensiones a partir de imágenes históricas, dado que no se dispone de planos acotados originales. La obtención de medidas se ha realizado combinando distintos criterios con el objetivo de alcanzar una escala proporcional y coherente.

En primer lugar, se han consultado fuentes documentales que ofrecen medidas aproximadas del torno, las cuales han servido como punto de partida para establecer una dimensión de referencia. Asimismo, se han analizado otras máquinas-herramienta similares de la época, tanto en términos funcionales como estructurales, para inferir proporciones típicas de los elementos principales (bancada, husillo, soportes, etc.).

Para ambas máquinas se ha seguido el mismo procedimiento. A partir de una imagen, donde se aprecie el cuerpo completo del torno, se ha utilizado el software AutoCAD para obtener las dimensiones. Para ello se ha tomado una medida conocida o estimada como referencia y, a partir de esa medida se ha realizado un escalado de la misma, después de esto se han determinado las dimensiones relativas del resto de componentes del torno. Este procedimiento ha permitido obtener unas dimensiones aproximadas y coherentes que respetan la configuración general de las máquinas.

6.1.2.2 Croquis de los componentes

Antes de iniciar el modelado tridimensional de los componentes, es necesario definir previamente los croquis de cada pieza. Estos sirven como guía para el proceso de modelado, asegurando que las geometrías generadas se correspondan con la planificación previa y respeten las proporciones del conjunto completo. Esta tarea se ha llevado a cabo de forma manual con el objetivo de agilizar el proceso. Para la elaboración de los croquis se han considerado los detalles de cada pieza, sus dimensiones aproximadas anteriormente obtenidas, así como el mecanismo al que pertenecen.

6.2 Modelado 3D

6.2.1 Software utilizado

El modelado y ensamblaje de las piezas de cada una de las máquinas-herramienta se ha llevado a cabo utilizando el software SolidWorks, una herramienta que posee el módulo de diseño mecánico 3D asistido por ordenador (CAD).

SolidWorks se basa en dos características de diseño, la variacional y la paramétrica. La variacional implica que las cotas y relaciones geométricas definidas en el modelo dominan a la geometría, es decir, la modificación en cualquiera de ellas se traduce automáticamente en cambios en la forma del modelo, y la característica paramétrica conlleva que se pueden establecer relaciones entre diferentes parámetros, como cotas, de manera que si una de ellas varía la otra lo hace según la relación establecida [68].

La elección de SolidWorks como software se debe a que todo el proceso de modelado, y posterior ensamble es flexible. Este enfoque facilita la edición y actualización del modelo de forma eficiente. También se destaca la capacidad para gestionar ensamblajes con muchos elementos.

Además, permite generar de manera automática las vistas de las piezas y el explosionado de los distintos ensamblajes. Esta información es útil para interpretar cada pieza y comprender la función que esta desarrolla en la máquina. Estas características convierten a SolidWorks en una herramienta adecuada para este propósito.

6.2.2 Modelado individual de las piezas

Cada componente de las máquinas-herramienta ha sido modelado individualmente siguiendo los croquis previamente obtenidos. Para facilitar el manejo de muchas piezas, se ha dividido las máquinas en subensamblajes, esto simplifica su posterior integración en el modelo completo.

El modelado de una pieza en SolidWorks se basa en la creación de croquis en 2D, que consiste en dibujar la forma básica de la geometría sobre un plano de trabajo. Este croquis se

define mediante líneas, arcos, círculos y otras entidades geométricas, y se parametriza utilizando cotas y relaciones para controlar su tamaño y forma con precisión. Una vez finalizado el croquis, se utilizan operaciones que confieren volumen al croquis. Estas pueden variar según las necesidades de la pieza.

A partir de este volumen base, se aplican operaciones adicionales para ajustar la geometría, tales como cortes (extruir recortes), redondeos, chaflanes y la creación de agujeros o ranuras, siempre respetando las dimensiones y características propias de la pieza a modelar. Cada operación se basa en nuevos croquis 2D o en las superficies del sólido existente, y gracias al diseño paramétrico, cualquier modificación en los croquis o parámetros iniciales se refleja automáticamente en el modelo completo, facilitando ajustes rápidos durante el proceso de diseño.

En primer lugar, para ambas máquinas, se ha comenzado modelando las piezas que forman los cuerpos de los tornos, esto es para tener una primera referencia de las dimensiones finales del conjunto e ir modelando las siguientes piezas ajustando sus dimensiones a las del cuerpo. El siguiente paso ha sido modelar las piezas en función de la complejidad de sus geometrías, en orden ascendente. Se ha dejado para el final las piezas de las cuales no se había obtenido toda la información referente a su geometría debido a que la información acerca de los detalles constructivos no estaba disponible.

Con las piezas individuales modeladas y definidas, el siguiente paso consiste en integrar estos componentes mediante el ensamblaje, con el fin de representar las estructuras completas y funcionales de los tornos.

6.2.3 Ensamblaje de los conjuntos

El proceso de ensamblaje consiste en posicionar y relacionar las piezas modeladas según sus conexiones y movimientos reales, utilizando relaciones y restricciones tanto geométricas como de posición que aseguran un montaje coherente y funcional. Esto permite analizar la interacción entre componentes y verificar la correcta unión del conjunto.

Como se comentó en el subapartado anterior, en primer lugar se ensamblan las piezas correspondientes a cada subensamblaje, definiendo las relaciones posicionales necesarias. Una vez completados los subensamblajes, se procede a unirlos para formar el conjunto completo de la máquina-herramienta, estableciendo también las relaciones entre ellos.

Finalmente, se verifica que las interacciones entre los distintos componentes sean correctas, comprobando tanto los límites de movimiento de cada pieza como el funcionamiento global del conjunto. Para ello, se ha realizado un estudio de movimiento utilizando la herramienta de simulación de SolidWorks, lo que permite visualizar el funcionamiento de la máquina y la interacción de todos sus componentes, garantizando así la correcta operación del ensamblaje.

Durante el proceso de ensamblaje de los diferentes componentes, fue necesario modificar tanto la geometría como las dimensiones de algunas piezas para lograr un encaje adecuado entre ellas. Estas modificaciones se deben al método empleado para obtener las dimensiones, el cual no es exacto, lo que provoca pequeñas variaciones en cada pieza que requieren ajustes para que el conjunto final encaje correctamente.

Tras explicar el procedimiento de modelado y ensamblaje, a continuación, se presentarán los resultados obtenidos, mostrando las distintas piezas modeladas de ambas máquinas-herramienta, así como el ensamblaje completo.

7 Modelos 3D obtenidos

En este apartado se presentan los resultados de los modelos 3D obtenidos de los distintos elementos que conforman ambas máquinas-herramienta. Asimismo, se incluyen los subensamblajes generados, detalles de las piezas más representativas y el ensamblaje final del conjunto.

7.1 Torno de Jacques de Vaucanson

Para el torno de Vaucanson se ha comenzado modelando las piezas que forman el cuerpo, estas son barras de sección cuadrada que se unen entre sí. Existe un eje de simetría longitudinal del cuerpo del torno, lo que disminuye el número de piezas a modelar. En la Figura 7.1 se muestran las cinco piezas modeladas que forman el cuerpo del torno. Debido a la simetría del conjunto, algunas piezas se replican para completar la estructura.

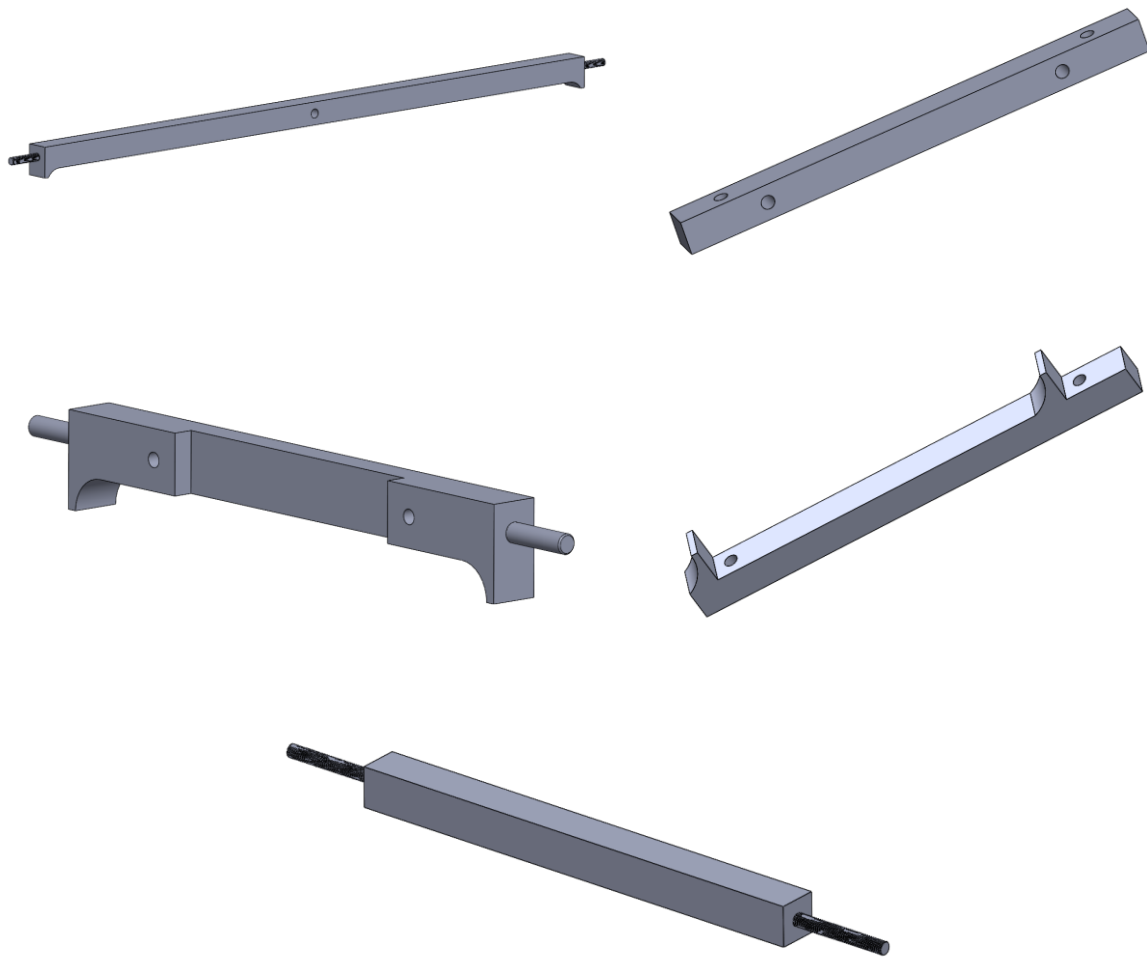


Figura 7.1. Diferentes piezas que conforman el cuerpo del torno de Vaucanson.

El ensamblaje de las distintas piezas del cuerpo queda como se muestra en la Figura 7.2.

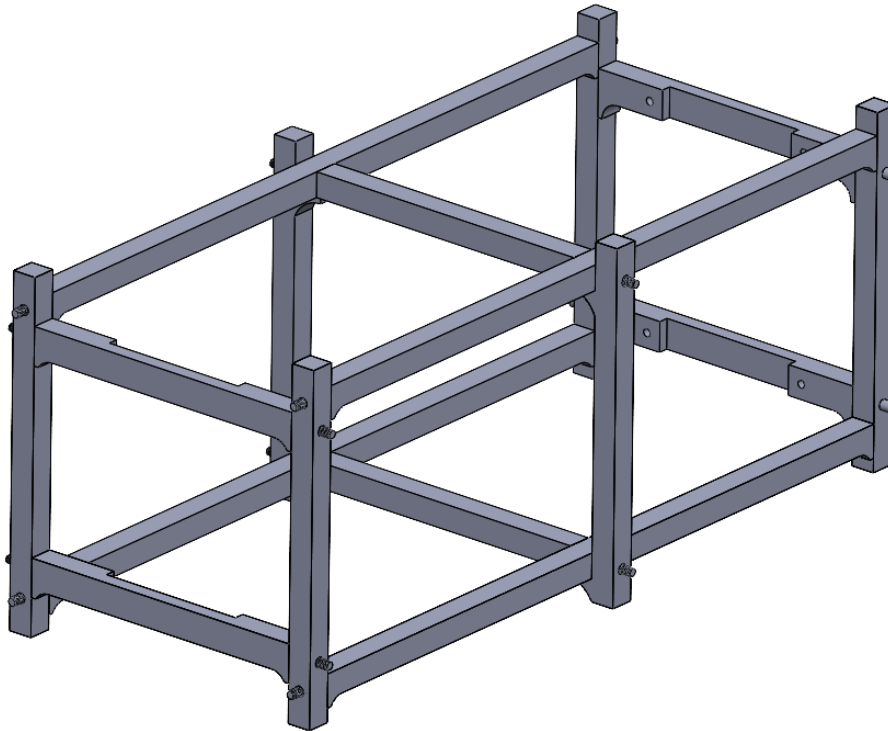


Figura 7.2. Ensamblaje de las piezas principales del cuerpo del torno.

Además de las piezas principales que conforman el cuerpo, a continuación, se modelan los elementos encargados de modificar y fijar la posición de los centros del torno. Las barras transversales permiten desplazar los centros a lo largo del cuerpo. El soporte con ranura guía modifica levemente su posición (Figura 7.3) y las pletinas fijan los centros contra la estructura del cuerpo Figura 7.4.

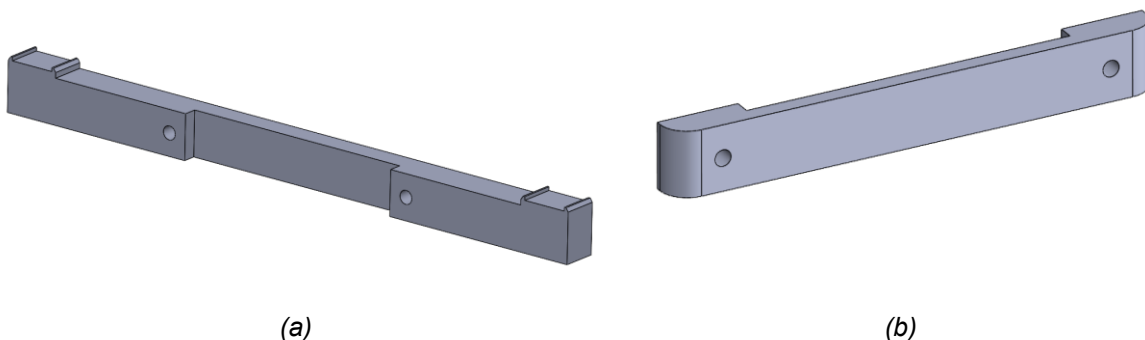


Figura 7.3. (a) Barra que se coloca transversalmente en el cuerpo del torno y sirve para ajustar la posición de los centros. (b) Soporte guía para ajustar levemente la posición de la estructura del contrapunto.

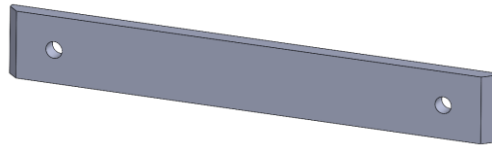


Figura 7.4. Pletina que fija los centros contra la estructura del cuerpo.

Al añadir los elementos anteriores al cuerpo, este queda como se muestra en la Figura 7.5.

