



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS FUNCIONAL DE UNA RECTIFICADORA DE RODAMIENTOS DE 1906

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Álvaro Torres Bustos

Tutor: Francisco Javier Trujillo Vilches

Málaga, febrero de 2024

Resumen

En este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado un modelo digital de una rectificadora de rodamientos patentada en 1906 que, por sus especiales características, presenta un elevado valor histórico-patrimonial, dada la influencia que tuvo a principios de del siglo XX en la emergente industria del automóvil. A pesar de su relevancia, ninguno de estos modelos se conserva, quedando como fuente de información exclusiva los datos recogidos en la patente. Partiendo de esta información y de la recogida en algunos catálogos y manuales de la época, se han aplicado técnicas de ingeniería inversa para la reconstrucción de esta máquina-herramienta, utilizando para ello el software SolidWorks. Además, se ha llevado a cabo un análisis funcional de esta rectificadora, así como un análisis cinemático de su sistema de accionamiento.

Este proyecto presenta un doble objetivo: en primer lugar, la modelización de una máquina-herramienta de gran relevancia histórica, que permite recuperar y poner en valor este elemento patrimonial, haciéndolo accesible a toda la sociedad. En segundo lugar, generar un recurso didáctico para estudiantes de diversas disciplinas de ingeniería industrial, permitiéndoles explorar una máquina-herramienta que pertenece a un contexto histórico distinto al actual, aunque comparte similitudes arquitectónicas con las rectificadoras de rodamientos modernas.

Cabe destacar que este trabajo se enmarca en el Proyecto de Innovación Educativa “Desarrollo y empleo de herramientas docentes a través de la creación del Museo Virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga”, con referencia PIE22-094. El modelo desarrollado será incorporado a este museo, pudiendo acceder al modelo digital y a la información sobre su funcionamiento haciendo uso de técnicas de realidad virtual y realidad aumentada, entre otras.

Palabras clave: Patrimonio industrial; industria del automóvil; rectificado; procesos de acabado; rodamientos.

Abstract:

In this work, a digital model of a bearing grinding machine patented in 1906 has been developed which, due to its special characteristics, has a high historical-heritage value, given the influence it had at the beginning of the 20th century in the emerging automotive industry. Despite their relevance, none of these models are preserved, leaving the data collected in the patent as the exclusive source of information. Based on this patent and the information contained in some catalogs and manuals of the time, reverse engineering techniques have been applied to reconstruct this machine tool, using SolidWorks software. In addition, a functional analysis of this grinding machine has been carried out, as well as a kinematic analysis of its drive system. This project has a double objective: firstly, the modeling of a machine tool of great historical relevance, which allows the recovery and enhancement of this heritage element, making it accessible to the entire society. Secondly, to generate a teaching resource for students of various industrial engineering disciplines, allowing them to explore a machine tool that belongs to a historical context different from the current one, although it shares architectural similarities with modern bearing grinding machines. It should be noted that this work is part of the Educational Innovation Project “Development and use of teaching tools through the creation of the Virtual Museum of the School of Industrial Engineering of the University of Malaga”, with reference PIE22-094. The developed model will be incorporated into this museum, being able to access the

digital model and information about its operation using virtual reality and augmented reality techniques, among others.

Keywords: Industrial heritage; automotive industry; grinding; finishing processes; bearings.

Índice general

Índice General

Contenido

<i>Índice de figuras</i>	11
<i>Índice de tablas</i>	17
<i>Capítulo 1. Introducción</i>	21
1.1. Antecedentes.....	23
1.2. Objetivos.....	24
1.3. Organización de la Memoria.....	24
<i>Capítulo 2</i>	27
<i>Evolución histórica del rectificado</i>	27
2.1. Introducción.....	29
2.2. Mecanizado con abrasivos.....	29
2.3. Clasificación de las máquinas-herramienta con abrasivos	30
2.4. Evolución histórica del material de las muelas de rectificar.....	37
2.5. Evolución histórica de las rectificadoras.....	39
2.5.1. Paleolítico-Neolítico	39
2.5.2. Edad De Los Metales	40
2.5.3. La Mecanización del Rectificado	41
2.5.4. La Primera Rectificadora.....	42
2.5.5. Las Aportaciones de Leonardo Da Vinci	43
2.5.6. Energía Hidráulica	45
2.5.7. Rectificado de Lentes	45
2.6. Revolución Industrial.....	46
2.6.1. Rectificadora cilíndrica	46
2.6.2. Rectificadora de superficies planas.....	47

2.6.3. Rectificadora de uso específico.....	48
2.7. Segunda mitad de siglo XIX. Inicios del rectificado de precisión.	49
2.7.1. Industria Relojera	49
2.7.2. Rectificado Pesado	50
2.7.3. Rectificadora Universal.....	51
2.7.4. Otros desarrollos de Brown and Sharp.....	53
2.8. Finales del siglo XIX- Inicios del XX- Rectificado Pesado	54
2.8.1. Mejora sobre la Rectificadora	54
2.8.2. La rectificadora de Norton	54
2.8.3. Rectificado de Cigüeñales	55
2.9. Inicios del siglo XX-Rectificados en industrias emergentes	57
2.9.1. La industria del ferrocarril	57
2.9.2. Rodamientos para cañones	57
2.10. Rectificado en la industria del automóvil	58
<i>Capítulo 3. Modelización 3D.....</i>	<i>63</i>
3.1. Introducción.....	65
3.2. Información de partida.....	65
3.3. Hipótesis de partida	70
3.4. Partes de la rectificadora y su funcionamiento. Modelización.	72
3.3.1. Sistema Bastidor.....	72
3.3.2. Sistemas de carros y mandril	77
3.3.3. Sistema de oscilación del carro	82
3.3.4. Sistema muela abrasiva	85
3.3.5. Sistema de poleas.....	92
3.3.6. Modelo	96

<i>Capítulo 4.</i>	99
<i>Análisis cinemático</i>	99
4.1. Introducción.....	101
4.2. Análisis cinemático de los elementos de transmisión de la máquina	101
4.3. Análisis cinemático del proceso de corte	104
4.3.1. Velocidad tangencial de la muela.....	105
4.3.2. Velocidad de la pieza	108
4.4. Profundidad de corte	111
<i>Capítulo 5. Conclusiones</i>	113
5.1. Conclusiones	115
<i>Capítulo 6. Bibliografía</i>	117
<i>Anexos</i>	121
<i>Anexo I. Patente</i>	123
<i>Anexo II. Planos</i>	124

Índice de figuras

Índice de figuras

Figura 1 Muelas para el mecanizado con abrasivos	29
Figura 2: Clasificación de las máquinas herramientas de corte por abrasivos	30
Figura 3: Esmeriladora	31
Figura 4: Afiladora	32
Figura 5: Rectificadora vertical	33
Figura 6: Rectificadora horizontal	34
Figura 7: Rectificadora cilíndrica 1	35
Figura 8: Rectificadora cilíndrica 2	35
Figura 9 : Rectificadora universal	36
Figura 10: Rectificadora de rodamientos	37
Figura 11: Piedra de esmeril	38
Figura 12: Carburo de silicio.....	38
Figura 13: Herramientas	40
Figura 14: Herramientas afiladas con abrasivos	40
Figura 15: Armadura	41
Figura 16: Piedra de amolar con pedal	42
Figura 17 : Bocetos primera rectificadoras	43
Figura 18: Rectificadora de interiores	44
Figura 19: Rectificadora con guiado mecánico	44
Figura 20: Rectificadoras con toboganes de agua	45
Figura 21 : Rectificadora Cilíndrica mejorada	47
Figura 22: Rectificadoras planas	48
Figura 23: Rectificadoras de uso específico	48
Figura 24 : Rectificadora de bolas	49

Índice de figuras

Figura 25: Mecanismo reloj	50
Figura 26: Rectificadora de Poole	51
Figura 27 : Rectificadora universal de Joseph R. Brown	52
Figura 28: Rectificadora universal con rectificado interior	53
Figura 29: Rectificadora cilíndrica plana	53
Figura 30: Norton Company	55
Figura 31: JHON SCOTT MEDAL	55
Figura 32: Rectificadora de cigüeñales	56
Figura 33: Equipo de investigación Norton	56
Figura 34: Rectificadora específicas ruedas de locomotoras	57
Figura 35: Rectificadora para rodamiento de cañones	58
Figura 36: Industria automovilística	59
Figura 37: Rectificadora de cigüeñales Landis Tool Company	60
Figura 38: Funcionamiento rectificadora de cigüeñales	61
Figura 39 : Vista trasera[20]	66
Figura 40: Vista lateral[20]	67
Figura 41: Vista de planta[20]	68
Figura 43: Vista en planta.....	72
Figura 44: Sistema Bastidor.....	73
Figura 45: Altura Bastidor	74
Figura 46 : Mecanismo de manguera	75
Figura 47: Válvula	76
Figura 48: Sistema bastidor conjunto	76
Figura 49: Vista explosionada.....	77
Figura 50 : Piñón-Engranaje	78

Índice de figuras

Figura 51 : Carro	78
Figura 52: Soporte de ruedas	79
Figura 53: Vista explosionada Mandril.....	80
Figura 54: Mandril completo.....	80
Figura 55: Nonius.....	81
Figura 56: Volante y Tornillo sinfn.....	81
Figura 57: Conjunto carro y mandril	82
Figura 58: Sistema giro del carro	83
Figura 59: Embrague acoplado.....	83
Figura 60 : Embrague desacoplado.....	84
Figura 61 : Desplazamiento zapata	84
Figura 62 : Indicador de posición.....	85
Figura 63: Sistema muela.....	86
Figura 64: Sistema muela explosionado	87
Figura 65: Sistema de poleas accionadas por la máquina de vapor	88
Figura 66: Accionamiento sistema de movimientos.....	88
Figura 67: Eje y muela abrasiva	89
Figura 68: Soporte de ruedas	90
Figura 69: Cojinete.....	90
Figura 70: Protector de muela.....	91
Figura 71: Muela abrasiva	91
Figura 72: Vista frontal sistema muela.....	92
Figura 73: Correas.....	93
Figura 74: Perfil correas	94
Figura 75: Correa	94

Índice de figuras

Figura 76: Sistema de accionamiento a techo.....	95
Figura 77: Modelo	96
Figura 78: Modelo 2.....	97
Figura 79: Indicador de posición	98
Figura 80: Vista frontal sistema accionamiento	102
Figura 81: Sistema accionamiento Rectificadora universal.....	103
Figura 82: Velocidad angular muela	105
Figura 83: Sistema accionamiento pieza.....	109

Índice de tablas

Índice de tablas

Tabla 1: Piezas principales.....	69
Tabla 2: Elementos del sistema de muela abrasiva	87
Tabla 3:Velocidad de la muela y de la pieza (rev/min).....	104
Tabla 4: Velocidad angular inicial de 6000 (rev/min).....	106
Tabla 5:Velocidad angular inicial de 5000 (rev/min)	106
Tabla 6: Velocidad angular inicial de 4000 (rev/min).....	107
Tabla 7:Velocidad angular inicial de 3000 (rev/min)	107
Tabla 8:Diámetros de la pieza.....	108
Tabla 9:Velocidades de rotación y de giro de la pieza	108
Tabla 10:Velocidad de accionamiento de la pieza para N3=50 (rev/min).....	110
Tabla 11: Velocidad de accionamiento de la pieza para N3=25 (rev/min).....	111

Capítulo 1.

Introducción

1.1. Antecedentes

La primera Revolución Industrial se erige como un período trascendental, que introdujo una serie de transformaciones sin precedentes en los ámbitos económico, tecnológico y social, rivalizando con los cambios ocurridos durante el Neolítico en la historia de la humanidad. Las innovaciones tecnológicas que irrumpieron en el dominio industrial trajeron consigo una serie de elementos que, progresivamente, se incorporaron a nuestra cultura y estilo de vida, pasando a formar parte inherente de nuestra herencia cultural. En esta herencia se incluyen no solo los productos manufacturados en estas fábricas, sino también los sistemas productivos y las corrientes de pensamiento que forjaron la trayectoria del mundo y la sociedad tal como los concebimos.

El concepto que hoy denominamos "patrimonio industrial" abarca una amplia gama de elementos, tanto tangibles como intangibles, que se originaron a raíz de las actividades industriales y que representan un testimonio vital de la industrialización y la evolución de nuestra sociedad. Estos elementos son esenciales para comprender el desarrollo de la misma y, por lo tanto, es imperativo preservarlos y recuperarlos. Esto implica la rehabilitación de edificaciones, la restauración de herramientas y maquinaria, y la documentación exhaustiva de archivos gráficos y escritos que atestiguan estos fragmentos de nuestra historia [1].

Es importante resaltar que estas iniciativas están alineadas con una de las principales líneas de investigación del grupo de investigación iFab "Ingeniería de Fabricación" de la Universidad de Málaga, en estrecha colaboración con investigadores de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) y el grupo de trabajo Patrimonio Industrial de Fabricación (PATRIF) de la Sociedad de Ingeniería de Fabricación (SIF). Estas investigaciones engloban un conjunto de esfuerzos destinados a analizar, recuperar y dar valor al patrimonio industrial, además de difundir estas actividades en diversos niveles.

En el contexto de estas actividades, se destaca la organización de varios cursos que exploran la historia de las máquinas-herramienta. No obstante, se enfrenta a un desafío significativo debido a la falta de documentación gráfica que ilustre la arquitectura y el funcionamiento de las primeras máquinas-herramienta, muchas de las cuales carecen de patentes o no han sobrevivido hasta el presente. En respuesta a esta limitación, se emplean técnicas de ingeniería inversa, a menudo basadas en fotografías o dibujos históricos, para crear modelos que faciliten el estudio de estas máquinas de época.

1.2. Objetivos

El objetivo central de este proyecto de Trabajo de Fin de Grado es la creación de un modelo digital de una rectificadora de rodamientos Norton de 1906, que por sus especiales características presenta una alta relevancia patrimonial, dada la influencia que tuvo a principios de del siglo XX en una industria emergente en la época, como fue la industria del automóvil. Lamentablemente, no se conserva ninguno de estos modelos, existiendo solo la información recogida en la patente. A partir de esa patente, se han aplicado técnicas de ingeniería inversa para la reconstrucción de esta máquina-herramienta. Para ello se ha recurrido al uso de software de diseño asistido por ordenador, específicamente SolidWorks. Además, se ha llevado a cabo un análisis funcional de esta rectificadora, así como un análisis cinemático de su sistema de accionamiento.

Esta iniciativa tiene una doble finalidad: en primer lugar, la modelización de una máquina-herramienta de gran relevancia en la historia en la industria del automóvil, la rectificadora de rodamientos Norton de 1906. Este modelo permite recuperar y poner en valor este elemento patrimonial, haciéndolo accesible a toda la sociedad. En segundo lugar, servirá como recurso didáctico para estudiantes de diversas disciplinas de ingeniería industrial, permitiéndoles explorar una máquina-herramienta que pertenece a un contexto histórico distinto al actual, aunque comparte similitudes arquitectónicas con las rectificadoras de rodamientos modernas.

Cabe destacar que este trabajo se enmarca en el Proyecto de Innovación Educativa “Desarrollo y empleo de herramientas docentes a través de la creación del Museo Virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga”, con referencia PIE22-094. El modelo desarrollado será incorporado a este museo, pudiendo acceder al modelo digital y a la información sobre su funcionamiento haciendo uso de técnicas de realidad virtual y realidad aumentada, entre otras. Este museo y las técnicas indicadas están siendo desarrolladas de forma paralela a través de otros Trabajos Fin de Estudios.

1.3. Organización de la Memoria

La memoria de este Trabajo de Fin de Grado se estructura en seis capítulos y tres anexos.

En el primer capítulo, titulado "Introducción y Contexto", se sitúa este trabajo en su contexto, se aborda la problemática que ha impulsado la preservación y recuperación del patrimonio industrial, y se establecen los objetivos que se pretenden alcanzar.

Capítulo 1

El segundo capítulo, llamado "Evolución histórica del rectificado y las rectificadoras", se adentra en el funcionamiento, las características y las operaciones de las principales categorías de máquinas utilizadas en procesos de acabado. Se pone especial énfasis en rastrear la evolución histórica de la máquina-herramienta de mecanizado con abrasivos, con un enfoque en la rectificadora, desde sus primeros indicios hasta su estado actual.

El tercer capítulo detalla la metodología seguida para recopilar información sobre las dimensiones y el funcionamiento de la máquina, así como las hipótesis formuladas debido a la falta de datos sobre ciertos componentes. También se describe el proceso de modelado aproximado de cada elemento que compone la máquina y de los mecanismos móviles que permiten una simulación cercana de la máquina-herramienta en cuestión.

El cuarto capítulo se centra en el análisis cinemático del sistema de accionamiento de la máquina-herramienta, así como en un análisis dinámico de su desempeño, cumpliendo con uno de los objetivos fundamentales de este Trabajo de Fin de Grado.

En el quinto capítulo, se presentan las conclusiones más destacadas de este Trabajo Fin de Grado, además de señalar posibles líneas de trabajo futuro.

Finalmente, el sexto capítulo reúne todas las fuentes bibliográficas consultadas y citadas a lo largo de cada uno de los capítulos.

Capítulo 2.

Evolución histórica del rectificado

2.1. Introducción

En este apartado se realiza una introducción al concepto del mecanizado con abrasivos y las distintas tipologías de máquinas-herramienta con sus operaciones correspondientes, así como a la evolución histórica de este tipo de mecanizado y de las máquinas-herramienta asociadas al mismo, principalmente las máquinas de rectificar, dada su importancia en industrias tan relevantes como la del automóvil, la bicicleta, la máquina de coser, el ferrocarril o la aeronáutica.

2.2. Mecanizado con abrasivos

El mecanizado con abrasivos (Figura 1) es un proceso de fabricación en el que se utiliza un material abrasivo, como esmeril, diamante o carburo de silicio, para eliminar material de una pieza de trabajo. Este proceso se utiliza principalmente para dar forma, pulir, afilar, desbarbar o acabar piezas metálicas u otros materiales duros.



Figura 1 Muelas para el mecanizado con abrasivos [2]

En el mecanizado con abrasivos, se utiliza una herramienta abrasiva que está compuesta por partículas duras y afiladas que actúan como “dientes” para eliminar pequeñas cantidades de material de la pieza de trabajo. Estas partículas abrasivas pueden estar unidas a una rueda, una banda, una muela u otros tipos de herramientas abrasivas, dependiendo de la aplicación específica.

El proceso de mecanizado con abrasivos es ampliamente utilizado en la industria para producir piezas de alta precisión y superficies de alta calidad. Algunos ejemplos comunes de aplicaciones de mecanizado con abrasivos incluyen el rectificado de metales, la operación de lapeado, el bruñido y el pulido. Este proceso es esencial en la fabricación de componentes que

requieren tolerancias ajustadas y superficies muy suaves, como los rodamientos, las herramientas de corte y las piezas de motores de aviones [3].

Desde otro enfoque, considerando que las muelas se componen mediante la consolidación de múltiples partículas abrasivas, donde cada una de estas partículas se asemeja a un filo de corte, se pueden incluir dentro del conjunto de máquinas-herramienta de mecanizado multifilo.

2.3. Clasificación de las máquinas-herramienta con abrasivos

Es posible realizar una primera clasificación (Figura 2) de las operaciones de mecanizado con abrasivos en función de la precisión que se puede alcanzar.



Figura 2: Clasificación de las máquinas herramientas de corte por abrasivos [4]

Desbaste: Esta fase inicial tiene como objetivo principal la eliminación rápida de grandes cantidades de material de la pieza de trabajo. La precisión dimensional en el desbaste suele ser menor, y el acabado de la superficie no es crítico en esta etapa.

Afilado: En esta etapa, se busca mejorar la precisión dimensional de la pieza y perfeccionar las características de corte. Se reduce la cantidad de material eliminado en comparación con el desbaste, y la precisión comienza a ser más relevante.

Afinado: La operación de afinado se centra en obtener una precisión dimensional superior y mejorar la calidad de la superficie. Se eliminan menos materiales en esta fase, y la atención se dirige hacia la obtención de tolerancias más ajustadas.

Acabado: La etapa de acabado se caracteriza por la búsqueda de la máxima precisión dimensional y un acabado superficial excepcional. Se utiliza en la fabricación de componentes críticos donde las tolerancias son rigurosas, como rodamientos de alta precisión, herramientas de corte de alta calidad y componentes de motores de aviones.

Esta clasificación refleja la progresión desde el desbaste inicial hasta el acabado de alta precisión, cada una adaptada a las necesidades específicas de la pieza de trabajo y las tolerancias de fabricación correspondientes.

- **ESMERILADORA (Figura 3):** Una esmeriladora, también conocida como amoladora, es una herramienta eléctrica o mecánica que se utiliza para desgastar, pulir, cortar o dar forma a materiales mediante el uso de una rueda abrasiva o disco de esmerilado. Su función principal es la de eliminar material de una pieza de trabajo, ya sea para afilar herramientas, desbastar superficies, preparar piezas metálicas, o llevar a cabo tareas de acabado. Las esmeriladoras son ampliamente utilizadas en diversas industrias y aplicaciones, desde la construcción hasta la fabricación de componentes metálicos.



Figura 3: Esmeriladora [2]

A continuación, el afilado, donde se obtiene algo más de precisión.

- **AFILADORA(Figura 4):** Estas máquinas pueden ser manuales o automáticas, dependiendo de la complejidad del proceso y de las necesidades de precisión. Las afiladoras habían sido esenciales en la industria manufacturera y en talleres de mecanizado, donde el mantenimiento de herramientas de corte en condiciones óptimas

era crucial para lograr resultados de alta calidad en la producción, en la actualidad estas máquinas han perdido aplicación por el uso de insertos desechables.



Figura 4: Afiladora [5]

Por otra parte, uno de los procesos donde se alcanzan muy buenas tolerancias y acabados con gran precisión es el rectificado.

- **RECTIFICADORAS:** El rectificado es un proceso de mecanizado utilizado para obtener una alta precisión en la geometría y el acabado de las superficies de las piezas de trabajo. Este proceso se realiza utilizando una herramienta abrasiva llamada muela abrasiva, que gira a alta velocidad y elimina material de la pieza de trabajo de manera controlada.

El rectificado se utiliza para lograr tolerancias dimensionales muy ajustadas y acabados de superficie extremadamente suaves. Es especialmente útil cuando se requiere una precisión excepcional en las dimensiones de la pieza y cuando se deben cumplir especificaciones estrictas.

El proceso de rectificado implica un contacto entre la muela abrasiva y la pieza de trabajo, y el material se elimina mediante la abrasión. Es importante utilizar sistemas de enfriamiento para controlar la temperatura durante el proceso y prevenir deformaciones térmicas en la pieza de trabajo.

Una rectificadora plana vertical (Figura 5), también conocida como rectificadora de superficie vertical, es una máquina-herramienta utilizada en el proceso de rectificado para lograr

una superficie plana y precisa en piezas de trabajo[6]. A diferencia de las rectificadoras planas horizontales, en las que la muela abrasiva gira horizontalmente, en las rectificadoras planas verticales, la muela gira en sentido vertical.



Figura 5: Rectificadora vertical [2]

Rectificadora plana horizontal (Figura 2): Aquí están las características principales de una rectificadora plana horizontal:

Muela abrasiva horizontal: La muela abrasiva está montada en un husillo horizontal y gira en sentido horizontal. Esta configuración permite el rectificado de superficies planas en piezas de trabajo.

Movimiento de la mesa: La mesa de la máquina, donde se coloca la pieza de trabajo, puede moverse en sentido longitudinal y transversal. Esto permite un control preciso de la posición de la pieza y la eliminación uniforme de material.

Precisión y acabado de superficie: Las rectificadoras planas horizontales son conocidas por su capacidad para lograr tolerancias dimensionales muy ajustadas y acabados de superficie de alta calidad.

Versatilidad de aplicaciones: Se utilizan en una variedad de aplicaciones, como el rectificado de superficies planas, la preparación de superficies para soldadura, el rectificado de piezas de gran tamaño y el mecanizado de piezas que requieren alta precisión en la planitud.

Control automático: Algunas rectificadoras planas horizontales pueden estar equipadas con sistemas de control numérico por computadora (CNC) que permiten la automatización y la repetibilidad en las operaciones de rectificado.



Figura 6: Rectificadora horizontal [2]

Estas máquinas son esenciales en la fabricación de piezas donde la planitud, la precisión dimensional y el acabado superficial son críticos, como en la industria de moldes y troqueles, la automotriz, la aeroespacial y la de maquinaria de precisión. Su capacidad para obtener superficies planas altamente precisas las hace valiosas en una variedad de aplicaciones industriales (Figura 6).

Una rectificadora cilíndrica es una máquina-herramienta diseñada para llevar a cabo operaciones de rectificado en superficies cilíndricas de piezas de trabajo. Utiliza una muela abrasiva que gira en sentido horizontal para eliminar material de la pieza de trabajo y lograr una forma cilíndrica precisa. Este proceso permite obtener tolerancias dimensionales muy ajustadas y acabados de superficie excepcionales en piezas cilíndricas, como ejes, árboles, vástagos y otros componentes mecánicos. Las rectificadoras cilíndricas son esenciales en la fabricación de piezas donde la precisión y la calidad superficial son críticas, Figura 7 y Figura 8.

El movimiento de corte es representado en rojo, el de penetración en verde y el de avance en azul.

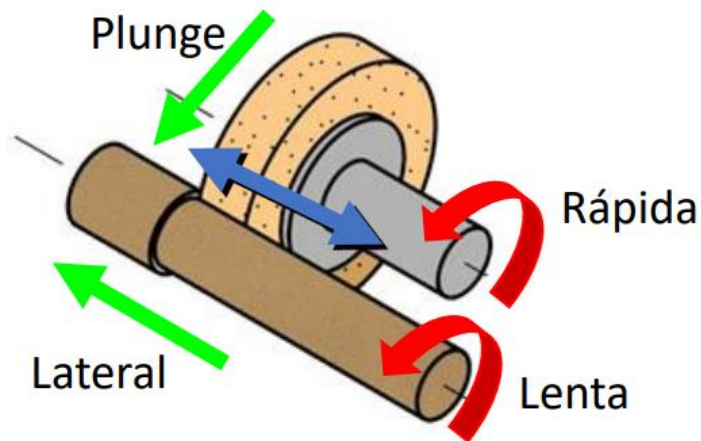


Figura 7: Rectificadora cilíndrica 1 [2]

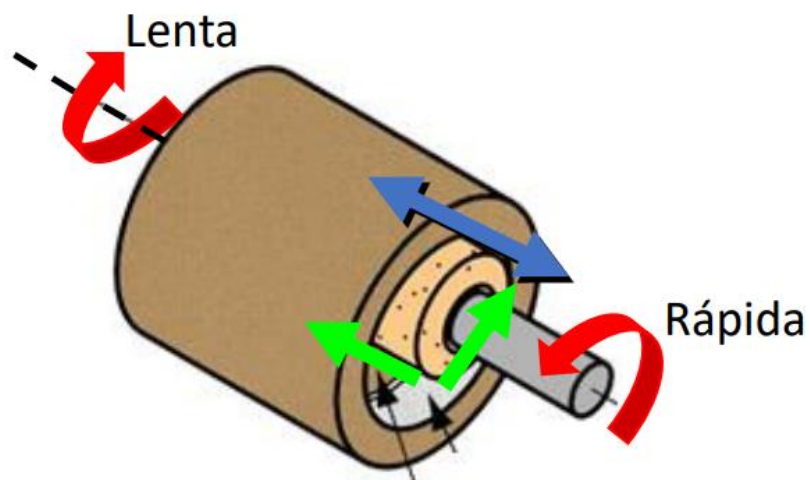


Figura 8: Rectificadora cilíndrica 2 [2]

La rectificadora universal (Figura 9) es una máquina de rectificado extremadamente versátil. Esto se debe a su capacidad para adaptarse con accesorios que permiten realizar una amplia variedad de operaciones de rectificado, incluyendo el rectificado plano, cilíndrico exterior e interior, rectificado de formas y otras tareas de rectificado. Esta versatilidad en la ejecución de diversas operaciones de rectificado es lo que la hace universal y marca un hito significativo en el desarrollo de máquina-herramienta para mecanizado con abrasivos.

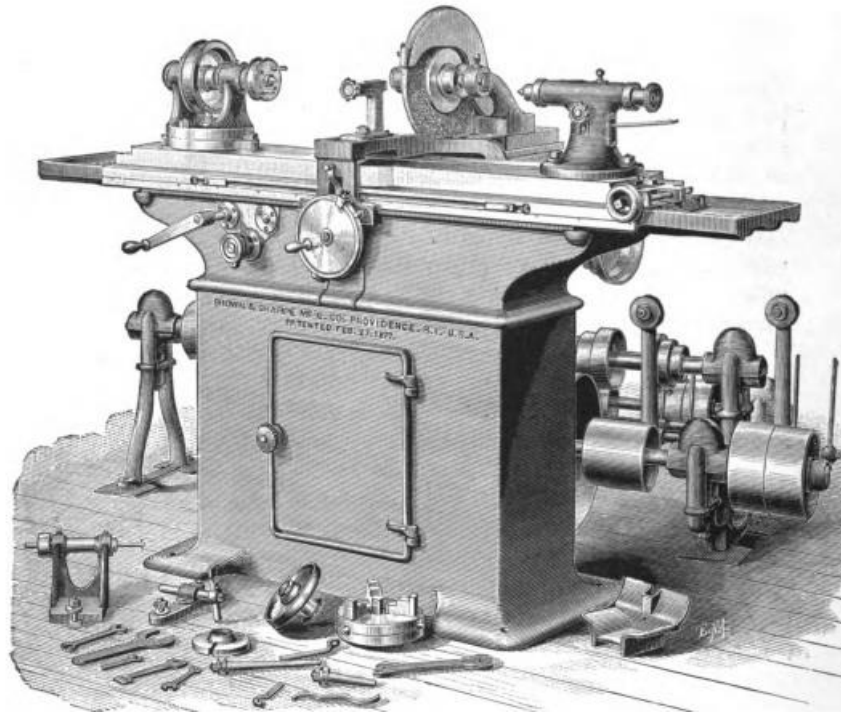


Figura 9 : Rectificadora universal [7]

La rectificadora de rodamientos es una máquina especializada utilizada para rectificar y dar forma a rodamientos, componentes críticos en maquinaria y equipo que requieren alta precisión en su fabricación. Esta máquina se utiliza en la producción de rodamientos para garantizar que tengan dimensiones precisas y superficies de rodadura perfectamente acabadas.

La función principal de una rectificadora de rodamientos (Figura 10) es refinar la geometría y la superficie de los anillos internos y externos de los rodamientos. Esto se logra mediante el uso de muelas abrasivas y una máquina que controla con precisión la eliminación de material para alcanzar tolerancias muy ajustadas. Estas rectificadoras son esenciales en la industria de fabricación de rodamientos, ya que garantizan la calidad y el rendimiento de estos componentes críticos.

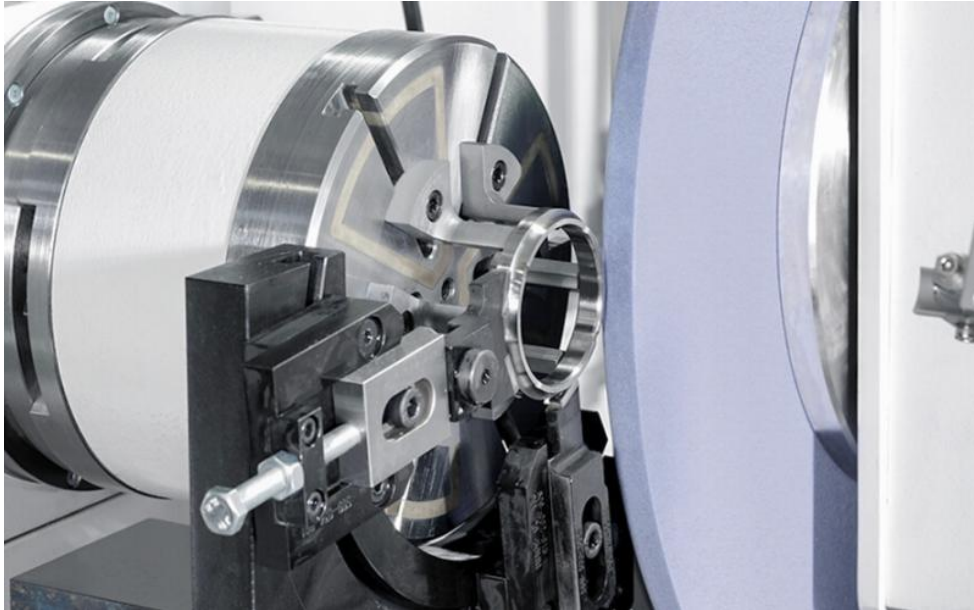


Figura 10: Rectificadora de rodamientos [8]

2.4. Evolución histórica del material de las muelas de rectificar

Uno de los aspectos más importantes en la evolución histórica de los procesos de rectificado, que han hecho de estos procesos uno de los procesos de fabricación de mayor precisión, ha sido los materiales empleados en las muelas de rectificar. La evolución histórica de los materiales utilizados en las muelas para rectificar ha sido un proceso gradual que ha ido mejorando la eficiencia y la durabilidad de estas herramientas a lo largo del tiempo.

En sus inicios, las muelas abrasivas se fabricaban principalmente a partir de piedras naturales como la arenisca y la piedra esmeril (Figura 11). Estos materiales se utilizaban para el rectificado de metales y otros materiales, pero tenían limitaciones en términos de consistencia y durabilidad [9].



Figura 11: Piedra de esmeril [10]

A medida que la demanda de muelas abrasivas aumentaba, se desarrollaron técnicas para crear piedras artificiales más consistentes y duraderas. Esto condujo al desarrollo de las muelas abrasivas hechas de carburo de silicio y corindón fundido. Estos materiales sintéticos eran más eficaces y duraderos que las piedras naturales. Las rectificadoras requerían de muelas abrasivas de mayores dimensiones capaces de soportar más peso y mayores fuerzas centrifugas, esto no era posible con los materiales naturales utilizados hasta entonces.

Se realizan varios intentos por fabricar muelas artificiales y el primero en hacerlo es Edward G.Acheson en 1981 con el carburo de silicio (Figura 12), también conocido como carborundum [11] (iba buscando quemar el carbón hasta convertirlo en diamante, pero no funciona).

Se creó una compañía para su fabricación, la Carborundum Company.



Figura 12: Carburo de silicio [2]

2.5. Evolución histórica de las rectificadoras

2.5.1. Paleolítico-Neolítico

El conformado mediante abrasivos, uno de los métodos más ancestrales de la humanidad, comparte su antigüedad con el proceso de taladrado, que se remonta a unos impresionantes 100,000 años atrás. En aquellos tiempos remotos, nuestros ancestros ya habían descubierto cómo forjar herramientas afiladas a partir de piedras, empleando la técnica de la fractura.

El ingenio humano se manifestó al utilizar la abrasión no solo para dar forma inicialmente a estas herramientas, sino también para mantener su filo a lo largo del tiempo. Este proceso involucraba el frotamiento de objetos afilados contra diversas superficies abrasivas, asegurando que permanecieran eficaces en su propósito.

El Neolítico, una época que se extendió desde hace aproximadamente 15,000 hasta 5,000 años antes de Cristo, marcó un hito en el desarrollo de este método. Se emplearon distintos tipos de piedras abrasivas, como la arenisca, el esmeril (fabricado a partir de corindón mezclado con magnetita o hematita) y valiosas gemas para esculpir y cortar otros materiales, impulsando así la fabricación de herramientas y armas de mayor sofisticación.