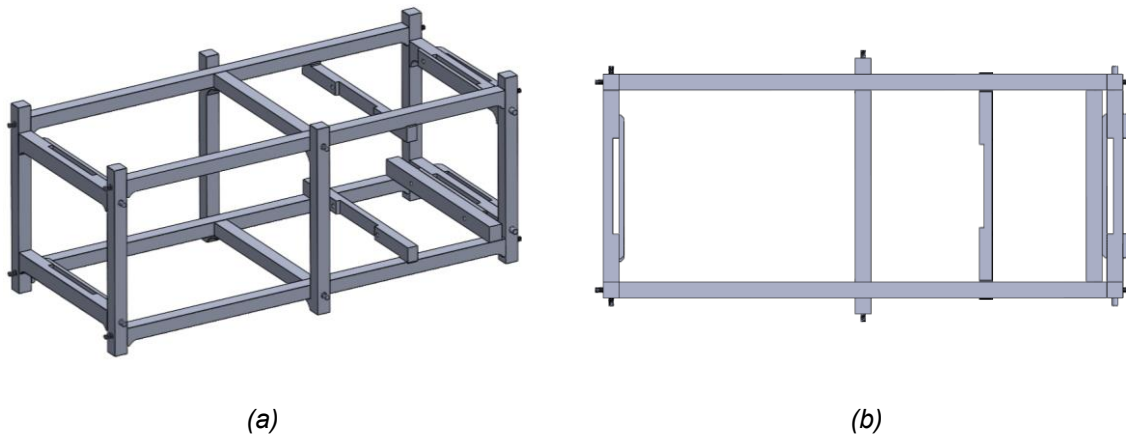


Figura 7.5. (a) Cuerpo del torno. (b) Vista de planta del cuerpo.

A continuación, se muestran las estructuras que contienen al contrapunto y al centro móvil, estas se han descrito con detalle en el subapartado 5.1.2.3 (Figura 7.6).

Ambas estructuras son similares, formadas por dos barras de sección cuadrada en disposición vertical, unidas por pletinas delanteras y traseras, donde se acoplan los mecanismos de anclaje correspondientes. Estas estructuras se fijan al cuerpo del torno mediante ranuras que permiten un desplazamiento transversal para ajustar la distancia entre la pieza y la herramienta, así como una regulación manual en altura para centrar el eje de la pieza según sea necesario.

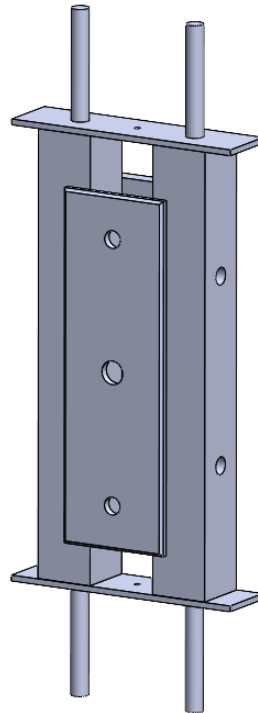


Figura 7.6. Estructura de los centros del torno.

En la Figura 7.7 se muestra la estructura completa del contrapunto y en la Figura 7.8 se observa el contrapunto en detalle.

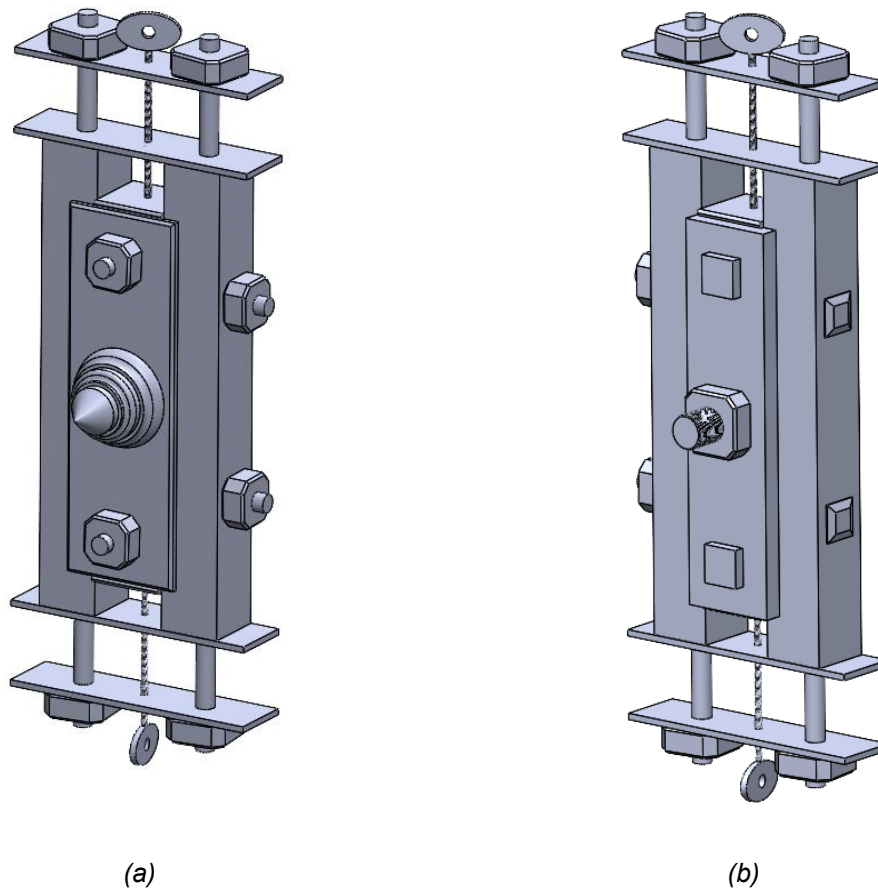


Figura 7.7. Estructura completa del contrapunto. (a) Vista Frontal. (b) Vista posterior.



Figura 7.8. Contrapunto.

El otro centro se distingue por contar con un tornillo ajustable (Figura 7.10), que permite aplicar la fuerza mínima necesaria para sujetar firmemente la pieza. En la Figura 7.9 se muestra la estructura completa del centro móvil.

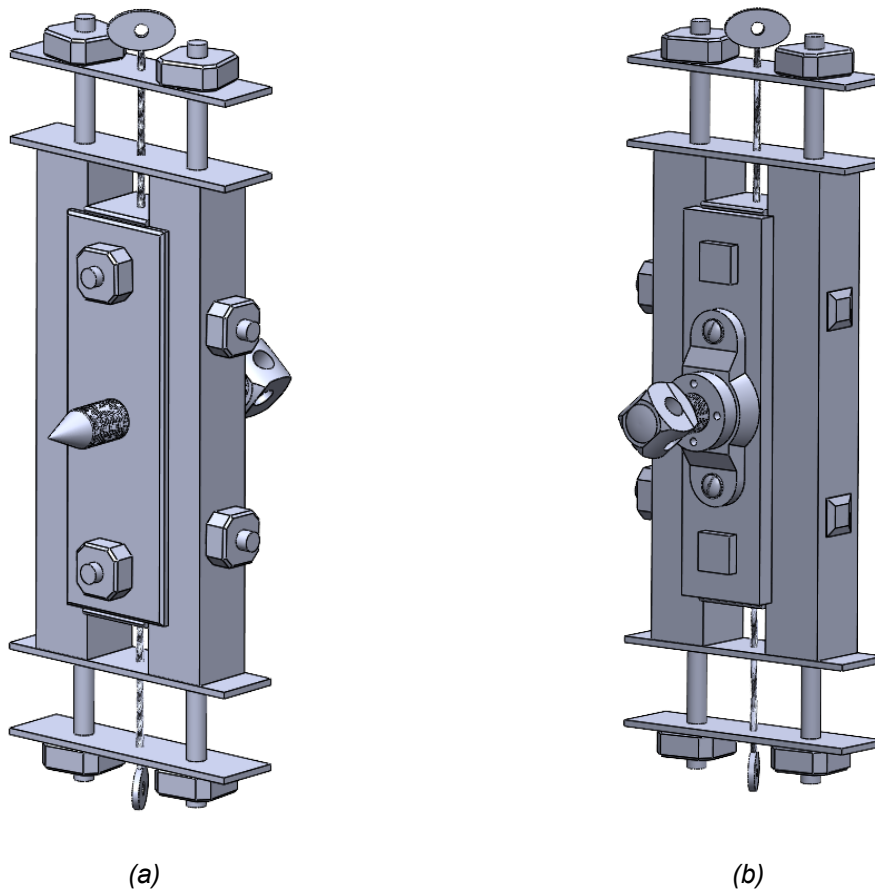


Figura 7.9. Estructura completa del centro móvil.

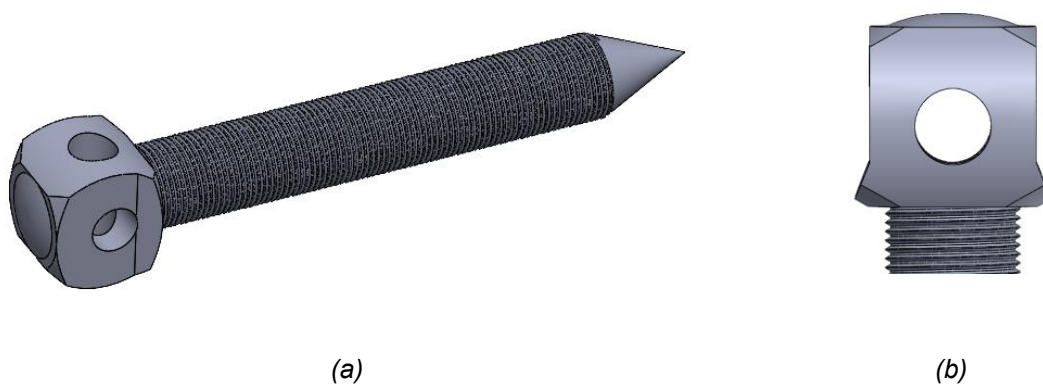


Figura 7.10. Tornillo de ajuste del centro móvil. (a) Cuerpo completo. (b) Detalle.

Los subensamblajes contenidos en el cuerpo quedan como se muestra en la Figura 7.11 y la Figura 7.12.

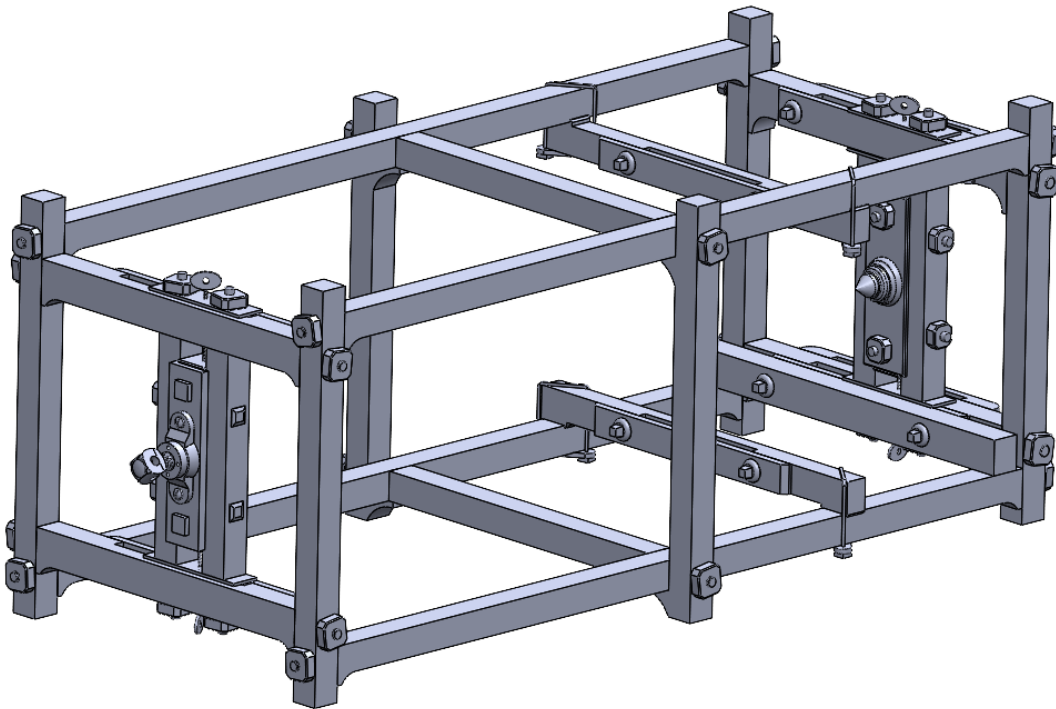


Figura 7.11. Subensamblajes añadidos al cuerpo.

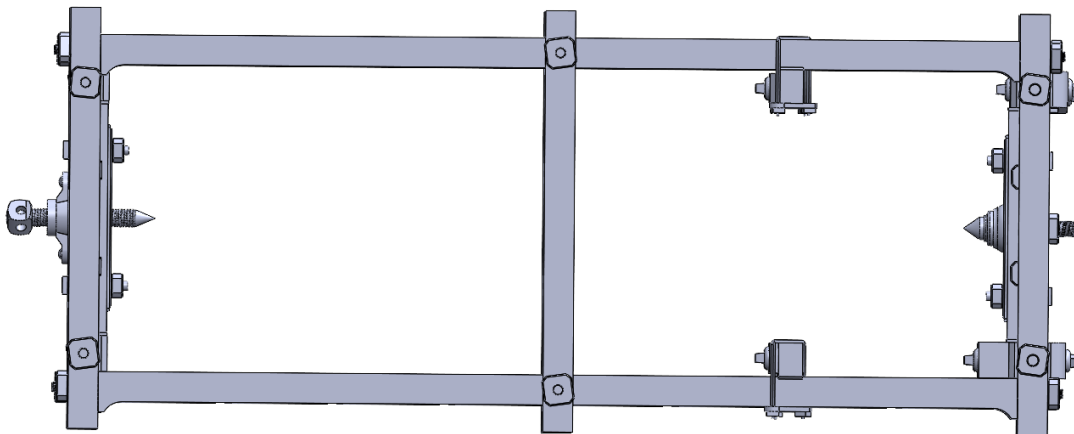


Figura 7.12. Vista de un perfil del cuerpo.

En la Figura 7.13 se muestra la estructura del carro longitudinal sin las barras superiores. Se aprecia el sistema de unión de los “pilares” al conjunto de barras inferiores, mediante distintos tornillos dispuestos en los laterales y en la zona central. En la Figura 7.14 se observa la estructura al completo.

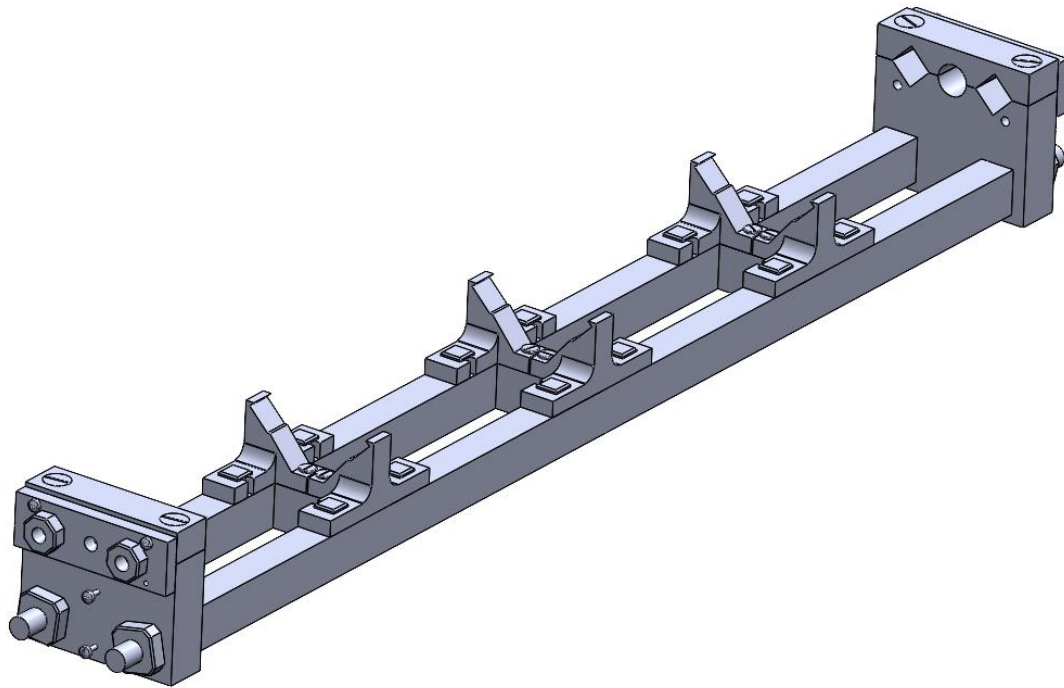


Figura 7.13. Estructura del carro longitudinal sin las barras superiores.