Este proceso no solo permitió la creación de herramientas de sílex con menos defectos en comparación con otros métodos, sino que también brindó la ventaja adicional de que sus filos podían ser fácilmente restaurados. Esta cualidad resultó de importancia trascendental en un contexto histórico donde el desgaste de las herramientas podía suponer un obstáculo en la lucha por la supervivencia.

En resumen, el conformado mediante abrasivos se revela como una piedra angular en la evolución de la tecnología y la civilización [12,13]. Facilitó la creación de herramientas (Figura 13) más precisas y duraderas durante los albores de la humanidad, y su capacidad de reafilado constituyó un avance crucial en el progreso humano.



Figura 13: Herramientas [2]

2.5.2. Edad De Los Metales

En el período entre 4,000 y 1,000 a.C., vivimos una evolución fascinante en la forma en que moldeábamos y afilábamos nuestras herramientas. Durante la Edad de Cobre y Bronce, estas herramientas eran fácilmente moldeables y afilables debido a sus materiales. Sin embargo, con la llegada de la Edad de Hierro en el 1,110 a.C., el rectificado volvió a ser crucial, ya que las herramientas de hierro se forjaban manualmente y necesitaban ser afiladas con abrasivos, Figura 14. Estos cambios reflejan nuestra capacidad para adaptarnos a los recursos disponibles en cada época.



Figura 14: Herramientas afiladas con abrasivos [2]

2.5.3. La Mecanización del Rectificado

Hasta la Edad Media, la tarea de rectificado se realizaba de manera manual. Esto implicaba sostener la pieza y frotarla contra una piedra plana de amolar o utilizar una pequeña muela que se aplicaba sobre la pieza fija. Para automatizar el proceso de rectificado, se requería una muela circular y un sistema de sujeción y orientación para la pieza mientras se movía con respecto a la muela.

En la antigua Roma, las piedras de amolar se empleaban tanto para triturar granos y obtener harina como para extraer aceite de aceitunas. Estas herramientas se ponían en funcionamiento mediante energía humana, animal o hidráulica, como lo describió Vitruvio. Con el tiempo, se adaptaron estas técnicas para afilar metales, centrándose en la mejora del filo de las herramientas.

La primera forma de mecanización del rectificado consistió en utilizar una rueda de amolar que se hacía girar manualmente alrededor de un eje. Esta técnica se empleaba principalmente para afilar y pulir herramientas y armas, con el operario sosteniendo la pieza en su lugar.

Hasta finales del siglo XVIII, el rectificado se centraba en tareas de afilado y pulido. En ese contexto, la producción de armas y armaduras (Figura 15), a pesar de sus cambios a lo largo de la historia, alcanzó un alto grado de desarrollo en el siglo XV. Fue en ese período cuando comenzó a utilizarse acero endurecido en la fabricación de estos elementos[3].



Figura 15: Armadura [10]

A finales de la Edad Media, se produjeron avances significativos en las máquinas-herramienta. Entre ellos, se destacó la sustitución del arco de violín por el pedal en el torno, que

se implementó en el año 1250. Este cambio proporcionó a los operarios una mayor libertad de manos en sus labores.

Además, en el siglo XIV, durante la dinastía Ming en China, se encuentra evidencia del uso del molinillo a pedal en el mecanizado mediante abrasivos. Este dispositivo se utilizaba para hacer girar un disco que se empleaba en el procesamiento de jade con arena como abrasivo y agua como refrigerante. Los discos utilizados variaban en tamaño según la gema que se estuviera mecanizando.

En Europa, se tiene registro del uso de una piedra de amolar con accionamiento de pedal en un grabado de cobre de 1485, realizado por Israel van Meckenem. Este período también marcó el inicio del uso de las primeras amoladoras de pedal portátiles, Figura 16. Estos avances marcaron el camino hacia la mecanización del rectificado y el pulido de materiales.



Figura 16: Piedra de amolar con pedal [13]

2.5.4. La Primera Rectificadora

Aunque la primera máquina de rectificado tal como la conocemos hoy no surgió hasta 1830, se encontraron indicios de este concepto en el siglo XV. Un ingeniero militar anónimo alemán que participó en las Guerras Husitas en Bohemia en 1430 diseñó una máquina

rudimentaria que usaba un pórtico para sujetar la muela y una tabla para la pieza a rectificar. La muela se accionaba manualmente mediante una manivela y un cable que pasaba por poleas, pero no se controlaba la posición de la pieza. Aunque este diseño fue un comienzo, desarrollos más avanzados vendrían más tarde, como los de Leonardo da Vinci, Figura 17.

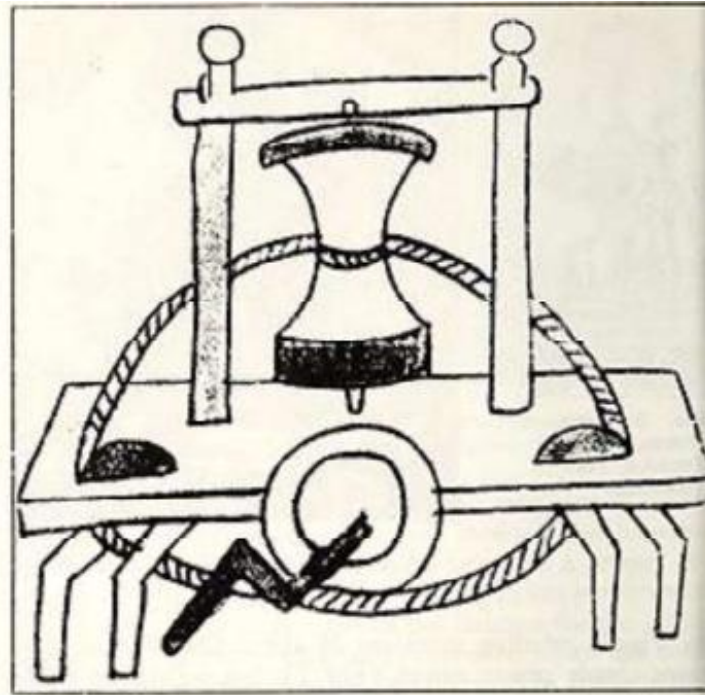


Figura 17 : Bocetos primera rectificadoras [12]

2.5.5.Las Aportaciones de Leonardo Da Vinci

El Códice Atlántico, que abarca los años 1478 a 1519, proporciona indicios de la mecanización de las muelas en una época temprana. Aunque no está claro si representan máquinas de la época, mejoras en ellas o ideas innovadoras, este códice desempeña un papel significativo en el desarrollo posterior de las rectificadoras, que cobraron importancia en el siglo XIX.

En particular, se menciona una rectificadora de exteriores (Figura 18) que es la primera registrada y que incorpora rodamientos y un sistema de engranajes[14]. El códice también describe varios tipos de muelas, generalmente hechas de madera y cubiertas de cuero con partículas de esmeril incrustadas. Estos hallazgos ofrecen una visión temprana del avance hacia la mecanización del rectificado.

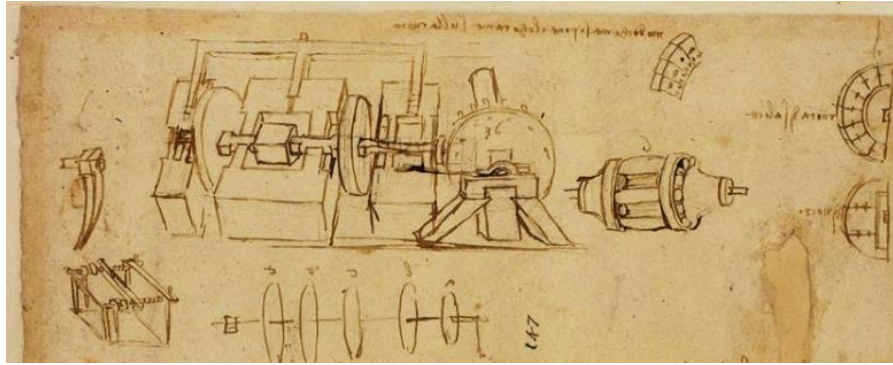


Figura 18: Rectificadora de interiores [12]

En cuanto a la rectificadora de interiores para cilindros, conocida como bruñidora, está sujeta los cilindros con garras, permitiendo un centrado preciso. Su construcción robusta, reforzada con un marco, marca el inicio del concepto de rectificadora de precisión. Además, permite el movimiento automático de la muela en relación con la pieza que se está rectificando.

Por último, Leonardo da Vinci aportó ejemplos de rectificadoras simples en las que el pulido se realizaba en la superficie de la muela (Figura 19) en lugar de en su periferia. Estas máquinas, tanto verticales como horizontales, se accionaban manualmente, y la pieza de trabajo ya contaba con un sistema de guiado mecánico en relación con la muela. Las ideas de Leonardo representaron un avance importante en la tecnología de rectificado.

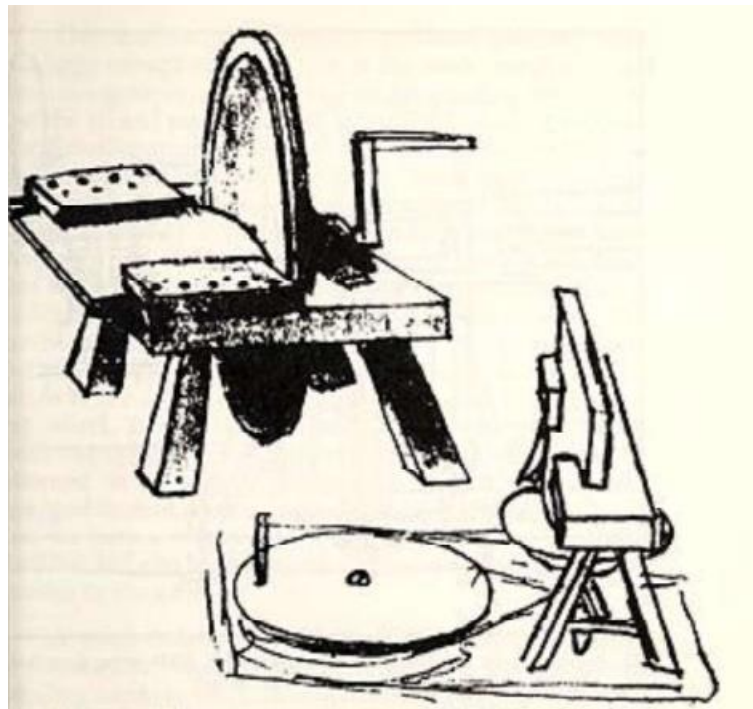


Figura 19: Rectificadora con guiado mecánico [12]

2.5.6. Energía Hidráulica

Dos generaciones después de la época de Leonardo da Vinci, encontramos una rectificadora que guarda similitudes con las que él dibujó. Este dispositivo se encuentra representado en un grabado de Johannes Stradanus, datado en 1575 y exhibido en el Museo Berliner Kupferstichkabinett.

En este grabado (Figura 20), se observa una característica interesante: la presencia de toboganes diseñados para agregar agua a las muelas de piedra. Este detalle marca una diferencia con respecto a las muelas cubiertas de cuero y esmeril, donde este tipo de adiciones no existían.

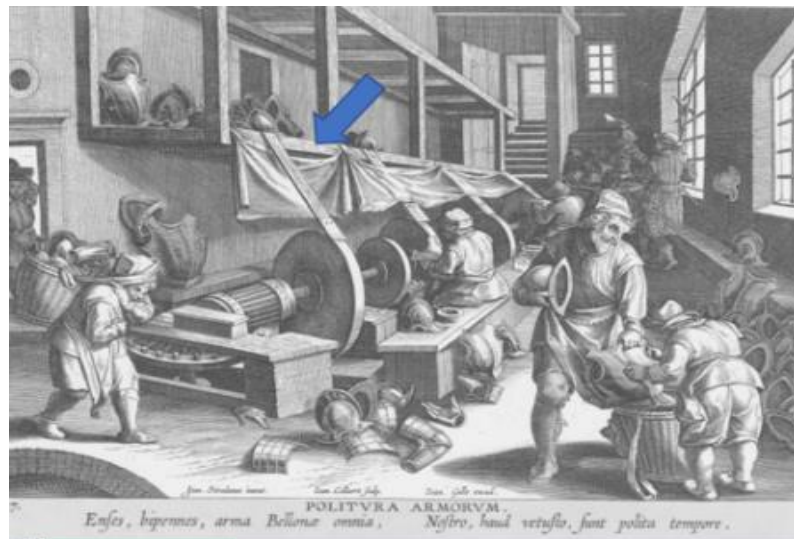


Figura 20: Rectificadoras con toboganes de agua [15]

2.5.7. Rectificado de Lentes

En el siglo XVII, se produjeron avances en dos técnicas de rectificado altamente especializadas. La primera estuvo relacionada con la rectificación de precisión para la creación de lentes utilizadas en telescopios y microscopios, un concepto que guardaba similitudes con las ideas propuestas por Leonardo da Vinci. La segunda técnica se desarrolló en Holanda en 1695 y se centró en la talla de gemas. En este proceso, se empleaba un disco de hierro que giraba horizontalmente, transportando polvo de diamante como abrasivo. La gema se fijaba cuidadosamente en un accesorio y se aseguraba con pesas de plomo contra el disco giratorio.

2.6. Revolución Industrial

2.6.1. Rectificadora cilíndrica

David Wilkinson (1771-1852), destacado ingeniero e inventor estadounidense, es reconocido como uno de los precursores de la máquina-herramienta. Su contribución inicial fue en la industria textil.

Se le atribuye la posible concepción de la rectificadora universal [6] alrededor de 1820. En sus escritos, describió una rectificadora diseñada para alcanzar precisión dimensional, acabado superficial y concentricidad, aspectos que no podía lograr con su torno "Jenny" al fabricar ejes. Esta máquina temprana ya contenía los elementos fundamentales de las rectificadoras modernas.

Jonathan Bridges y James Wheaton, dos estadounidenses, patentaron dos rectificadoras cilíndricas similares con solo un año de diferencia. Es probable que estuvieran familiarizados con el trabajo de David Wilkinson, ya que basaron sus diseños en esa tecnología previa.

Jonathan Bridges patentó la rectificadora transversal o cilíndrica en 1833, donde la muela proporcionaba el movimiento de rectificado de manera longitudinal en lugar de la pieza. Esta máquina se utilizaba para rectificar ejes y cilindros. Por otro lado, James Wheaton patentó la rectificadora de husillo elíptica en 1834. A diferencia de la de Bridges, esta máquina podía utilizarse para fabricar una variedad de piezas en lugar de solo ejes y se inspiró en el torno y la rectificadora descritos por Wilkinson.

A partir de 1830, se produjeron avances en la tecnología de rectificadoras cilíndricas en Estados Unidos, Alemania, Inglaterra y Escocia. En 1838, James Whitelaw detalló una rectificadora cilíndrica[9] que había diseñado específicamente para rectificar la superficie de poleas utilizadas en sistemas de transmisión mecánica mediante correas.

Alfred Krupp (1812-1887), con sede en Essen, Alemania, diseñó y construyó una rectificadora cilíndrica de gran tamaño en 1836 (Figura 21), buscando lograr estabilidad y precisión en sus operaciones.

James Hall Nasmyth (1808-1890), originario de Escocia, es conocido por sus contribuciones en la invención del martillo pilón de vapor y una taladradora de sobremesa.

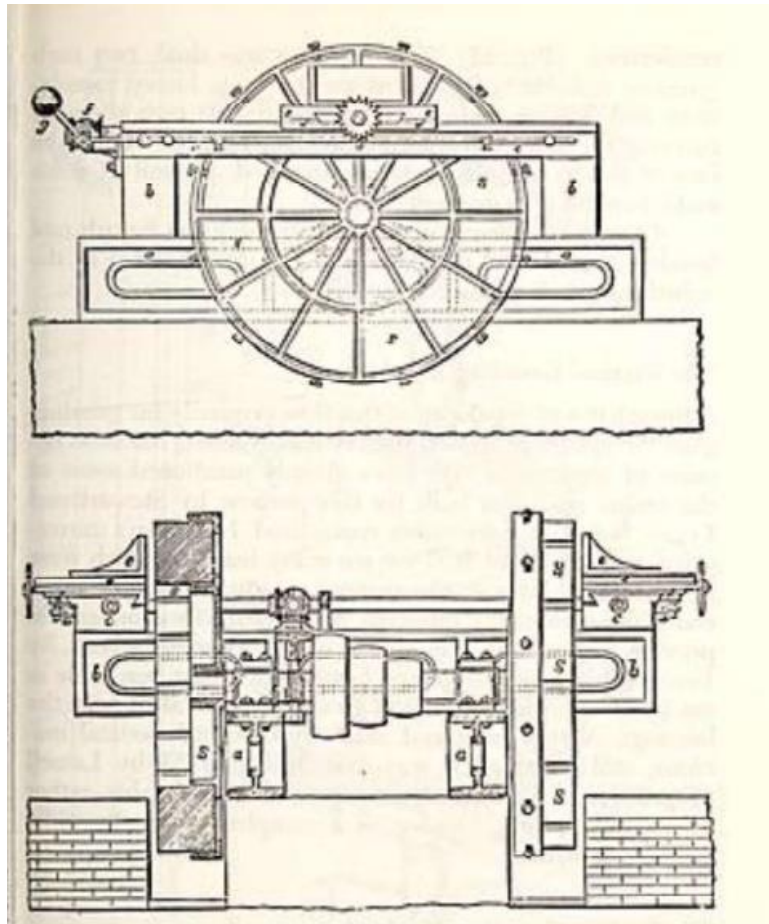


Figura 21 : Rectificadora Cilíndrica mejorada [12]

2.6.2. Rectificadora de superficies planas

En 1830, se introdujo la planeadora [6], [9], diseñada por Roberts, para mejorar la precisión en la planitud de componentes y aprovechar las ventajas del endurecimiento por rectificado. En 1853, Samuel Darling, asociado a Brown and Sharpe, desarrolló una rectificadora de superficies planas con una muela horizontal. Esta máquina permitía movimientos longitudinales y transversales mediante guías en forma de “V”, y la profundidad de corte se ajustaba verticalmente. La mesa incorporaba orificios para la evacuación de agua y virutas, lo que revolucionó el proceso de rectificado, Figura 22.

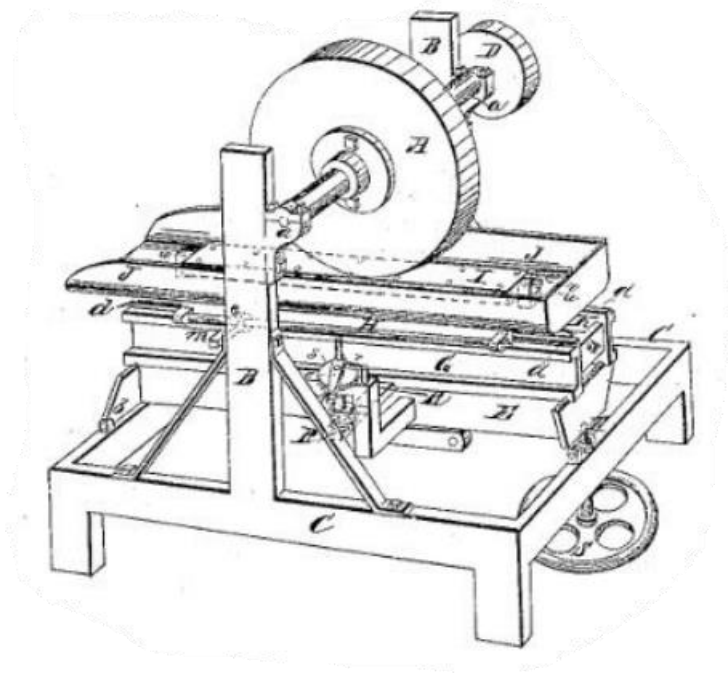


Figura 22: Rectificadoras planas[12]

2.6.3. Rectificadora de uso específico

En 1858, Schelicher, de Inglaterra, persigue un sueño que había sido concebido por Leonardo: la creación de una máquina para la fabricación automática de agujas, Figura 23. Su enfoque principal radica en la automatización de este proceso, más que en el avance en términos de rectificado.

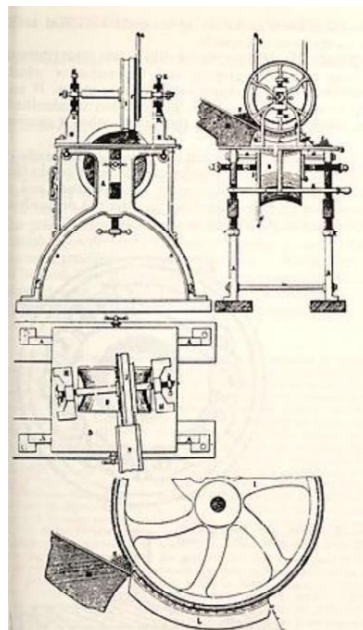


Figura 23: Rectificadoras de uso específico [12]

Hiram Barker y Francis Holt, de Inglaterra, en 1853, crearon una rectificadora de bolas (Figura 24) para válvulas de bombas de locomotoras. Esta invención fue un precursor de las máquinas utilizadas en la fabricación de rodamientos, que desempeñan un papel crucial en la reducción de la fricción en varias aplicaciones de maquinaria.

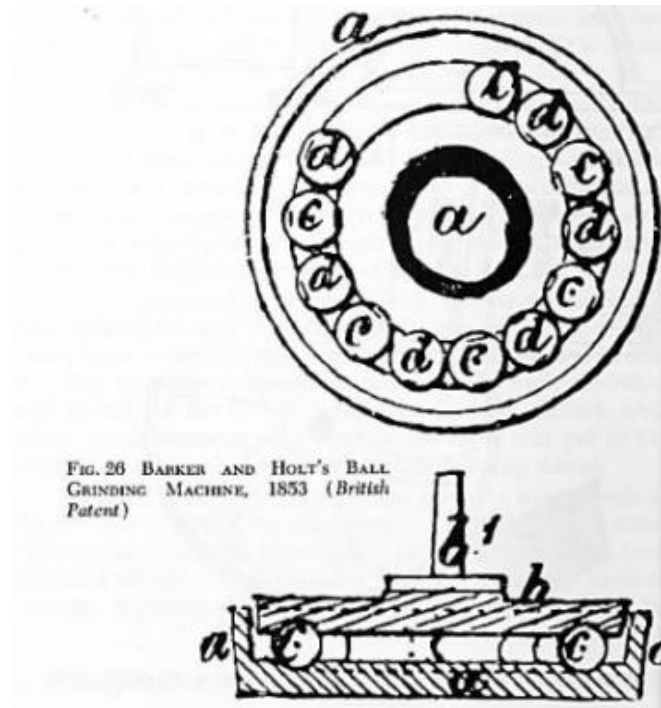


Figura 24 : Rectificadora de bolas [12]

2.7. Segunda mitad de siglo XIX. Inicios del rectificado de precisión.

2.7.1. Industria Relojera

A partir de 1820, las rectificadoras se volvieron esenciales en la industria relojera, proporcionando precisión y acabado superficial a las pequeñas piezas, Figura 25. Charles S. Moseley diseñó máquinas de precisión, como un torno y una rectificadora (1860), para la Nashua Watch Company[15].

Ambrose Webster, fundador de la American Watch Tool Company en 1860, innovó en la producción de relojes con piezas intercambiables entre 1872 y 1890. Esto marcó un cambio hacia la producción en serie y la intercambiabilidad en lugar de los métodos artesanales tradicionales. Además, diseñó una rectificadora mejorada con una mesa giratoria que permitía rectificadas cónicos, incorporando avances tecnológicos desarrollados para el torno, lo que aumentó su precisión.



Figura 25: Mecanismo reloj [15]

2.7.2. Rectificado Pesado

En la innovadora rectificadora de Poole, se introdujo un concepto revolucionario en estas máquinas. A diferencia de las prácticas anteriores, donde la precisión dependía de las guías que movían la pieza y la muela, Poole cambió el enfoque.

En la rectificadora de Poole (Figura 26), las guías se utilizaban principalmente para mantener las muelas en línea recta, y la pieza misma se empleaba para corregir cualquier error en las guías. Utilizaba un sistema pendular para posicionar las muelas, lo que permitía ajustar el diámetro deseado. Cuando el péndulo estaba en su posición más baja, correspondía al diámetro buscado, y no había corte debido a la falta de presión de las muelas. Al desplazarse a otras posiciones pendulares, se lograba un diámetro diferente al buscado, y la fuerza gravitatoria generaba la presión necesaria para el corte. Esto condujo a resultados de alta precisión.

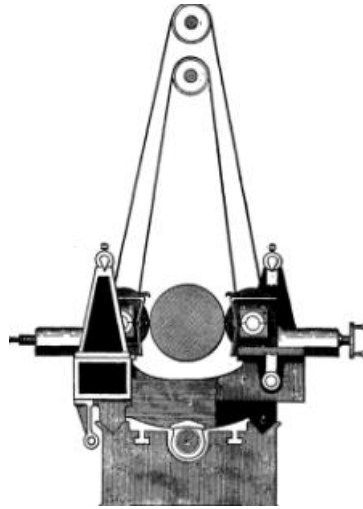


Figura 26: Rectificadora de Poole [13]

2.7.3. Rectificadora Universal

Hasta mediados del siglo XIX, el rectificado como máquina-herramienta de propósito general, destinada a lograr la "precisión," no se estableció por completo. Joseph R. Brown fue un pionero en este campo, desarrollando una rectificadora que se destacaba por su capacidad para mejorar la calidad de las piezas, en lugar de enfocarse exclusivamente en aumentar la productividad, como lo hacían otras máquinas.

No obstante, la idea de usar el rectificado para aumentar la productividad tuvo que esperar hasta finales del siglo XIX y principios del siglo XX, gracias a los avances de Edward Acheson y Charles Norton. Inicialmente, el rectificado se incorporaba como un proceso en otras máquinas-herramienta, y su desarrollo en términos de rigidez, precisión y mecanización estaba ligado a la evolución de estas máquinas, especialmente el torno.

Las rectificadoras como máquina-herramienta independientes surgieron relativamente tarde, pero su progreso en términos de precisión se aceleró. Esto se debió a que muchos de los desafíos técnicos ya se habían resuelto en otras máquinas-herramienta, como el torno. Joseph R. Brown pudo aprovechar estos avances al incorporarlos en su rectificadora universal en 1868, lo que impulsó aún más el desarrollo de esta tecnología [6].

Joseph R. Brown, hijo de un relojero, creció en un entorno donde la precisión era fundamental en el taller de máquina-herramienta, lo que lo convirtió en un ingeniero talentoso. En 1853, se asoció con Lucien Sharpe, un hombre de negocios, y juntos se dedicaron al desarrollo de diversas máquinas de precisión para el mecanizado.

Inicialmente, su enfoque se centró en la industria relojera, donde la precisión era esencial. Luego, ampliaron su alcance y se aventuraron en la fabricación de componentes para máquinas de coser.

Para compensar su falta de rigidez, era común añadir peso a estas máquinas (Figura 27), lo que permitía lograr una mayor precisión en su funcionamiento. Sin embargo, la precisión de estas máquinas dependía en gran medida de la habilidad del operario, quienes solían ser muy bien remunerados, recibiendo hasta 7 dólares diarios.

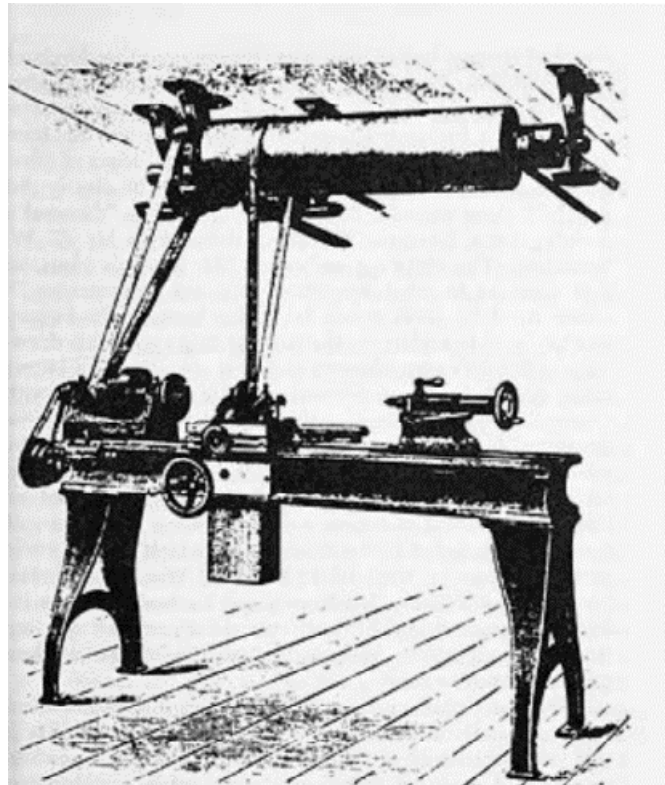


Figura 27 : Rectificadora universal de Joseph R. Brown [13]

Los tornos rectificadores se revelaron ineficaces en términos de productividad. Esto llevó a Joseph R. Brown a emprender un proyecto ambicioso: diseñar una rectificadora completamente nueva desde cero. Sus esfuerzos culminaron con la presentación de esta innovadora máquina en la Exposición de Máquinas de París en 1876, y obtuvo la patente en 1877, poco después del fallecimiento de Brown.

Este desarrollo fue el fruto de la colaboración de varios técnicos destacados, incluyendo a Samuel Darling y Oscar J. Beale, entre otros. En 1880, esta rectificadora se transformó en una máquina “universal” al incorporar un dispositivo para el rectificado interior.

Aunque las rectificadoras universales modernas han evolucionado con mejoras en cuanto a rigidez, control y el uso de motores eléctricos, aún se basan en los principios fundamentales desarrollados por Joseph R. Brown, Figura 28.

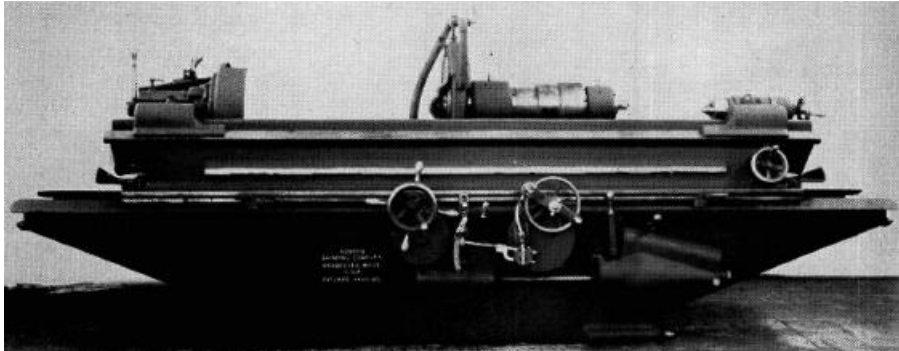


Figura 28: Rectificadora universal con rectificado interior [13]

2.7.4. Otros desarrollos de Brown and Sharp

La creciente necesidad de lograr una mayor precisión en piezas más voluminosas impulsó a Brown & Sharpe a diseñar una rectificadora cilíndrica plana (Figura 29) de mayores dimensiones y peso. Esta máquina fue posteriormente mejorada por Charles H. Norton en 1877, quien le aportó mayor rigidez y la dotó de un dispositivo para realizar rectificados internos.

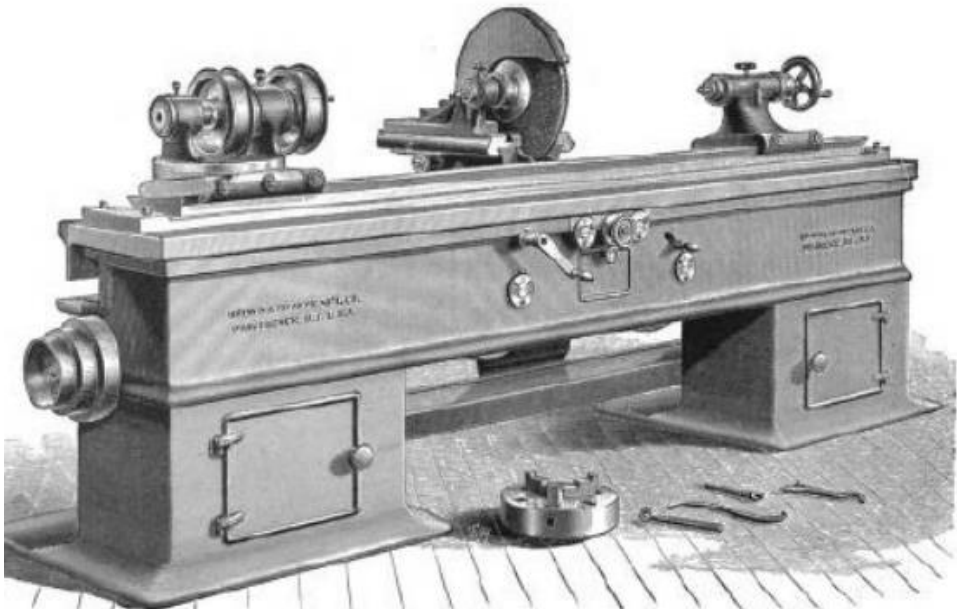


Figura 29: Rectificadora cilíndrica plana [7]

2.8. Finales del siglo XIX- Inicios del XX- Rectificado Pesado

2.8.1. Mejora sobre la Rectificadora

Charles H. Norton, un hombre con experiencia en la industria relojera, se unió a Brown and Sharpe en 1886. Se dio cuenta de que las rectificadoras existentes eran demasiado ligeras y requerían operarios altamente calificados para lograr una alta precisión. Norton vio una oportunidad en la creciente industria de fabricación de componentes automotrices.

Estableció una empresa filial en Detroit para comprender mejor los desafíos de esta industria en crecimiento. En 1896, de vuelta en Brown and Sharpe, Norton propuso mejoras significativas. Quería hacer que las rectificadoras fueran más robustas, con muelas más grandes y anchas. Introdujo el concepto de rectificado en plunge y se centró en mejorar la precisión en la fabricación de máquinas y piezas [12].

Aunque estas mejoras implicaban un mayor costo, Norton estaba convencido de que se compensarían con una reducción en el tiempo de mecanizado y la mano de obra. Su visión y esfuerzos contribuyeron en gran medida al avance del rectificado y la fabricación de alta precisión.

2.8.2. La rectificadora de Norton

Charles H. Norton enfrentó resistencia en Brown and Sharpe, ya que sus ideas se consideraban costosas. Ante esta oposición, Norton tomó la valiente decisión de dejar la empresa y fundar su propia compañía, la Norton Company.

En la Norton Company (Figura 30), Norton pudo poner en práctica todas sus ideas revolucionarias. A principios del siglo XX, diseñó una rectificadora pesada que incorporaba todas las innovaciones que él había imaginado y que no pudo realizar en Brown and Sharpe. Estas innovaciones marcaron un gran avance en la industria del rectificado y la fabricación de alta precisión. Norton demostró que a veces es necesario seguir un camino propio para llevar a cabo innovaciones significativas.

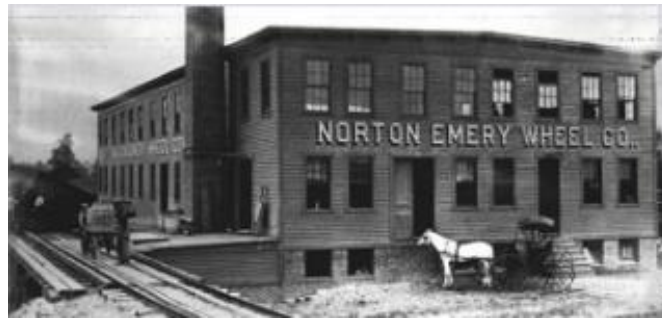


Figura 30: Norton Company [16]

El impacto de la máquina de Norton fue tan significativo que en 1925 recibió el prestigioso John Scott Medal (Figura 31), un galardón que honra a los mejores inventos en los Estados Unidos. Este premio lo comparte con otras mentes brillantes como Edison y Tesla, destacando la magnitud de su contribución al mundo de la innovación y la tecnología [17].