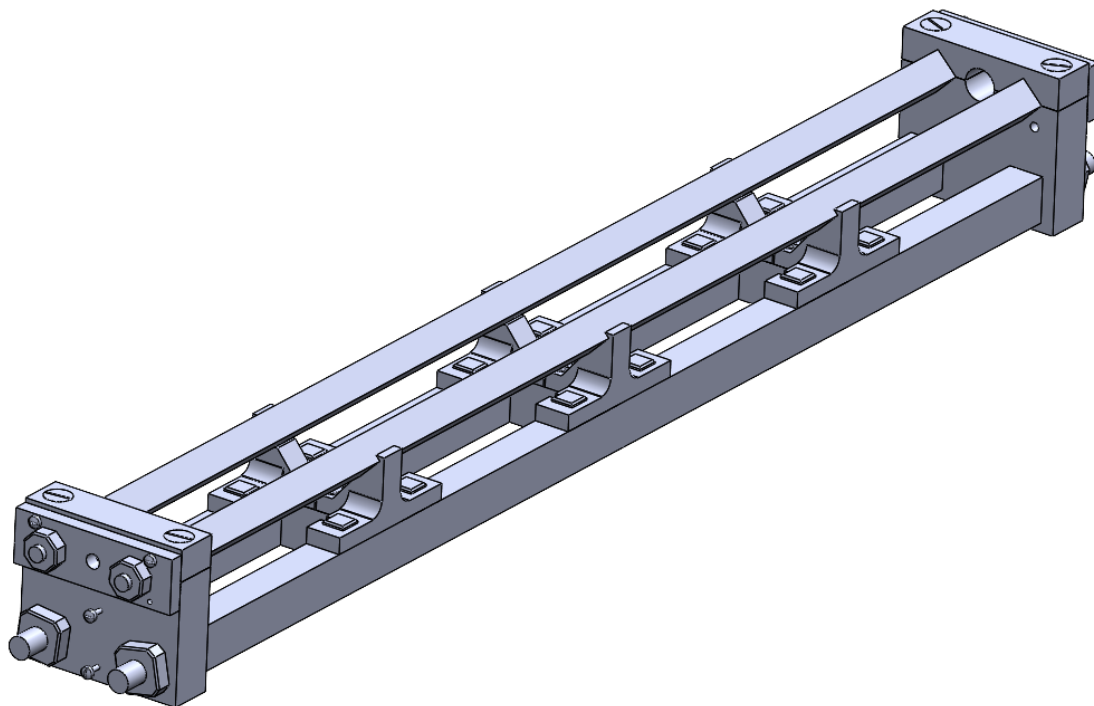


Figura 7.14. Estructura del carro longitudinal.

En la Figura 7.15 se identifica el carro longitudinal sin el portaherramientas en su parte superior. En la zona inferior se aprecia el orificio roscado que actúa como tuerca para el mecanismo del tonillo sin fin.

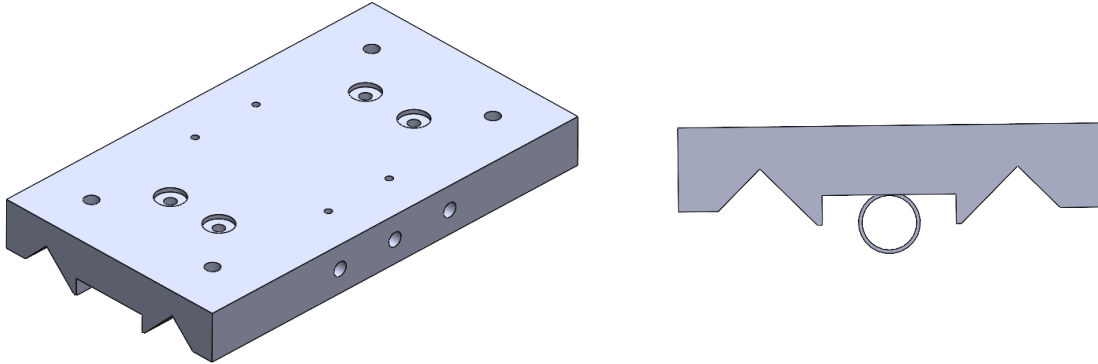


Figura 7.15. *Cuerpo del carro longitudinal.*

En la Figura 7.16 se muestra la pieza que sirve para sujetar el carro contra las barras guía. Este posee un alojamiento que permite que el husillo gire libremente.

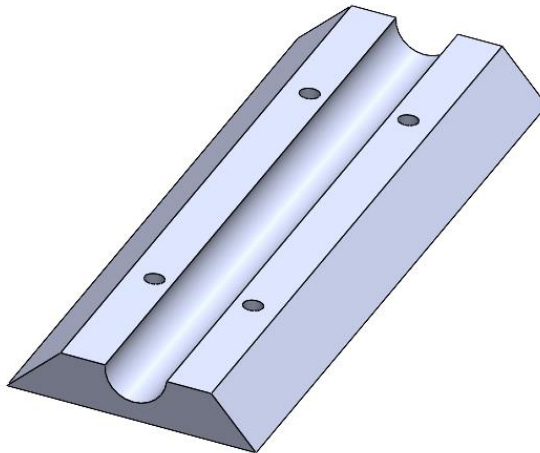


Figura 7.16. *Pieza inferior que sujeta el carro.*

A continuación, se muestra el conjunto de carro y pieza soporte (Figura 7.17). Y en la Figura 7.18 se aprecia el husillo que atraviesa este conjunto.

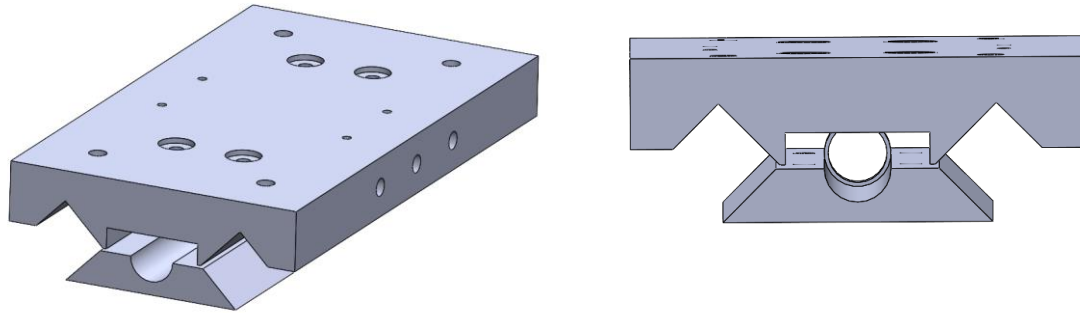


Figura 7.17. Carro y pieza de sujeción.

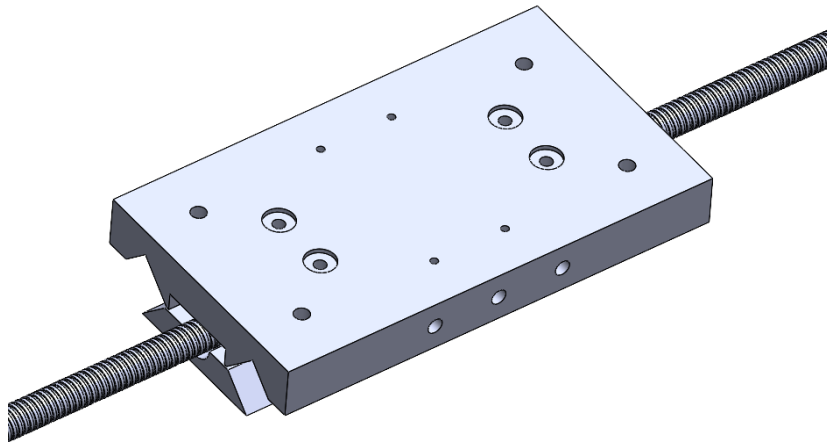


Figura 7.18. Carro atravesado por el husillo.

Los elementos del portaherramientas se encuentran en la parte superior del carro, fijado mediante tornillos (Figura 7.19). En la Figura 7.20 se aprecia la geometría de la herramienta de corte y el tornillo que permite desplazarlo.

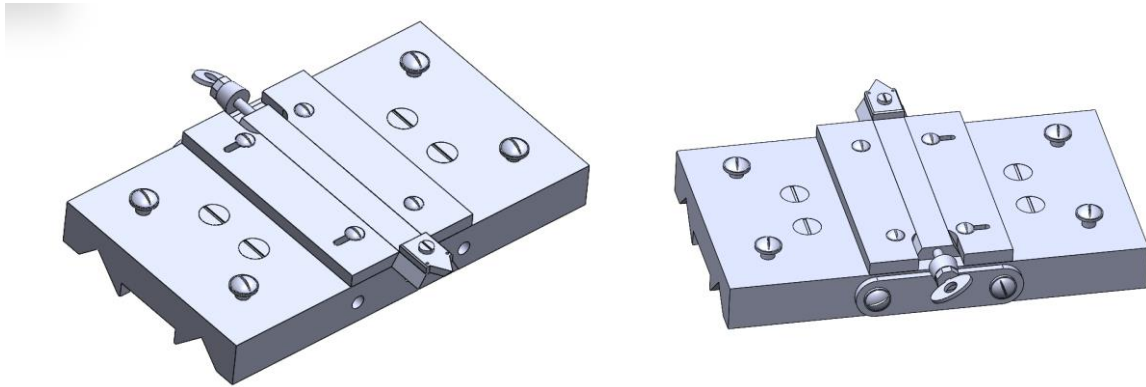


Figura 7.19. Carro con portaherramientas.

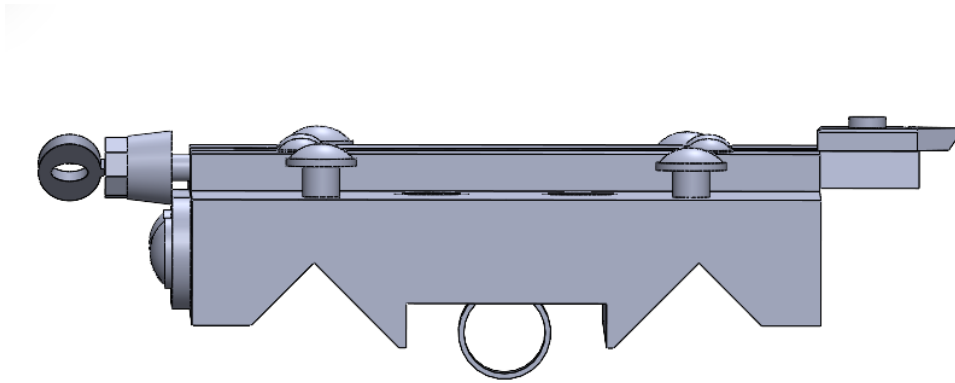


Figura 7.20. Vista lateral del carro con el portaherramientas.

Por último, en la Figura 7.21 y la Figura 7.22 se muestra el ensamblaje del torno completo con todos sus elementos. En la Figura 7.23 se observa la vista de un perfil del torno y en la Figura 7.24, la vista de la planta.

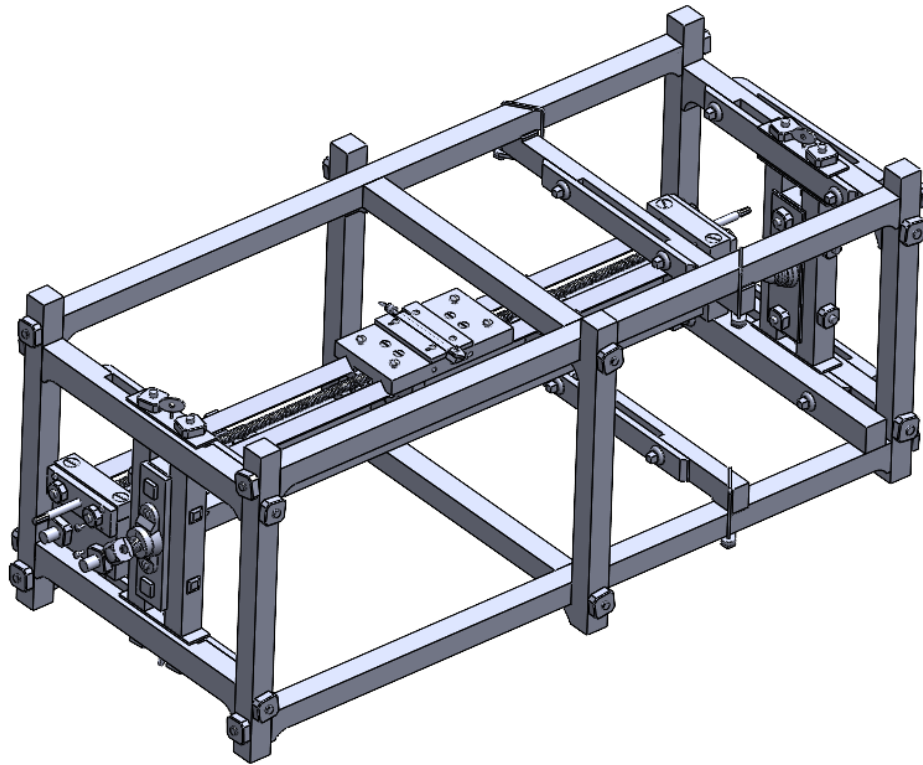


Figura 7.21. Ensamblaje completo del Torno de Vaucanson (1).

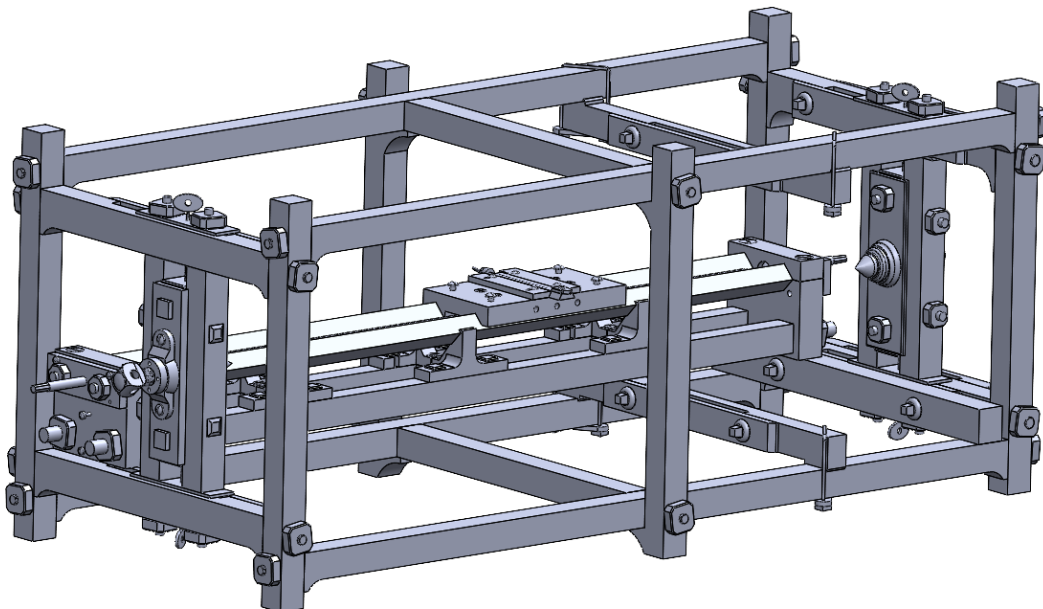


Figura 7.22. Ensamblaje completo del Torno de Vaucanson (2).

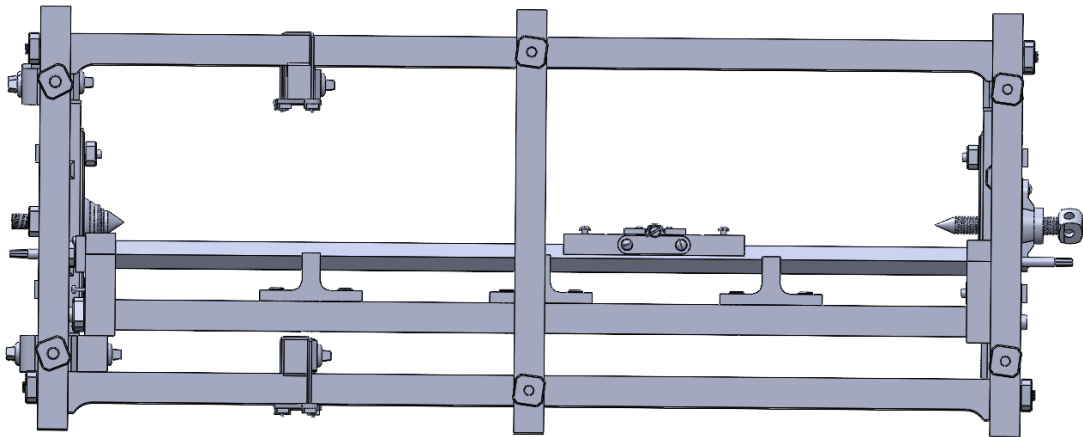


Figura 7.23. Vista de un perfil del torno completo.

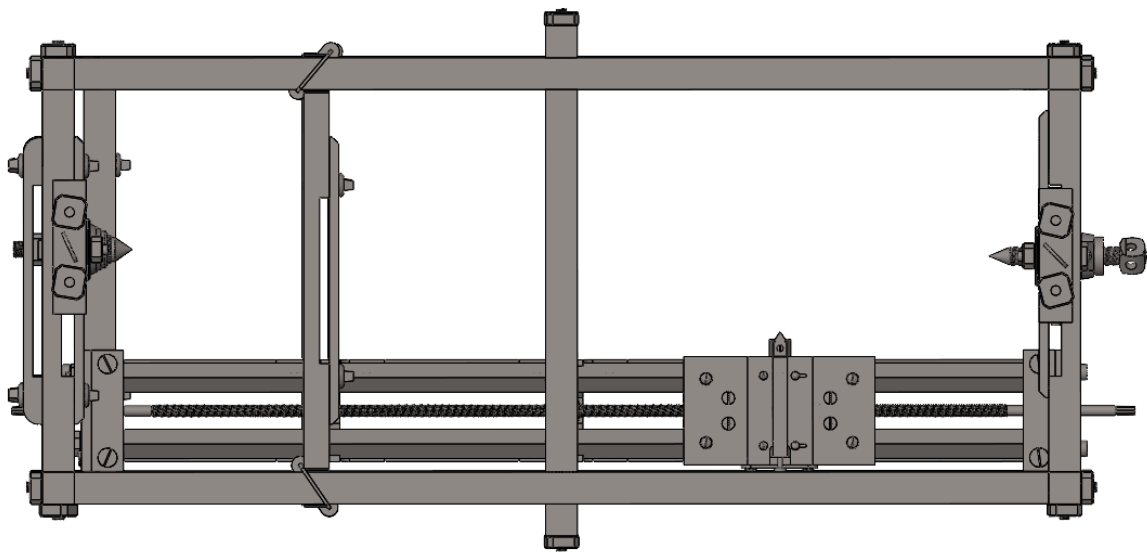


Figura 7.24. Vista de la planta del torno completo.

En la Figura 7.25 se muestra el ensamblaje completo del torno, al que se le han asignado a las piezas las mismas apariencias que en el torno original.

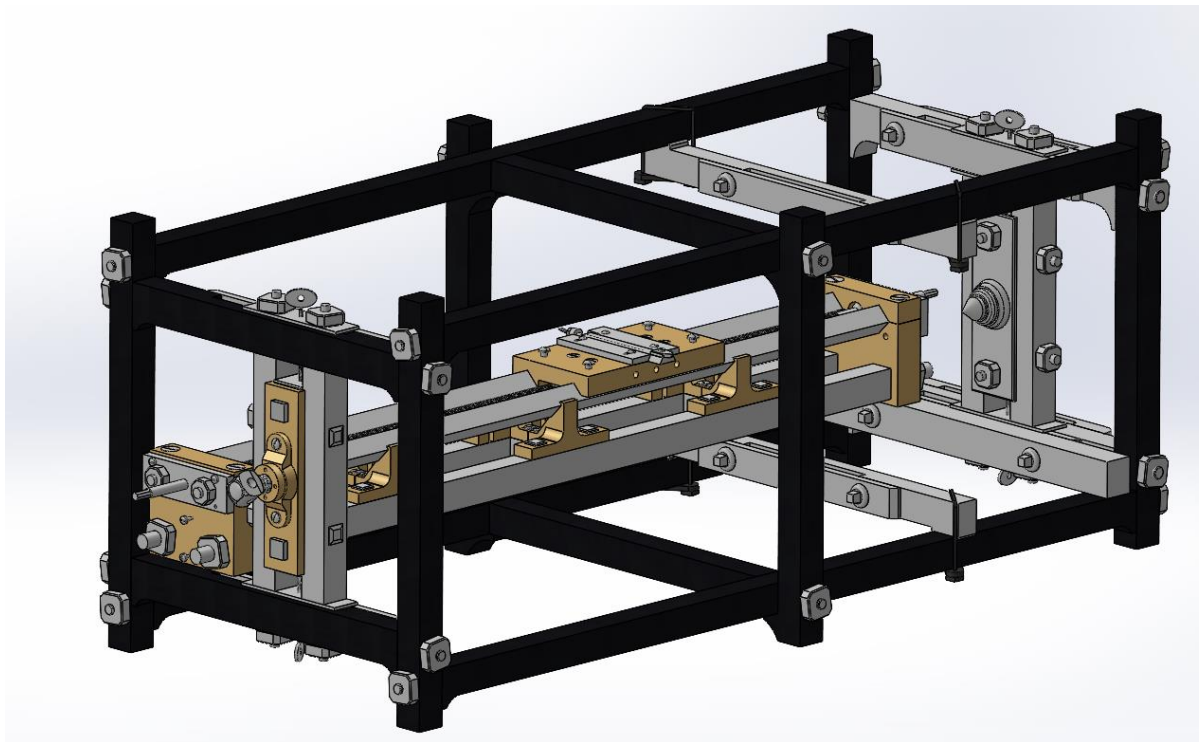


Figura 7.25. Ensamblaje completo del torno de Vaucanson con igual apariencia al original.

7.2 Torno de Henry Maudslay

En primer lugar, se modelaron las piezas que conforman la bancada del torno, la cual está compuesta por dos soportes ubicados en los extremos. En uno de ellos, en la parte superior, se sitúa una pieza que actúa como unión entre las barras guía del carro longitudinal y el propio soporte. En el soporte del extremo opuesto se encuentra otra pieza que aloja tanto el cabezal como uno de los extremos del husillo de avance, además de servir como apoyo para las barras guía. En la Figura 7.26 se muestra el conjunto del soporte de un extremo, mientras que en la Figura 7.27 se identifica el conjunto correspondiente al extremo opuesto.

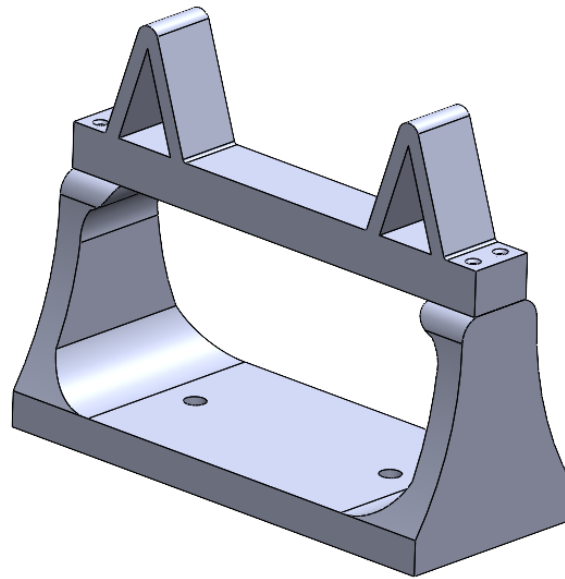


Figura 7.26. Conjunto de bancada correspondiente a uno de los extremos.

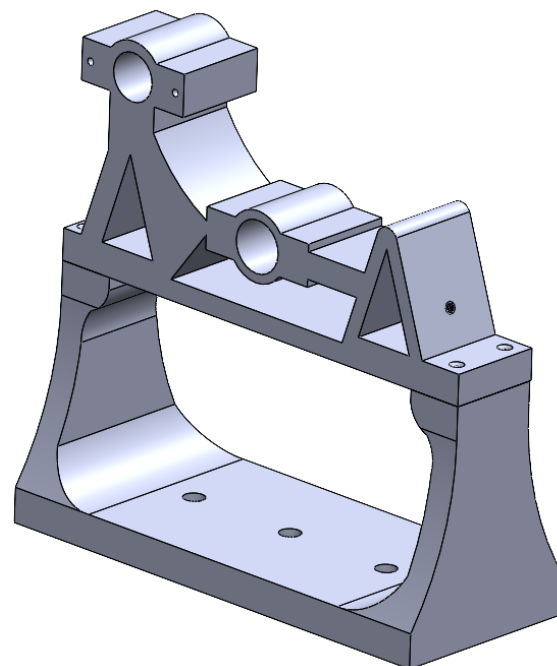


Figura 7.27. Conjunto de la bancada con el soporte del cabezal y del husillo de avance.

El cabezal, el plato y el husillo de avance quedan integrados en el conjunto como se aprecia en la Figura 7.28. El husillo de avance se conecta al soporte a través de un acople (Figura 7.29), asegurado en ambos extremos por pasadores.

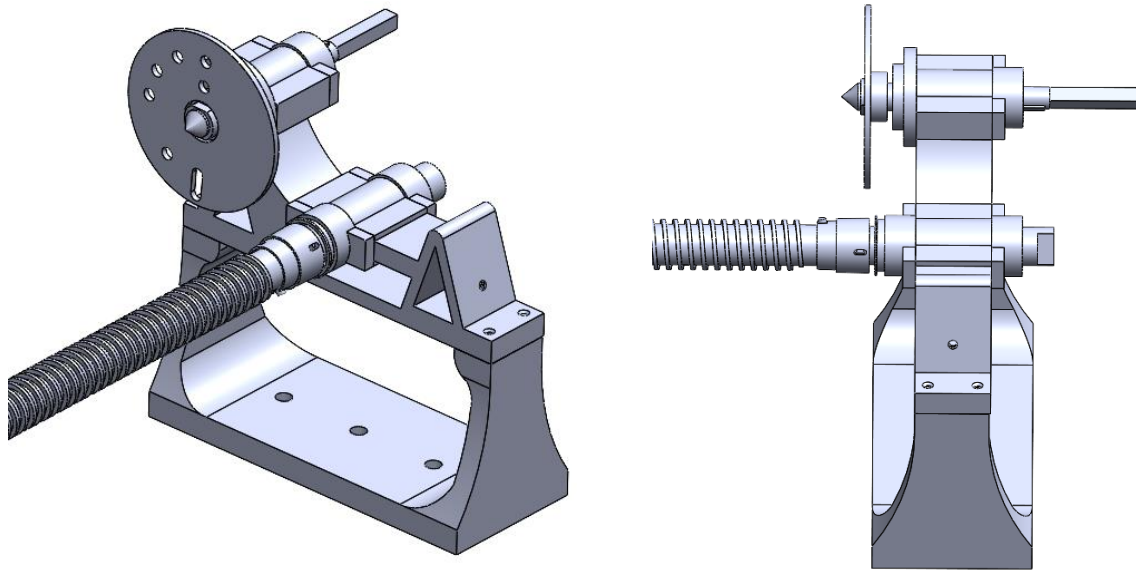


Figura 7.28. Conjunto de la bancada con el cabezal, el plato y el husillo de avance integrados.

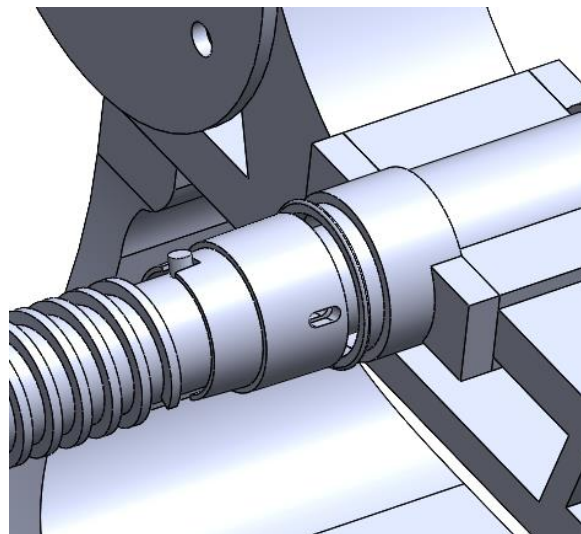


Figura 7.29. Detalle de la pieza de acoplamiento del husillo.

El extremo opuesto del husillo se conecta a una pieza (Figura 7.30) que se apoya y desliza sobre la barra guía, lo que permite ajustar su posición según la longitud del husillo.

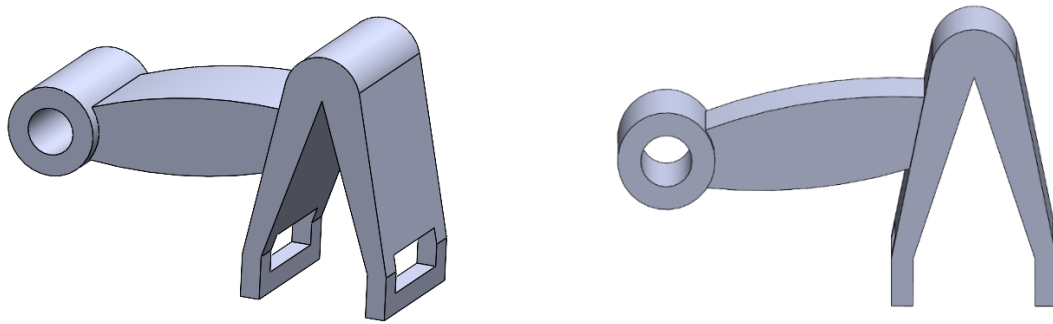


Figura 7.30. Soporte deslizante para el extremo del husillo.

En la Figura 7.31 se observa la conexión del extremo del husillo al soporte deslizante, el cual se fija a una de las barras guía mediante una pletina que lo atraviesa en su zona inferior.