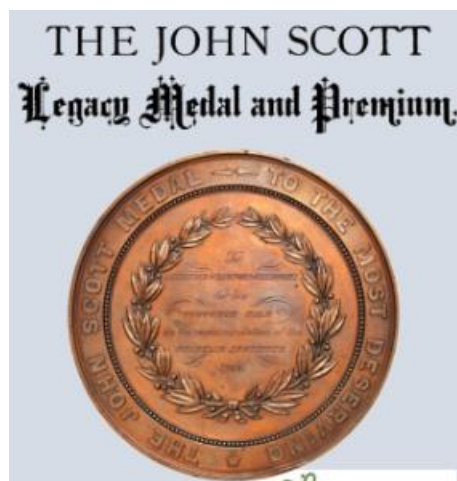


Figura 31: JHON SCOTT MEDAL [17]

2.8.3. Rectificado de Cigüeñales

En 1903, Charles H. Norton perfeccionó su máquina de rectificado para cigüeñales, reduciendo drásticamente el tiempo de mecanizado y manteniendo altos estándares de precisión y calidad superficial. La Norton Company se convirtió en líder en la fabricación de cigüeñales (Figura 32), ya que las máquinas de Norton hacían el trabajo de manera más eficiente que los tornos convencionales.

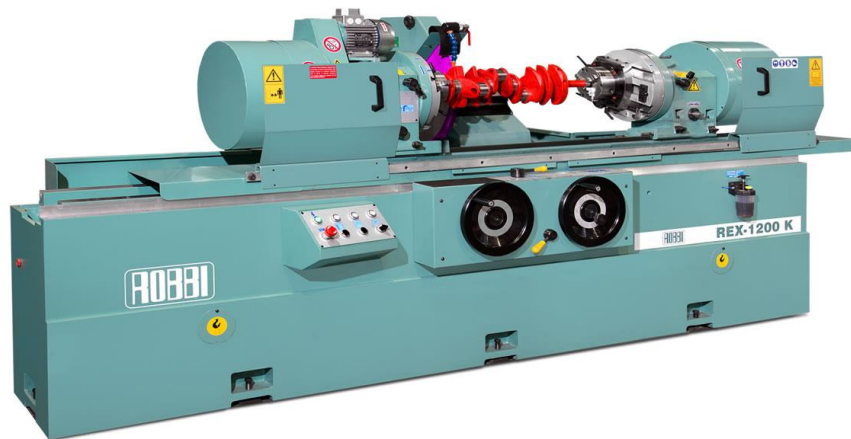


Figura 32: Rectificadora de cigüeñales [18]

La falta de máquinas de cigüeñales en la industria automotriz hizo que la Norton Company tuviera el monopolio del mercado. Con el tiempo, Ford adquirió varias de estas máquinas, estableciendo el rectificado como un proceso crucial en la fabricación de automóviles.

La demanda de reducción de tiempos y costos llevó al desarrollo de rectificadoras altamente automatizadas y especializadas en el mecanizado de cigüeñales. Este avance requirió el desarrollo de materiales de muelas de alta calidad. Norton estableció un laboratorio de ensayo de abrasivos en 1898, que se expandió con el tiempo (Figura 33) y contó con varios departamentos de investigación, contribuyendo al progreso de la industria[16].

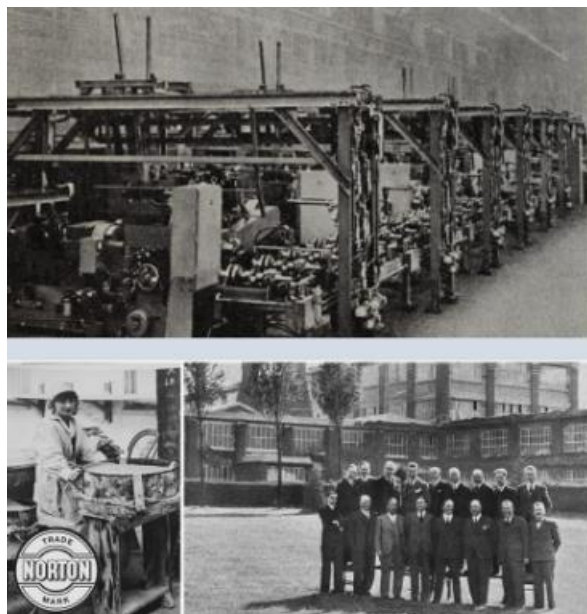


Figura 33: Equipo de investigación Norton [16]

2.9. Inicios del siglo XX-Rectificados en industrias emergentes

2.9.1.La industria del ferrocarril

La rectificadora desempeñó un papel crucial en el desarrollo de la locomotora de vapor. Resolvió desafíos técnicos en la fabricación de piezas ferroviarias, lo que permitió locomotoras más eficientes y rentables. En 1898, la Springfield Emery Wheel Manufacturing Company creó una rectificadora para reparar ruedas de locomotoras desgastadas por frenos, reduciendo los costos de mantenimiento, Figura 34.

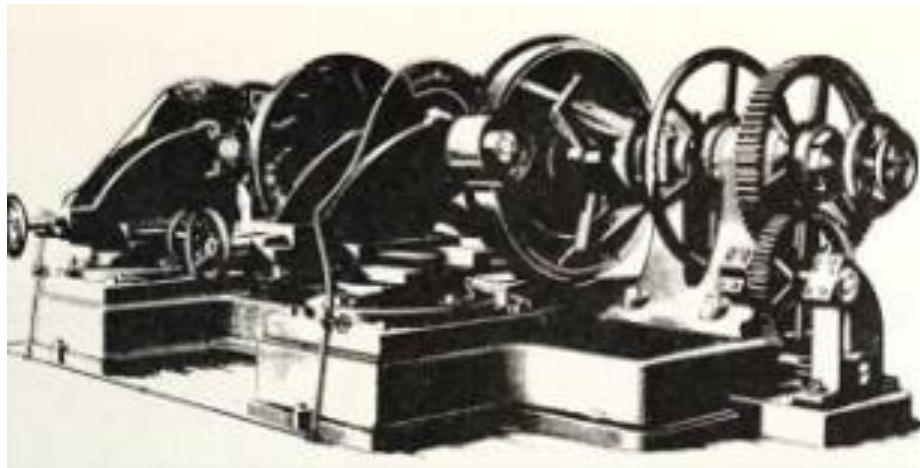


Figura 34: Rectificadora específicas ruedas de locomotoras [12]

La misma compañía diseñó otra rectificadora especializada en la fabricación de rodamientos y cojinetes para vagones de tren. Charles H. Norton también contribuyó al avance al desarrollar en 1902 una máquina para rectificar bielas y balancines de locomotoras, facilitando tanto la fabricación como el mantenimiento de estas piezas.

2.9.2.Rodamientos para cañones

En 1906, la empresa Pratt and Whitney creó una rectificadora específicamente diseñada para fabricar rodamientos utilizados en cañones, Figura 35. Estas máquinas tenían la capacidad de rectificar piezas con un impresionante rango, desde un diámetro interior de 12 pulgadas hasta un diámetro exterior de 40 pulgadas, lo que representaba un avance significativo en la precisión y capacidad de producción en la fabricación de rodamientos para aplicaciones militares.

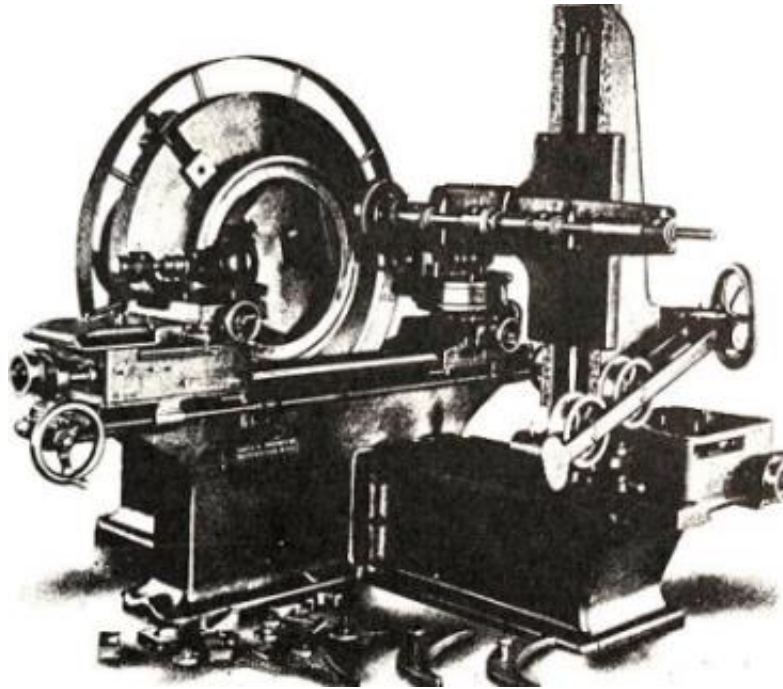


Figura 35: Rectificadora para rodamiento de cañones [12]

2.10. Rectificado en la industria del automóvil

El avance de la rectificadora y la industria del automóvil estuvieron estrechamente entrelazados, influyéndose mutuamente de manera significativa. A partir de 1900, la industria del automóvil se convirtió en un cliente clave para la industria de la máquina-herramienta, representando aproximadamente el 25-35% de su producción, Figura 36. Esta interdependencia se debió a que las rectificadoras permitieron la fabricación de componentes de motores de automóviles con tolerancias muy estrechas y excelentes acabados superficiales. Las rectificadoras altamente especializadas y automatizadas, desarrolladas por empresas como Norton, Landis, Heald en los Estados Unidos, Churchill en el Reino Unido y Schmaltz en Alemania, desempeñaron un papel crucial en la producción de motores de alta calidad.

Este proceso de desarrollo impulsó la eficiencia y la calidad en la fabricación de automóviles, lo que, a su vez, llevó a un aumento en la demanda de rectificadoras más avanzadas y especializadas.

Posteriormente, en la década de 1930, la industria aeronáutica también emergió como un importante jugador en el mercado de la máquina-herramienta, siguiendo un camino similar al de la industria del automóvil. La producción de componentes aeroespaciales requería niveles excepcionales de precisión y calidad, lo que impulsó el desarrollo de rectificadoras aún más

avanzadas y especializadas. De esta manera, tanto la industria del automóvil como la aeronáutica influyeron de manera crucial en el avance de la tecnología de rectificadoras y viceversa.



Figura 36: Industria automovilística [19]

En 1906, la Landis Tool Co. Lanzó una rectificadora de cigüeñales para competir con Norton Co., evitando así que Norton monopolizara completamente el mercado. Además, en 1904, la Heald Machine Company presentó una rectificadora con un plato giratorio de 6" diseñada específicamente para rectificar las caras de los anillos de pistones de motores de automóviles, Figura 37.

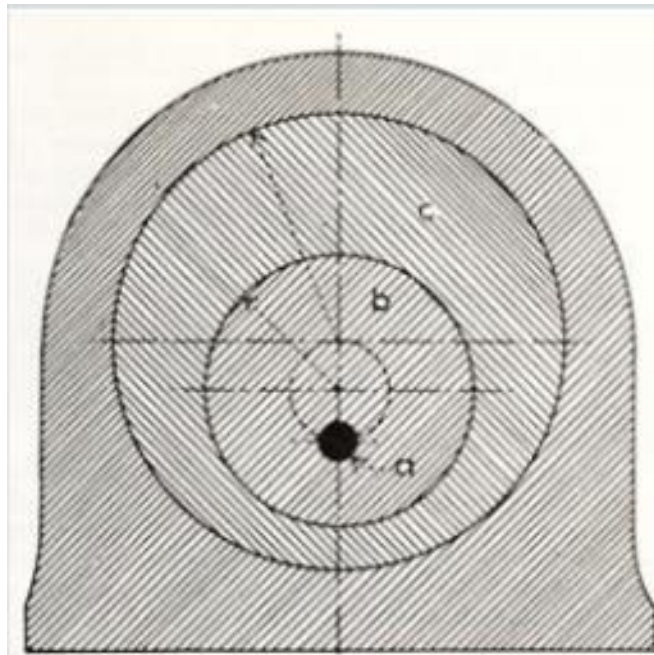


Figura 38: Funcionamiento rectificadora de cigüeñales [12]

Primera mitad del siglo XX. Rectificado de alta productividad.

A partir de 1900, surgió la necesidad de mejorar la precisión y la productividad en la fabricación debido a la producción en masa. Como respuesta, se introdujo más automatización en las rectificadoras, abarcando aspectos como la carga de material, el proceso de rectificado y el control de tolerancias.

La alta demanda de rodamientos para diversas máquinas llevó al desarrollo de rectificadoras específicas. En 1903, A.B. Landis patentó una rectificadora totalmente automatizada, fabricada por Norton Co. En 1908, que solo requería ajustes manuales en la muela y la pieza.

En 1908, Pratt & Whitney lanzó una rectificadora para cilindros y conos que permitía que el operario se enfocara únicamente en cargar y descargar el material. Esta máquina incluía un sistema de medición automática que hacía el proceso más eficiente.

Debido a su alta productividad y precisión, la rectificadora se adaptó rápidamente para fabricar piezas que solían producirse en otras máquinas-herramienta, como tornos, mandrinadoras, planeadoras, máquinas para engranajes, fresadoras y máquinas de roscado.

Un ejemplo de su eficiencia es que una rectificadora de superficies podía hacer el trabajo equivalente a 40 horas de una planeadora en tan solo 3.5 horas.

Capítulo 2

La creciente demanda de piezas roscadas de precisión en materiales duros, impulsada por la industria automotriz y los conflictos bélicos, llevó al reemplazo del torno por la rectificadora de roscas en muchas aplicaciones.

Finalmente, en este capítulo se ha hecho un repaso a la evolución histórica del rectificado y de las rectificadoras, poniendo de manifiesto su relevancia en el desarrollo de industrias tan importantes como el ferrocarril, la bicicleta, la aeronáutica o el automóvil. Dentro de esta última, un hito importante lo materializó el sistema creado para rectificar rodamientos de bolas, que es la máquina objeto de este TFG. Con este sistema se eliminó la necesidad de utilizar costosas muelas de forma, realizando geometrías circulares complejas con mayor sencillez y utilizando muelas convencionales.

La aportación principal de la rectificadora objeto de estudio fue el montaje de la muela abrasiva. Dicho montaje se realiza de forma que la muela abrasiva gire corporalmente alrededor de un eje que tiene una relación angular con su eje de rotación, moviendo así esa porción de la cara abrasiva en una trayectoria curvilínea correspondiente a la sección transversal curvilínea de la pista de bolas. Esta muela abrasiva está montada sobre un carro oscilatorio que es el que permite girar alrededor del eje. Esto, sumado a que la pieza a rectificar se encuentra en un mandril que se ajusta a las dimensiones de la pieza suponía una ventaja en términos de velocidad, producción y economía puesto que la rectificadora podía trabajar con piezas de diferentes tamaños. Por tanto, en el siguiente capítulo se va a explicar este sistema, así como se va a realizar una reconstrucción digital de esta máquina de elevada importancia patrimonial mediante la aplicación de técnicas de ingeniería inversa.

Capítulo 3.

Modelización 3D

3.1. Introducción

En el presente capítulo se van a establecer las hipótesis de partida para la creación de un modelo original de la máquina-herramienta objeto de estudio, la Rectificadora Norton de rodamientos patentada en 1906. Estas hipótesis se fundamentan en la información encontrada en la patente y en diversos catálogos de la época. Posteriormente realizará un análisis funcional de cada uno de sus componentes, hasta obtener el modelo final.

3.2. Información de partida

La rectificadora de rodamientos es una máquina totalmente automatizada en la actualidad y a pesar de algunos avances tecnológicos fundamentalmente se basa en el modelo de la patente de 1906 por CLAYTON O. SMITH, no se tiene constancia de ningún ejemplar por lo que las medidas no han podido ser tomadas desde la máquina.

Por lo que para la modelización de la máquina se ha tomado la información de la patente de 1906 [20], que se encuentra en lengua inglesa.

En la Figuras 39, 40 y 41 se observan las siguientes piezas principales como: Carros de movimiento lineal y oscilatorio, engranajes, mandril, poleas, piñones, depósito de agua, correas, guías, volantes y distintos sistemas de movimiento.

No. 839,080.

PATENTED DEC. 18, 1906.

C. O. SMITH.
GRINDING MACHINE.

APPLICATION FILED OCT. 31, 1904. RENEWED OCT. 23, 1906.

3 SHEETS-SHEET 1.

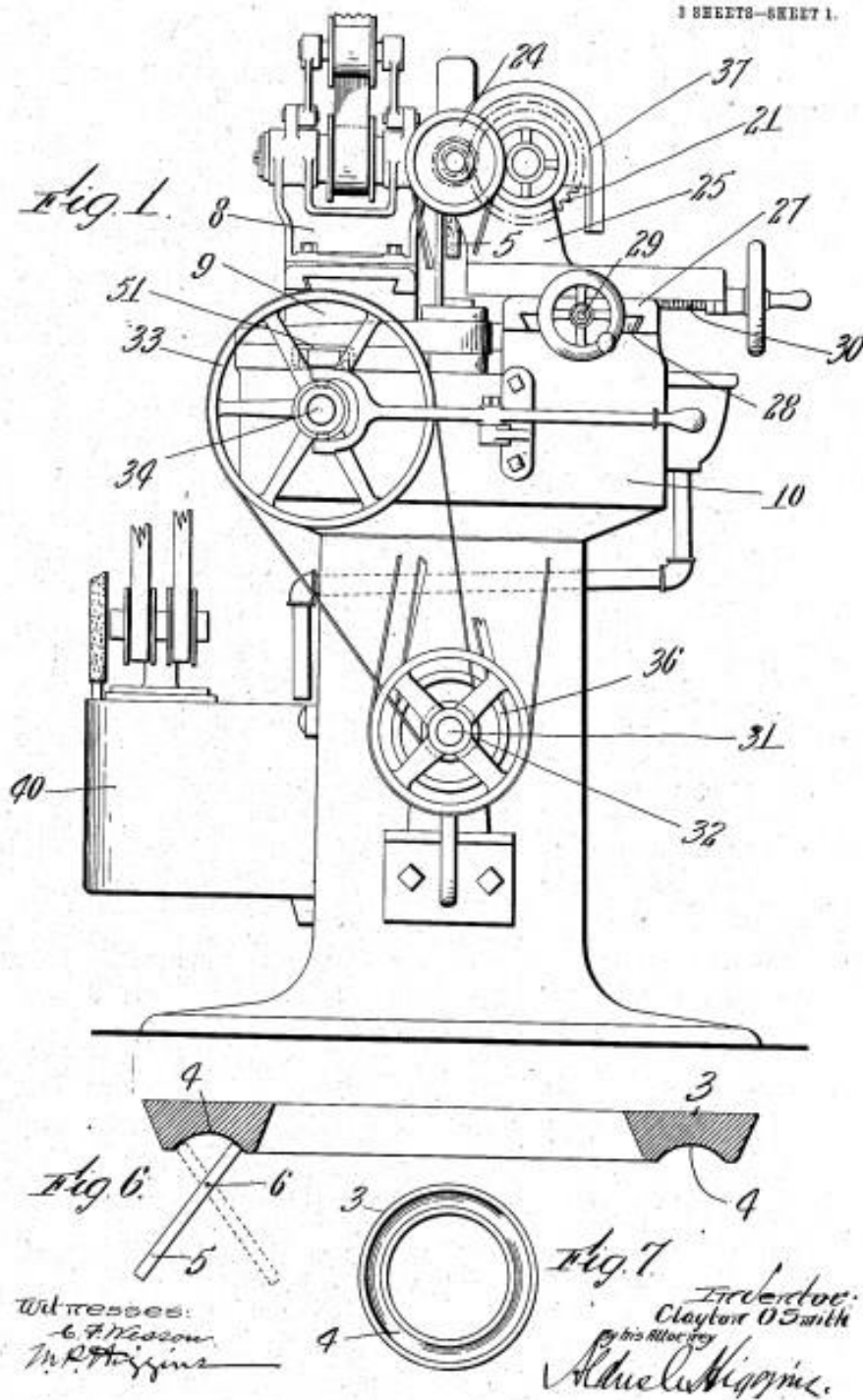


Figura 39 : Vista trasera[20]

No. 839,080.

PATENTED DEC. 18, 1906.

C. O. SMITH.
GRINDING MACHINE.

APPLICATION FILED OCT. 31, 1904. RENEWED OCT. 22, 1906.

3 SHEETS—SHEET 2.

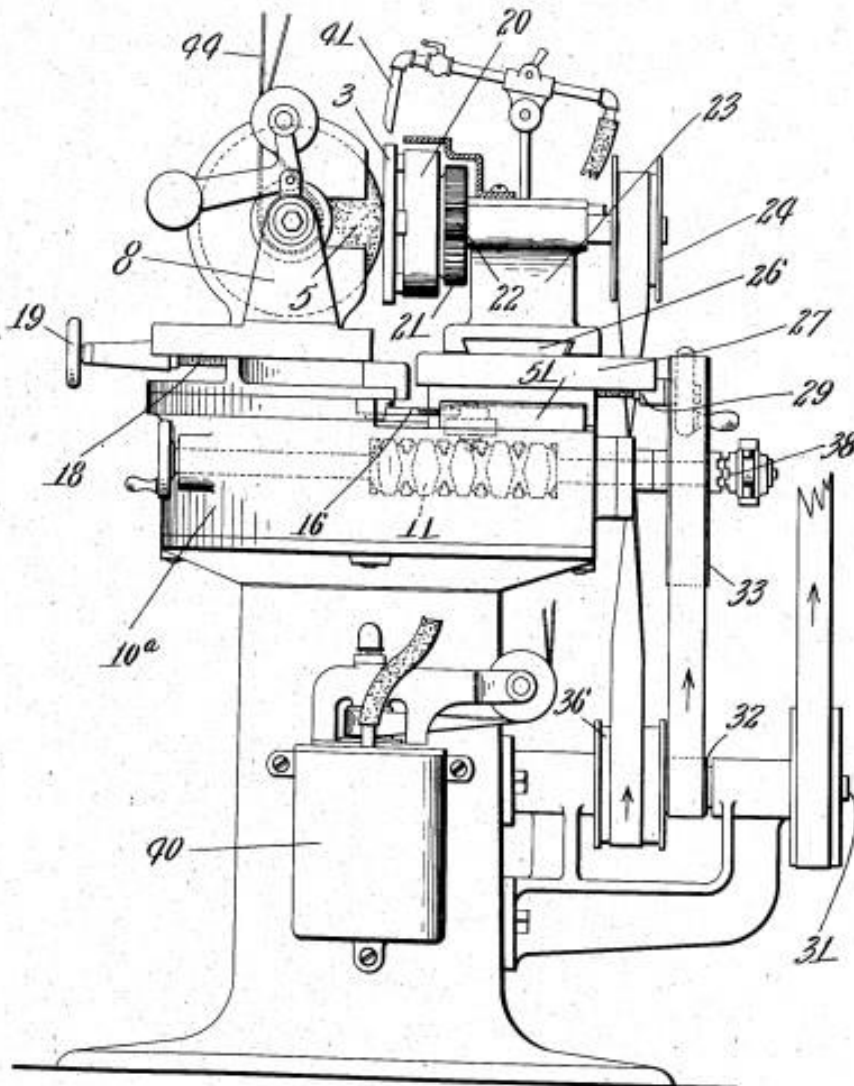


Fig. 2.

Witnesses:
C. F. Messou,
M. P. Higgins

Inventor:
Clayton O. Smith,
by his attorney
Alden Higgins.

Figura 40: Vista lateral[20]

No. 839,080.

PATENTED DEC. 18, 1906.

C. O. SMITH.
GRINDING MACHINE.

APPLICATION FILED OCT. 31, 1904. RENEWED OCT. 22, 1906.

3 SHEETS—SHEET 3.

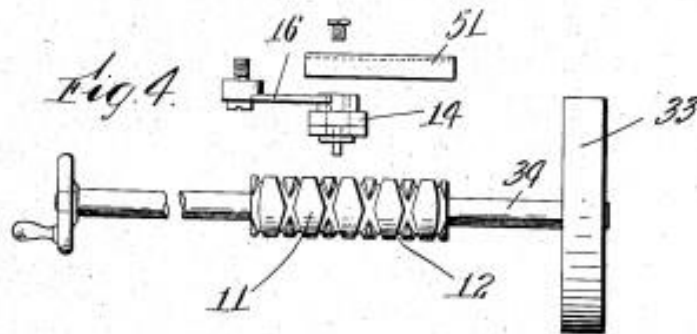
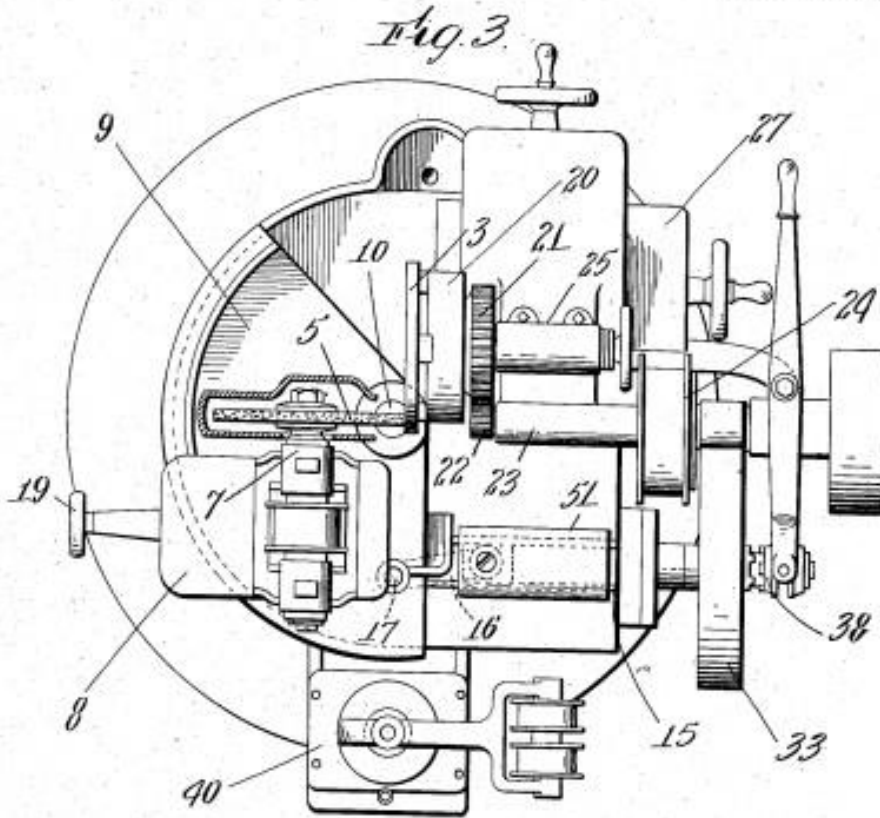
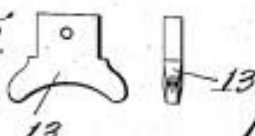


Fig. 5.  13

Witnesses:
G. F. Mason
H. P. Higgins

Inventor:
Clayton O. Smith
by his Attorney
H. P. Higgins.

Figura 41: Vista de planta[20]

En la Tabla 1 se muestran la designación de los elementos más importantes del modelo.

Tabla 1: Piezas principales

Numeración	Nombre
10	Bastidor
25 y 27	Carros con movimiento lineal
9	Carro con movimiento oscilatorio
20	Mandril
5	Muela abrasiva
24,32,33,36	Poleas
3	Anillo
21	Engranaje
22	Piñón

-Bastidor; Número 10:

Elemento fijo que actúa como base de los carros oscilatorios y lineales y de apoyo para los diferentes sistemas de movimientos, así como para la muela y la pieza a rectificar. Es el elemento de mayor dimensión de nuestro modelo.

-Carro con movimiento lineal; Número 25 y 27:

Son los responsables de posicionar la pieza correctamente a través del deslizamiento a través de las guías.

-Carro con movimiento oscilatorio; Número 9:

Es el encargado de posicionar la muela abrasiva para el correcto rectificado.

-Engranajes y piñón; Números 21 y 22:

Trasmiten el movimiento, a través de una relación de engrane con los dientes, de los ejes para el movimiento del mandril y en consecuencia de la pieza a rectificar.

-Mandril; Número 20:

Sistema de sujeción a compresión de la pieza.

-Anillo; Número 3:

Pieza sujeta al mandril en la que se produce el rectificado.

-Muela abrasiva; Número 5:

Salto de ruedas naturales a ruedas sintéticas con materiales como carburo de silicio.

-Poleas-Números 24,32,33,36:

Trasmiten el movimiento a través de un sistema de correas.

3.3. Hipótesis de partida

Como se ha comentado anteriormente con la información que existe sobre el diseño en la patente no se hace referencia a ninguna dimensión. Por lo tanto, se ha elegido una medida de la muela utilizada de forma convencional en la época y del bastidor o base en el que las manos del operario se encuentren en una posición cómoda para poder mover los volantes de accionamiento de los carros, así como el acople del embrague.

A partir de esta altura, consultadas en manuales más modernos, se ha usado una regla de proporcionalidad para realizar los demás elementos de la máquina. Cabe destacar que el modelo ha sido parametrizado, de forma que si alguna vez se conocen las medidas puede ser escalado con éxito, Figura 42.

La altura a la que se encuentra el volante principal del suelo es de 900 mm y la altura máxima de la máquina es aproximadamente 1464.70 mm

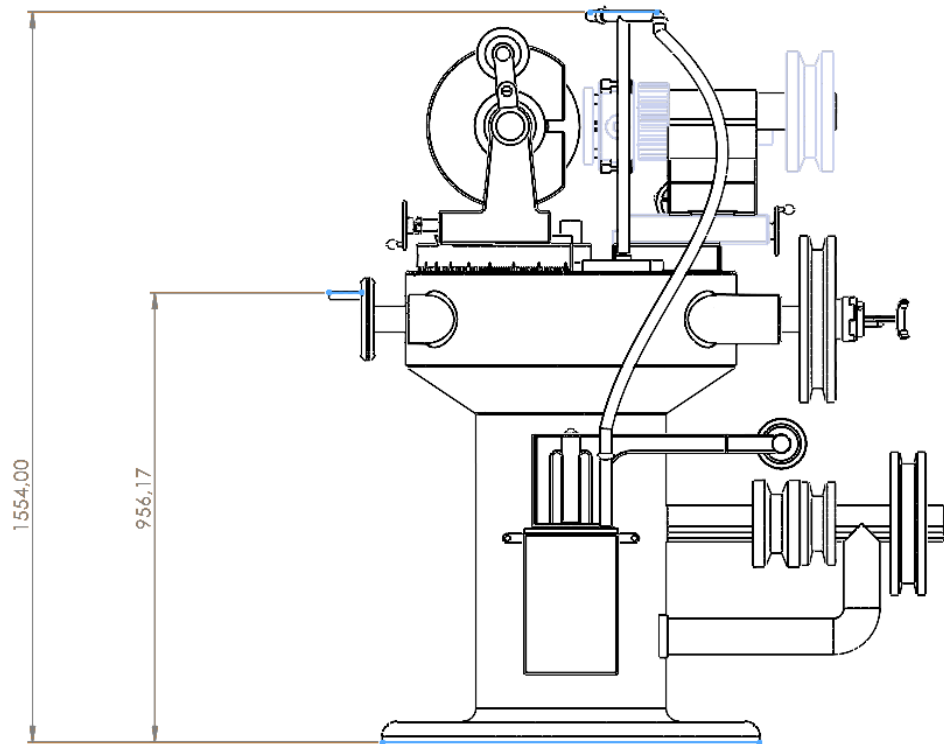


Figura 42 : Vista frontal

A partir de estas alturas y mediante proporcionalidad se ha obtenido también las medidas de las anchuras máximas de la máquina. Podemos observar en la Figura 43 las medidas más significativas.

Las alturas y las anchuras ofrecidas son las medidas principales de la máquina.

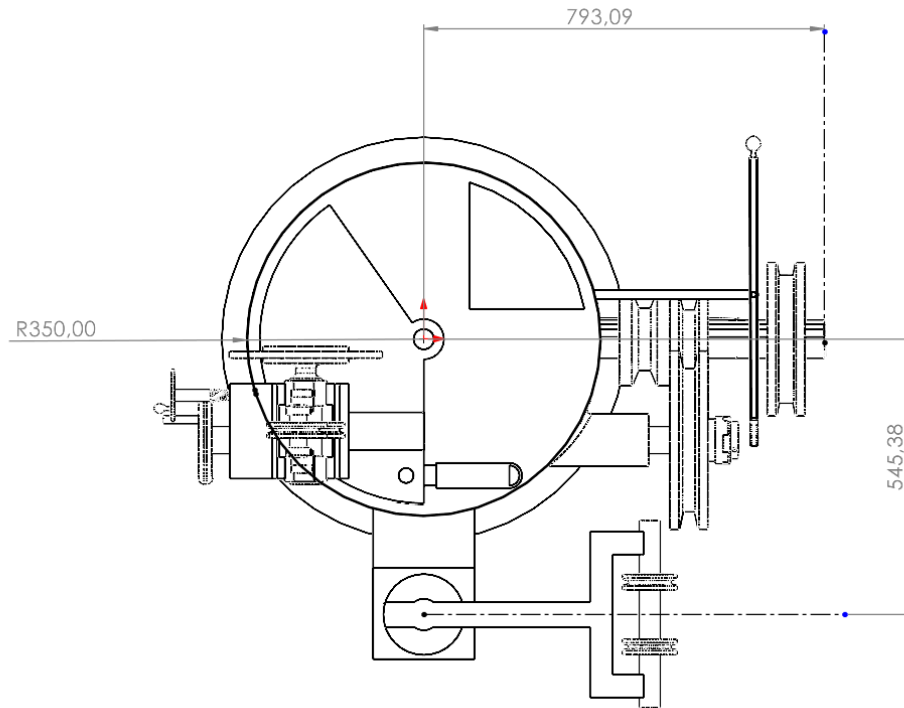


Figura 43: Vista en planta

3.4. Partes de la rectificadora y su funcionamiento. Modelización.

La rectificadora de rodamientos consta de varias partes fundamentales. En los siguientes apartados se han dividido en los grupos más importantes los diferentes mecanismos y piezas, así como sus medidas y su funcionamiento.

3.3.1. Sistema Bastidor

En este sistema se ha incluido tanto el bastidor, depósito de agua, soporte de ruedas y poleas, Figura 44.