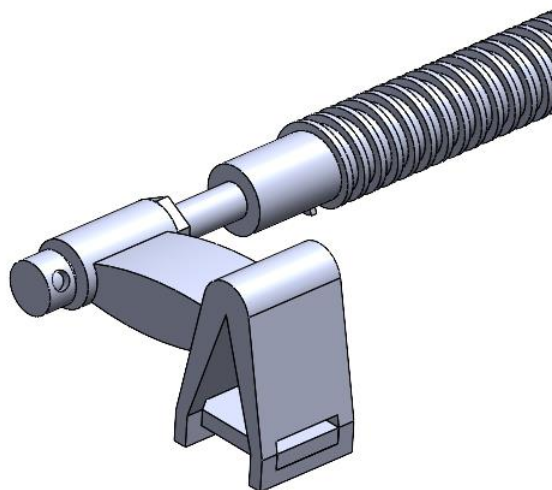


Figura 7.31. Detalle del soporte deslizante con el husillo conectado.

Ambas barras guía son prismas triangulares. Una de ellas presenta hendiduras en sus extremos para evitar interferencias con el plato del cabezal durante su giro. El hecho de que haya dos hendiduras podría estar destinado al equilibrado de la masa de la barra, con el fin de minimizar las vibraciones durante el giro del cabezal. En la Figura 7.32 se muestran ambas barras.

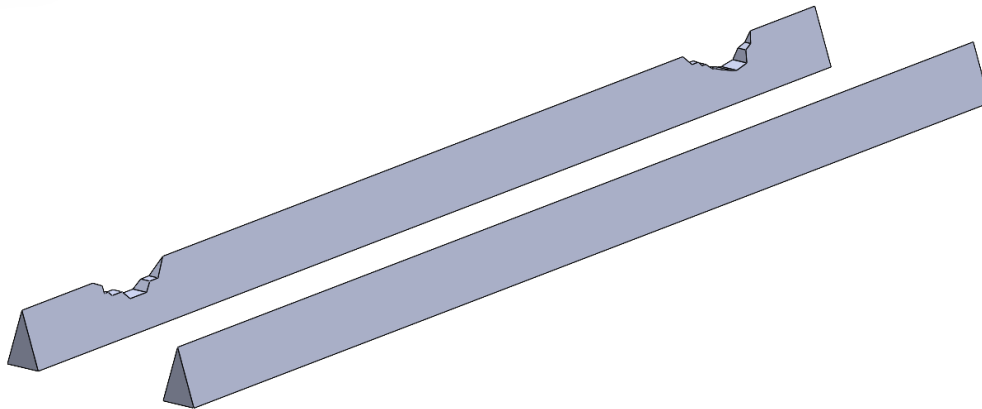


Figura 7.32. Barras guía.

El conjunto de la bancada del torno, con las barras guía, el cabezal y el husillo de avance, queda montado tal como se muestra en la Figura 7.33.

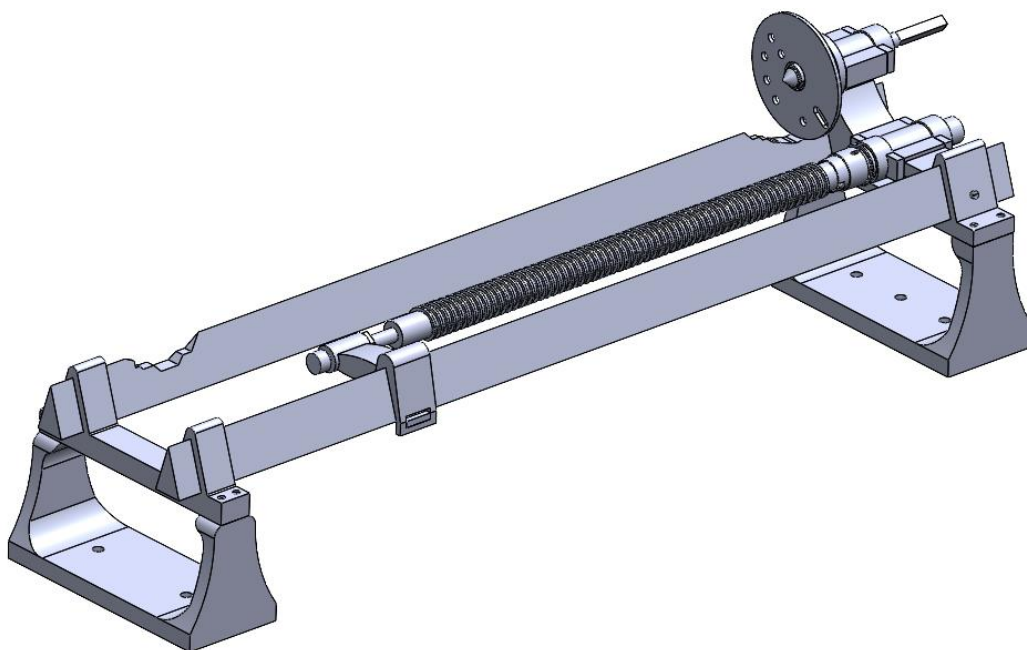


Figura 7.33. Conjunto de bancada con el cabezal y el husillo ensamblados.

A continuación, en la Figura 7.34 se presenta el cuerpo del carro longitudinal, el cual se apoya sobre ambas barras guía. Este componente incorpora un mecanismo de tornillo sin fin que permite desplazar el portaherramientas y ajustar la distancia entre la herramienta de corte y la pieza, mediante el accionamiento de una manivela.

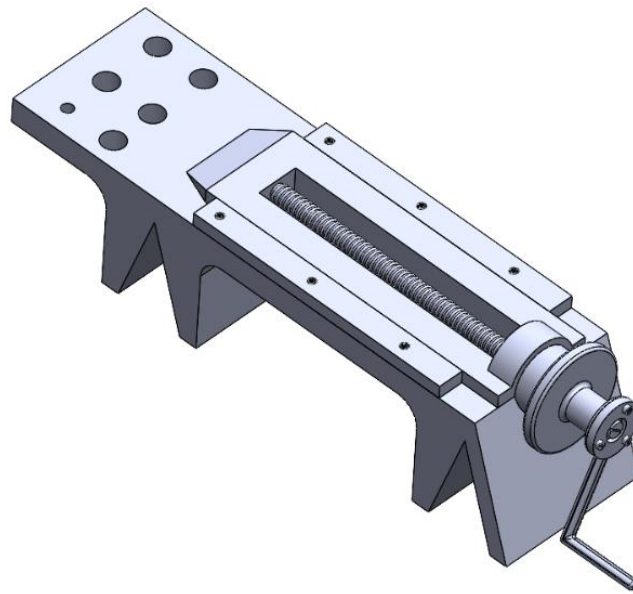


Figura 7.34. Cuerpo del carro longitudinal sin el portaherramientas.

El portaherramientas (Figura 7.35) dispone de dos alojamientos para insertar la herramienta de corte, la cual se fija mediante tornillos. Asimismo, se observa la tuerca correspondiente al mecanismo de tornillo sin fin.

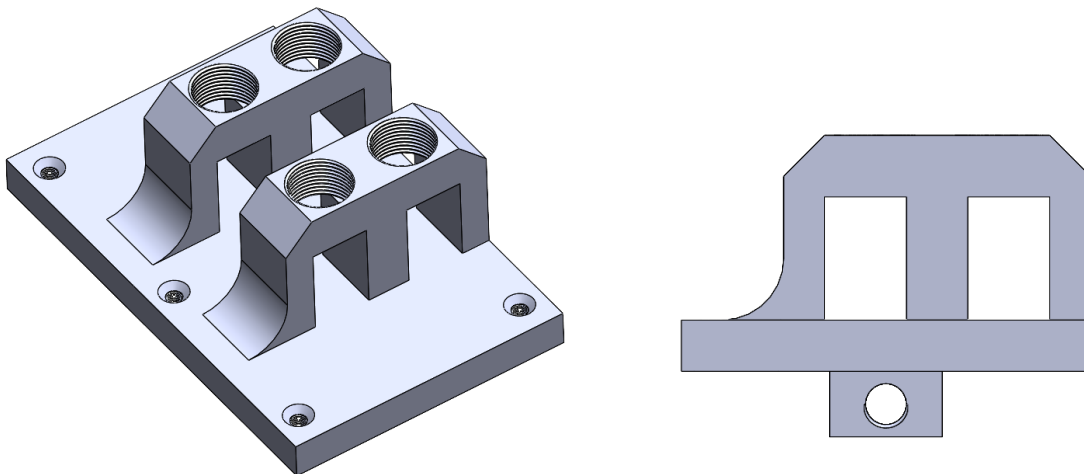


Figura 7.35. Estructura portaherramientas.

La configuración del portaherramientas instalado sobre el carro puede apreciarse en la Figura 7.36.

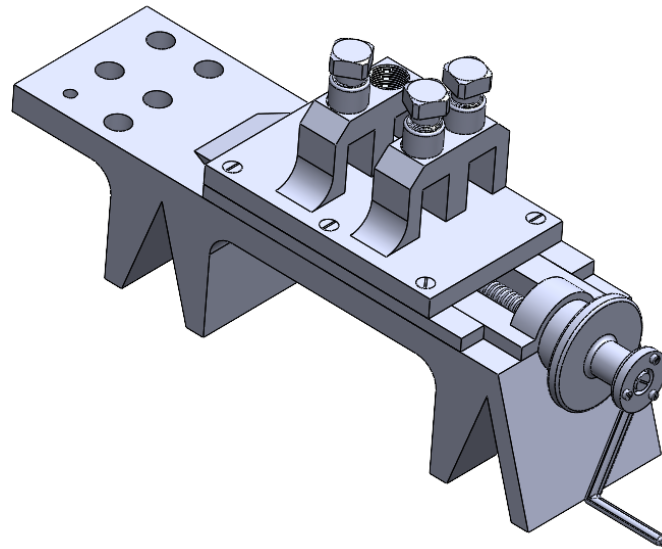


Figura 7.36. Vista del conjunto del carro y el portaherramientas.

Para fijar el conjunto del carro a las barras guía, se emplea una pletina flexible que se ajusta mediante un tornillo contra la parte inferior de dichas barras (Figura 7.38). Además, la tuerca asociada al husillo de avance se encuentra en la parte inferior del carro (Figura 7.37).

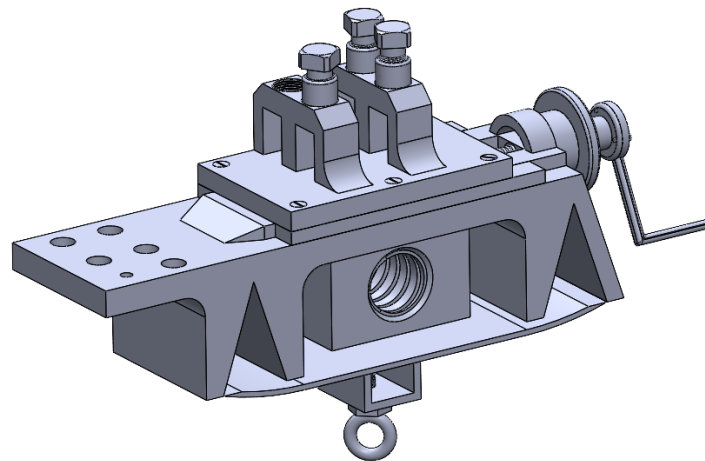


Figura 7.37. Cuerpo del carro completo.

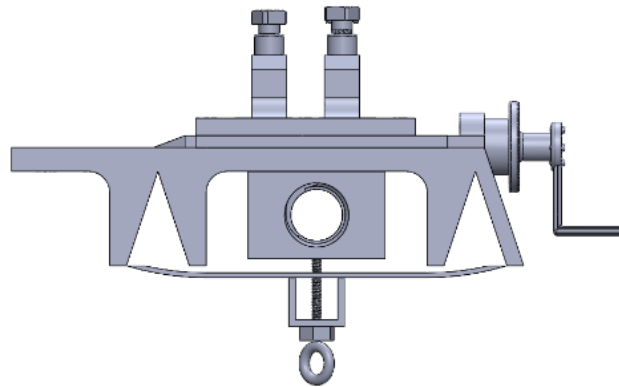


Figura 7.38. Vista de perfil del carro completo.

El carro longitudinal con el portaherramientas ensamblado en el cuerpo del torno se muestra en la Figura 7.39. En la Figura 7.40 se aprecia la disposición del carro longitudinal apoyado en las barras guía y atravesado por el husillo de avance.

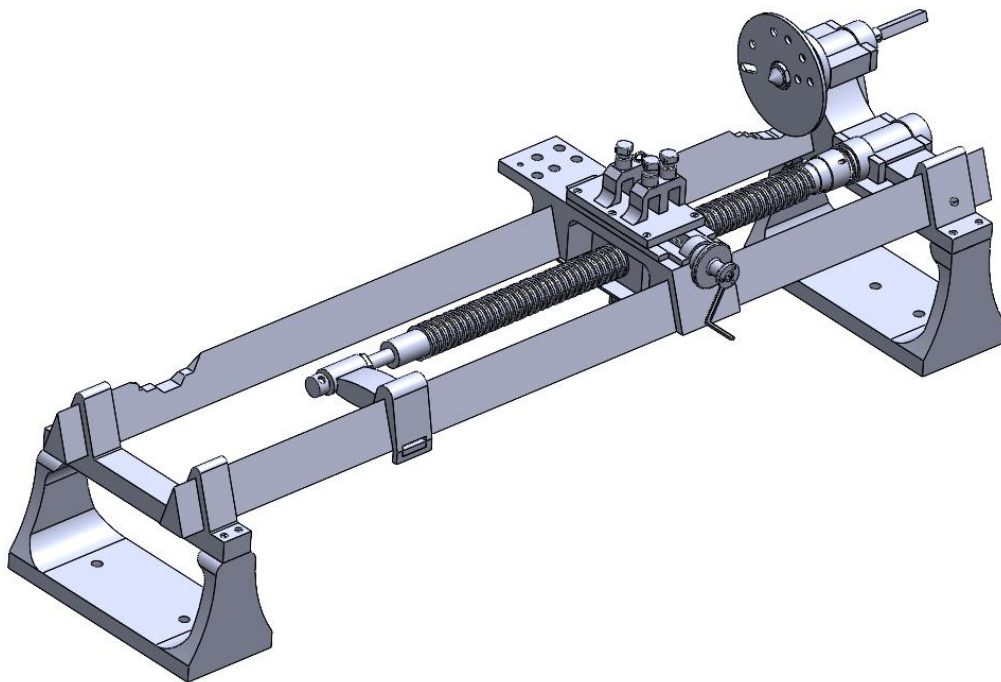


Figura 7.39. Carro longitudinal ensamblado en el cuerpo del torno.

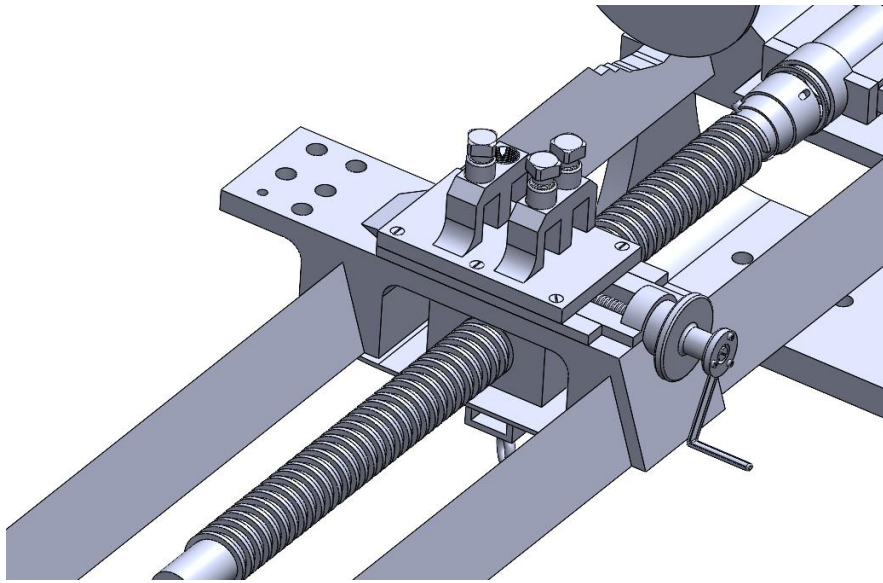


Figura 7.40. Detalle de la disposición del carro con el portaherramientas.

La conexión entre el cabezal y el husillo de avance se realiza mediante un tren de engranajes compuesto por: el engranaje conductor, instalado en el cabezal; un engranaje intermedio, que invierte el sentido de giro sin modificar la relación de transmisión total; y el engranaje conducido, acoplado al eje del husillo de avance (Figura 7.41). El engranaje conductor recibe el movimiento a través de una manivela (Figura 7.42).

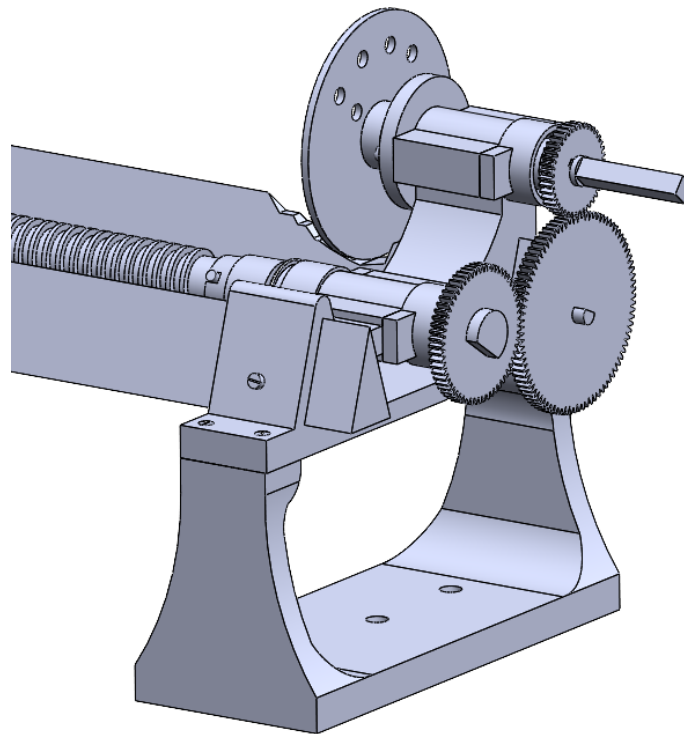


Figura 7.41. Sistema de movimiento mediante tren de engranajes.

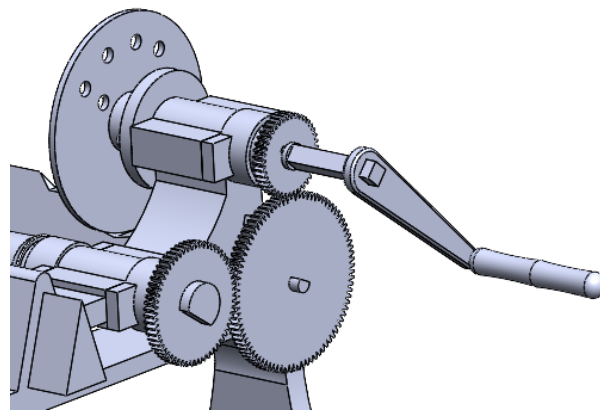


Figura 7.42. Manivela conectada al eje del cabezal.

El cuerpo del contrapunto es una pieza única atravesada por una de las barras guía (Figura 7.43). Además de permitir el desplazamiento de todo el conjunto, el contrapunto puede ajustarse mediante un tornillo. En la Figura 7.44 se muestran tanto los tornillos de ajuste del contrapunto como el tornillo que fija el cuerpo a la barra guía.

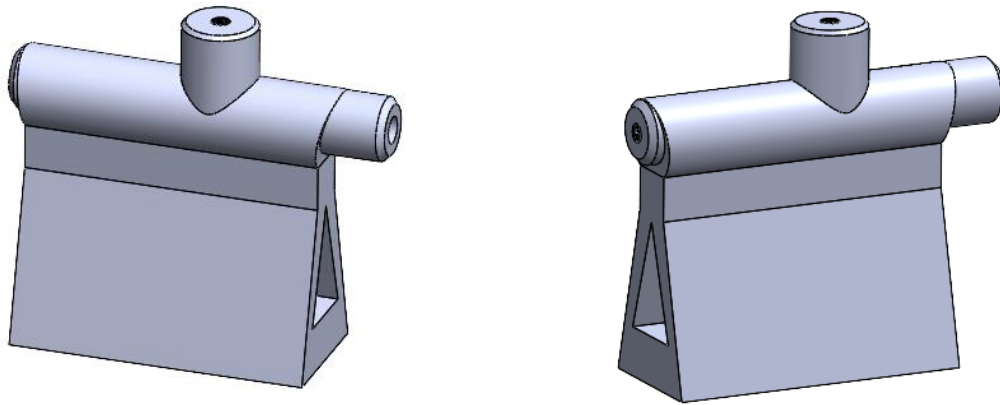


Figura 7.43. *Cuerpo del contrapunto.*

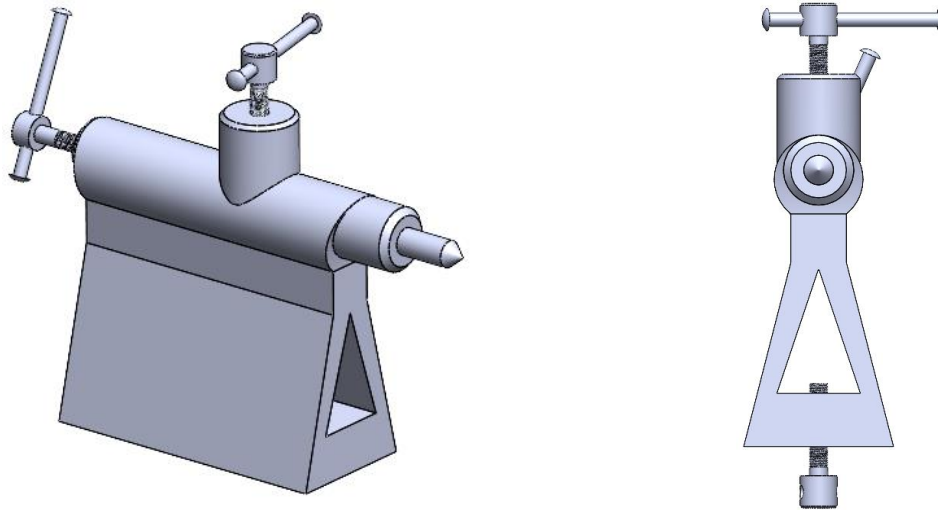


Figura 7.44. *Tornillos de ajuste y fijación.*

La pieza mostrada en la Figura 7.45 se utiliza durante el mecanizado de tornillos de gran longitud. Se coloca intermedia para reducir los desplazamientos radiales y evitar que el tornillo se desvíe del eje de giro. Esta pieza se ajusta mediante tornillos, se desplaza sobre las barras guía y se fija con una pletina que la atraviesa.

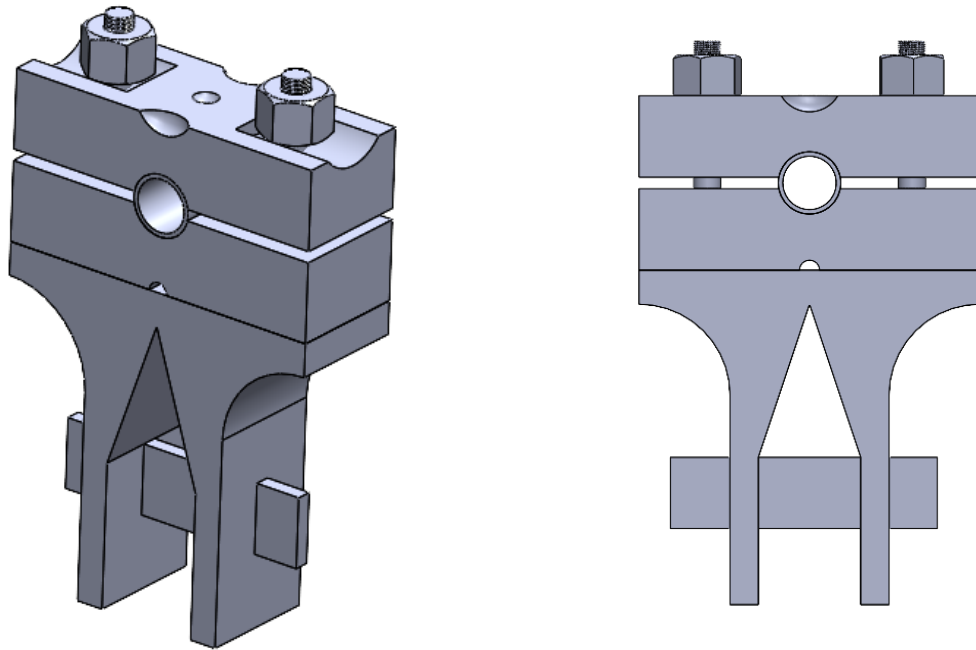


Figura 7.45. Soporte para alineación durante mecanizado de tornillos de gran longitud.

El torno ensamblado por completo se presenta en la Figura 7.46, la Figura 7.47 y la Figura 7.48.

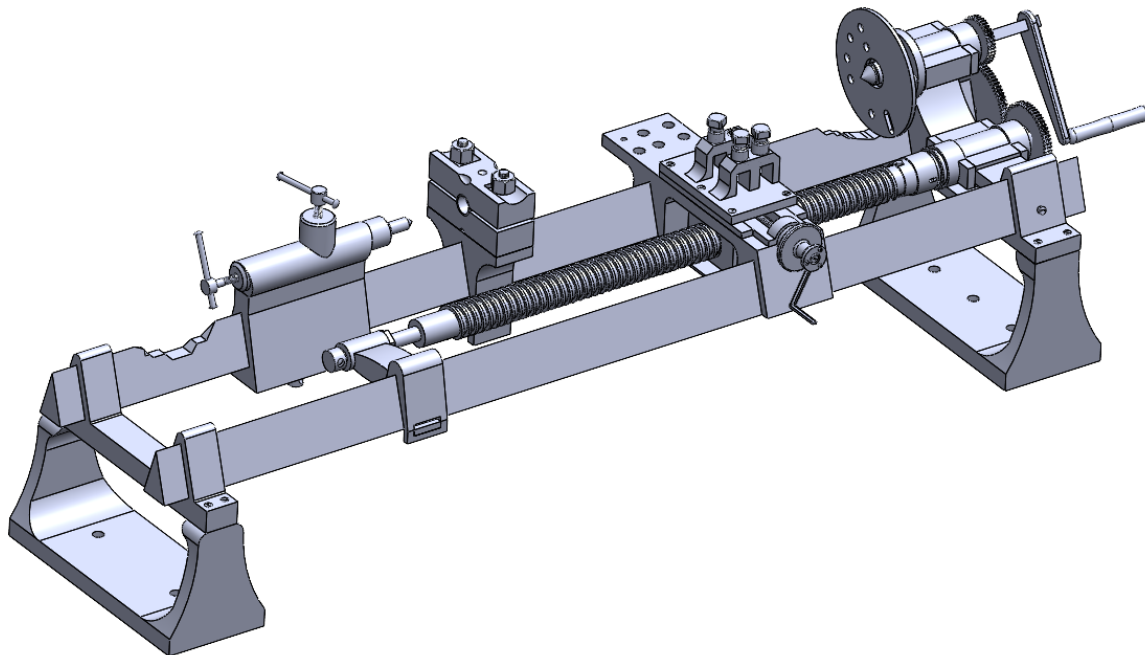


Figura 7.46. Ensamblaje del torno completo (1).

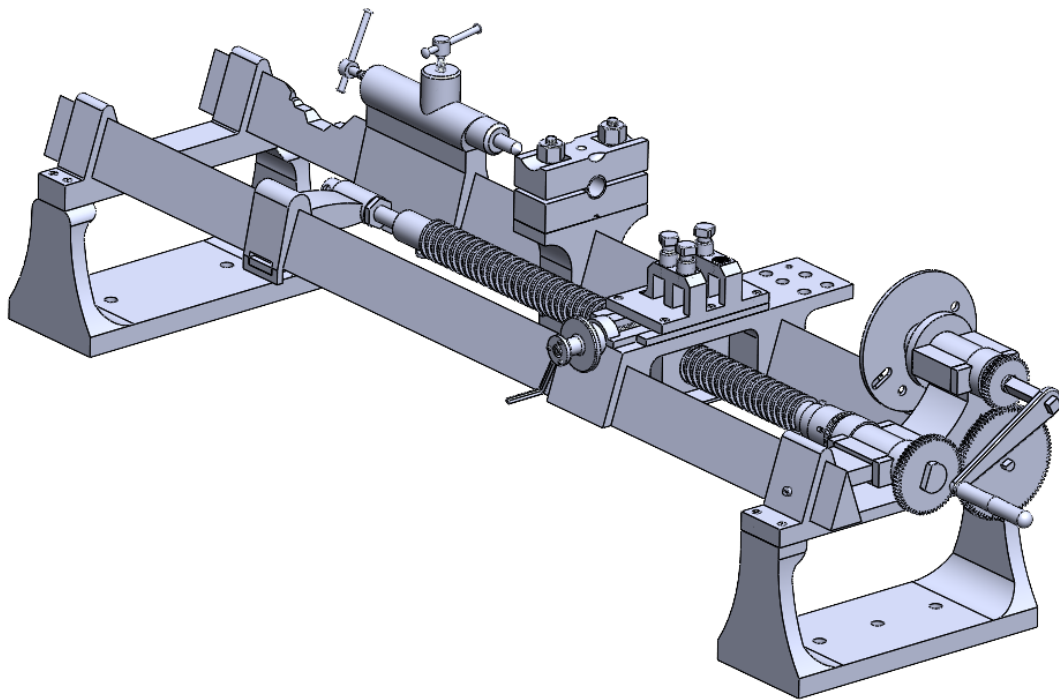


Figura 7.47. Ensamblaje del torno completo (2).

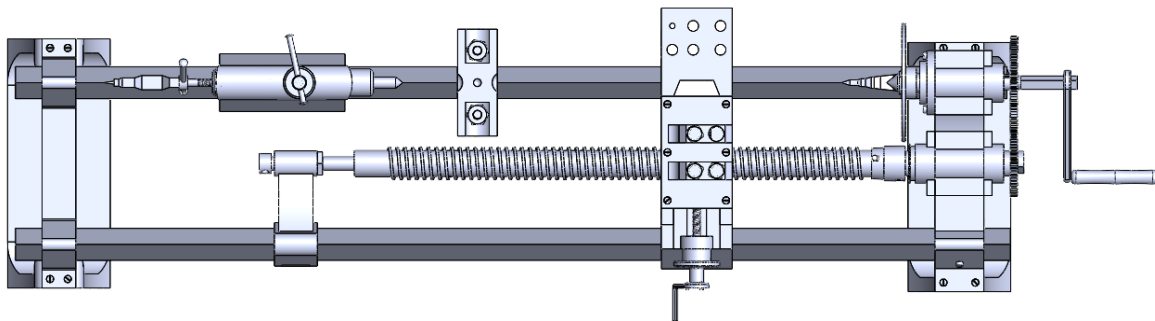


Figura 7.48. Vista de planta del torno completo.