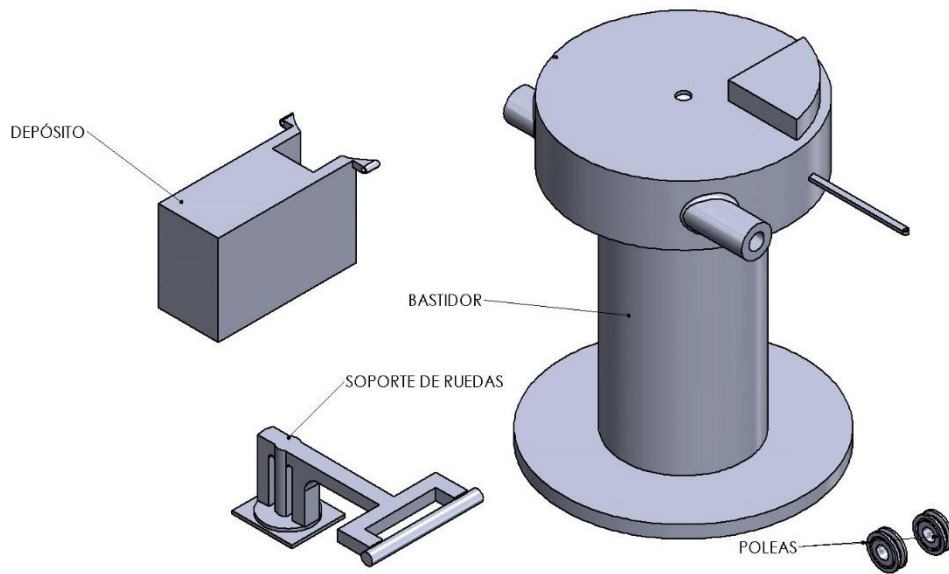


Figura 44: Sistema Bastidor

-Deposito

Es el elemento donde reside el fluido que sirve para refrigerar la rueda abrasiva a través de un sistema de manguera.

-Soporte de ruedas

Se trata de la pieza con forma de L que actúa como apoyo de las poleas.

-Bastidor (Figura 45).

Se trata de uno de los elementos principales de la rectificadora, actúa como base y uno de sus elementos principales es el cilindro hueco que contiene, en el que penetra un eje que será explicado más adelante. Además, es la pieza de mayor dimensión.

Alto: 1000 mm

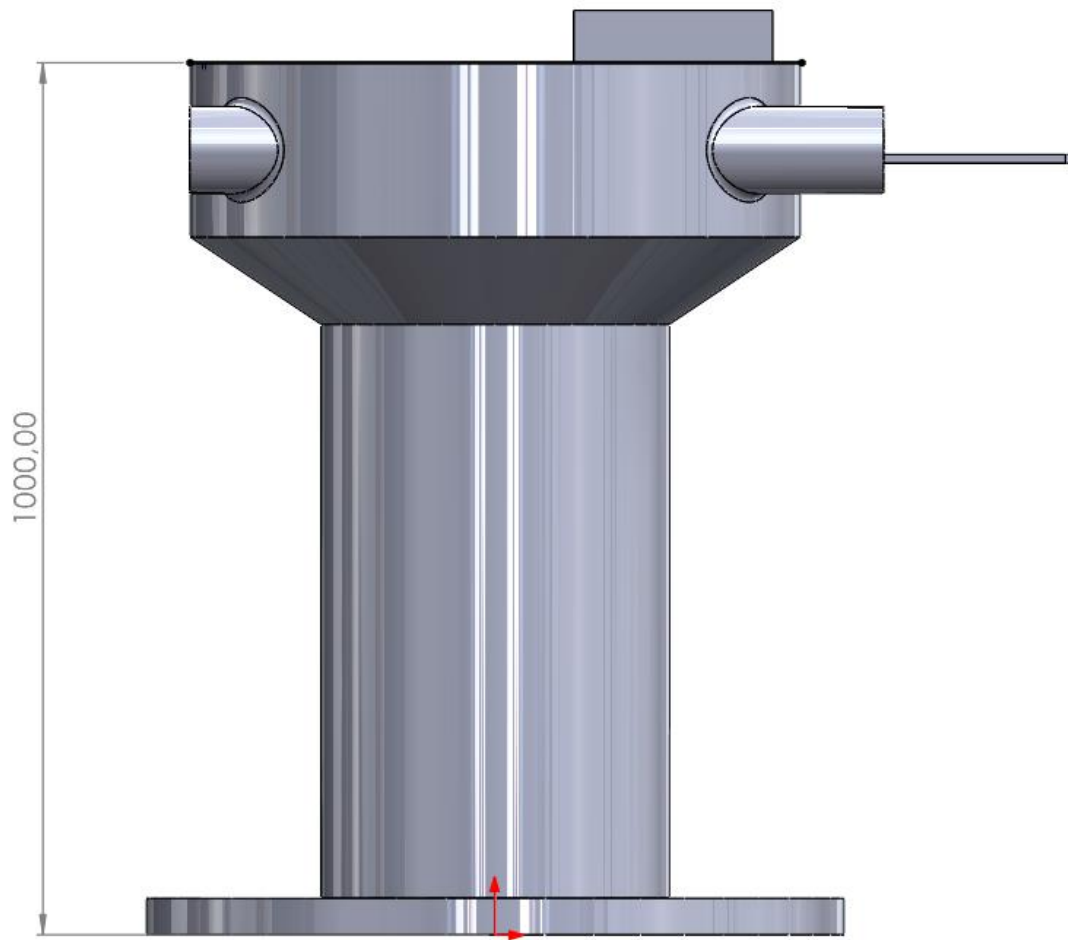


Figura 45: Altura Bastidor

-Poleas

Encargadas de transferir el movimiento al sistema de mangueras del depósito. Además, este sistema cuenta con un mecanismo de refrigeración para la muela abrasiva que se compone por conductos y mangueras conectados al depósito, Figura 46. Es accionado a través de las poleas que se encuentran en el soporte de ruedas.

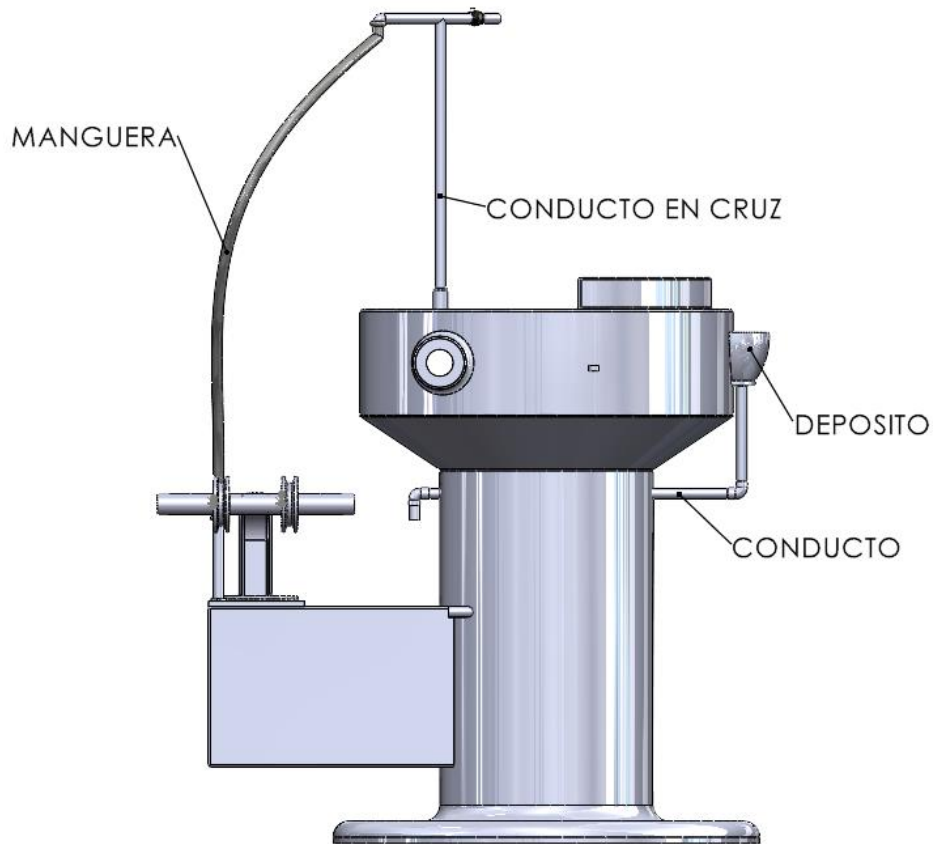


Figura 46 : Mecanismo de manguera

El fluido es conducido a través de la manguera hasta llegar al conducto en cruz que es el encargado de verter dicho fluido sobre la operación de rectificado debido a sus altas temperaturas.

El operario es el encargado de suministrar fluido al depósito y este sistema cuenta además con una válvula (Figura 47) que permite pasar o no el fluido según lo requiera.

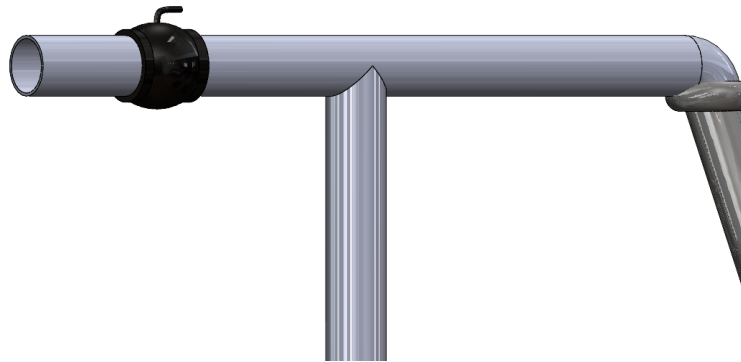


Figura 47: Válvula

A continuación, se muestra en la (Figura 48), una vista del sistema conjunto de forma que el procedimiento explicado se entienda mejor.

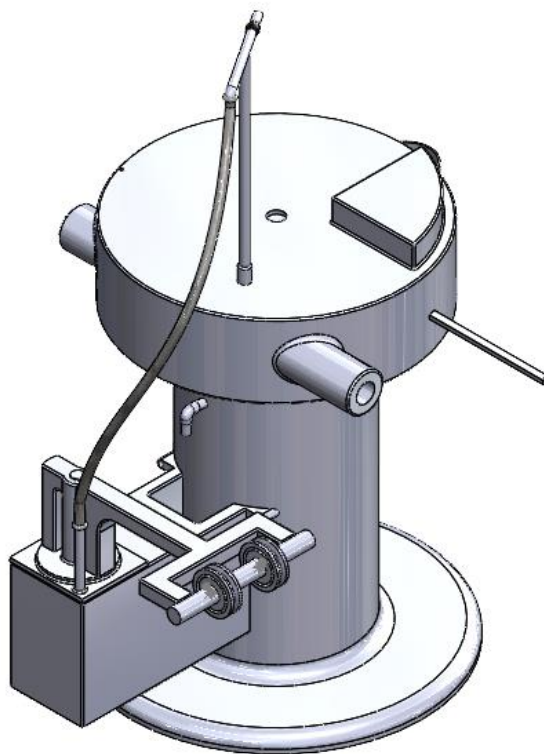


Figura 48: Sistema bastidor conjunto

3.3.2. Sistemas de carros y mandril

En este sistema (Figura 49) se explica , tanto de forma individual como en conjunto, el funcionamiento de piezas como: Piñón, engranaje, mandril, soporte de ruedas, carro y guías.

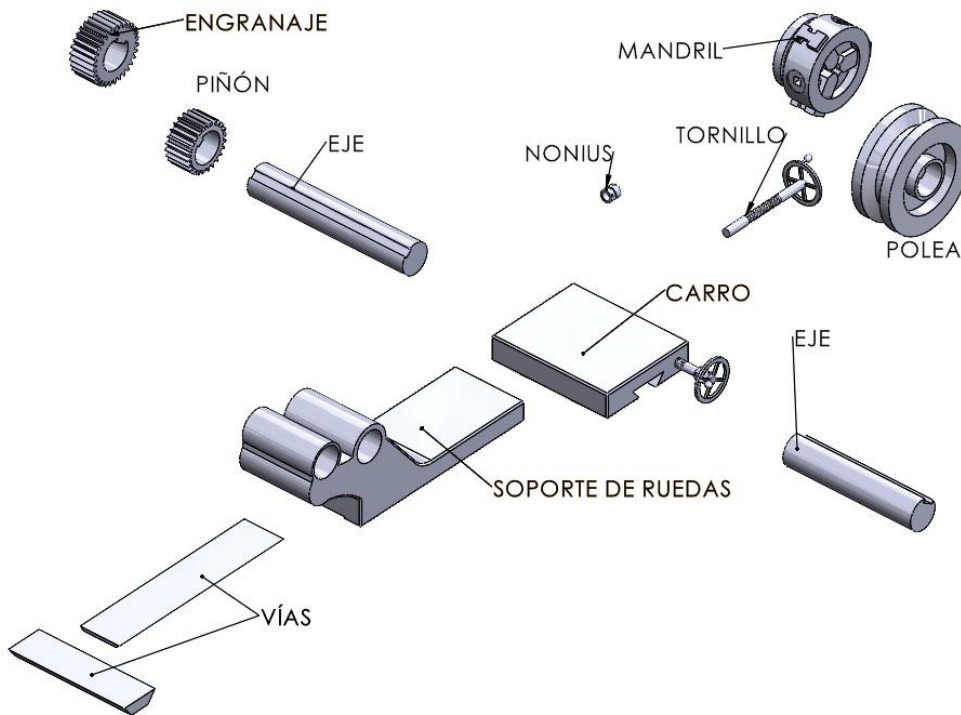


Figura 49: Vista explosionada

-Piñón y engranaje

Son los encargados de proporcionar a través de una relación de engranaje de transferir movimiento al mandril a una velocidad específica, Figura 50.

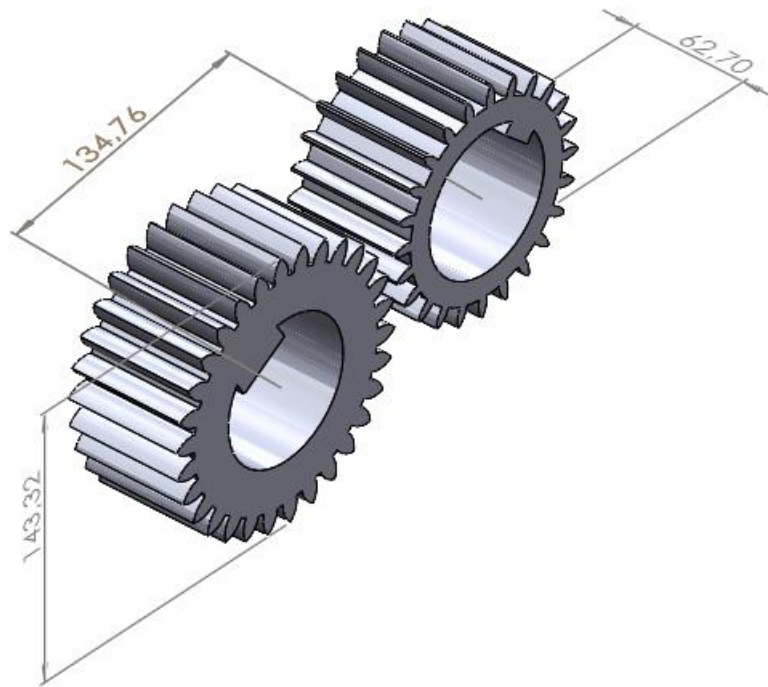


Figura 50 : Piñón-Engranaje

Carro

Pieza encargada de transportar longitudinalmente todos los elementos a una distancia específica de la rueda abrasiva según las necesidades, Figura 51.

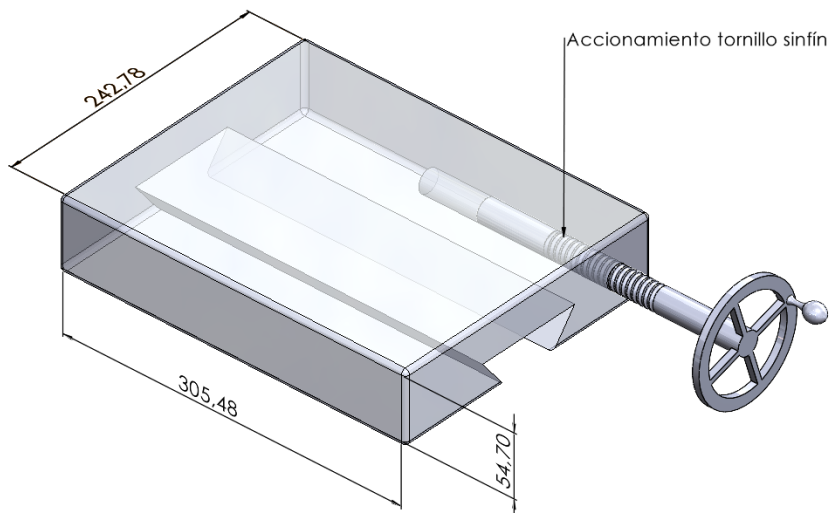


Figura 51 : Carro

-Guías

Pieza que actúa como patrón para el movimiento lineal del carro.

-Soporte de ruedas

Es un elemento que sirve de base para los ejes y las poleas de este sistema, además cuenta en su parte inferior con unas guías para su desplazamiento transversal, Figura 52.

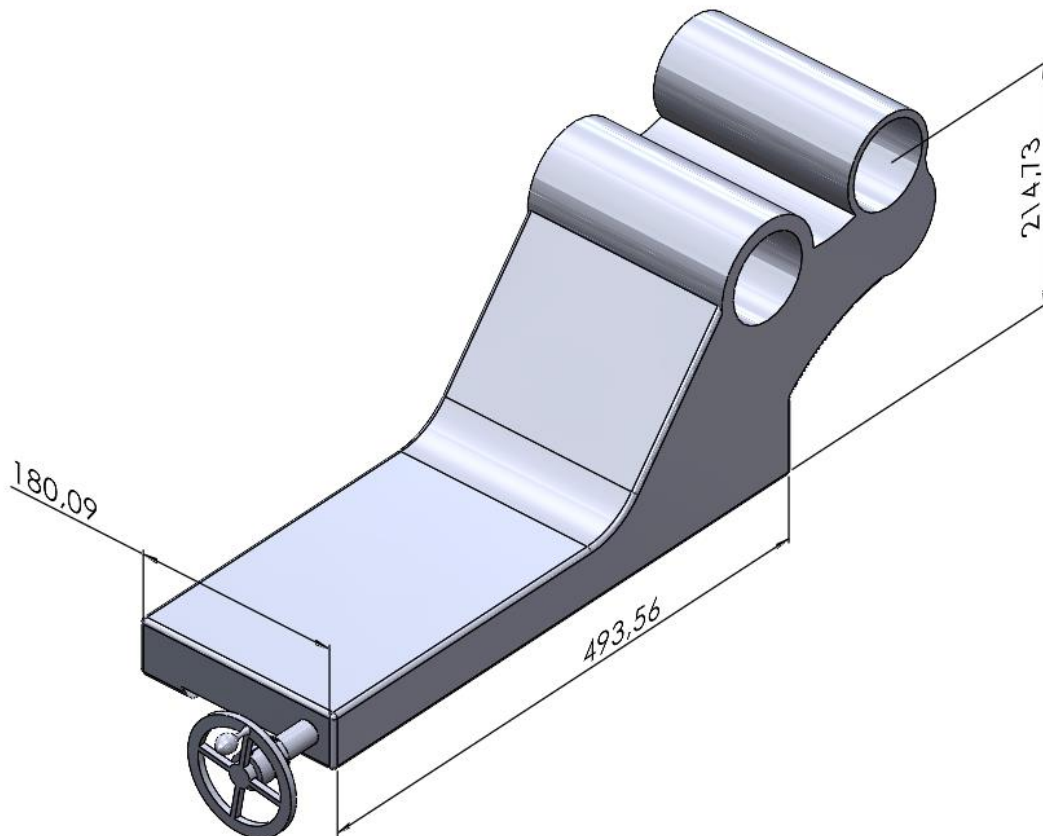


Figura 52: Soporte de ruedas

-Ejes

Elemento que transmite el movimiento, gracias a la chaveta, de la polea al piñón. Debido a la relación de transmisión del piñón con el engranaje se provoca el movimiento del mandril.

-Mandril

El Mandril es un mecanismo por el cual se sujeta la pieza a rectificar a través de una fuerza de compresión. Hemos modelado un sistema por el cual el mandril se ajusta a cualquier

pieza o anillo a rectificar, de esta manera sirve para diferentes anillos y sale más rentable tanto en términos de productividad y economía, Figura 53 y 54.

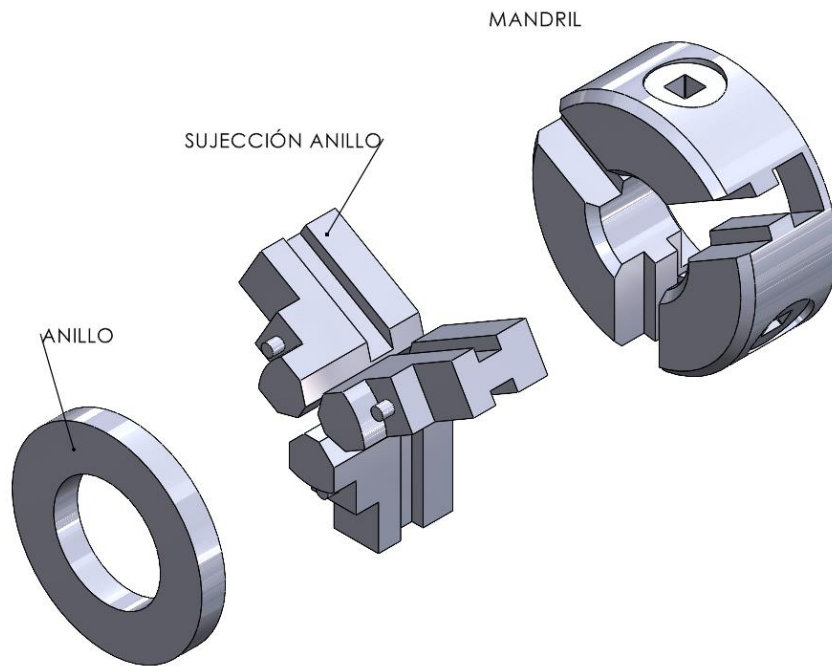


Figura 53: Vista explosionada Mandril

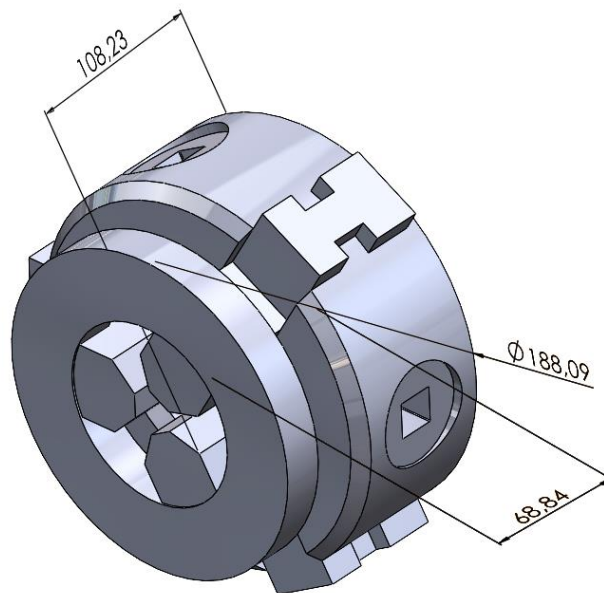


Figura 54: Mandril completo

-Nonius

Este elemento está formado por dos piezas: Un nonius fijo y otro móvil, Figura 55. Su función consiste en cuantificar cual es el movimiento del carro o soporte de ruedas según el número de vueltas que se le dé al volante (Será abordado más adelante).

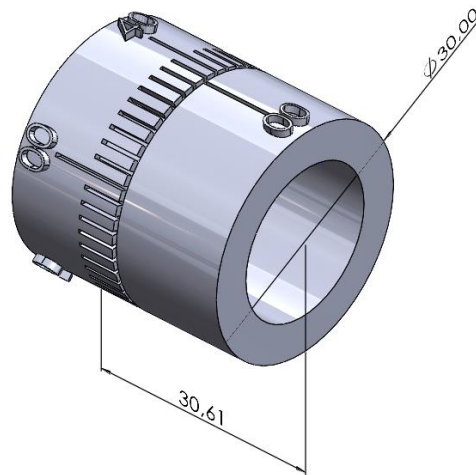


Figura 55: Nonius

-Volante y Tornillo sinfín

Es el sistema de accionamiento del movimiento lineal del carro que es activado cuando el operario mueve el volante a un lado u otro, Figura 56.

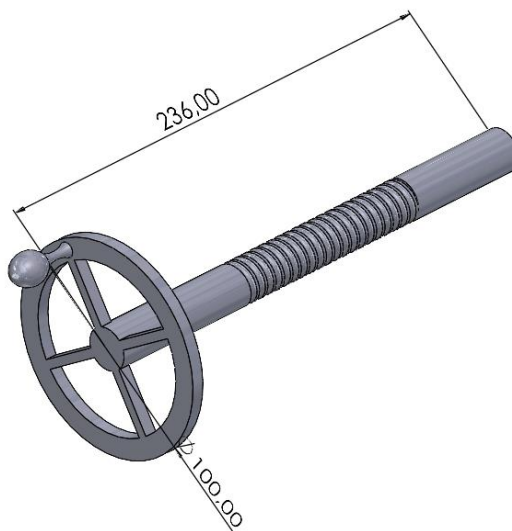


Figura 56: Volante y Tornillo sinfín

El movimiento de los volantes accionado por los operarios provoca el movimiento del carro o soporte de rueda para buscar una buena posición para trabajar. Dicho soporte y carro se mueven a través de unas guías que se usan como guía para el movimiento.

Una vez que se ajustan las piezas, el movimiento automático de la polea provoca el movimiento en los ejes, accionando la relación piñón-engranaje y dando una velocidad determinada al mandril que está unido solidariamente a la pieza a rectificar. En la Figura 57 se muestra este conjunto.

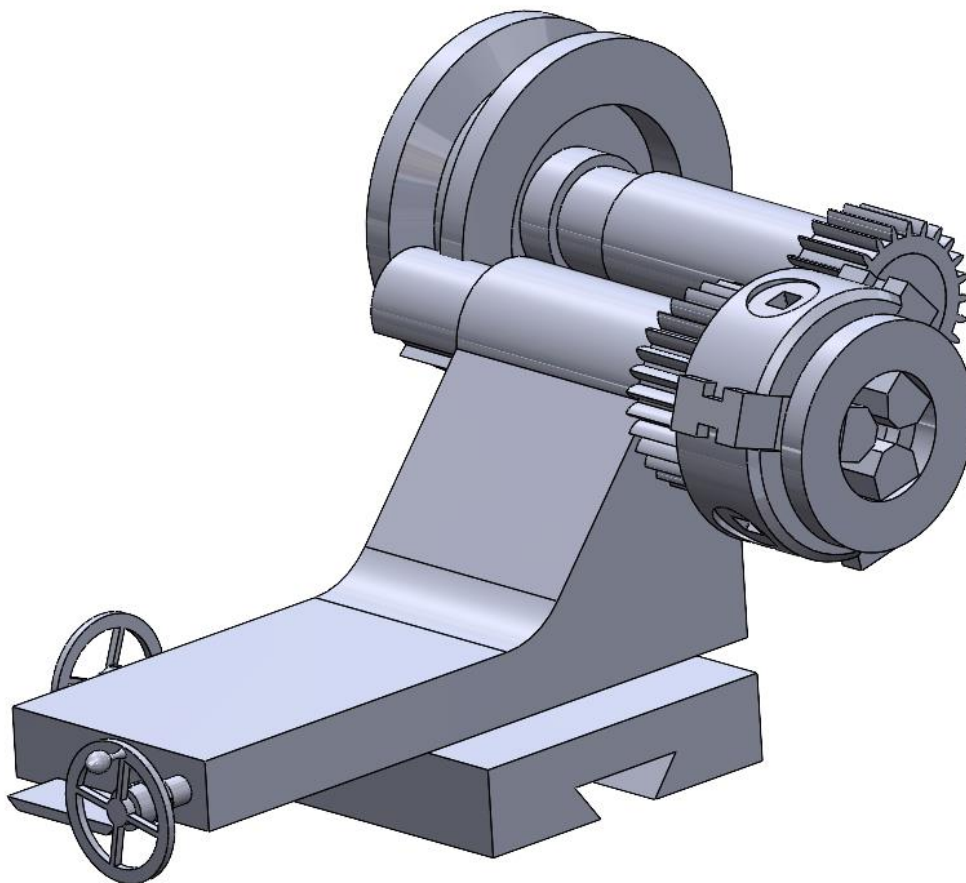


Figura 57: Conjunto carro y mandril

3.3.3. Sistema de oscilación del carro

Se ha modelizado un mecanismo lo más parecido posible al mecanismo utilizado en la patente, Figura 58. Este sistema busca el movimiento oscilatorio del carro alrededor de un eje ya sea de forma manual o automática.

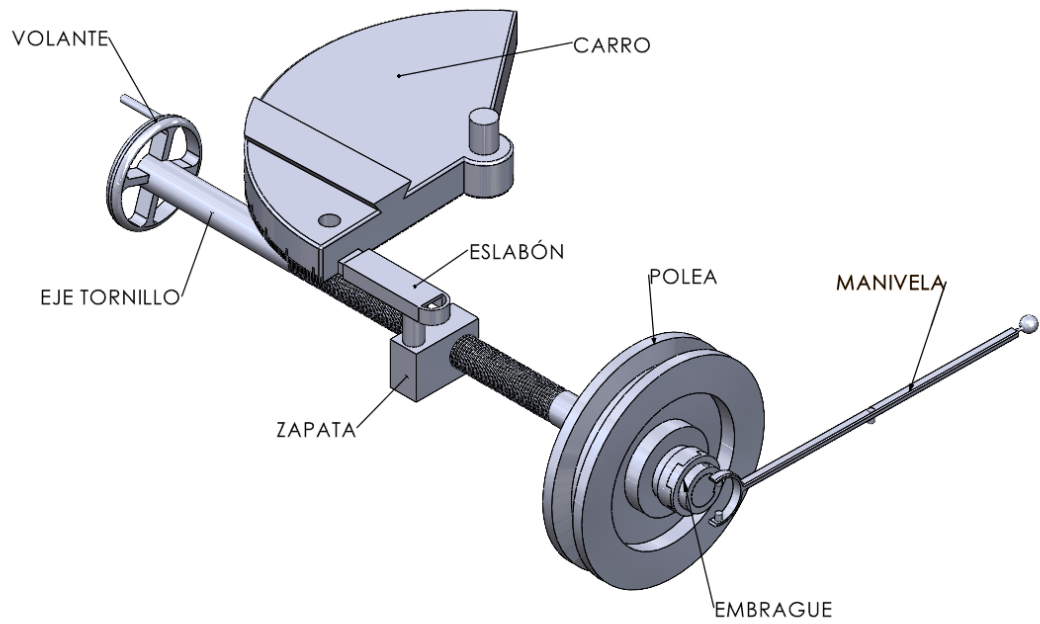


Figura 58: Sistema giro del carro

Se explica su funcionamiento y la descripción de cada una de las piezas que lo componen.

Lo primero que se conoce es el mecanismo de embrague en el que se acopla (Figura 59) o desacopla (Figura 60) la polea al eje.

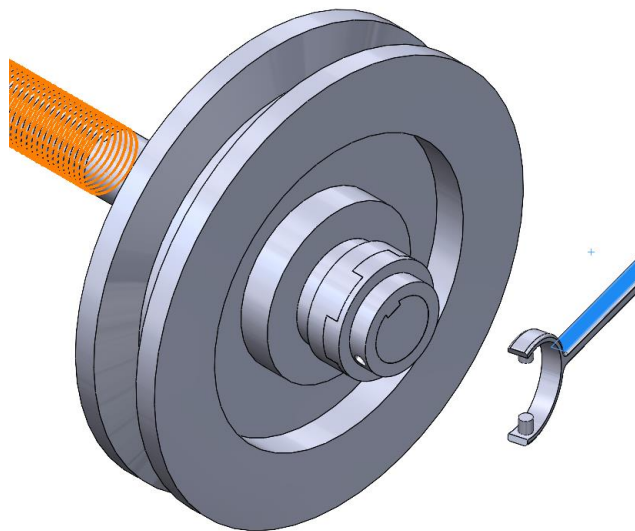


Figura 59: Embrague acoplado

El momento en el que el embrague se encuentra acoplado, el eje gira solidario con el movimiento de la polea. A través de la manivela desacoplamos el embrague y de esta manera la polea no transmite movimiento al eje.

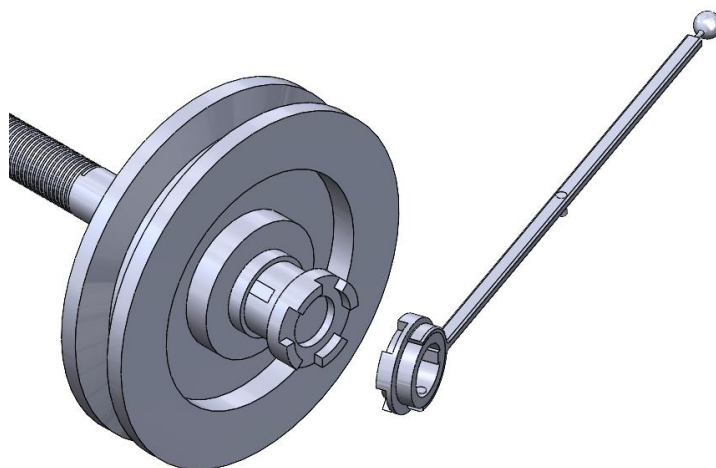


Figura 60 : Embrague desacoplado

La rotación del tornillo hace que la zapata se desplace hacia adelante y hacia atrás, tal y como se muestra en la Figura 61. El movimiento de esta zapata a través del eslabón oscilará, el carro alrededor de su eje.

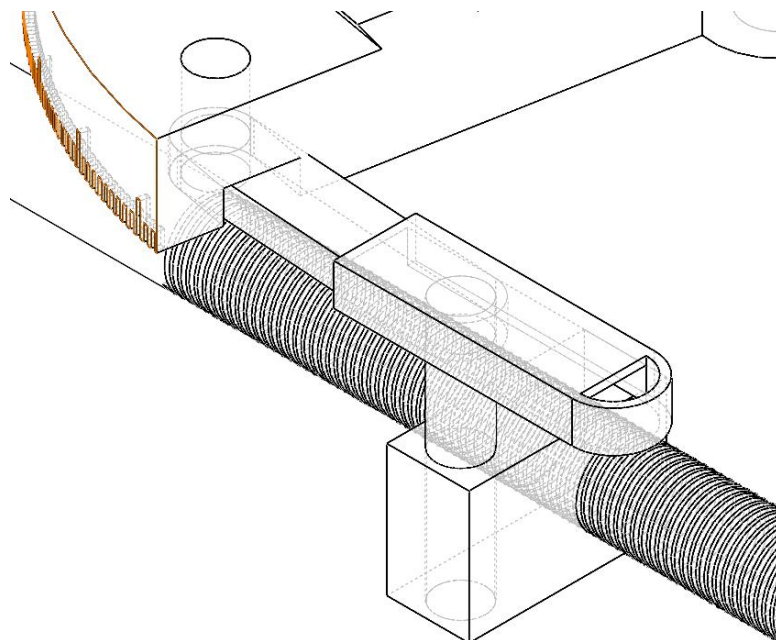


Figura 61 : Desplazamiento zapata

Este sistema cuenta con un elemento protector del eslabón que el que vemos en la (Figura 61) y un indicador de posición (Figura 62) que indica cuantos grados nos hemos desplazado en función de una vuelta del volante.