En la Figura 7.49 se muestra el ensamblaje completo del torno, al cual se han asignado a las piezas las mismas apariencias que en el torno original. En la Figura 7.50 se observa la disposición del carro longitudinal, mientras que en la Figura 7.51 se presenta el sistema de movimiento transmitido por engranajes.

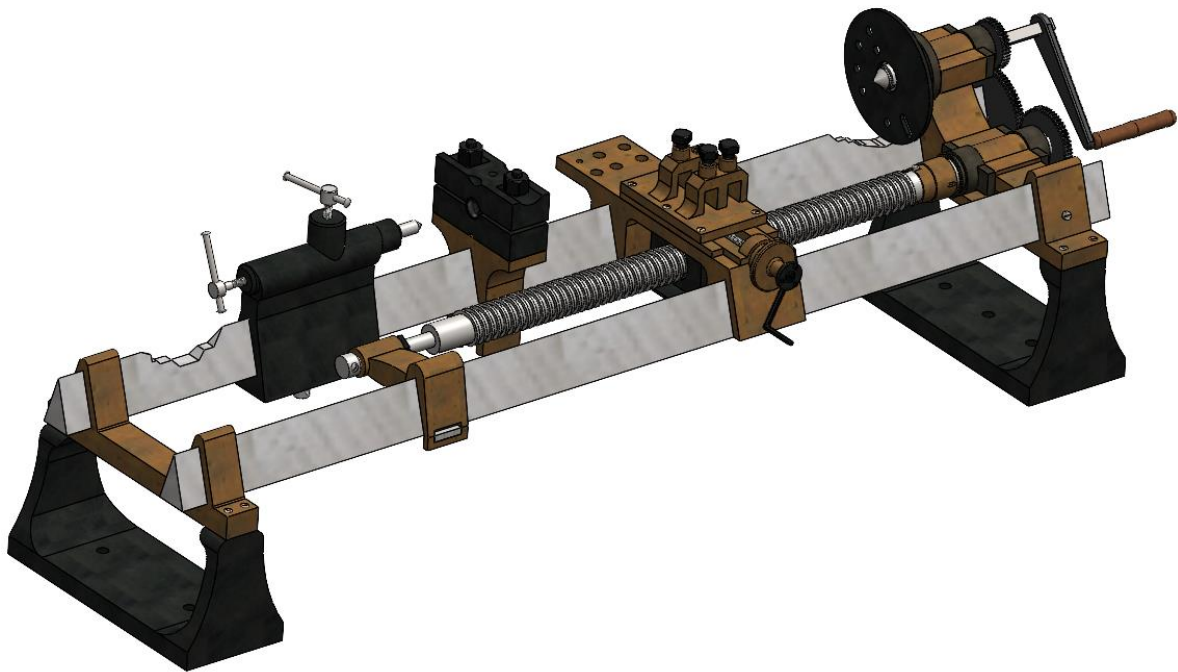


Figura 7.49. Ensamblaje completo del torno con apariencias originales de las piezas.

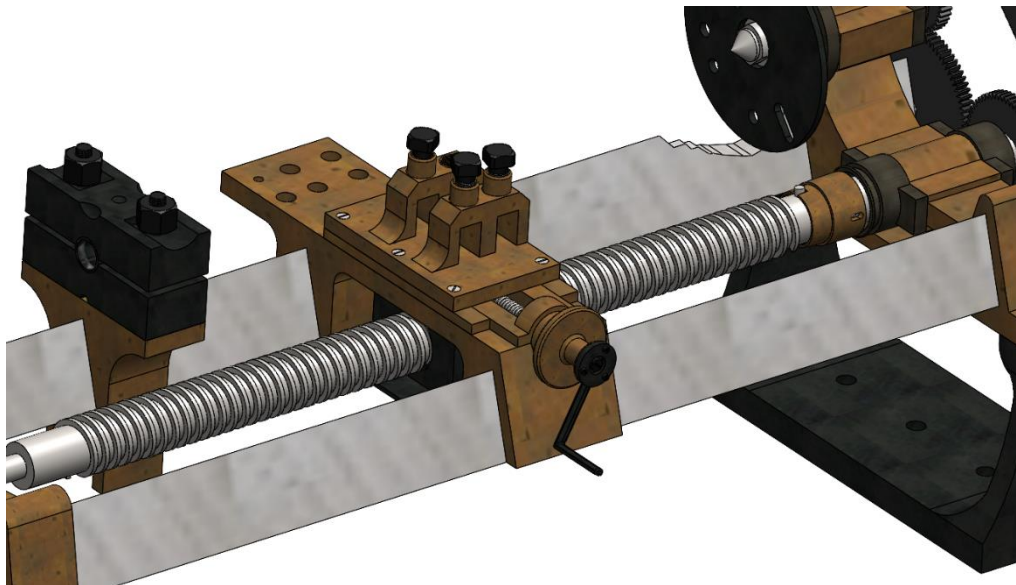


Figura 7.50. Disposición del carro longitudinal en el torno.

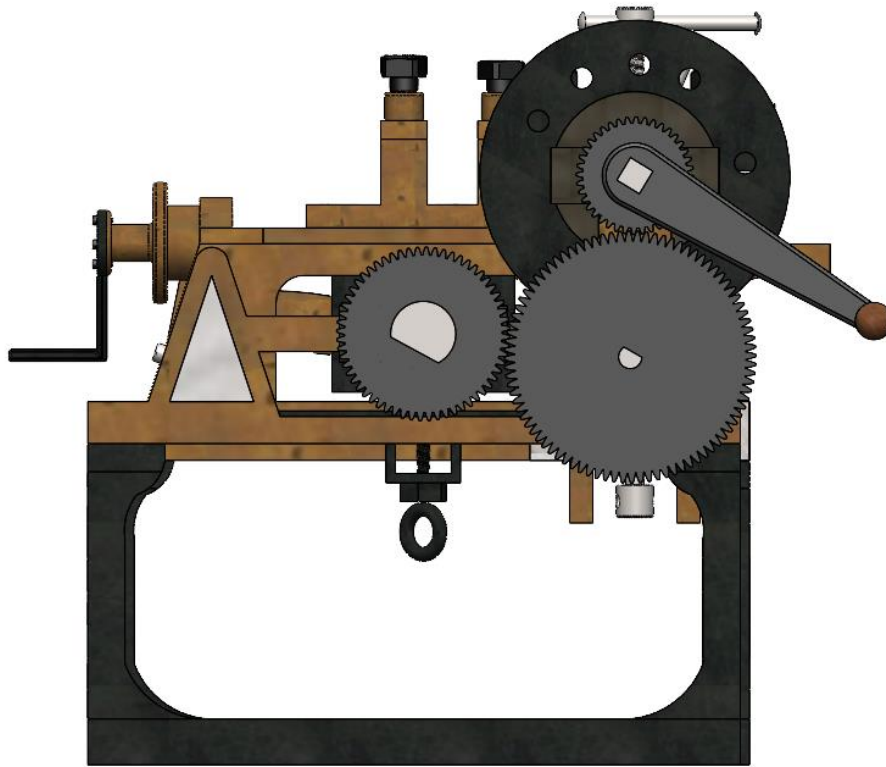


Figura 7.51. Sistema de transmisión de movimiento mediante engranajes.



8 Validación de los modelos

Los modelos 3D realizados de ambas máquinas-herramienta estudiadas representan fielmente a los originales, muestran un alto grado de similitud con las imágenes de referencia, y sus dimensiones aproximadas son coherentes en conjunto. Asimismo, se ha llevado a cabo el estudio de movimiento en SolidWorks, mediante el cual se ha simulado el funcionamiento descrito a continuación, obteniéndose resultados coherentes con el comportamiento previsto.

En el torno de Vaucanson, al proporcionar el giro al husillo de avance, este transmite el movimiento al carro longitudinal, que se desplaza a lo largo de las guías. En el torno de Maudslay, se ha completado el tren de engranajes ausente en el torno real. En la simulación, al girar la manivela del cabezal, el movimiento se transmite a través de los engranajes, acciona el husillo de avance y este, a su vez, desplaza el carro longitudinal, quedando todo el sistema de transmisión conectado.

Por tanto, ambos modelos pueden considerarse válidos, ya que no solo reproducen con precisión las dimensiones y características físicas de las máquinas originales, sino que también demuestran un comportamiento mecánico coherente mediante la simulación de su movimiento.

Por último, en la Figura 8.1 se muestra el torno real de Vaucanson, mientras que en la Figura 8.2 aparece el modelo 3D correspondiente. De igual modo, en la Figura 8.3 se presenta el torno real de Maudslay, y en la Figura 8.4 su modelo 3D correspondiente.



Figura 8.1. Torno de Jacques de Vaucanson (1751).

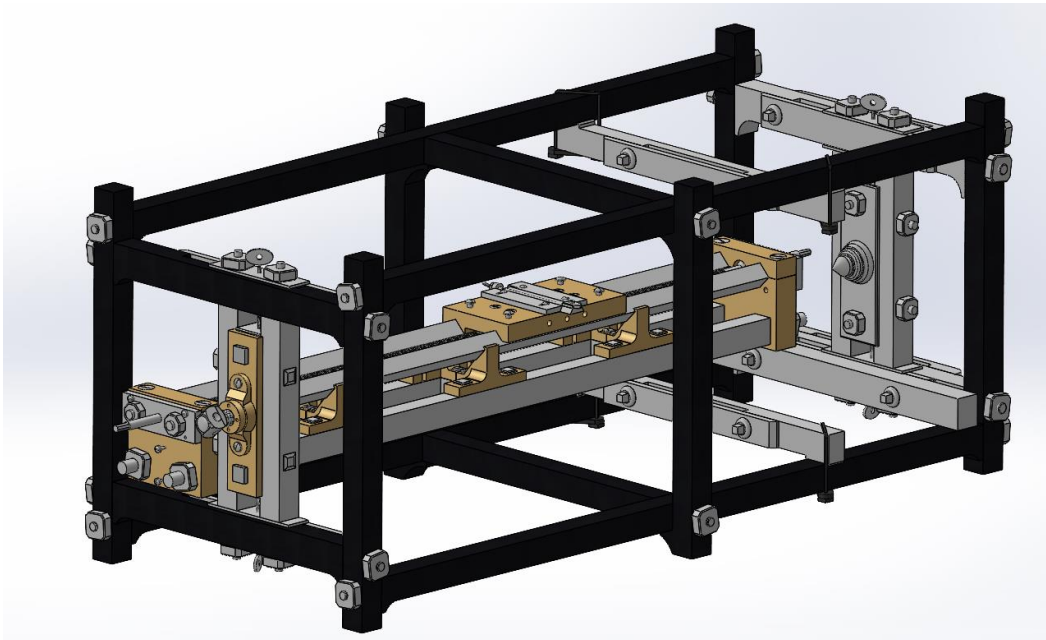


Figura 8.2. Modelo 3D del torno de Jacques de Vaucanson (1751).

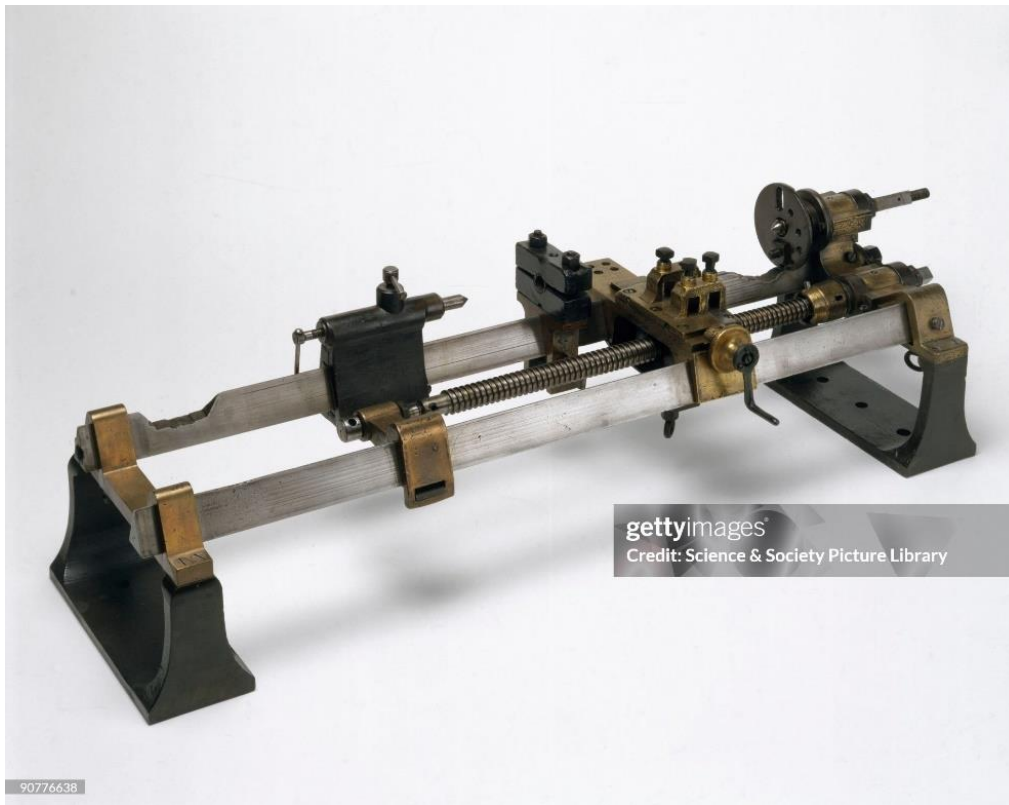


Figura 8.3. Torno de Henry Maudslay (1797).

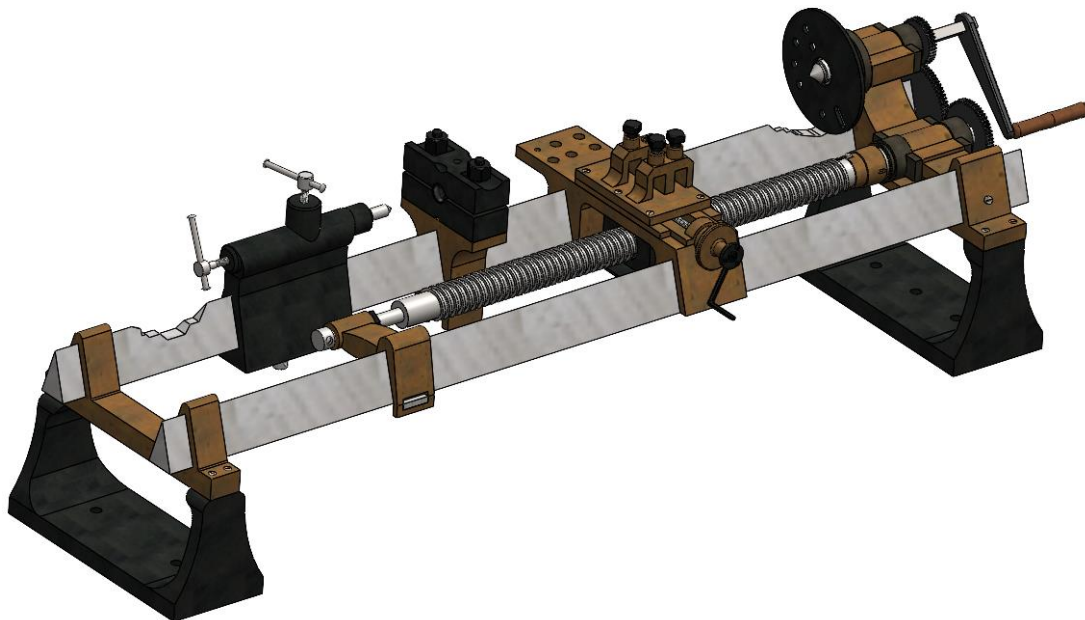


Figura 8.4. Modelo 3D del torno de Henry Maudslay (1797).



9 Conclusiones

El patrimonio industrial constituye una pieza clave para entender la evolución tecnológica y los procesos que han moldeado la industria moderna. Por ello, la conservación y estudio de máquinas-herramienta históricas, como los tornos de Vaucanson y Maudslay, permiten preservar su valor histórico y, con ello, el patrimonio que representan. Estos tornos simbolizan avances decisivos en la mecanización y estandarización de los procesos productivos, que transformaron radicalmente la fabricación durante los siglos XVIII y XIX, impulsando la Revolución Industrial.

El torno de Vaucanson incorporó un cuerpo completamente metálico e introdujo el carro longitudinal accionado por un husillo de avance, lo que permitió el desplazamiento controlado de la herramienta de corte. Estas innovaciones mejoraron notablemente la precisión y calidad del mecanizado, sentando las bases para el desarrollo de posteriores máquinas-herramienta. Por su parte, Maudslay perfeccionó estos conceptos al sincronizar el movimiento del cabezal con el husillo de avance mediante un sistema de engranajes, lo que posibilitó un mecanizado más preciso y repetible. Esta innovación fue clave para la estandarización de componentes y su intercambiabilidad, facilitando la producción en serie y consolidando su influencia en la Revolución Industrial y sentando, a su vez, las bases de la producción industrial moderna.

El trabajo realizado digitalizando estas máquinas-herramienta, tanto en el modelado como en el análisis detallado, resulta fundamental para preservar y difundir el conocimiento técnico que sustentó estos avances. La reconstrucción virtual de estas máquinas facilita una comprensión profunda de sus componentes, mecanismos y funcionamiento, permitiendo su estudio sin necesidad de manipular los originales, lo cual es crucial para su conservación. Además, este enfoque contribuye a la transmisión del legado tecnológico, acercando a las nuevas generaciones los principios mecánicos que siguen siendo relevantes en el diseño y operación de la maquinaria contemporánea.

Los resultados obtenidos demuestran que la digitalización permite recrear con alta fidelidad los detalles geométricos y funcionales de las máquinas originales, facilitando su análisis y difusión en formatos accesibles y replicables. No obstante, el estudio también pone de manifiesto ciertas limitaciones, como la escasa información técnica que se conserva, ya que modelar con precisión resulta complicado cuando se deben hacer aproximaciones dimensionales o no se dispone de datos completos sobre el funcionamiento de los mecanismos, lo que dificulta una digitalización más integral y precisa.



Por tanto, la digitalización de máquinas-herramienta históricas se consolida como una herramienta clave para la conservación y transmisión del patrimonio industrial, al combinar el conocimiento histórico con técnicas digitales modernas en beneficio de su preservación y puesta en valor.

10 Líneas futuras

Este estudio abre diversas vías para continuar profundizando en el conocimiento y la conservación del patrimonio industrial representado por las máquinas-herramienta históricas. En primer lugar, se puede ampliar el modelado y análisis de otras máquinas-herramienta, tanto anteriores como posteriores a los tornos de Vaucanson y Maudslay, con el fin de comprender mejor la evolución tecnológica y las diferentes soluciones de ingeniería que se implementaron en cada caso.

Asimismo, el análisis mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), o la integración de tecnologías avanzadas como la realidad virtual, aportaría un mayor nivel de detalle en la comprensión del comportamiento funcional y estructural de estas máquinas. Esto permitiría facilitar su reproducción exacta mediante impresión 3D u otras técnicas de fabricación.

Finalmente, una línea importante de investigación sería promover la difusión del valor cultural y científico que las máquinas-herramienta han tenido en el desarrollo de la sociedad. Esto se podría lograr reuniendo información técnica, imágenes y modelos digitales de diversas máquinas-herramienta históricas, y presentándolas de manera virtual e interactiva, lo cual contribuiría a dinamizar la enseñanza y el aprendizaje sobre estas, además de fomentar el interés en el ámbito de la ingeniería.



11 Bibliografía

- [1] «Carta De Nizhny Tagil Sobre El Patrimonio Industrial / Julio, 2003».
- [2] M. Ramírez, «Henry Maudslay, el gran innovador de la máquina herramienta».
- [3] «Evolución técnica de la máquina-herramienta. Reseña histórica. - Metalmecánica». Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1435-Evolucion-tecnica-de-la-maquina-herramienta-Resena-historica.html>
- [4] «Tour à charioter de Vaucanson | musée des Arts et Métiers». Accedido: 2 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.arts-et-metiers.net/musee/tour-charioter-de-vaucanson>
- [5] «conservar | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE». Accedido: 12 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/conservar>
- [6] «(PDF) Industrial Heritage: The past in the future of the city». Accedido: 12 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/239823904_Industrial_Heritage_The_past_in_the_future_of_the_city
- [7] «Patrimonio Industrial: Protección, Preservación e Interpretación - EVE Museos + Innovación». Accedido: 12 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://evemuseografia.com/2018/12/05/patrimonio-industrial-proteccion-preservacion-e-interpretacion/>
- [8] «Digitalización del patrimonio cultural». Accedido: 12 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://culturalab.es/digitalizacion-de-patrimonio/>
- [9] «Programas y líneas de actuación - IPCE Instituto... | Ministerio de Cultura». Accedido: 12 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cultura.gob.es/planes-nacionales/planes-nacionales/educacion-patrimonial/programas-y-lineas-actuacion.html>
- [10] J. Monteagudo-Fernández, C. J. Gómez-Carrasco, y Á. Chaparro-Sainz, «Heritage Education and Research in Museums. Conceptual, Intellectual and Social Structure within a Knowledge Domain (2000–2019)», *Sustainability 2021*, Vol. 13, Page 6667, vol. 13, n.º 12, p. 6667, jun. 2021, doi: 10.3390/SU13126667.

- [11] «PLAN NACIONAL DE PATRIMONIO INDUSTRIAL».
- [12] A. Alcón, G. Tutores, R. Ovejero, y Q. Rebotto Rodríguez, «Evolución, Análisis y Estudio Comparativo de las Máquinas Herramienta (Torno y Fresadora) a lo largo de la Historia».
- [13] «Machine tool operation part 1 : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive». Accedido: 1 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://archive.org/details/dli.scoerat.6140machinetooloperationpart1/page/239/mode/2up>
- [14] «The Origins of the Lathe on JSTOR». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en:
https://www.jstor.org/stable/24936538?saml_data=eyJpbmN0aXR1dGlvbklkcyI6Wyl3ZDJiOTZhMi05MmJiLTRINTU0tYWM3Ni1iYTU3ODczNTNjYjEiXSwic2FtbFRva2VuljoiYWY5NDVmMTU0tNjJmNC00NzQxLTK1YzctZTJjMTNkOTE0ODgxIn0&seq=2
- [15] «Historia del torno de carpintero: árabe, de pedal y de ballesta». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tecni-tool.es/historia-del-torno-de-carpintero/>
- [16] G. Lefèbvre, *Le tombeau de Pérosiris. Troisième partie: vocabulaire et planches*. Le Caire: Institut Français d'Archéologie Orientale, 1923.
- [17] «Egyptian turners (Rieth 1958: 179) | Download Scientific Diagram». Accedido: 15 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Egyptian-turners-Rieth-1958-179_fig4_320585859/actions#reference
- [18] «File:Drehbank Petosiris.png - Wikimedia Commons». Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Drehbank_Petosiris.png
- [19] Lynn. White, «Medieval technology and social change», 1962, Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:
https://books.google.com/books/about/Medieval_Technology_and_Social_Change.html?hl=es&id=xa7zPNkxswQC
- [20] «Tools for the job; a short history of machine tools : Rolt, L. T. C., 1910-1974 : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://archive.org/details/toolsforjobshort0000rolt/page/n5/mode/2up>

- [21] Tornos, «Aspectos tecnológicos del torneado».
- [22] «-- Les Forgaxes -- Asociación de Amigos de la Madera». Accedido: 2 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://forgaxes.com/web/fxtorno.php?codidioma=C&pestana=2>
- [23] «Torno de pértiga - Wikipedia». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Pole_lathe#
- [24] «Antecedentes de Torno | PDF | Máquinas | Ingeniería mecánica». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://es.scribd.com/document/206612469/Antecedentes-de-Torno>
- [25] «Mechanick exercises, or, The doctrine of handy-works : applied to the arts of smithing, joinery, carpentry, turning, bricklayery : to which is added Mechanick dyalling: shewing how to draw a true sun-dyal on any given plane ... : Moxon, Joseph, 1627-1691 : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive». Accedido: 2 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:
https://archive.org/details/mechanickexercis00moxo_1/page/8/mode/2up
- [26] «The Project Gutenberg eBook of Screw-Thread Cutting by the Master-Screw Method Since 1480, by Edwin A. Battison». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/31756/pg31756-images.html>
- [27] «Codex Atlanticus». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://codex-atlanticus.ambrosiana.it/#/Overview>
- [28] «Get creative with stock photos and videos from Alamy». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.alamy.com/>
- [29] «Jacques Besson | Inventor, Mathematician, Mechanic | Britannica». Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://www.britannica.com/biography/Jacques-Besson>
- [30] «Theater of Instruments and Machines. | Library of Congress». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.loc.gov/item/2021666747/>
- [31] «The Perfectionists Page 7 Read online free by Simon Winchester». Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bookreadfree.com/265331/6542956>

- [32] «Jesse Ramsden - Graces Guide». Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.gracesguide.co.uk/Jesse_Ramsden
- [33] «This lathe is said to be the first workshop machine on which English... Fotografía de noticias - Getty Images». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gettyimages.es/detail/fotograf%C3%ADa-de-noticias/this-lathe-is-said-to-be-the-first-workshop-fotograf%C3%ADa-de-noticias/90776504>
- [34] «Whitworth Lathes - Graces Guide». Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.gracesguide.co.uk/Whitworth_Lathes
- [35] «Historia de Hendey». Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.lathes.co.uk/hendey/page2.html>
- [36] «Engraving of a porter-mcleod lathe, 1904 image courtesy of». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.academia.edu/figures/9047409/figure-17-engraving-of-porter-mcleod-lathe-image-courtesy-of>
- [37] «Cut by Numbers | MIT Technology Review». Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.technologyreview.com/2004/05/01/232946/cut-by-numbers/>
- [38] «History of numerical control - Wikipedia». Accedido: 10 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_numerical_control
- [39] «HISTORIA DE LOS CNC». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.inter2000mecanizados.com/post/historia-de-los-cnc>
- [40] «Serie S. BNC 425-475 | Maquinaria Márquez». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.maquinariamarquez.com/centros-mecanizado-startech-machinery/tornos-paralelos-cnc/serie-s-bnc-425-475/>
- [41] J. Riskin, «The Defecating Duck, or, the Ambiguous Origins of Artificial Life», *Crit Inq*, vol. 29, pp. 599-633, 2003.
- [42] F. G. J. Gies, *Ingenieros de la Edad Media*. Crítica, 1994.
- [43] «English and American tool builders by Joseph Wickham Roe | Project Gutenberg». Accedido: 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gutenberg.org/ebooks/72046>

- [44] «Jacques de Vaucanson rectangular - Jacques de Vaucanson - Wikipedia, la enciclopedia libre». Accedido: 14 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Jacques_de_Vaucanson#/media/Archivo:Jacques_de_Vaucanson_rectangular.jpg
- [45] «El torno de Vaucanson - Guía de las Gracias». Accedido: 3 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.gracesguide.co.uk/Vaucanson%27s_Lathe
- [46] «Tela de seda muaré azul, telas textiles de lujo para el hogar, telas para interiores, muaré, seda con estampado de marca de agua, tela de diseñador. - Etsy España». Accedido: 8 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.etsy.com/es/listing/1889984038/tela-de-seda-muare-azul-telas-textiles?ls=s&ga_order=most_relevant&ga_search_type=all&ga_view_type=gallery&ga_search_query=red+moire+fabric&ref=sr_gallery-1-28&frs=1&content_source=da332da009d8763207210d8082d97c7ac428c340%253A1889984038&organic_search_click=1&logging_key=da332da009d8763207210d8082d97c7ac428c340%3A1889984038
- [47] «Jacques de Vaucanson | Biografía, autómatas, inventos y datos | Britannica». Accedido: 8 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Jacques-de-Vaucanson>
- [48] «Metal-turning lathe - Jacques Vaucanson — Google Arts & Culture». Accedido: 2 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://artsandculture.google.com/asset/metal-turning-lathe/kwGbpYqKSyzcSg>
- [49] «CNAM»: Accedido: 6 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://phototheque.arts-et-metiers.net/?idPageWeb=95>
- [50] «La máquina de 1751 que lo hizo todo - YouTube». Accedido: 3 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=djB9oK6pkbA&ab_channel=MachineThinking
- [51] «Cojinete - Wikipedia, la enciclopedia libre». Accedido: 4 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cojinete>
- [52] D. Dowson, *History of Tribology*, 2.^a ed. London: Professional Engineering Publishing, 1998.

- [53] D. S. Landes, *The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present*. Cambridge University Press, 1969.
- [54] R. L. Hills, «Maudslay, Henry», en *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 9, Nueva York: Charles Scribner's Sons, 1989.
- [55] F. R. Tomlinson, «The Maudslay Legacy», *Transactions of the Newcomen Society*, vol. 10, pp. 1-24, 1929.
- [56] «Henry Maudslay | Machine tools, Industrial Revolution, Manufacturing | Britannica». Accedido: 21 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/biography/Henry-Maudslay>
- [57] «Henry Maudslay by Grevedon - Henry Maudslay - Wikipedia, la enciclopedia libre». Accedido: 14 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Henry_Maudslay#/media/Archivo:Henry_Maudslay_by_Grevedon.jpg
- [58] «Henry Maudslay's original screw-cutting lathe, c.1800 | Science Museum Group Collection». Accedido: 14 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co46284/henry-maudslays-original-screw-cutting-lathe-c-1800>
- [59] «This lathe is said to be the first workshop machine on which English... Fotografía de noticias - Getty Images». Accedido: 5 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gettyimages.es/detail/fotograf%C3%ADa-de-noticias/this-lathe-is-said-to-be-the-first-workshop-fotograf%C3%ADa-de-noticias/90776638>
- [60] «Maudslay Production Lathe, circa 1800 - The Henry Ford». Accedido: 5 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.thehenryford.org/collections-and-research/digital-collections/artifact/146017>
- [61] «This lathe is said to be the first workshop machine on which English... Fotografía de noticias - Getty Images». Accedido: 9 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gettyimages.es/detail/fotograf%C3%ADa-de-noticias/this-lathe-is-said-to-be-the-first-workshop-fotograf%C3%ADa-de-noticias/90742141>
- [62] M. C. Shaw, *Metal Cutting Principles*, 2nd ed. Oxford University Press, 2005.

- [63] «Machinability - an overview | ScienceDirect Topics». Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/machinability>
- [64] «Mechanization - Wikipedia». Accedido: 22 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanization>
- [65] L. H. V Van der Woude, S. de Groot, y T. W. J. Janssen, «Physical strain in manual wheelchair propulsion», *Scand J Rehabil Med*, vol. 33, n.º 1, pp. 1-7, 2001.
- [66] «Ergonomics — Manual handling — Lifting and carrying», International Organization for Standardization, 2003. [En línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/28434.html>
- [67] «Maqueta del torno de Henry Maudslay | Colección del Museo de Ciencias». Accedido: 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8637173/model-of-henry-maudslays-screw-cutting-lathe>
- [68] F. García Vacas, «Cuaderno de Prácticas de Modelado con SolidWorks».