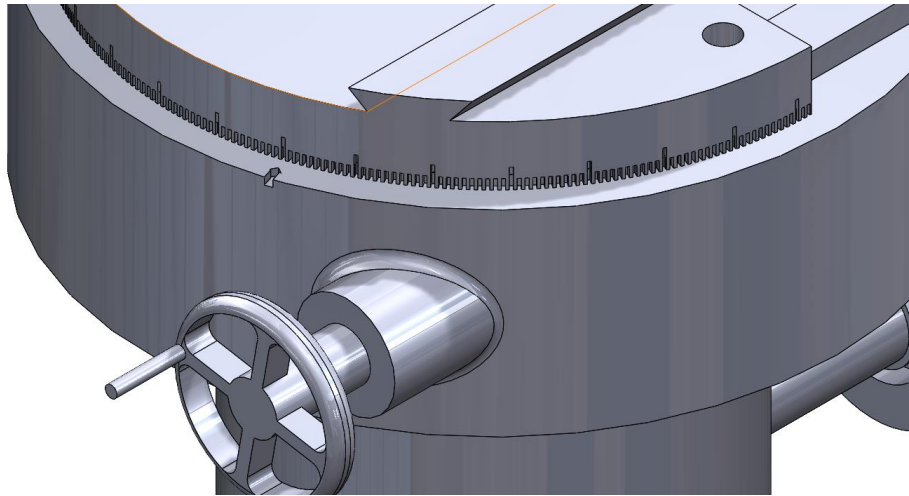


Figura 62 : Indicador de posición

En este capítulo se ha tratado la modelización y descripción detallada de un mecanismo destinado a lograr el movimiento oscilatorio del carro alrededor de un eje, ya sea de forma manual o automática. El enfoque principal se centra en el funcionamiento del embrague, que acopla o desacopla la polea al eje, así como en el desplazamiento de una zapata mediante la rotación de un tornillo para generar el movimiento oscilatorio en el carro. Además, se destacan elementos como un protector del eslabón y un indicador de posición que cuantifica el desplazamiento angular del sistema.

3.3.4.Sistema muela abrasiva

En este sistema hemos modelizado (Figura 63) el mecanismo que provoca el movimiento de la muela abrasiva, describiremos su accionamiento y las funciones de cada una de las piezas que lo componen.

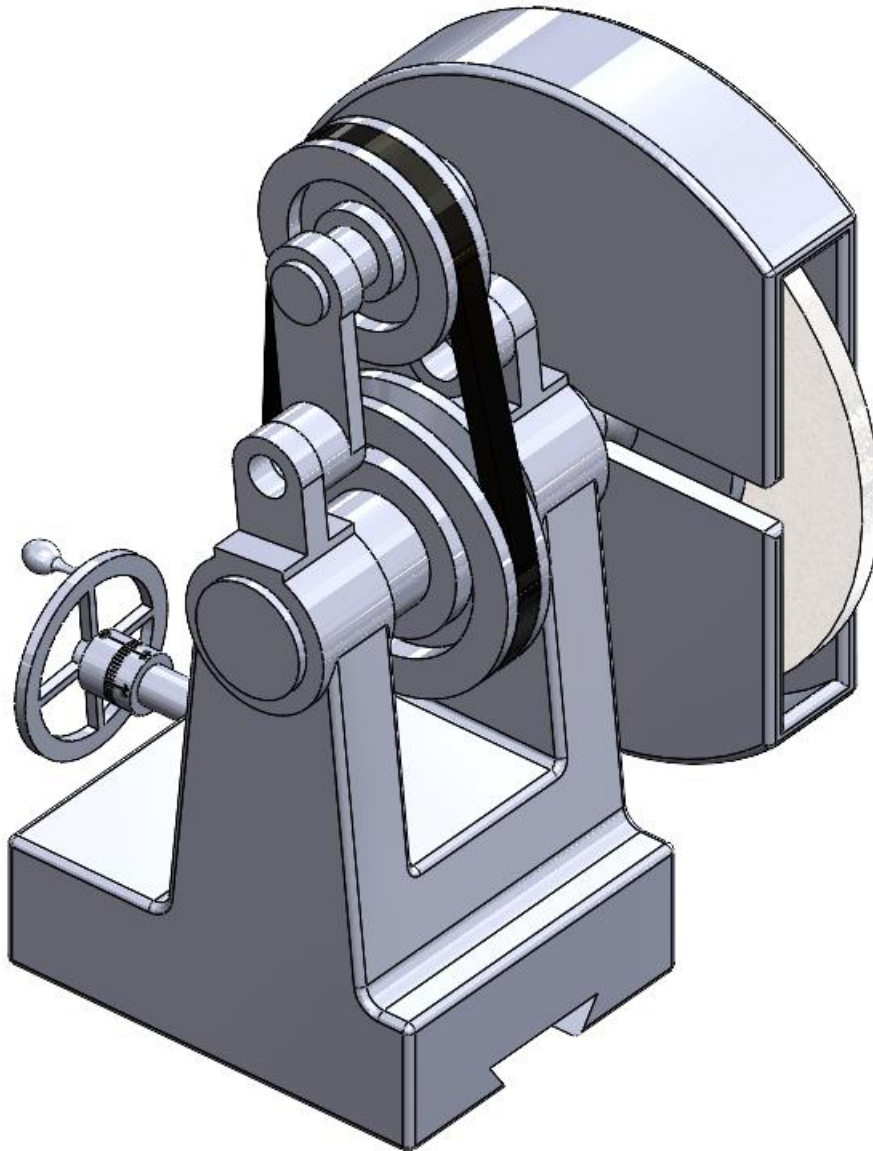


Figura 63: Sistema muela

En la Figura 63 se muestra que este sistema de muela está apoyado sobre el carro oscilante que hemos visto anteriormente. Esto implica que la muela tiene distintos ángulos de ataque sobre la pieza o anillo a rectificar.

Al igual que en sistemas anteriores, se contiene un tornillo para que pueda desplazarse a través de la vía incorporada en el carro.

En la Tabla 2 se hace referencia a los elementos existentes en este sistema, así como a su cantidad.

Tabla 2: Elementos del sistema de muela abrasiva

Nombre	Cantidad
Tornillo sinfín	1
Eje muela	1
Cojinetes	2
Eje	1
Muela abrasiva	1
Protector de muela	1
Poleas	2
Correa	1

En la Figura 64 observamos cada una de las piezas. Está compuesto tanto por poleas, ejes, soportes, tornillos, cojinetes, eslabones y protector de muela.

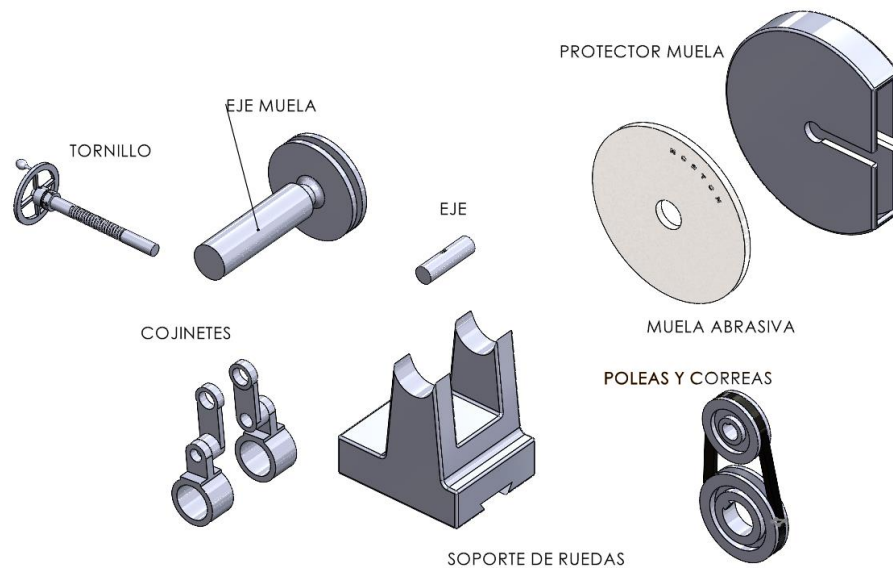


Figura 64: Sistema muela explosionado

Capítulo 3

El accionamiento de este sistema viene dado por el movimiento de las poleas accionada por una fuerza externa como, por ejemplo: Una correa que una las poleas mostradas con una polea en el techo del taller, accionada a su vez por una máquina de vapor, (Figura 65).

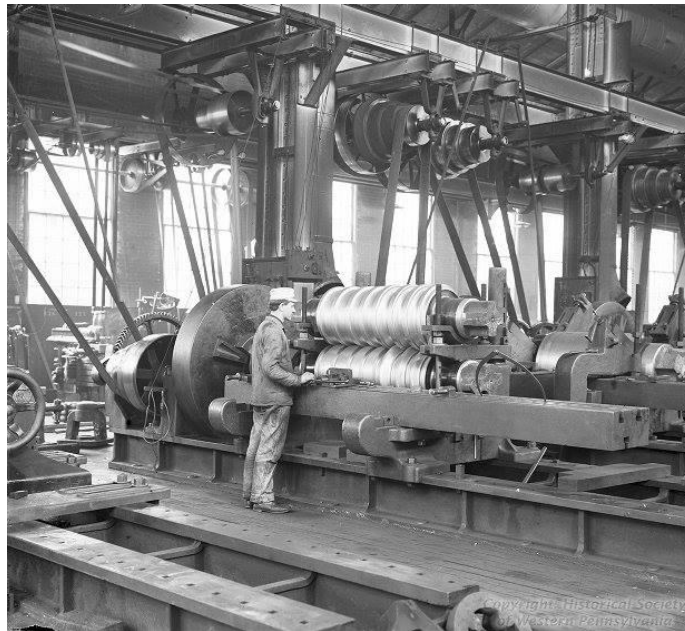


Figura 65: Sistema de poleas accionadas por la máquina de vapor [21]

En la Figura 66 se observa cómo y dónde se produce el accionamiento de la muela

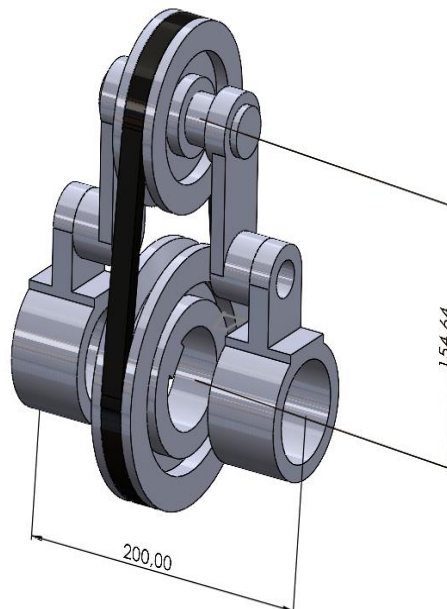


Figura 66: Accionamiento sistema de movimientos

Al moverse la **polea superior** y estar conectada mediante una correa a la **polea inferior** se genera un movimiento en el **eje** (Figura 67) que esta concéntrico a dicha polea inferior.

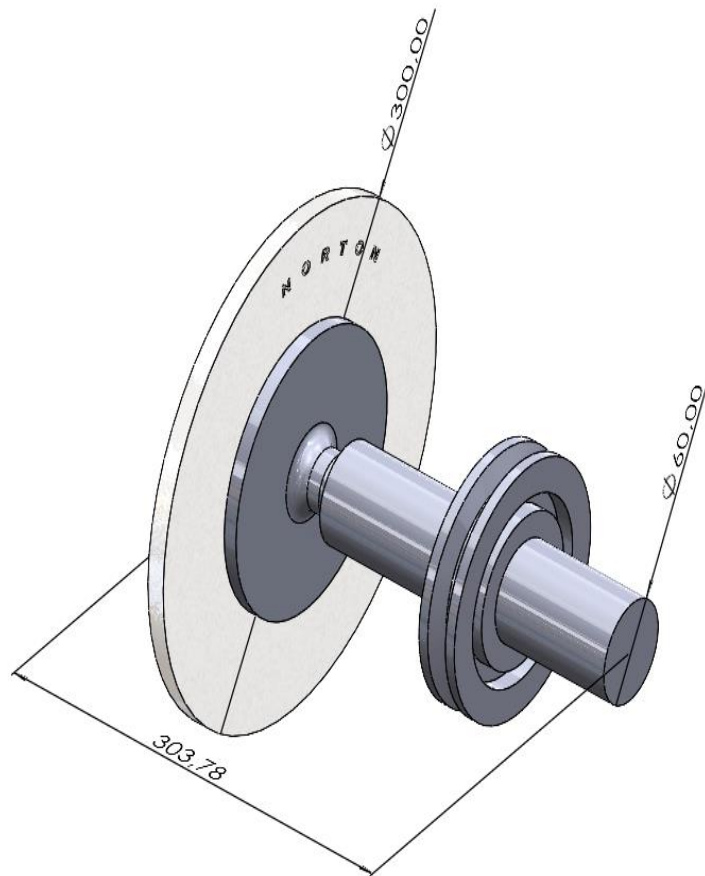


Figura 67: Eje y muela abrasiva

La base de este sistema es el **soporte de ruedas** (Figura 68) que es en el que está el cojinete, sus eslabones y poleas. Además, dicho soporte se desplaza a través de un carro oscilante.

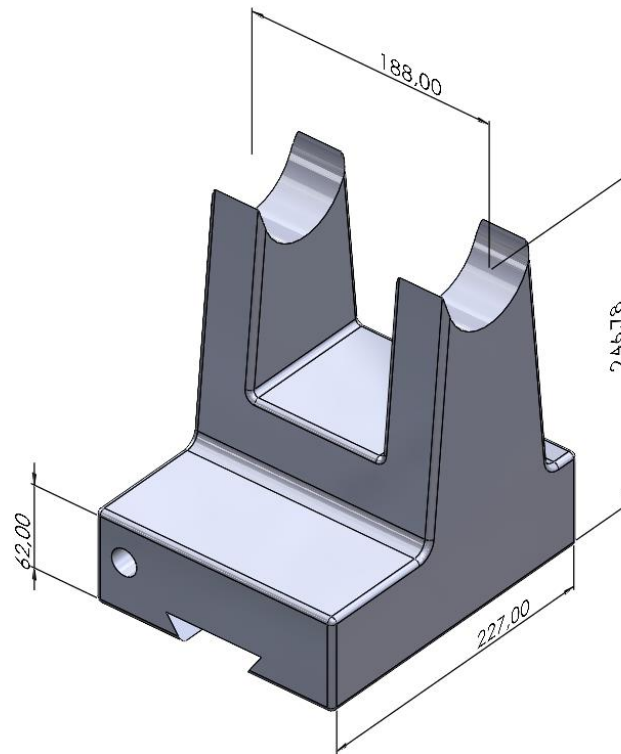


Figura 68: Soporte de ruedas

Los **cojinetes** (Figura 69) tienen la función de apoyar y girar el eje de un mecanismo.

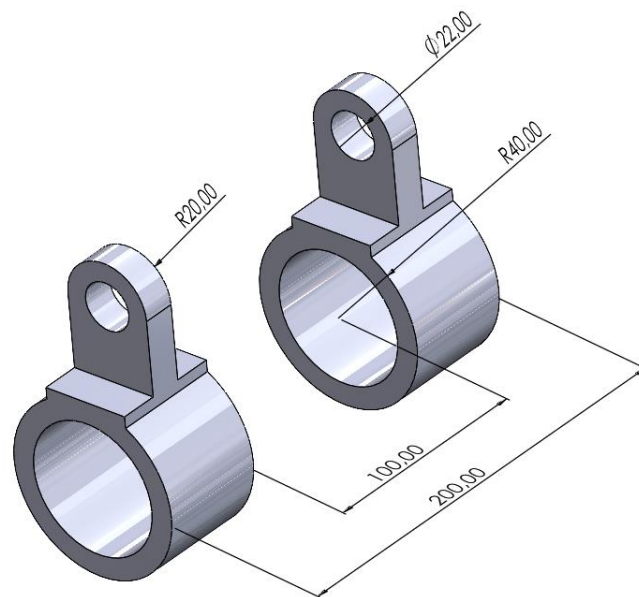


Figura 69: Cojinete

El protector de muela (Figura 70) es el encargado de defender tanto al operario como al propio proceso de rectificado de las altas temperaturas que se producen en el proceso y del arranque de material producido.

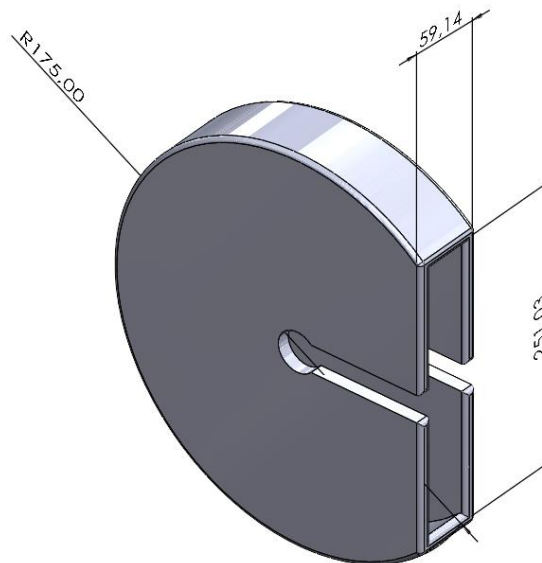


Figura 70: Protector de muela

Por último, **la muela abrasiva** (Figura 71) es la pieza encargada de rectificar que se encuentra en contacto directo con dicho anillo. Esta muela está fabricada con óxido de aluminio (alundum).

Tiene unas dimensiones en el diámetro exterior es de 300 mm y en el diámetro interior es de 50 mm.

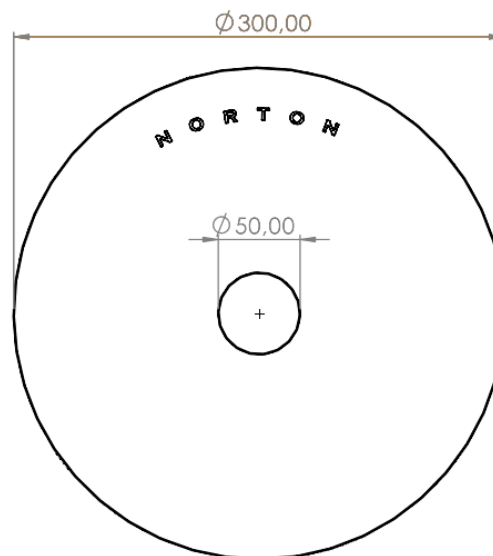


Figura 71: Muela abrasiva

Todos los elementos mencionados conforman lo que hemos denominado sistema de muela y en la Figura 72 se muestran sus medidas más importantes.

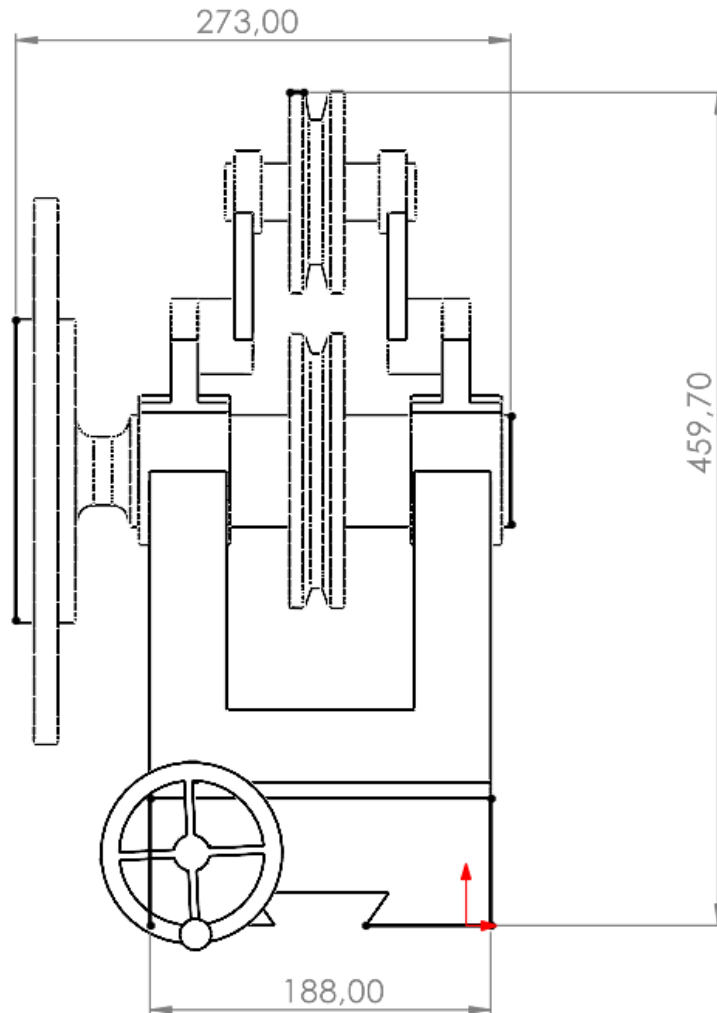


Figura 72: Vista frontal sistema muela

3.3.5. Sistema de poleas

Este sistema es uno de los más importantes y sencillos, puesto que se compone por una relación de correas con diferentes poleas.

Una vez que el operario ha ajustado la máquina ya sea tanto los carros longitudinales y transversales, así como el carro oscilatorio la máquina se encuentra preparada para funcionar de manera automática.

Se procede a acoplar al embrague y a colocar las correas para que los ejes se encuentren conectados entre sí, Figura 73.

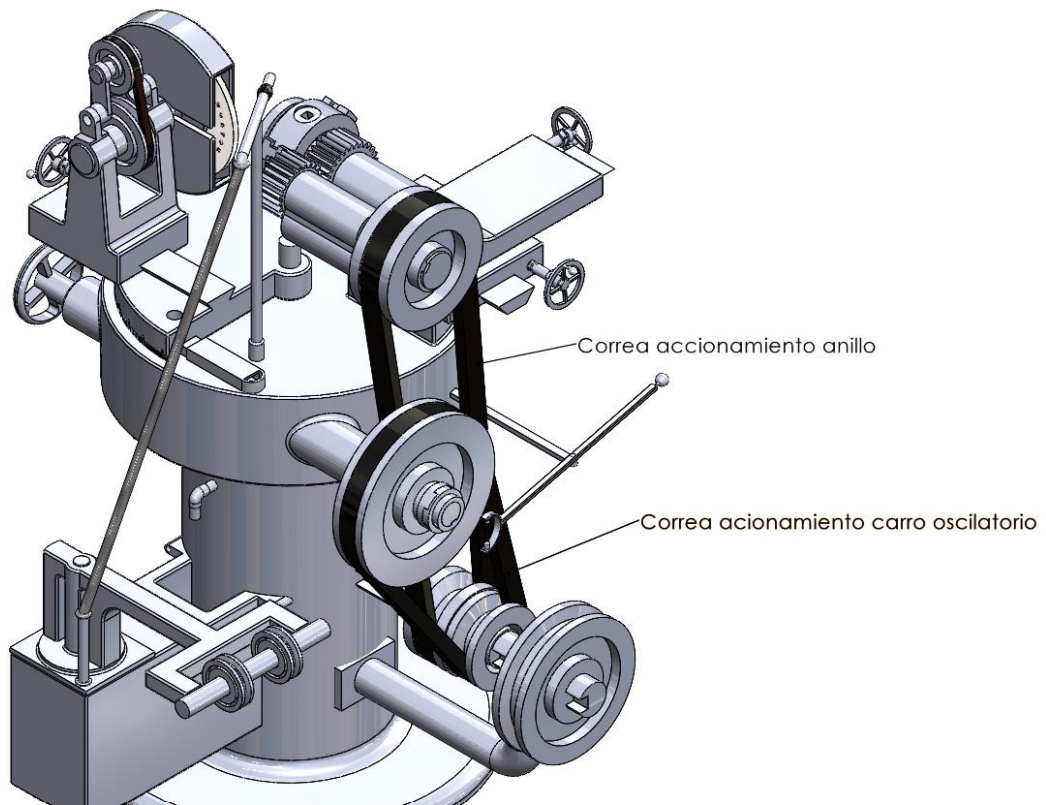


Figura 73: Correas

Una correa encarga de transferir el movimiento a la pieza o anillo a rectificar dándole una velocidad específica que veremos en los siguientes capítulos y otra es la encargada de generar el movimiento del carro oscilatorio para que la muela abrasiva haga el proceso de corte a la vez que gira con el carro.

El diseño de estas correas (Figura 75) ha sido diseñado según el perfil (Figura 74) de las poleas correspondientes.

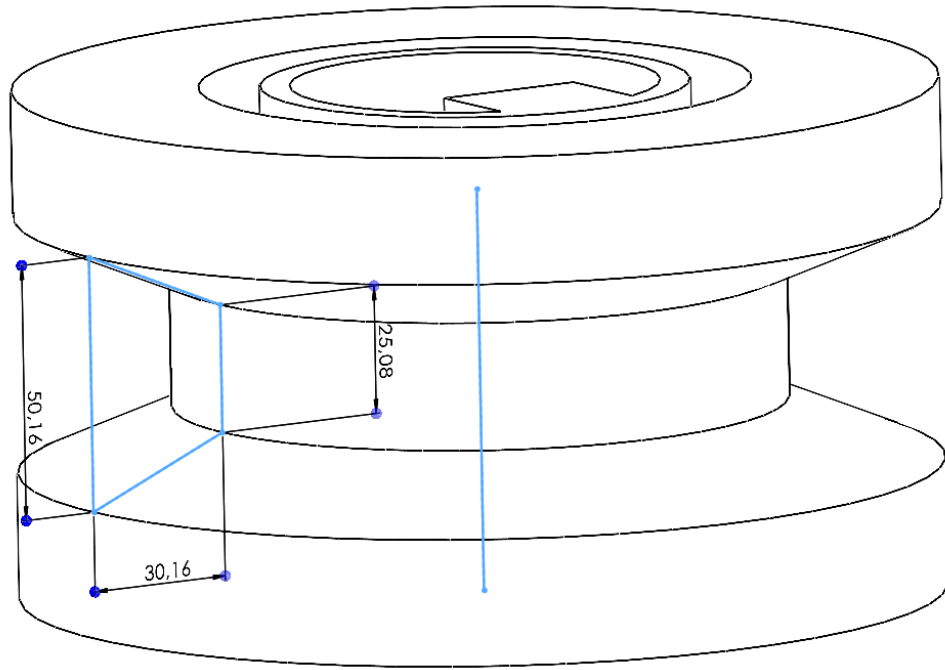


Figura 74: Perfil correas

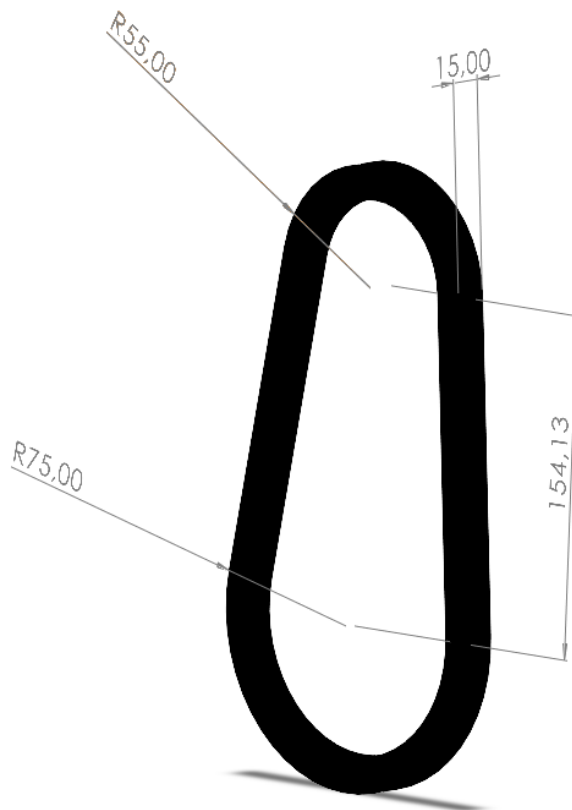


Figura 75: Correa

Se han mostrado las dos correas más importantes del mecanismo y que son propiamente de la máquina, además el sistema de accionamiento de esta rectificadora viene dado por una correa de techo (Figura 76) que engancha con nuestro eje principal y gracias al cual se permite el rectificado.

También el movimiento de la muela abrasiva se hace enganchando correas a una de nuestras poleas a otra del techo de la nave.

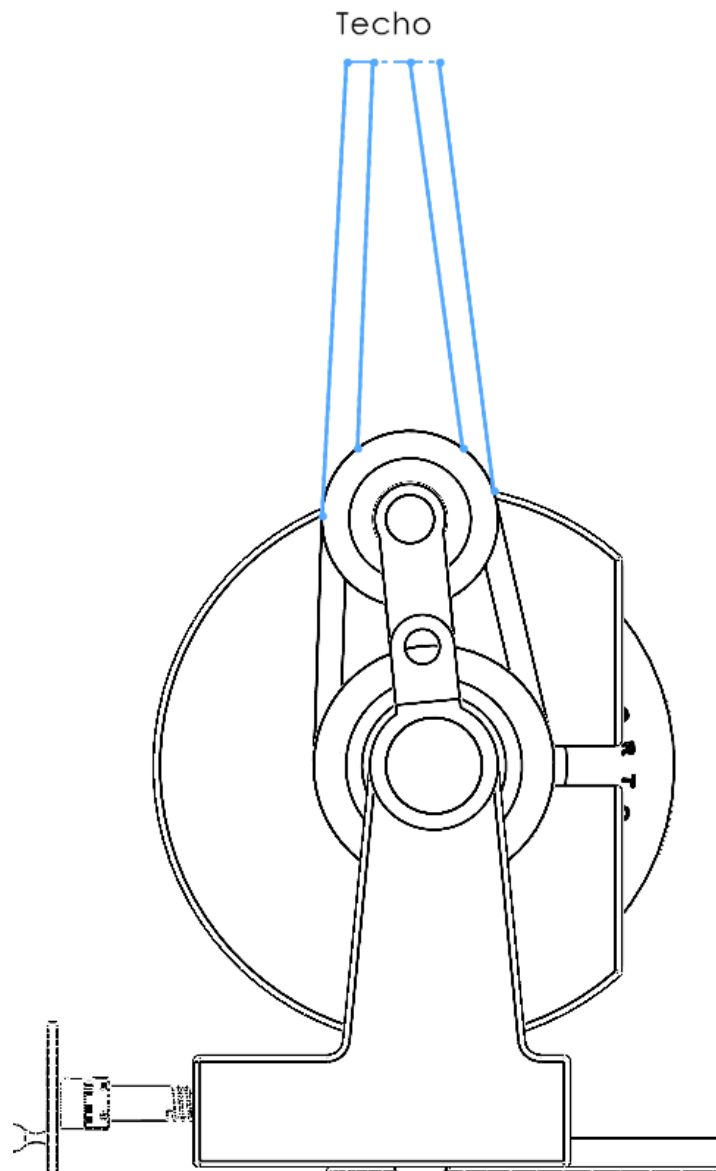


Figura 76: Sistema de accionamiento a techo

3.3.6. Modelo

En este capítulo se muestran distintas vistas del modelo (Figura 77 y 78) totalmente reconstruido y una explicación acerca del proceso de rectificado.

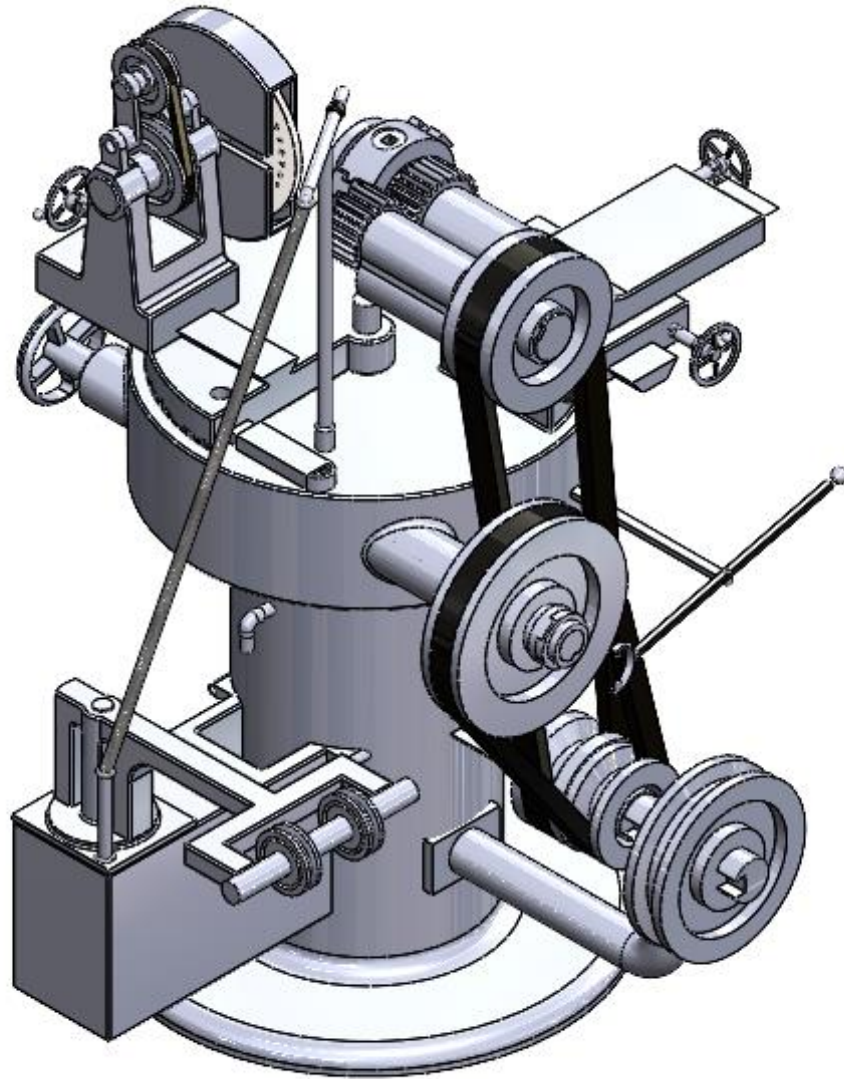


Figura 77: Modelo

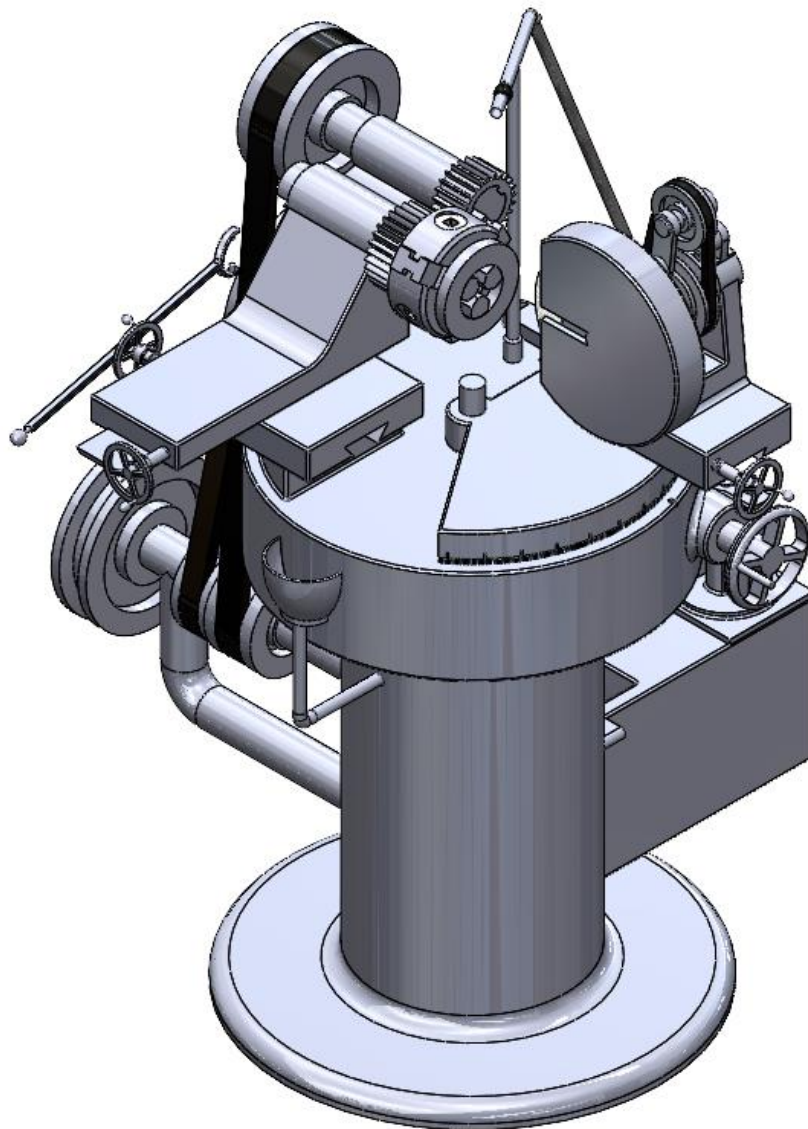


Figura 78: Modelo 2

En primer lugar, antes de comenzar con el proceso automático, el operario debe ajustar de forma manual los carros longitudinales y transversales, una vez que estos estén en los parámetros correctos se corrige la posición del carro portador de muela a una distancia específica del anillo, dicha posición será cuantificada en el capítulo siguiente.

Una vez el operario haya colocado todo correcto, ayudándose de los indicadores de posición (Figura 79) con los que cuentan los carros y con el indicador angular, se colocan las correas sobre las poleas y se acopla el embrague.

Capítulo 4.

Análisis cinemático

4.1. Introducción

En este capítulo se realiza un análisis cinemático de los distintos sistemas de transmisión que posee esta máquina, responsables del movimiento de rotación de la muela (movimiento principal de corte) y de los sistemas de accionamiento del avance, tanto del giro de la pieza como su sincronización con el giro de la muela. Se parte de una serie de hipótesis correspondientes a las velocidades de giro de la muela y de la pieza, que son típicas para este tipo de rectificadores. Dicha información se ha obtenido de catálogos de la época, contrastándolos con valores actuales habitualmente utilizados.

A partir de estos valores y a través de relaciones de transmisión en las que influyen el diámetro que puedan tener las poleas y engranajes, determinamos los cálculos cinemáticos de todos los elementos de la rectificadora.

También se detallan las operaciones con las que se determinan cuanto avanzan los carros de la máquina según el número de vueltas que realizamos en el volante, todo ello se refleja en la modelización de la máquina y con un indicador de posición o nonius.

4.2. Análisis cinemático de los elementos de transmisión de la máquina

En primer lugar, en la patente de la rectificadora de rodamientos da varias alternativas del sistema de accionamiento de esta máquina. De este modo se muestra como se produce el avance de los carros de posicionamiento del anillo o pieza a rectificar, la propuesta de sistema de movimiento oscilatorio del carro y el accionamiento automático del rectificado, Figura 80.

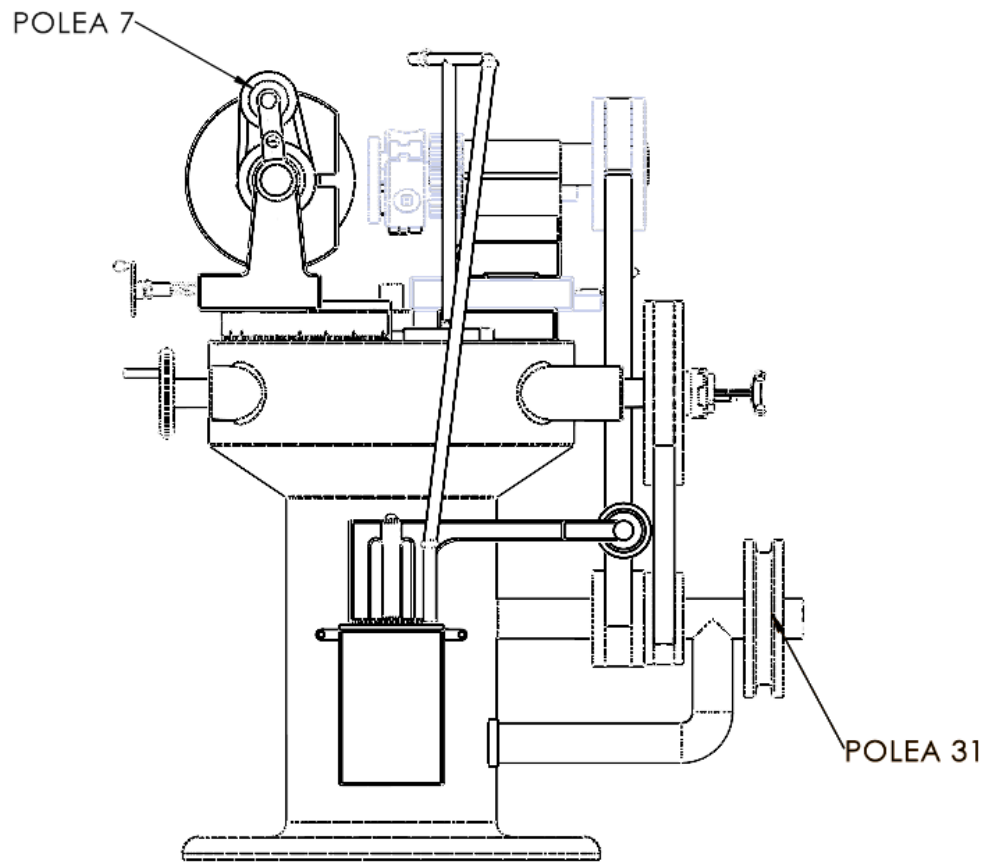


Figura 80: Vista frontal sistema accionamiento

Como se muestra en la Figura 80 las poleas 7 y 31 son accionadas por la relación con unas poleas de techo, puesto que no existe información exacta de cómo era este sistema de accionamiento mostramos información acerca del sistema que tenía la rectificadora universal por su similitud, Figura 81.

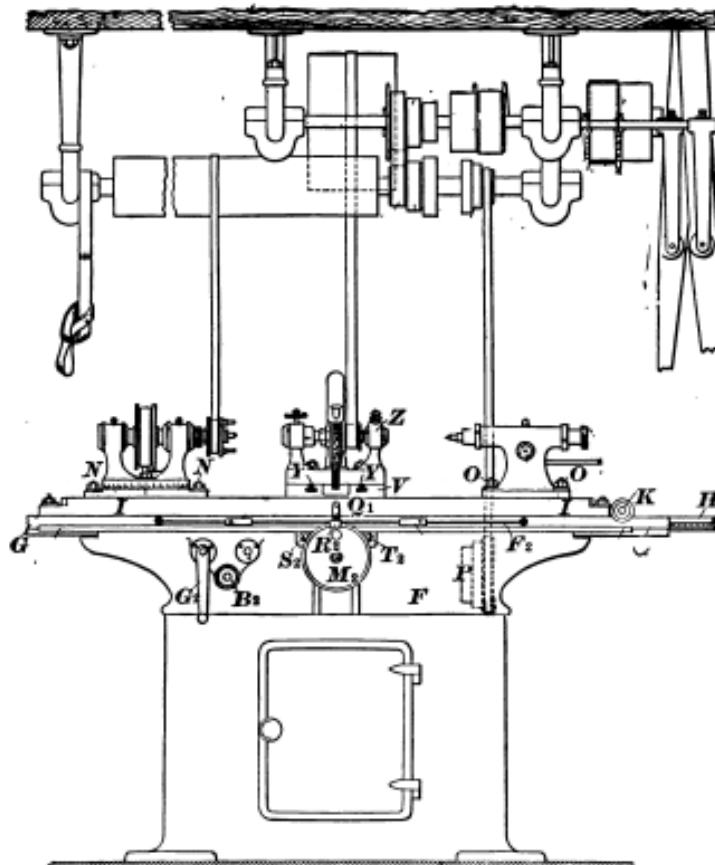


Figura 81: Sistema accionamiento Rectificadora universal [6]

Con este sistema de conos de poleas de techo tanto la muela abrasiva como la pieza y el sistema de manguera pueden moverse a distintas velocidades ya que dependiendo en que parte del cono nos encontremos las poleas tienen diferente diámetro.

De este modo, la muela posee velocidades de rotación de: 6000, 5000, 4000 y 3000 rev/min. En nuestra máquina observamos que el cabezal porta piezas es independiente de la ubicación de la muela abrasiva y podemos cambiar muela o pieza sin necesidad de parar por completo el sistema y ahorrando tiempo de mecanizado. La pieza a rectificar gira a velocidades de 25 y 50 rev/min.

En la Tabla 3 se recoge información acerca del rango de velocidades de la muela y de la pieza.

Tabla 3: Velocidad de la muela y de la pieza (rev/min)

Velocidad de la muela	Velocidad de la pieza
6000	25
5000	50
4000	
3000	

Por último, los carros longitudinales y oscilatorios son posicionados correctamente antes de comenzar con el proceso automático, esto implica que el embrague debe estar desacoplado. Según la información de la patente se hace girar un volante diseñado para avanzar 5 mm por cada revolución hasta que el operario llegue a la posición indicada. Una vez posicionado, se acopla el embrague se colocan las correas y comienza el proceso automático

4.3. Análisis cinemático del proceso de corte

La Rectificadora de rodamientos presenta todos los movimientos de la máquinas-herramienta: Movimiento de avance, de corte, de profundidad de corte y de rotación de la pieza. Los movimientos de corte y de penetración son los producidos por la muela abrasiva y los movimientos de avance y de rotación son originados por la pieza.

Las muelas son fabricadas de un material específico para el corte de los materiales de la pieza. Antiguamente los materiales más utilizados eran los naturales como el diamante o el esmeril, pero debido a que por la gran producción que se estaba desarrollando tanto en la industria aeronáutica como en la automovilística se necesitaban buscar materiales con más precisión y robustez se empezó a estudiar materiales sintéticos. Además, materiales como el diamante tenían un alto coste.

El primer material artificial fue el carburo de silicio descubierto por Edward G. Acheson, más adelante se creó el óxido de aluminio con el nombre comercial de Alundum.

Existen muchos factores a la hora de elegir el material de la muela, entre ellos destaca la velocidad de corte de la muela y de la pieza. A mayor velocidad de la muela más blando debe ser su material.

4.3.1. Velocidad tangencial de la muela

Esta velocidad se calcula con la formula (Vc):

$$Vc = d \times n \times \pi \quad (1)$$

Entendemos por velocidad de corte tangencial aquella velocidad que se da en los puntos periféricos de la muela.

- d: Diámetro de la muela
- n: Velocidad angular

Para el cálculo de la velocidad tangencial se ha optado por un tamaño de muela de 300 mm y las velocidades de corte se encuentran en un rango de 45- 95 m/s. Como se ha visto en apartados anteriores el rango de velocidades de giro a estudiar son de 3000 a 6000 rpm.

Se observa en la Figura 82 que la polea 7 es la encargada de accionar el movimiento de la muela. Por lo tanto, sabiendo que la muela debe girar en un rango de 3000 a 6000 rpm, conociendo el diámetro de las poleas y de la muela, se calcula velocidad angular (n) que debe tener la polea 7 para girar a la muela dentro del rango.

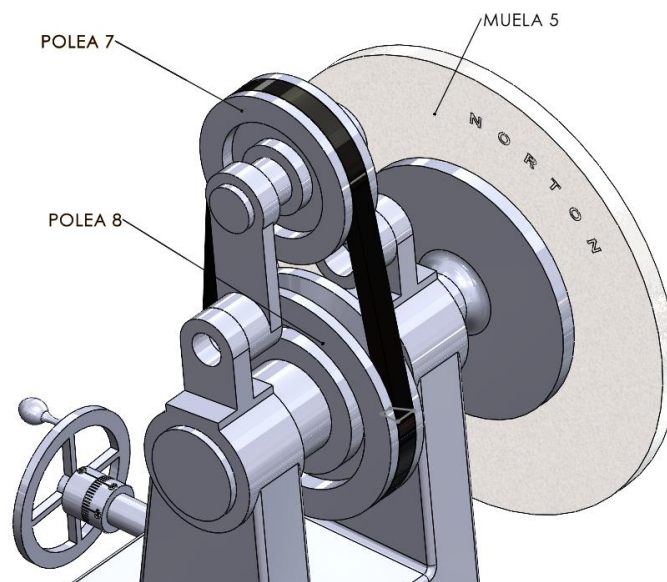


Figura 82: Velocidad angular muela

Relación de transmisión:

$$NA \times DA = NB \times DB \quad (2)$$

Junto con esta relación, el diámetro de las poleas y la velocidad angular de la muela determinamos la velocidad que debe tener la polea de accionamiento del sistema (N7). En la Tabla 4 se recogen datos sobre el diámetro y la velocidad angular.

- Velocidad angular inicial de 6000 (rev/min)

Tabla 4: Velocidad angular inicial de 6000 (rev/min)

Nombre	Diámetro (mm)	Velocidad angular (rev/min)
Muela 5	300	6000
Polea 8	150	12000
Polea 7	110	16363.63

Se observa que la polea 7 debe tener una velocidad angular igual a 16363.63 rev/min para una velocidad angular inicial de 6000 rev/min de la muela 5.

En la Tabla 5 se recogen datos del diámetro y velocidad angular.

- Velocidad angular inicial de la muela 5 de 5000(rev/min).

Tabla 5: Velocidad angular inicial de 5000 (rev/min)

Nombre	Diámetro (mm)	Velocidad angular (rev/min)
Muela 5	300	5000
Polea 8	150	10000
Polea 7	110	13636.36

Se observa que la polea 7 debe tener una velocidad angular igual a 13636.36(rev/min) para una velocidad angular inicial de 5000 rev/min de la muela 5.

Capítulo 4

En la Tabla 6 se recogen datos del diámetro y velocidad angular.

- Velocidad angular inicial de la muela 5 de 11000 (rev /min).

Tabla 6: Velocidad angular inicial de 4000 (rev/min)

Nombre	Diámetro (mm)	Velocidad angular (rev/min)
Muela 5	300	4000
Polea 8	150	8000
Polea 7	110	10909.09

Se observa que la polea 7 debe tener una velocidad angular igual a 10909.09 (rev/min) para una velocidad angular inicial de 4000 rev/min de la muela 5.

En la Tabla 6 se recogen datos del diámetro y velocidad angular.

- Velocidad angular inicial de la muela 5 de 3000 (rev /min).

Tabla 7: Velocidad angular inicial de 3000 (rev/min)

Nombre	Diámetro (mm)	Velocidad angular (rev/min)
Muela 5	300	3000
Polea 8	150	6000
Polea 7	110	8181.81

Se observa que la polea 7 debe tener una velocidad angular igual a 8181.81 (rev/min) para una velocidad angular inicial de 3000 rev/min de la muela 5.

4.3.2. Velocidad de la pieza

La velocidad de la pieza se calcula con la fórmula (1) aplicada anteriormente. Nuestro modelo tiene un tamaño de pieza de 90 mm en su interior y 160 mm en su exterior. En la siguiente Tabla 8 se muestran los valores de los diámetros de la pieza

Tabla 8: Diámetros de la pieza

Diámetro interior (mm)	Diámetro exterior (mm)
90	160

También se ha visto en apartados anteriores como las velocidades de rotación de la pieza habitualmente se encuentran entre 10-25 m/min, por lo que se tiene un rango de giro alrededor de 25-50 rev/min, 25 rev/min (acabado) y 50 rev/min (desbaste). En la siguiente Tabla 9 se recogen estos valores.

Tabla 9: Velocidades de rotación y de giro de la pieza

Velocidad de rotación (m/min)	Velocidad de giro (rev/min)
10	25
25	50

En la siguiente imagen (Figura 83) se observa los elementos que intervienen en el movimiento final de la pieza o anillo a rectificar.

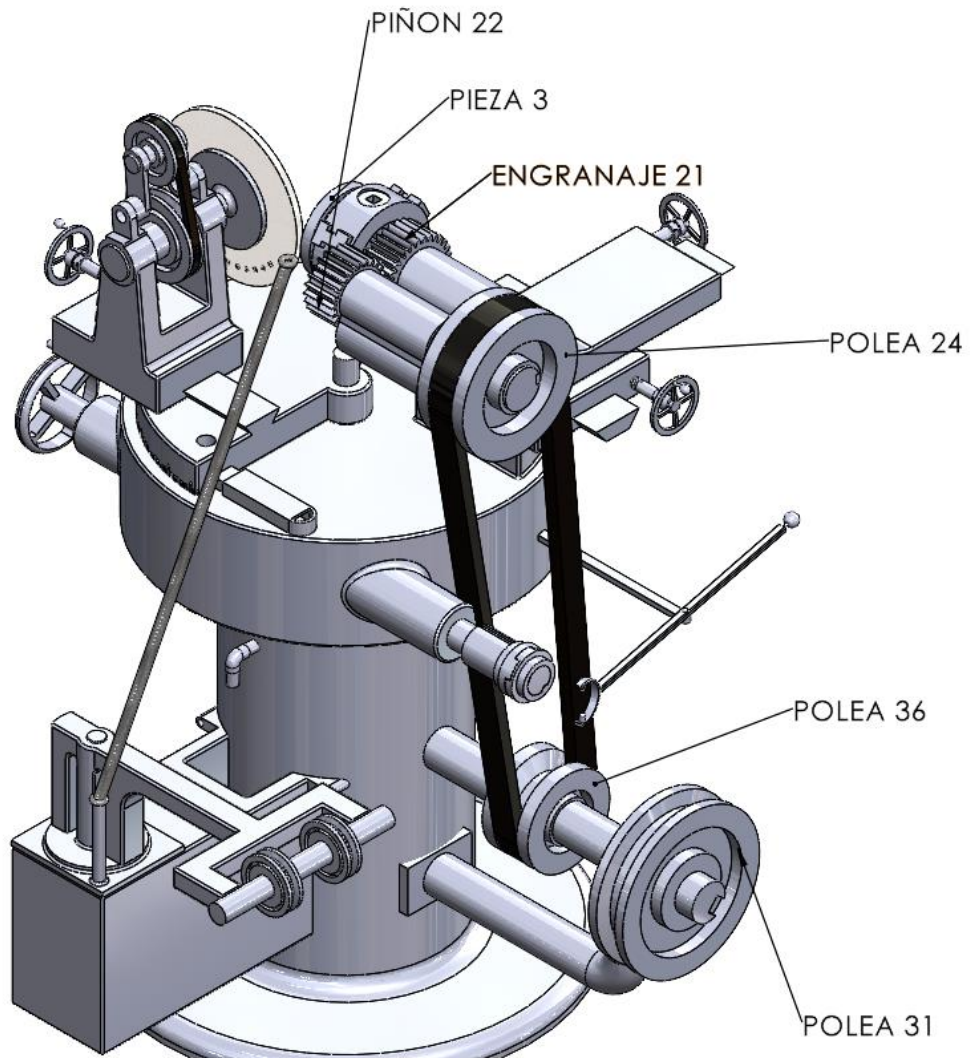


Figura 83: Sistema accionamiento pieza

Tomando la velocidad angular de la pieza como $N_3 = 50 \text{ rev/min.}$, el diámetro de las poleas, y el número de dientes del engranaje (30) y del piñón (24) y con la fórmula (2) de la relación de transmisión vista anteriormente se obtiene la velocidad angular de N_{31} que es la encargada de accionar el movimiento.

Capítulo 4

En la Tabla 10 se recoge información de las dimensiones y velocidades de las poleas, engranajes, piñón, etc.

Tabla 10: Velocidad de accionamiento de la pieza para $N_3=50$ (rev/min).

Nombre	Diámetro	Velocidad angular (rev/min)
Pieza 3	160	50
Engranaje 21	150	53.33
Piñón 22	120	66.67
Polea 24	250.70	31.91
Polea 36	150	53.51
Polea 31	300	26.75

Obtenemos una velocidad de $N_{31}= 26,75$ (rev/min). que es la que se necesita para girar la pieza a 50 (rev/min).

En la siguiente Tabla 11 se recoge la misma información, pero tomando la velocidad angular como $N_3 = 25$ r.p.m.:

Tabla 11: Velocidad de accionamiento de la pieza para $N_3 = 25$ (rev/min)

Nombre	Diámetro	Velocidad angular (rev/min)
Pieza 3	160	25
Engranaje 21	150	26.67
Piñón 22	120	33.33
Polea 24	250.70	16
Polea 36	150	26.73
Polea 31	300	13.36

Obtenemos una velocidad de $N_{31} = 13.36$ (rev/min). que es la que se necesita para girar la pieza a 25 (rev/min).

4.4. Profundidad de corte

La profundidad de corte consiste en el desplazamiento que se le da al objeto encargado de acercar la muela a la pieza, este desplazamiento por lo general suele ser un valor pequeño. El operario es el que ajusta el carro soporte de pieza a través de las guías, durante este proceso el embrague se desacopla y el carro oscilatorio no gira.

En primer lugar, se mueve el carro porta piezas a una distancia del eje del bastidor igual a longitud del radio de curvatura de la pista de bolas menos la profundidad de dicha pista. Normalmente estas pistas se rectifican a una profundidad a un octavo de pulgada.

Por otro lado, la rueda abrasiva se ajusta hasta que la porción de esta se acopla al trabajo y se proyecta a una distancia del eje del bastidor del radio de la pista de bolas deseada.

Por último, se acopla el embrague y se activa la máquina a través de las poleas 7 y 31, todos estos movimientos provocan el roce de la bola.

Capítulo 4

En este capítulo se ha tratado el procedimiento en el que sistema porta muela se acerca una determinada distancia a la pieza a rectificar, el orden en el que tiene que actuar el operario para que el rectificado sea exitoso y los mecanismos que deben estar desacoplados como el embrague mientras el operario está trabajando.

Capítulo 5.

Conclusiones

5.1. Conclusiones

A continuación, se exponen las principales conclusiones derivadas de la realización de este Trabajo Fin de Grado:

1. En este trabajo se ha realizado la modelización de una rectificadora de rodamientos patentada en 1906 por CLAYTON O. SMITH, con especial relevancia desde el punto de vista histórico patrimonial. Se trata de una máquina que fue clave en la fabricación en serie de rodamientos para todo tipo de piezas móviles, principalmente en la industria del automóvil. Sin embargo, ninguno de estos modelos se conserva, existiendo solo la información recogida en la patente.
2. Para la obtención del modelo digital se han aplicados técnicas de ingeniería inversa sencillas, tomando como referencia la información recogida en la patente de esta máquina-herramienta. Se han tomado una serie de hipótesis de partida respecto de las dimensiones, tomando información recogida en catálogos y manuales de la época, además de contrastarse con las dimensiones de máquinas similares actuales. Mediante el uso del software SolidWorks, se ha obtenido un modelo parametrizado, de forma que se pueda realizar un escalado de todos sus elementos en caso de encontrar información más precisa respecto de las dimensiones.
3. Se ha realizado un análisis de la evolución histórica de los procesos de rectificado y de las rectificadoras, haciendo hincapié en las rectificadoras utilizadas en la industria del automóvil, entre finales del S. XIX y comienzos del S. XX, donde se encuentra enmarcada históricamente la máquina-herramienta estudiada en este trabajo. En este análisis histórico se ha puesto de manifiesto que el mecanizado con abrasivos es uno de los procesos de fabricación más antiguos que existen, siendo la rectificadora la primera máquina-herramienta desarrollada para obtener precisión en lugar de productividad. Además, se ha identificado que la rectificadora tuvo un desarrollo tardío, pero evolucionó de forma mucho más rápida que el resto de máquina-herramienta, dado que aprovechó el desarrollo de elementos presentes en otras máquina-herramienta, tales como el torno o la fresadora.
4. Se ha realizado un análisis funcional de esta máquina-herramienta, a partir de los datos recogidos en la patente de 1906, realizando un modelado digital de cada uno de sus componentes.

5. Finalmente, se ha realizado un análisis cinemático de los sistemas de accionamiento de esta rectificadora, identificando los posibles valores utilizados en los accionamientos del movimiento principal de corte, avance y profundidad de corte.
6. Este modelo digital permite recuperar y poner en valor una máquina-herramienta de elevado valor desde el punto de vista del patrimonio industrial, además de perpetuar esta información para generaciones futuras. Además, permite mostrar la arquitectura y funcionamiento de estas rectificadoras, que no difieren sustancialmente de las rectificadoras de rodamientos actuales, a distintos alumnos que estudian grados en ingeniería industrial. Cabe destacar que esta máquina será expuesta en el museo virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga, junto con otra máquina-herramienta de especial relevancia histórico-patrimonial, que se está desarrollando a través de un proyecto de innovación educativa de la Universidad de Málaga (PIE22-094 “Desarrollo y empleo de herramientas docentes a través de la creación del Museo Virtual de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga”).

Capítulo 6.

Bibliografía

- [1] TICCIH-Comité Internacional para la Conservación del Patrimonio Industrial. Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://ticcih.org/wp-content/uploads/2013/04/NTagilSpanish.pdf>
- [2] *Grupo de Trabajo en Patrimonio Industrial de Fabricación (PATRIF), "Primer curso de historia de las máquinas-herramienta y equipos de fabricación: mecanizado. Las rectificadoras y máquinas de procesos de acabado".* Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), Cátedra de Territorios Sostenibles y Desarrollo Local. (2021-2021).
- [3] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing : Materials, Processes, and Systems*. Prentice Hall, 1996.
- [4] C. Carlson, *The development and use of machine tools in historical perspective*. Journal of Economic Behavior and Organization, 5 (1984).
- [5] Maquinaria para carpintero. Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.maquinariaparacarpintero.com/es/p1/afiladoras-de-herramientas/maquinas-muelas-afiladoras/afiladora-universal-industrial-holzmann2>
- [6] *Brown and Sharpe manufacturing co. A treatise on the construction and use of universal and plain grinding machine*. Providence, 1891.
- [7] S. William, *History of Machine Tools*. Oxford University Press, Oxford, 1969.
- [8] DANOBAT. Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.danobat.com/en/bearings?region=GLOBAL&country=Global>
- [9] F. Colvin, F. Stanley. *American Machinist Grinding Book*. McGraw- Hill Book Company. New York. 1912.
- [10] D. Cardwell, *The Fontana History of Technology*. , Harper Collins. New York: 1984.
- [11] C. Urdangarin and F. Aldabaldetrecu, *Historia técnica y económica de la máquina-herramienta*, CAP. San Sebastian, 1982.
- [12] R. S. Woodbury. *History of the grinding machine*. The technology press. Massachusetts, 1958.
- [13] L. T. C. Rolt, *Tools for the job, a short history of machine tools*. B. T. BATSFORD LTD. Londres, 1965.

- [14] Codex Atlanticus. Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.codex-atlanticus.it/>
- [15] A. Patxi, Evolución técnica de la máquina-herramienta. Reseña histórica, *Metalmecánica.*, vol. III, no. Siglos de edición sobre máquina-herramienta, 2002.
- [16] Norton Abrasives. Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: <https://www.nortonabrasives.com/es-mx/nuestra-historia>
- [17] Grace's Guide to British Industrial History. Accessed: Jan. 05, 2024. [Online]. Available: https://www.gracesguide.co.uk/Main_Page
- [18] Rectificadoras cilíndricas universales Robbi Group. Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://robbigroup.com/es/rectificadora-de-ciguenales-rex-1200/>
- [19] Museo de la máquina herramienta - MAQUINARIA MADRID, S.A. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/view/14761678/museo-de-la-maquina-herramienta-maquinaria-madrid> Ultimo acceso: Diciembre, 2023.
- [20] C. O. Smith, *Norton Grinding Machine Bearings 1906*. Providence (USA). Patent No. Octubre 1906.
- [21] Industrial History. Accessed: Jan. 04, 2024. [Online]. Available: <https://industrialscenery.blogspot.com/>

Anexos

Anexo I. Patente

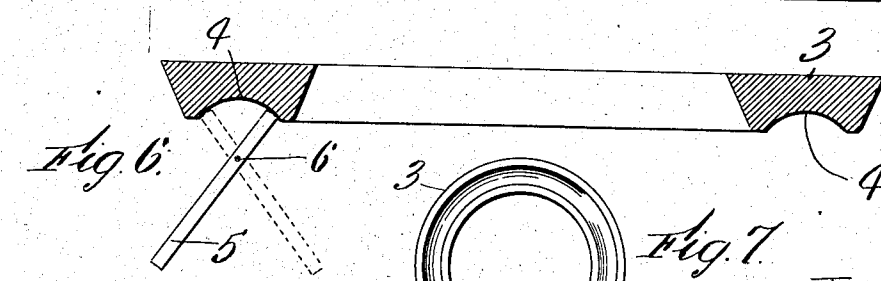
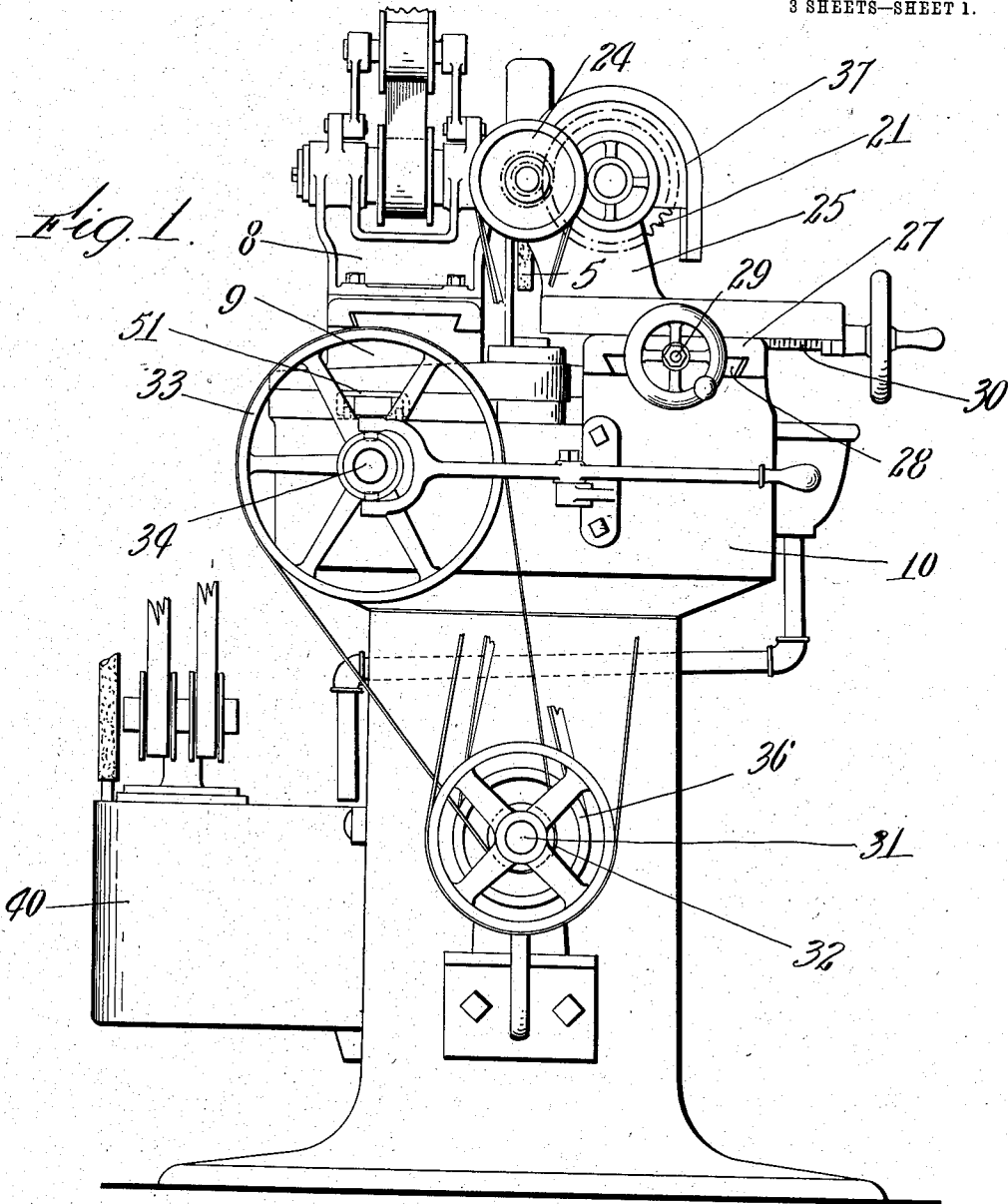
No. 839,080.

PATENTED DEC. 18, 1906.

C. O. SMITH.
GRINDING MACHINE.

APPLICATION FILED OCT. 31, 1904. RENEWED OCT. 22, 1906.

3 SHEETS—SHEET 1.



Witnesses:
C. F. Messon
M. P. Higgins

Fig. 7.
Inventor:
Clayton O. Smith
By his Attorney
Amuel Higgins.

No. 839,080.

PATENTED DEC. 18, 1906.

C. O. SMITH.
GRINDING MACHINE.

APPLICATION FILED OCT. 31, 1904. RENEWED OCT. 22, 1906.

3 SHEETS—SHEET 2.

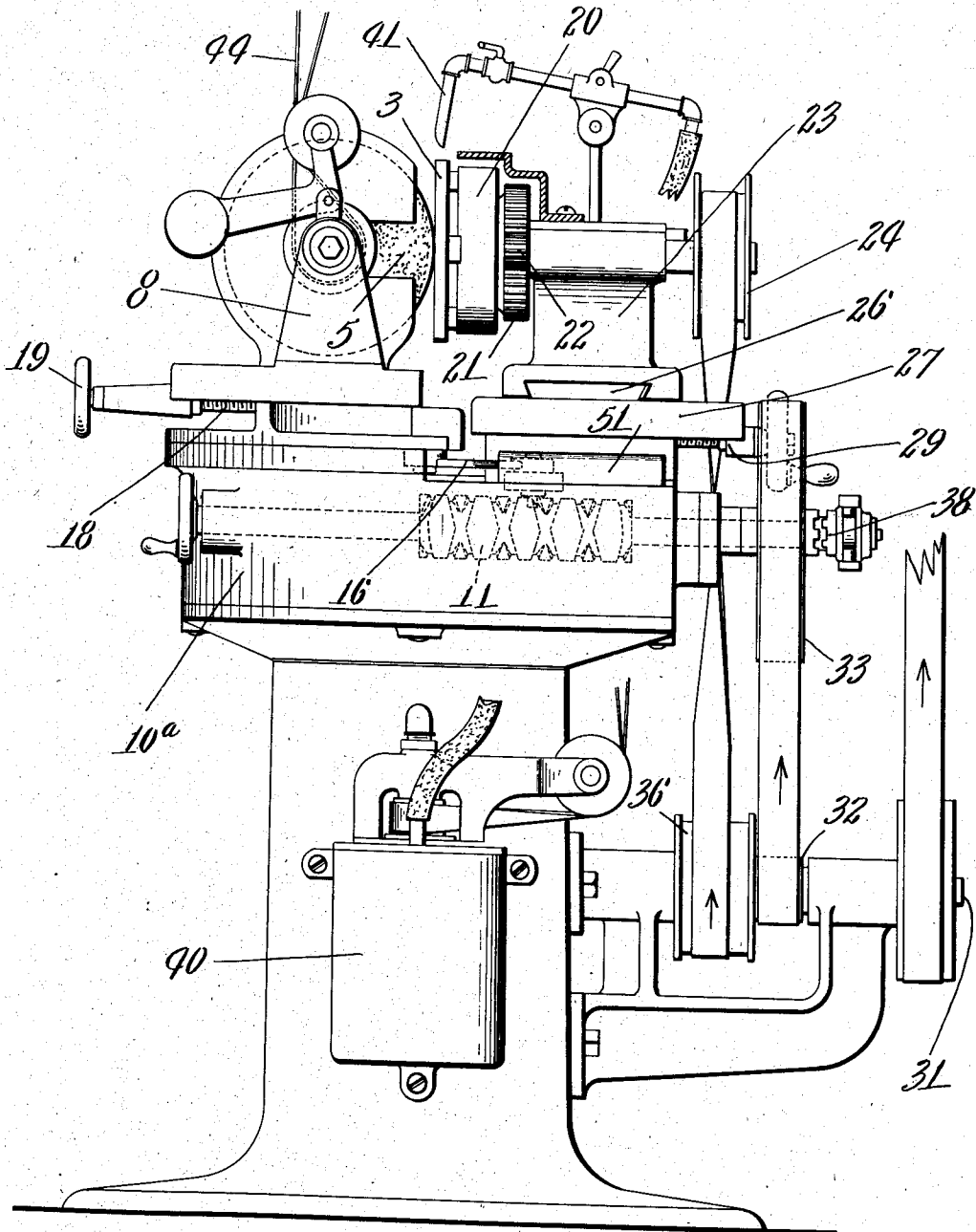


Fig. 2.

Witnesses:
C. F. Messou.
M. P. Higgins

Inventor:
Clayton O. Smith.
By his Attorney
A. M. Higgins.

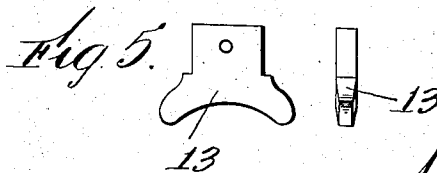
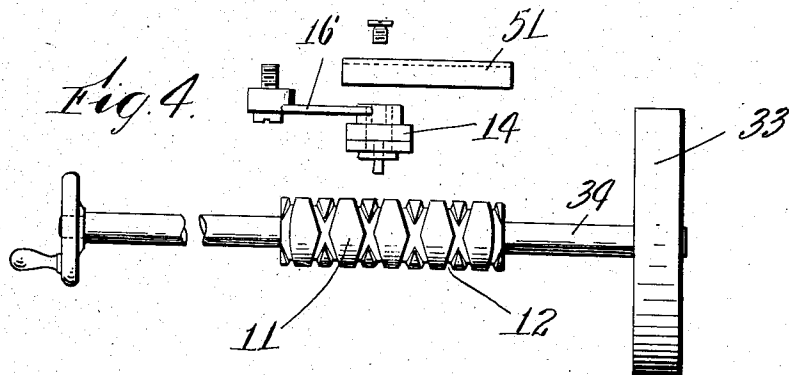
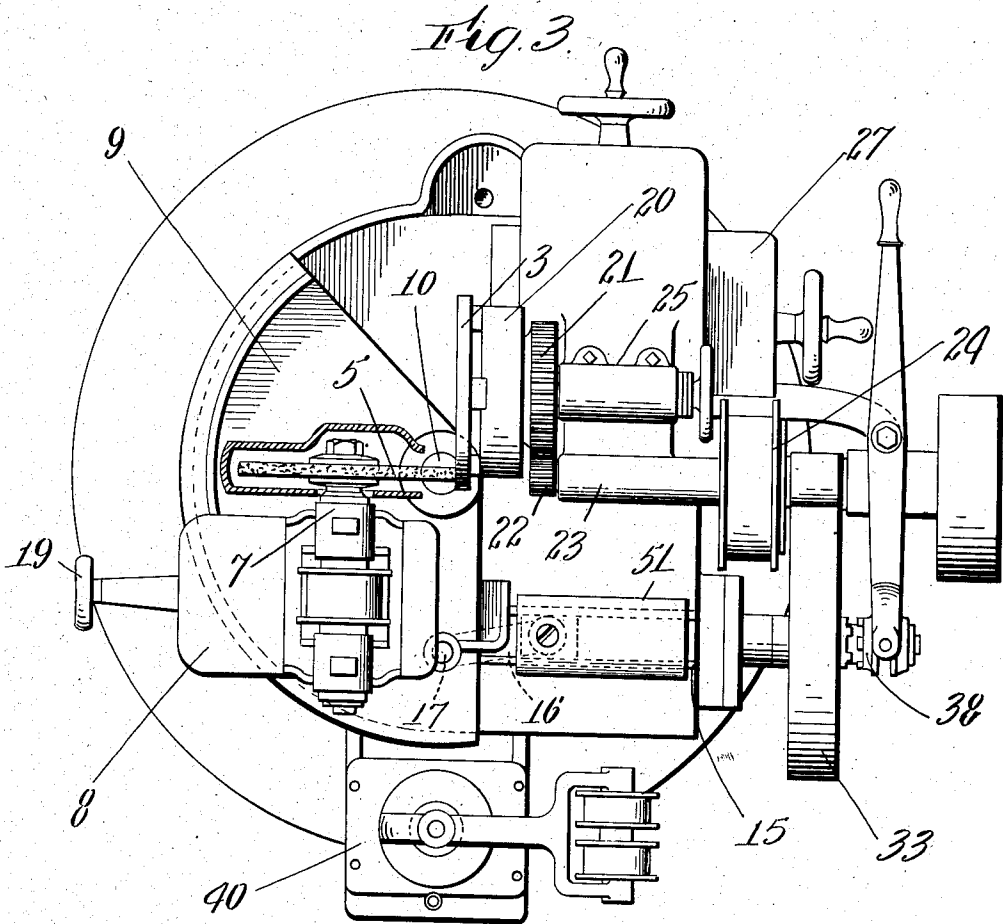
No. 839,080.

PATENTED DEC. 18, 1906.

C. O. SMITH.
GRINDING MACHINE.

APPLICATION FILED OCT. 31, 1904. RENEWED OCT. 22, 1906.

3 SHEETS—SHEET 3.



Witnesses:
C. F. Mason
M. P. Higgins

Inventor:
Clayton O. Smith
 By his Attorney
Edwin C. Higgins

UNITED STATES PATENT OFFICE.

CLAYTON O. SMITH, OF WORCESTER, MASSACHUSETTS, ASSIGNOR TO
NORTON EMERY WHEEL COMPANY, OF WORCESTER, MASSACHU-
SETTS.

GRINDING-MACHINE.

No. 839,080.

Specification of Letters Patent.

Patented Dec. 18, 1906.

Application filed October 31, 1904. Renewed October 22, 1906. Serial No. 340,072.

To all whom it may concern:

Be it known that I, CLAYTON O. SMITH, a citizen of the United States of America, and a resident of the city and county of Worcester, State of Massachusetts, have invented certain new and useful Improvements in Grinding-Machines, of which the following is a specification.

This invention relates to grinding-machines, and especially to machines for grinding ball-races in ball-bearings.

Heretofore, so far as I am aware, it has been customary to grind ball-races for the purpose of giving them their desired contour by means of a shaped emery or abrasive wheel—that is, an emery-wheel having a grinding-face of shape which it is desired to give to the ball-race. Another well-known method of securing the desired contour of the ball-race is to employ pattern guide-plates, by means of which devices governing the bodily movement of the grinding-wheel are led over the pattern and the grinding-wheel thereby bodily moved from one point to another of the surface to be ground. The first of these methods necessitates the repeated repairing or truing up of the grinding-wheel, as is obvious, while the second necessitates a useless and complex multiplicity of expensive parts which entail a constant expense for their renewal and repairs.

In the present invention I obviate both the necessity of requiring a shaped wheel for grinding ball-races and the use of pattern guide-slides by so mounting the abrasive wheel that the portion of the abrasive face thereof which engages the work can be moved in a curvilinear path while in contact with the work and at the same time that the wheel is rotating about its axis, the contour of the path corresponding to the cross-sectional contour of the ball-race.

In the preferred form of my invention I mount the abrasive wheel to swing about an axis having an angular relation to the axis about which said wheel rotates and provide means for oscillating the wheel about said axis during the grinding operation. This causes that portion of the abrasive face of said wheel which engages the work to swing back and forth in the arc of a circle, and by giving said wheel a rotary motion about its axis and at the same time the swinging motion above referred to the desired contour

may be given the ball-race without regard to the shape of the face of the wheel.

In the accompanying drawings, Figure 1 is a rear view of a machine embodying my invention. Fig. 2 is a side view thereof. Fig. 3 is a top plan view. Fig. 4 shows details of the traversing mechanism for the carriage which supports the abrasive wheel. Fig. 5 is a detail of the shoe forming a part of the traversing mechanism. Fig. 6 is a view showing the principle on which my invention operates. Fig. 7 is a front view of an annulus having a ball-race ground therein.

Referring first to Figs. 6 and 7, which show an annulus having a ball-race ground therein, 3 designates said annulus having a ball-race in one face thereof, said ball-race constituting the way in which the balls of a ball-bearing travel when this part is assembled with the other parts constituting said ball-bearing. It is necessary, of course, that the cross-sectional curvature of said ball-race should be a true arc of a circle, and to give said ball-race this desired contour I mount the emery or abrasive wheel, which is shown in edged view at 5, Fig. 6, so that said wheel can swing bodily about an axis having an angular relation to its axis of rotation. In this embodiment of my invention the axis about which the abrasive wheel swings bodily stands at right angles to the axis of rotation of said wheel, and in Fig. 6 is designated by the point 6, which point also coincides with the center of the arc of curvature of the ball-race 4. Referring to said Fig. 6, it will be obvious that if the abrasive wheel 5 is swung from the full-line position to the dotted-line position about the axis 6 at the same time that said wheel is rotated about its own axis the ball-race will be ground on the arc of a circle whose center is the point 6, regardless of the shape or contour of the face of the abrasive wheel.

In the embodiment of my invention shown in Figs. 1, 2, and 3, the abrasive wheel 5 is mounted in suitable bearings 7, carried by a wheel-stand 8; said stand in turn being supported by a carriage 9, suitably supported upon the frame 10^a of the machine to turn about the point 10 as an axis. The carriage 9 may be oscillated about its axis 10 by any suitable means, that herein shown comprising an endless screw 11, journaled in suitable bearings in the frame 10^a. Coöperating

with the groove 12 of said screw is a shoe 13, which is journaled in a block 14, mounted to slide in suitable ways 15 in the frame. Pivoted to said block 14 is a link 16, which is also pivotally connected with the carriage 9, as at 17. With this construction it will be obvious that rotation of the endless screw 11 will cause the shoe 13 to traverse back and forth in the groove 12, and the movement of said shoe through the link 16 will oscillate the carriage 9 about its axis 10. 51 designates a guard which is carried by the block 14 and operates as a cover for the guideway in which the block 14 moves. This form of traverse mechanism for the carriage is not essential, however, and any other suitable means for oscillating said carriage may be used without departing from the invention.

I prefer to adjustably mount the wheel-stand 8 upon the carriage 9, thereby making the machine capable of adjustment for grinding ball-race grooves of different sizes, as will be more fully explained hereinafter. The adjustment of the wheel-stand 8 upon the carriage may be effected in any suitable or usual way, as by an adjusting-screw 18, having a hand-wheel 19 thereon, by means of which said wheel-stand may be adjusted.

My improved machine also includes a suitable work-support on which is supported the piece or element in which the ball-race is to be ground. The particular construction of work-support may be varied according to the shape of the piece to be supported thereby. In the embodiment of my invention herein illustrated the work-support is adapted to sustain an annulus such as shown in Figs. 6 and 7, and it comprises a suitable chuck device 20 of any appropriate construction, adapted to hold said annulus 3. This chuck device is rigid therewith and is driven by a gear 21, meshing with a pinion 22 upon a shaft 23, said shaft having a driving-pulley 24 thereon and being mounted in suitable bearings in a stand 25. The work-holder is preferably adjustable both toward and from the abrasive wheel and laterally with respect thereto, and for this purpose I have mounted the stand 25 to slide on ways 26 on a carriage 27, and said carriage in turn is mounted to slide on suitable ways 28 on the main frame 10^a. The ways 26 28 are arranged at right angles to each other, thus permitting the work-holder to have the desired movement toward and from the abrasive wheel and also laterally thereof. Any suitable or usual adjusting-screws 29 and 30 are provided for adjusting the carriage 27 on its ways and the stand 25 on said carriage.

The shaft carrying the endless screw 11 and also the shaft 23 for driving the chuck device may be driven in any suitable way. As herein illustrated they are driven from the same power-shaft, and for this purpose said power-shaft, which is designated by 31,

has thereon a pulley 32, which is belted to a pulley 33, carried by the shaft 34, on which said endless screw 11 is mounted, and said power-shaft also has thereon another pulley 36, which is belted to and drives a pulley 37, fast on said shaft 23. I prefer to mount the pulley 33 loosely on the shaft 34 and to provide suitable clutch mechanism 38 for clutching said pulley to the shaft at the appropriate time. Any other way of driving the shafts 34 and 23 may be employed, however, without departing from my invention.

I have herein shown my machine as equipped with any suitable or usual pump mechanism 40 for delivering water through the pipe 41 to the abrasive wheel for keeping said wheel cool. The abrasive wheel may be driven in any suitable way, such as by means of belt 44, connected to some overhead shafting.

In grinding a ball-race in an annulus, such as shown in Figs. 6 and 7, said annulus is first clamped to the chuck device 20, and the face 48, in which the ball-race is to be ground, is trued up on the abrasive wheel by moving the stand 25 back and forth upon the ways 26 and at the same time rotating said chuck device. During this operation the clutch 38 is disengaged, and therefore the carriage 9 has no oscillatory movement, and the abrasive wheel may have any desired position, although I prefer to place it substantially in the position shown in Fig. 3. After the face 48 has been trued up the carriage 27 is adjusted so as to position said face a distance from the axis 10 equal to the length of radius of the curvature of the ball-race to be ground minus the depth of said ball-race. In practice these ball-races are usually ground to the depth of one-eighth of an inch, and therefore the work-support is adjusted so as to bring the face 48 a distance from said axis 10 equal to the radius of the curvature of the desired ball-race less one-eighth of an inch. Assuming that the ball-race is to be ground on an arc of a circle whose radius is three-quarters of an inch, the work-support will be adjusted to bring the face 48 three-quarters of an inch minus one-eighth of an inch, or five-eighths of an inch from the axis 10. The stand 25 is then adjusted upon the carriage 27 to move the annulus laterally to bring the face thereof opposite the abrasive wheel, and said abrasive wheel is then adjusted until the portion thereof which engages the work will be projected beyond the axis 10 a distance equal to the radius of curvature of the desired ball-race. The machine is then set into operation and the clutch 38 thrown into engagement. The rotation of the shaft 34 will cause the carriage 9, and consequently the abrasive wheel, to oscillate about the axis 10, and the rotation of the shaft 23 will cause the annulus to turn about its axis. These combined movements result in grinding the ball-

race to the desired curvature, as seen in Figs. 6 and 7, and this curvature is obtained without any regard to the exact contour of the face of the grinding-wheel. It is unnecessary, therefore, to be constantly truing the abrasive wheel, and the grinding operation can be proceeded with rapidly and with absolute certainty.

The principal feature of my invention is the mounting of the abrasive wheel so that it will swing bodily about an axis having an angular relation to its axis of rotation, thereby moving that portion of the abrasive face thereof in a curvilinear path corresponding to the curvilinear cross-section of the ball-race to be ground, and believing that I am the first to devise a machine having this feature I desire to claim it broadly. The particular manner of mounting the wheel so as to obtain this swinging movement, may be changed in various ways without departing from my invention. I would also remark that while the particular form of work-support illustrated is suitable for supporting an annulus in which a ball-race is to be ground, yet my invention is not limited to this construction, as the shape and details of the work-support will be varied to suit the shape and character of the work to be supported thereby.

Having described my invention, what I claim as new, and desire to secure by Letters Patent, is—

1. In a grinding-machine, an abrasive wheel and means to rotate said wheel simultaneously in two intersecting planes of rotation while the grinding portion of the wheel is engaging the work.

2. In a grinding-machine, an abrasive wheel and separate means for simultaneously rotating said wheel in two planes of rotation at right angles to each other while the operative portion of the wheel is in engagement with the work.

3. In a grinding-machine, an adjustably-mounted abrasive wheel, rotating means therefor, and means to shift the position of the wheel pivotally while in contact with the work, thereby moving the portion of the wheel which engages the work in a curvilinear path.

4. In a grinding-machine, an abrasive wheel, rotating means therefor, and means to swing said wheel about an axis having an angular relation to its axis of rotation while the wheel is engaging the work.

5. In a grinding-machine, an abrasive wheel, rotating means therefor, means to swing said wheel about an axis having an angular relation to its axis of rotation while said wheel engages the work and means to adjust said wheel relatively to the axis about which it swings.

6. In a grinding-machine, an abrasive wheel, rotating means therefor, and means to

swing said wheel about an axis at right angles to its axis of rotation while the wheel engages the work.

7. In a grinding-machine, an abrasive wheel, rotating means therefor, means to swing said wheel bodily about an axis having an angular relation to its axis of rotation while the wheel is in engagement with the work and means to adjust said wheel toward and from the axis about which it swings.

8. In a grinding-machine, a carriage mounted to swing in the arc of a circle, means for oscillating said carriage, and an abrasive wheel mounted on said carriage to oscillate therewith, the oscillation of the carriage moving the portion of the face of said wheel which engages the work in an arc of a circle while the wheel portion is in such engagement.

9. In a grinding-machine, a carriage, an abrasive wheel adjustably mounted upon said carriage and means to move said carriage in a curvilinear path while said abrasive wheel is in engagement with the work.

10. In a grinding-machine, an oscillating carriage mounted to swing about an axis, an abrasive wheel mounted on the carriage and adapted to engage the work under operation while said carriage is being oscillated means to adjust said wheel with relation to the carriage toward and from the axis of oscillation of the carriage, and rotating means for the wheel.

11. In a grinding-machine, a carriage adapted to oscillate about an axis of oscillation, means to oscillate said carriage, said means including an endless screw, an abrasive wheel mounted on the carriage and rotating about an axis which has an angular relation to the axis of oscillation, and rotating means for said wheel.

12. In a grinding-machine, an abrasive wheel, means to rotate said wheel, means to swing said wheel about an axis having an angular relation to its axis of rotation while said wheel is in engagement with the work under operation a work-holder, and means for moving the same to advance the work with reference to the abrasive wheel.

13. In a grinding-machine, a work-holder, an abrasive wheel, means to give the work-holder and abrasive wheel a relative movement, and means to swing said wheel about an axis having an angular relation to its axis of rotation during the time that the wheel is in engagement with the work.

14. In a grinding-machine, work-support, an abrasive wheel, rotating means for said wheel, and means to swing said wheel while in engagement with the work about an axis extending parallel to the face of the work on which said wheel is operating.

15. In a grinding-machine, an abrasive wheel, rotating means therefor, means to swing the wheel bodily about an axis having

an angular relation to its axis of rotation while the operating portion of the wheel is in engagement with the work a work-support, and means to adjust said work-support both toward and from said first-named axis, and laterally with respect thereto.

16. In a grinding-machine, a rotating work-holder, means for rotating said work-holder, an abrasive wheel, rotating means therefor, and means to swing said wheel about an axis having an angular relation to the axis of rotation of the work-holder while the said abrasive wheel is engaging the work.

17. In a grinding-machine, a rotating work-holder, means to rotate said work-holder, an abrasive wheel, rotating means therefor, and means to swing said wheel while in contact with the work about an axis at right angles to the axis of rotation of the work-holder.

Signed by me at Worcester, Massachusetts, this 26th day of October, 1904.

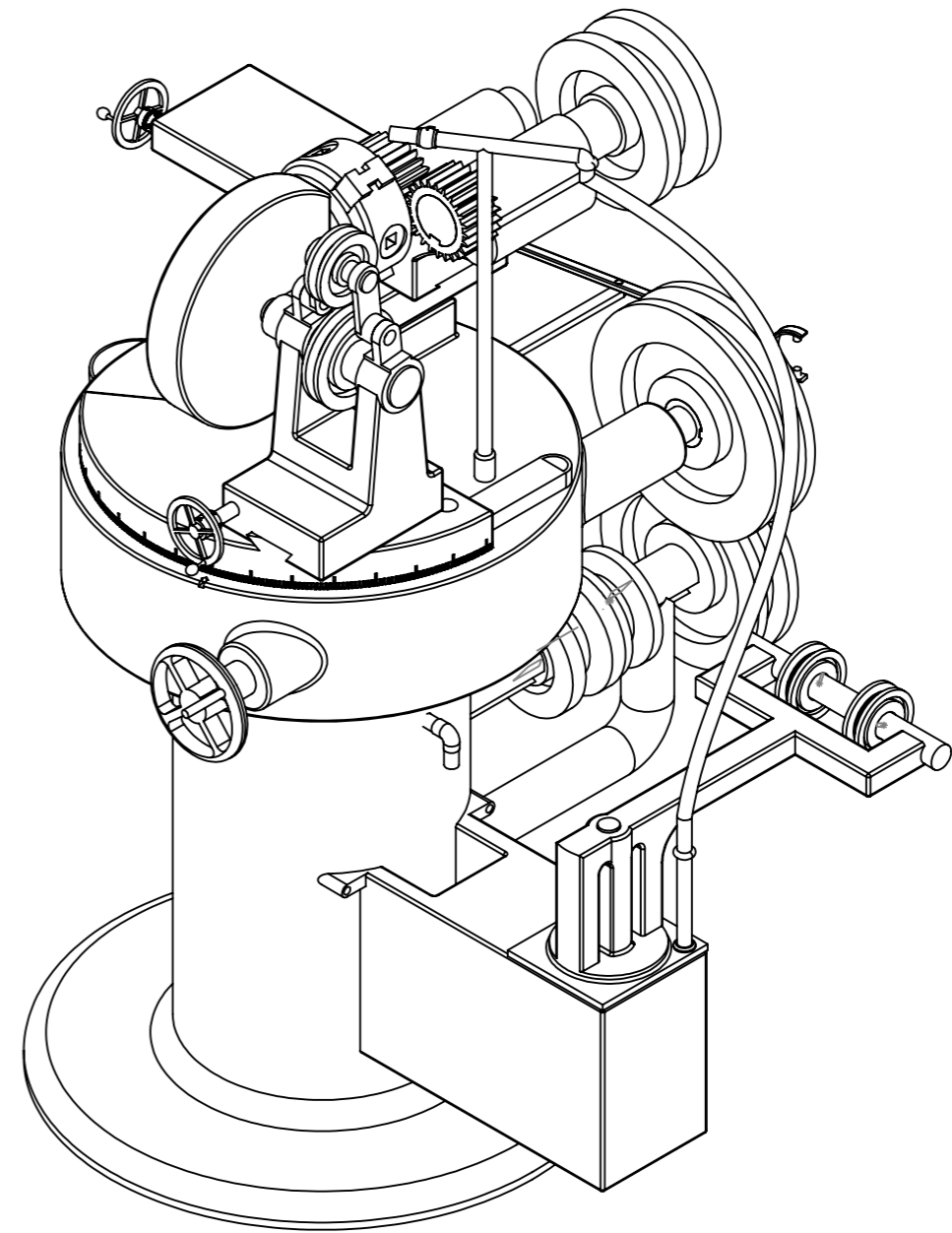
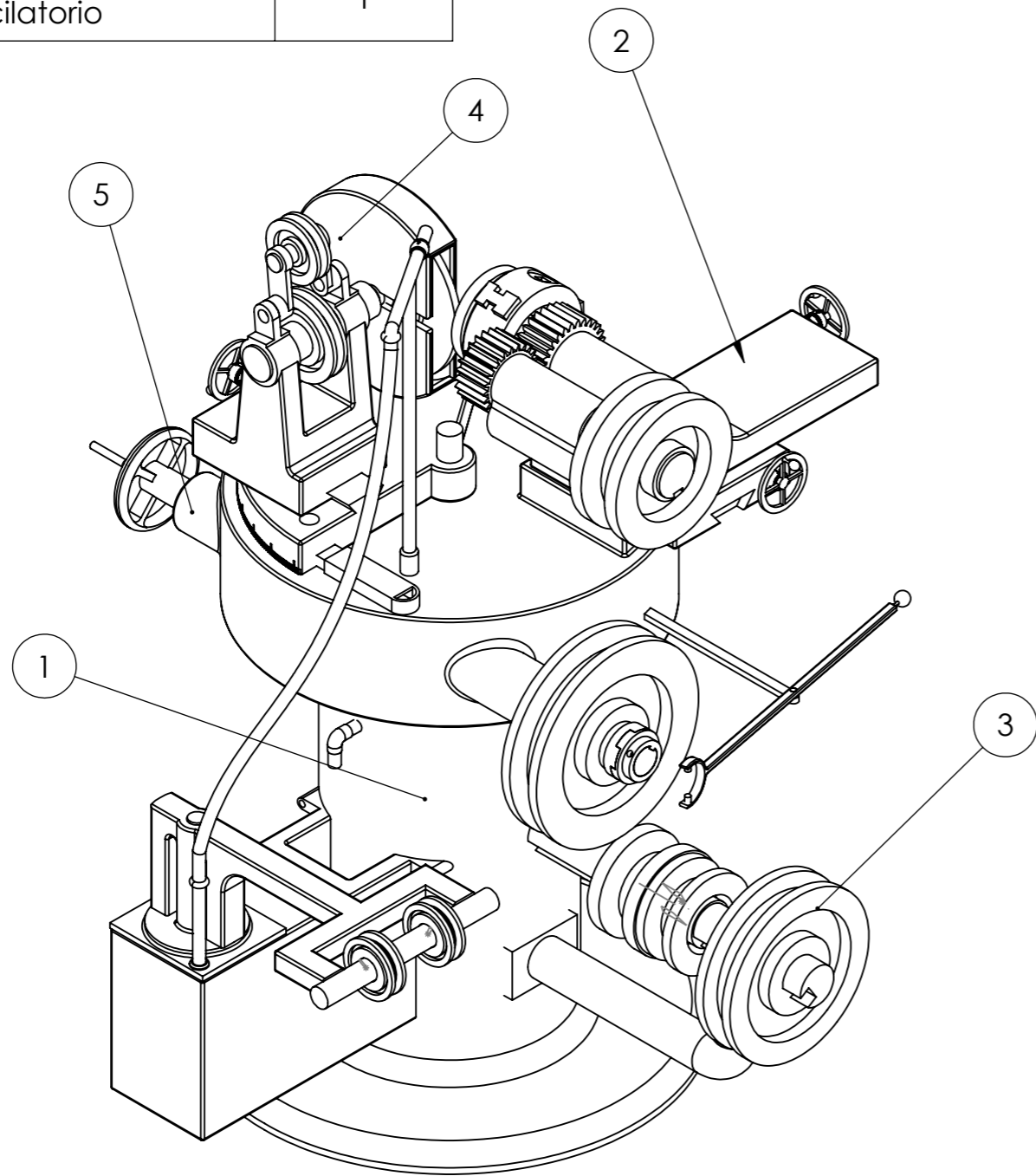
CLAYTON O. SMITH.

Witnesses:

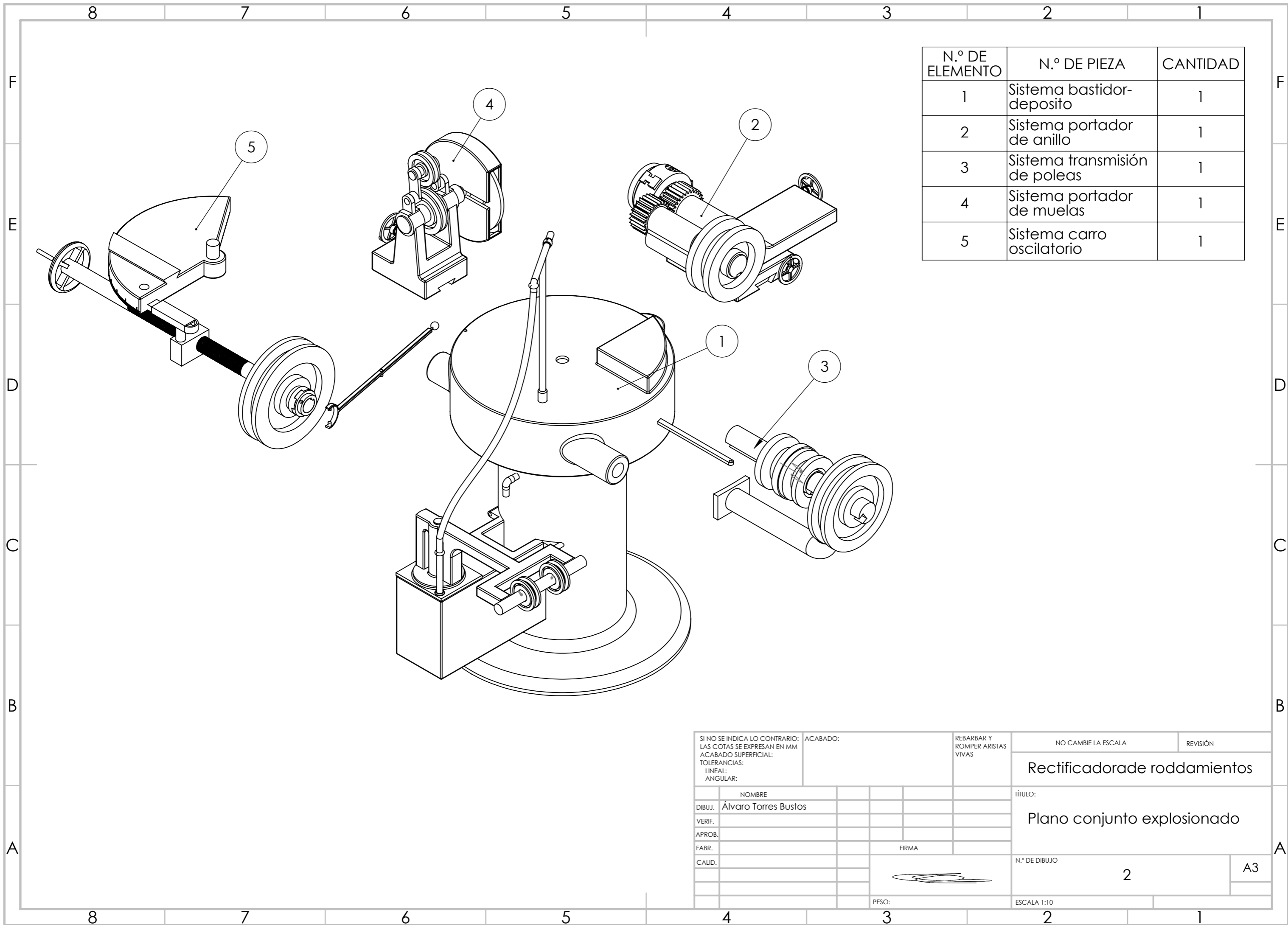
F. H. LINCOLN,
JOHN C. HILBURN.

Anexo II. Planos

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Sistema bastidor-deposito	1
2	Sistema portador de anillo	1
3	Sistema transmisión de poleas	1
4	Sistema portador de muelas	1
5	Sistema carro oscilatorio	1

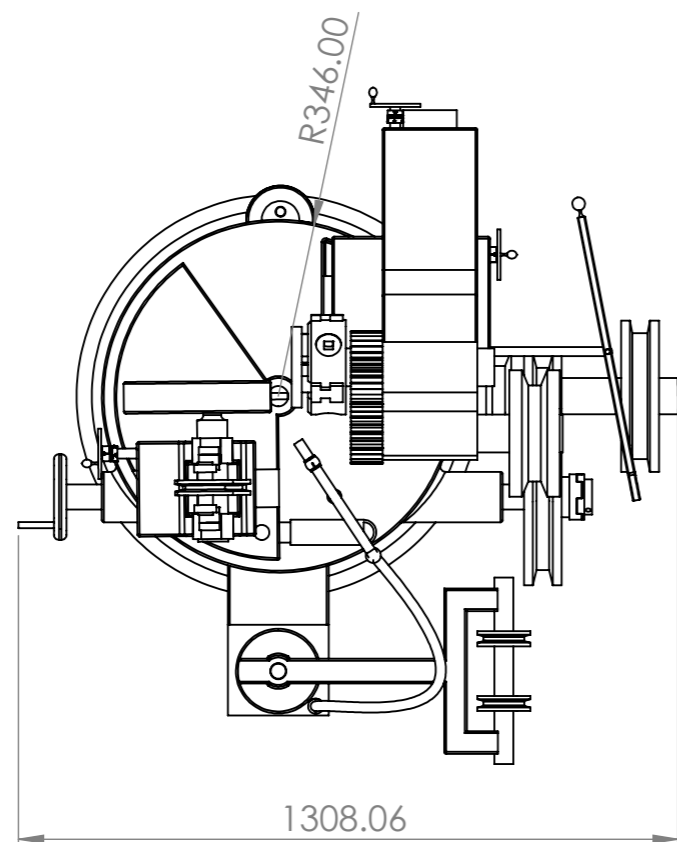
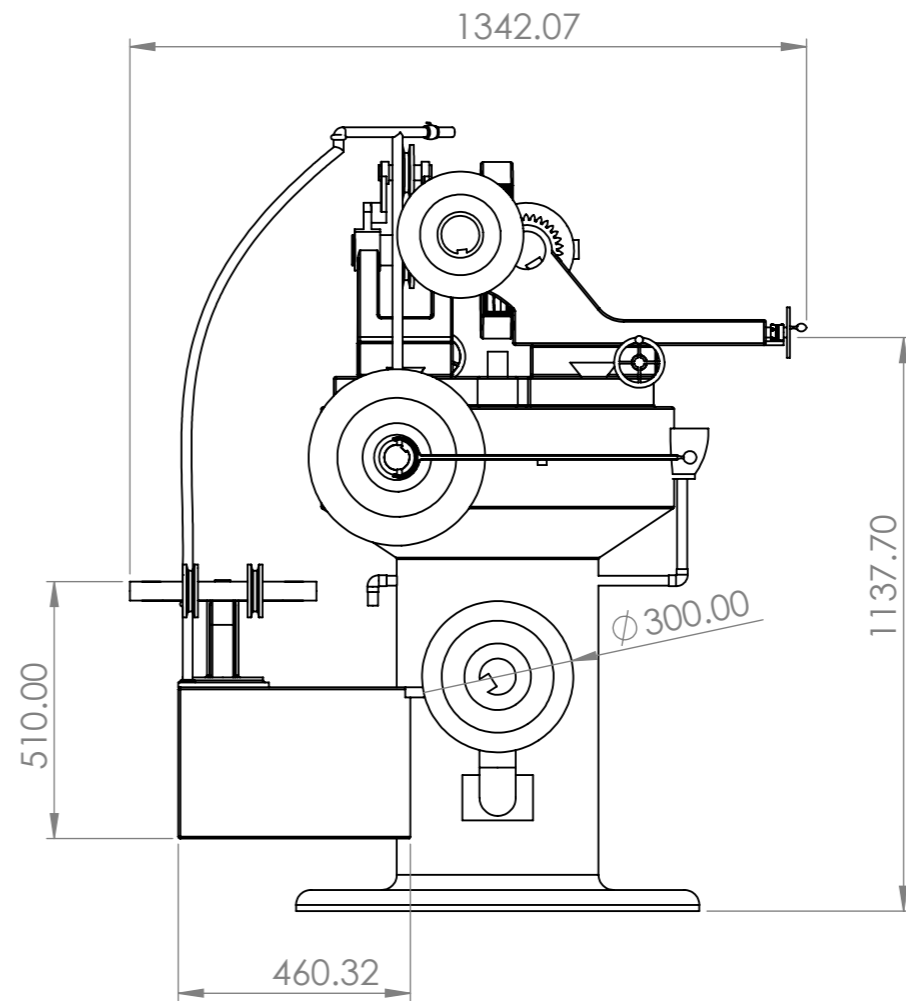
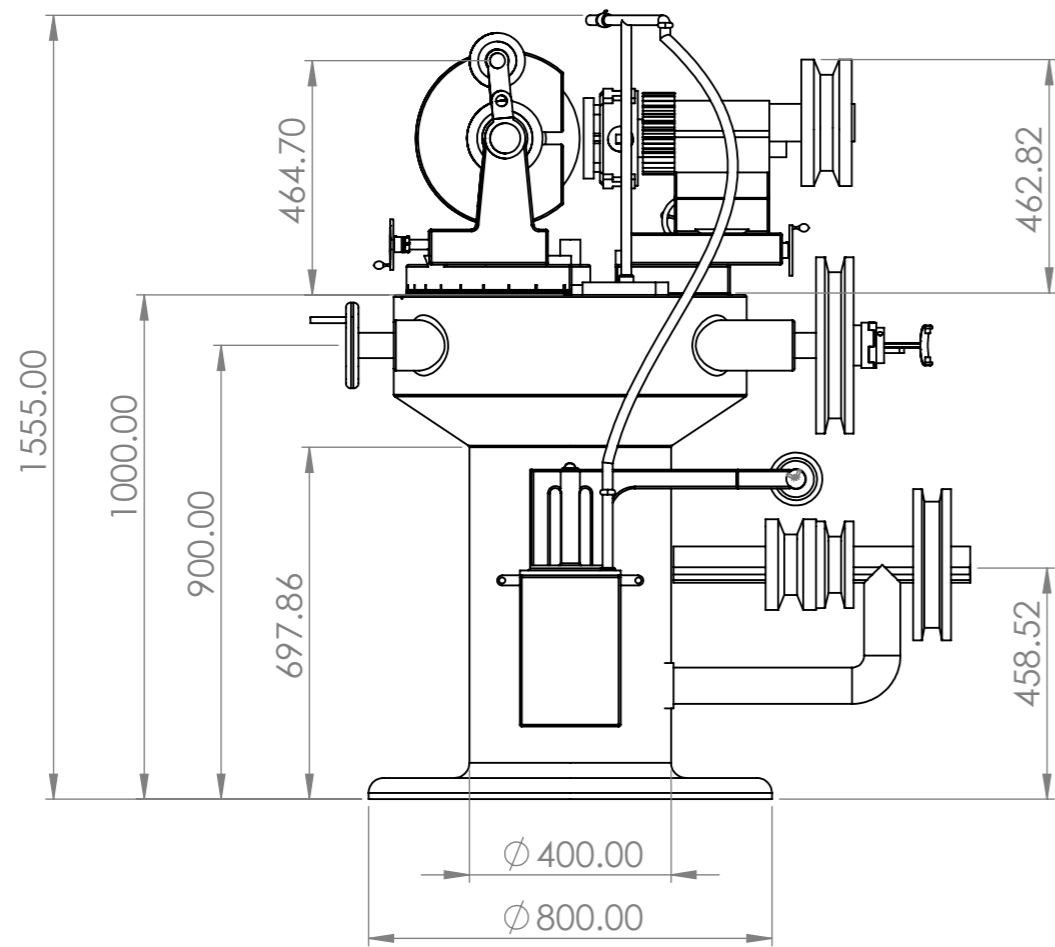


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			TÍTULO:		
DIBUJ. Álvaro Torres Bustos			Rectificadora de rodamientos Plano de conjunto		
VERIF.	FIRMA		N.º DE DIBUJO		A3
APROB.	PESO:		1		
FABR.	ESCALA 1:10				
CALID.					



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Sistema bastidor-deposito	1
2	Sistema portador de anillo	1
3	Sistema transmisión de poleas	1
4	Sistema portador de muelas	1
5	Sistema carro oscilatorio	1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			TÍTULO:		
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos		Rectificador de rodamientos		
VERIF.			Plano conjunto explosionado		
APROB.			N.º DE DIBUJO		
FABR.			2		A3
CALID.			ESCALA 1:10		
PESO:					

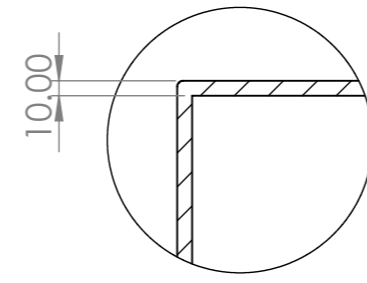
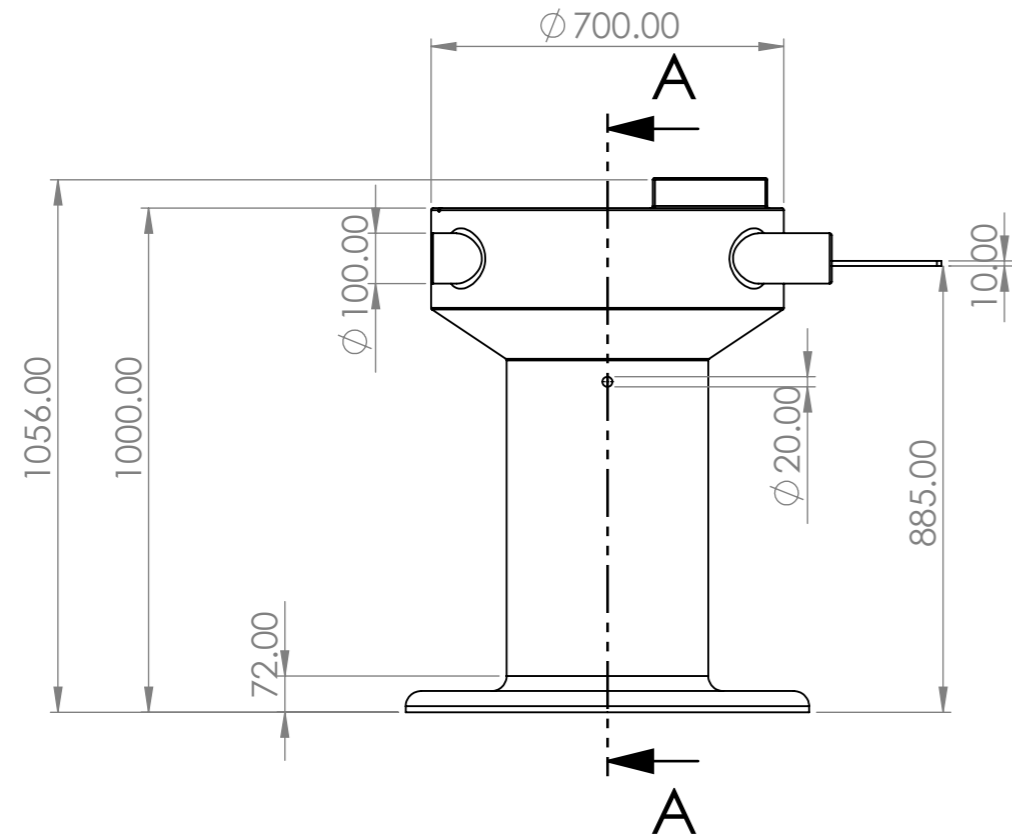


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			TÍTULO:		
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos		Rectificadora de Rodamientos		
VERIF.			Plano dimensiones generales		
APROB.			N.º DE DIBUJO		
FABR.			3		A3
CALID.			ESCALA 1:15		
PESO:					

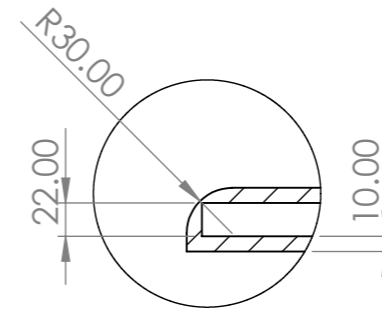
FIRMA

PESO:

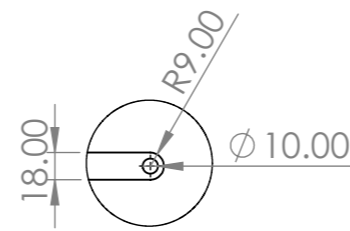
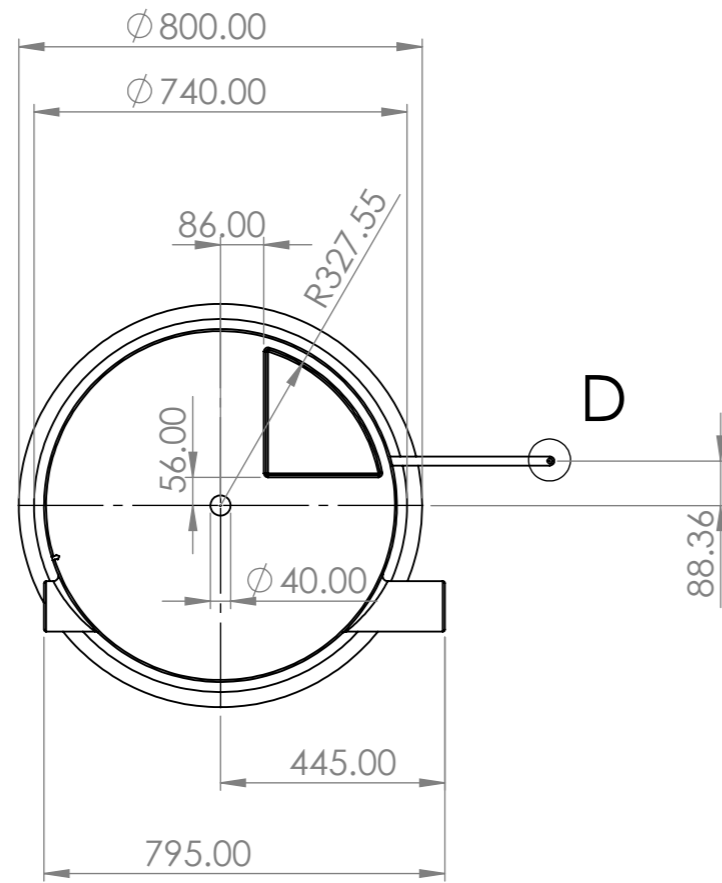
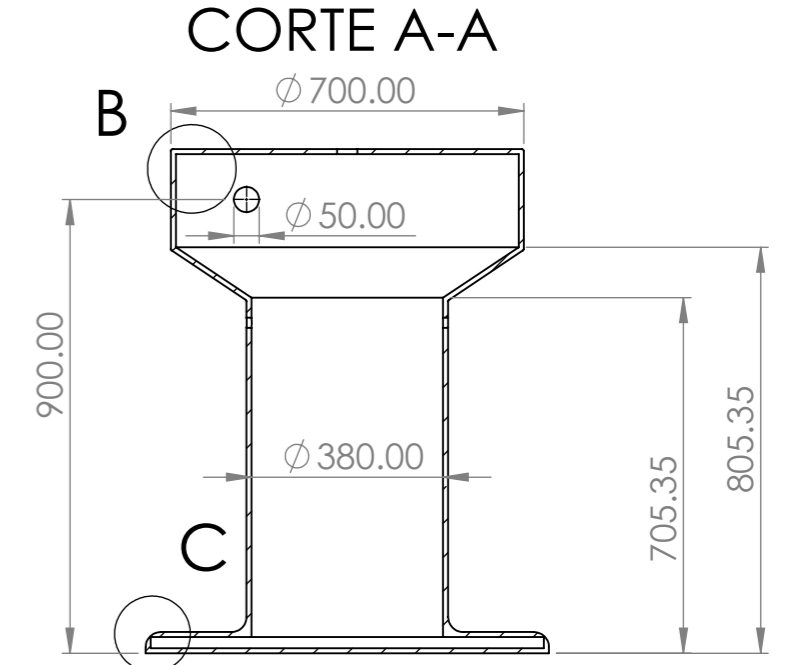
ESCALA 1:15



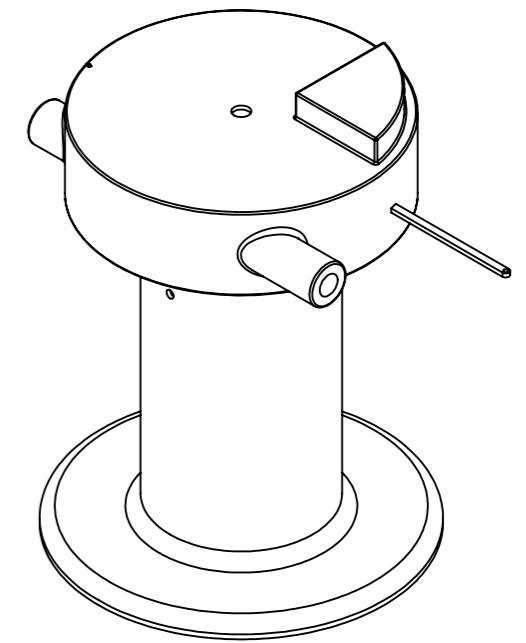
DETALLE B
ESCALA 1:5



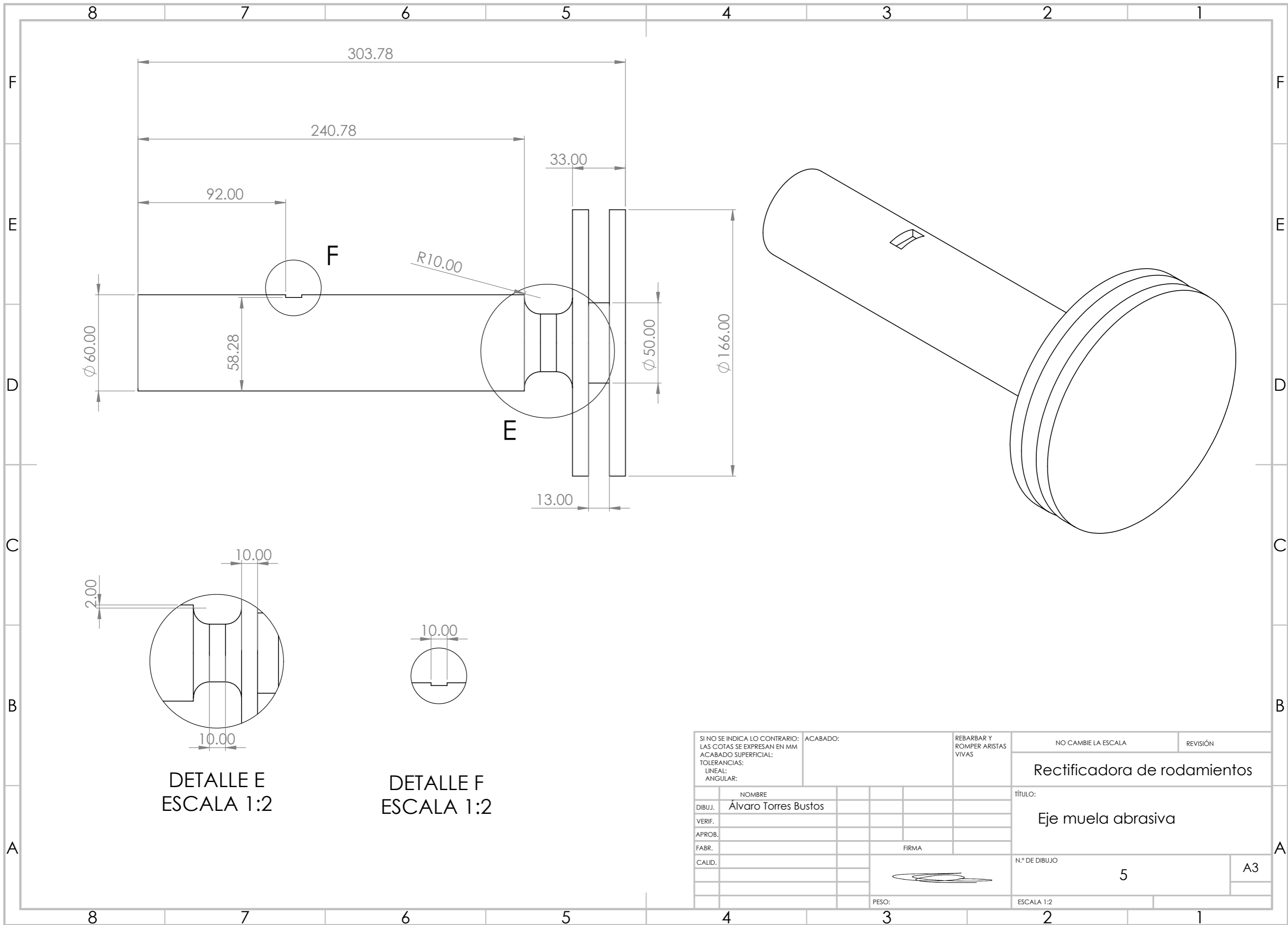
DETALLE C
ESCALA 1:5



DETALLE D
ESCALA 1:5



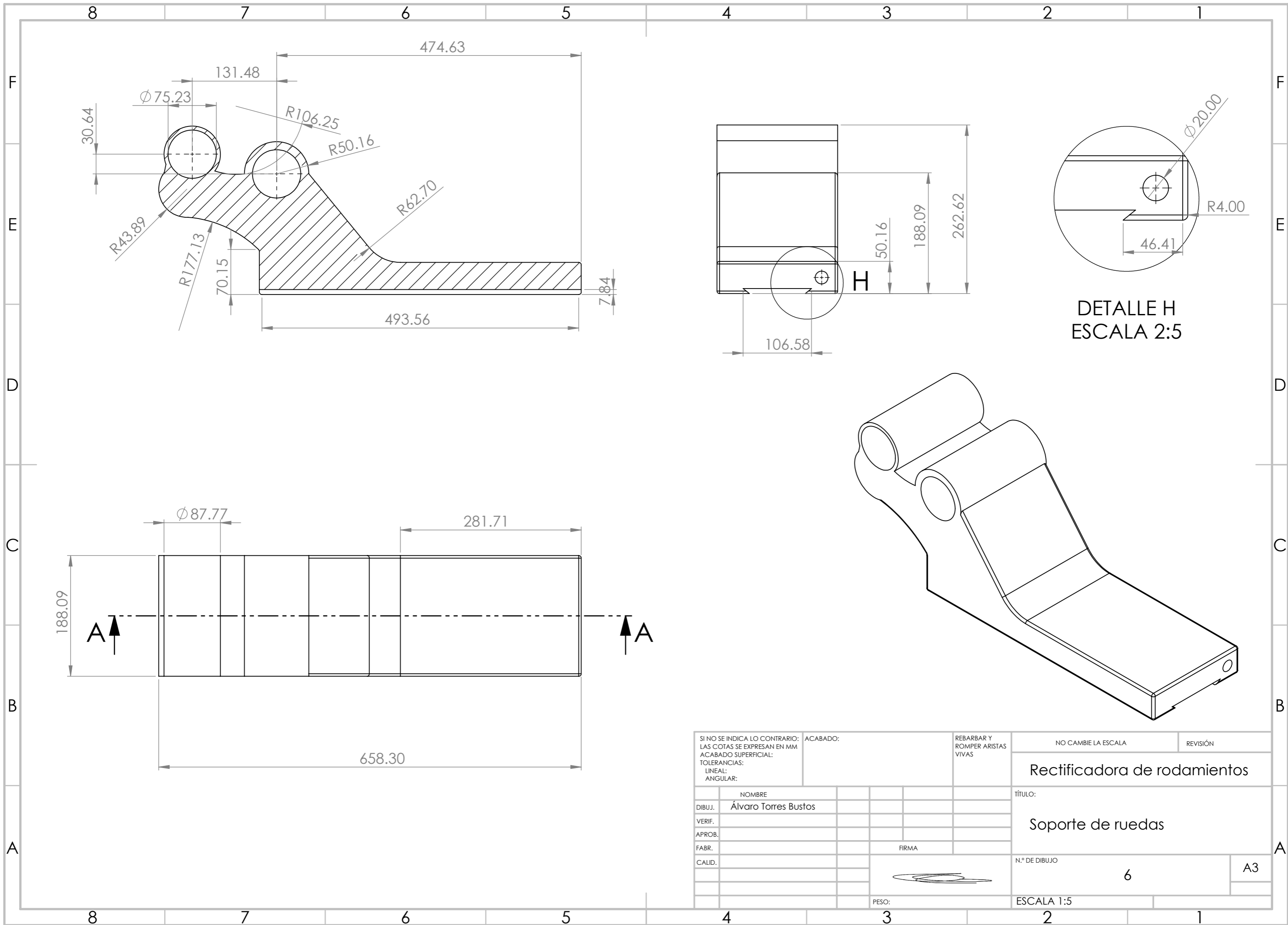
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE Álvaro Torres Bustos				TÍTULO: Rectificadora de rodamientos	
DIBUJ. VERIF. APROB. FABR. CALID.				Bastidor	
FIRMA			N.º DE DIBUJO	4	A3
PESO:			ESCALA 1:15		



DETALLE E
ESCALA 1:2

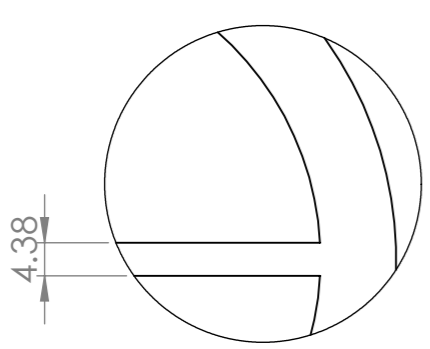
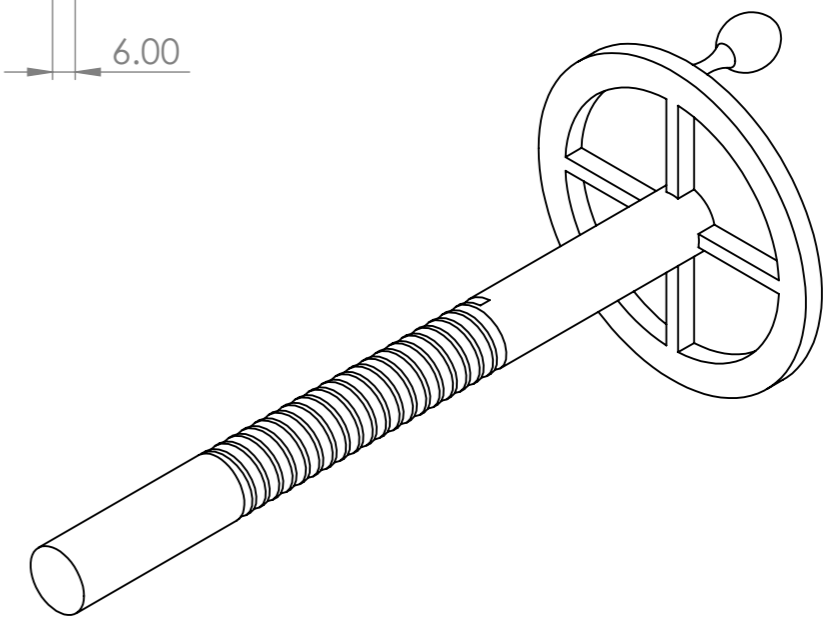
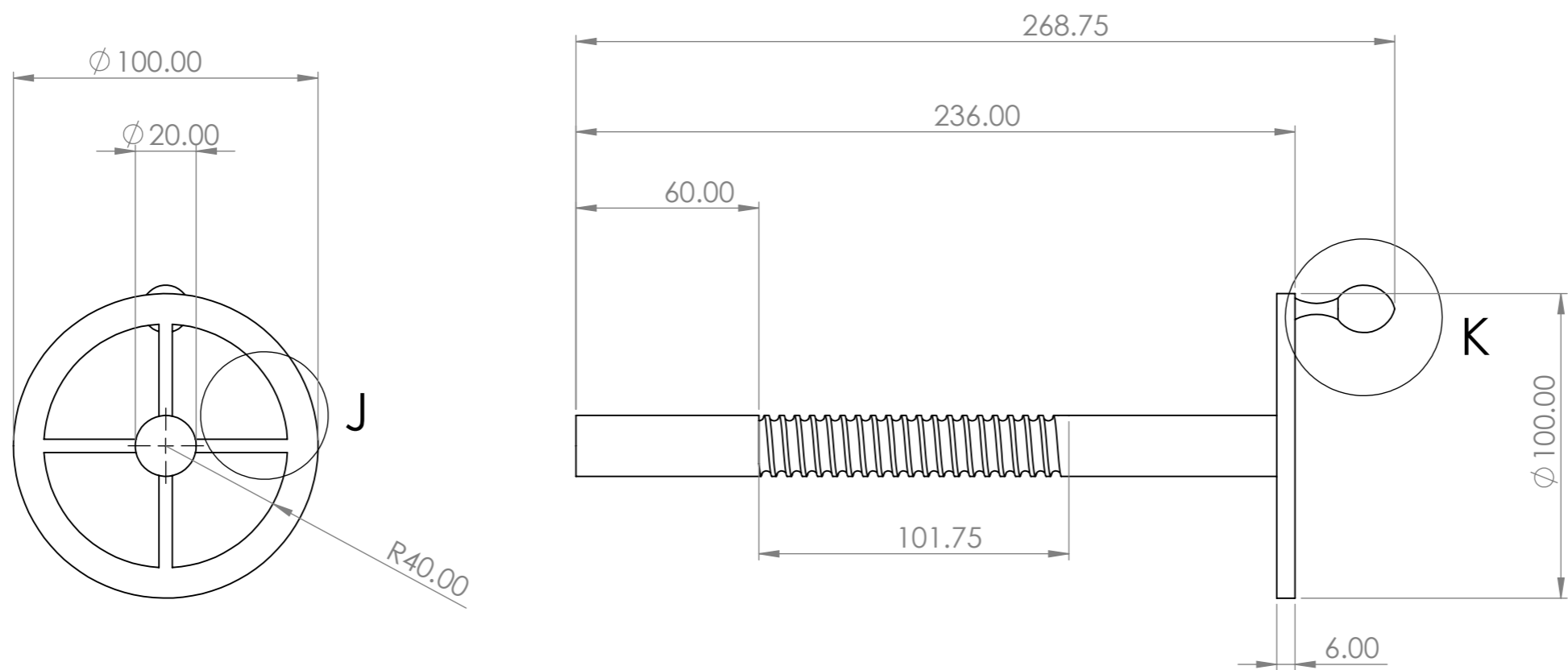
DETALLE F
ESCALA 1:2

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			TÍTULO:		
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos		Rectificadora de rodamientos		
VERIF.			Eje muela abrasiva		
APROB.			N.º DE DIBUJO		
FABR.	FIRMA		5		A3
CALID.			ESCALA 1:2		
PESO:					

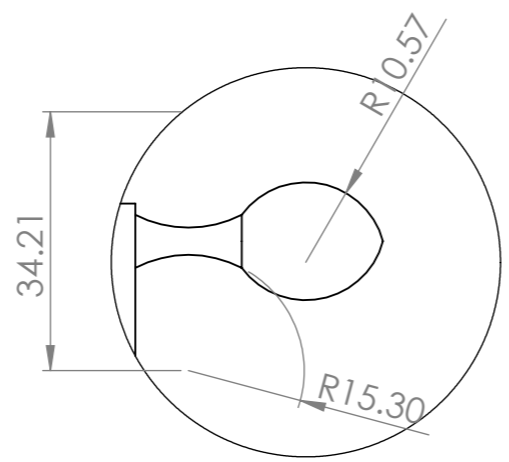


DETALLE H
ESCALA 2:5

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Rectificadora de rodamientos	
NOMBRE				TÍTULO:	
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos			Soporte de ruedas	
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.	FIRMA			N.º DE DIBUJO	
			6		A3
PESO:			ESCALA 1:5		

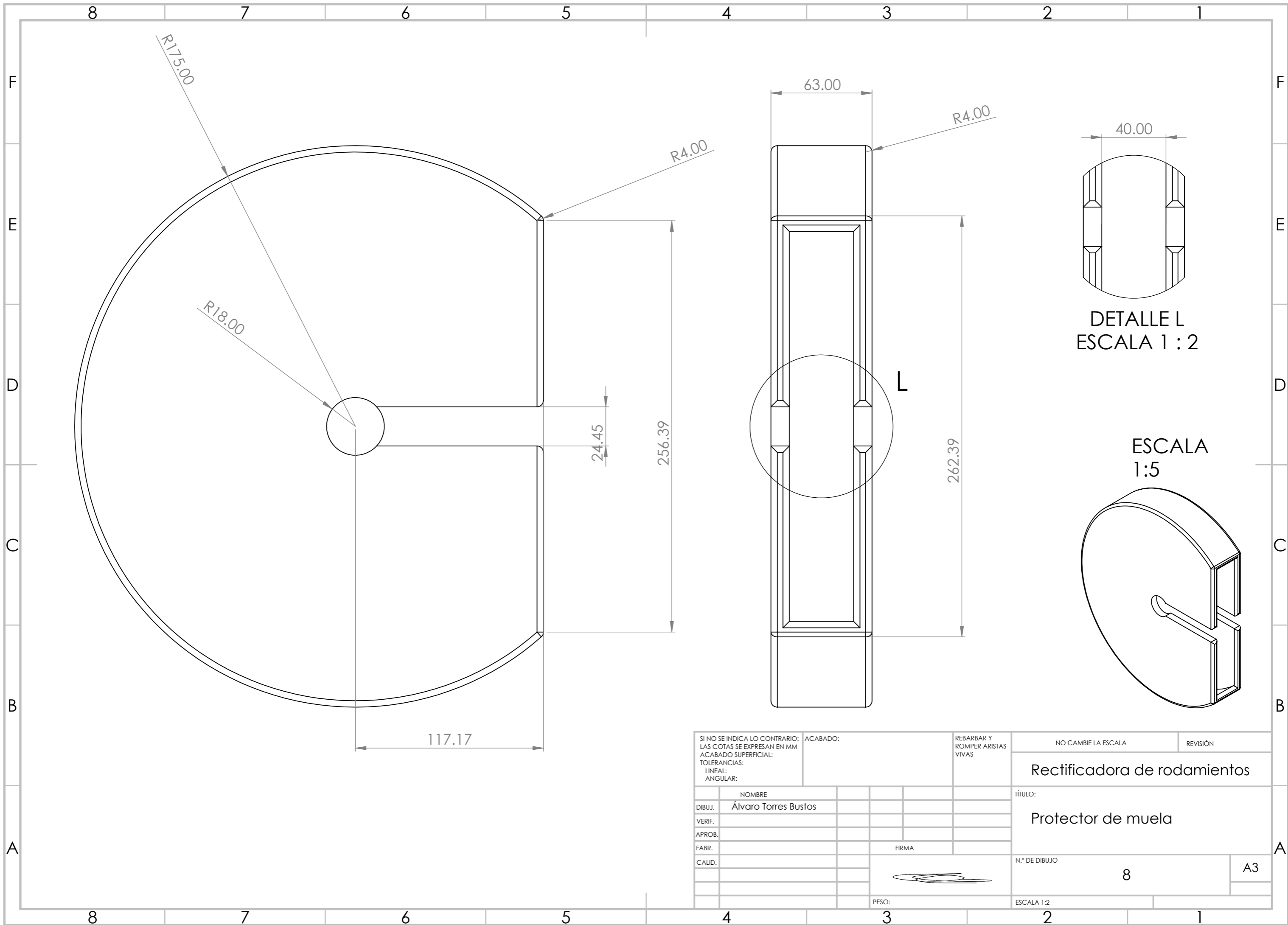


DETALLE J
ESCALA 1:1



DETALLE K
ESCALA 1:1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Rectificadora de rodamientos	
				TÍTULO: Volante y tornillo sinfín	
NOMBRE		FIRMA		N.º DE DIBUJO	
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos			7	
VERIF.				A3	
APROB.				ESCALA 1:2	
FABR.					
CALID.					
PESO:					

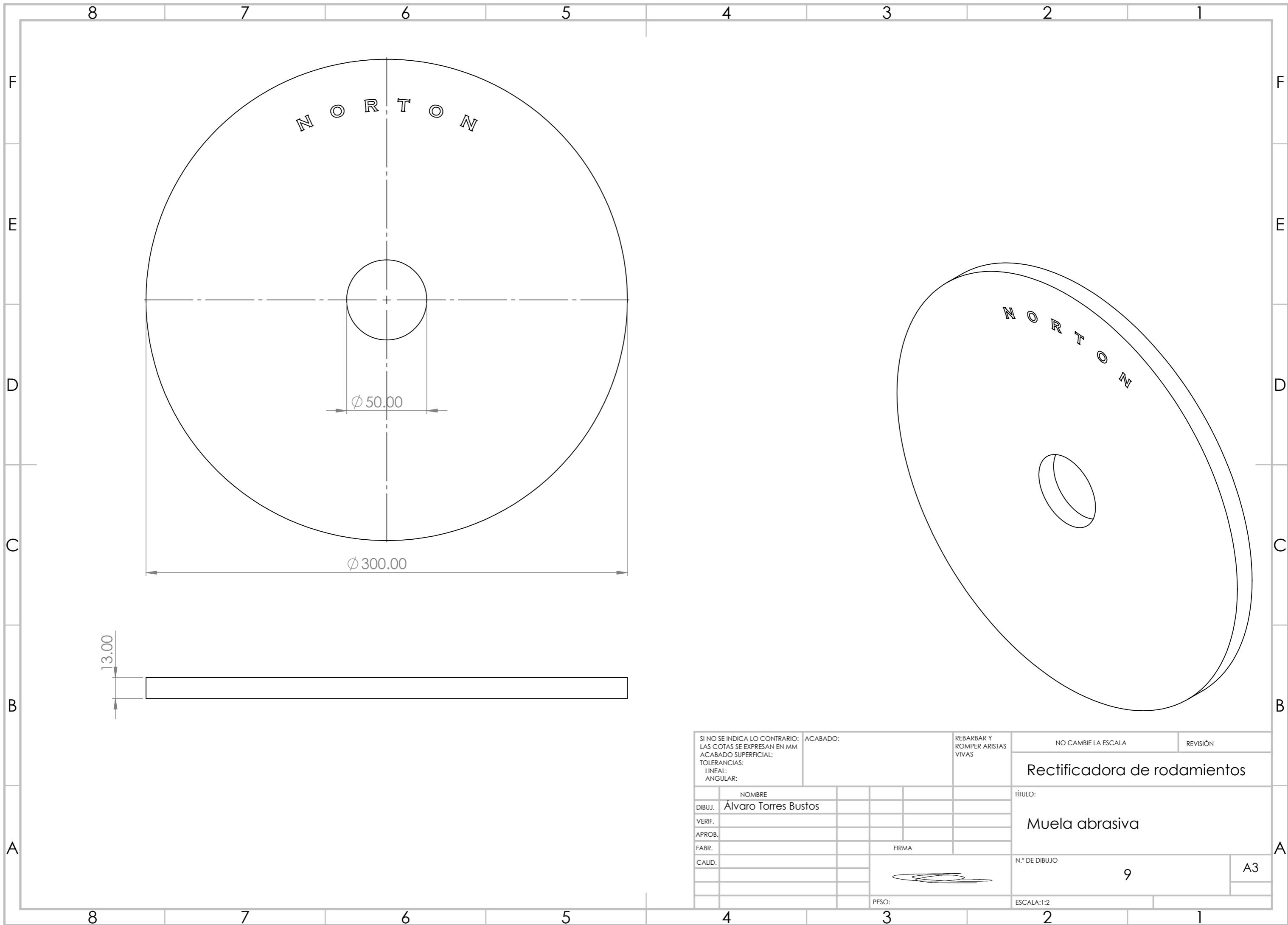


DETALLE L
ESCALA 1 : 2

ESCALA
1:5

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE				TÍTULO:	
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos		Rectificadora de rodamientos		
VERIF.			Protector de muela		
APROB.			N.º DE DIBUJO		
FABR.			8		
CALID.			A3		
PESO:			ESCALA 1:2		

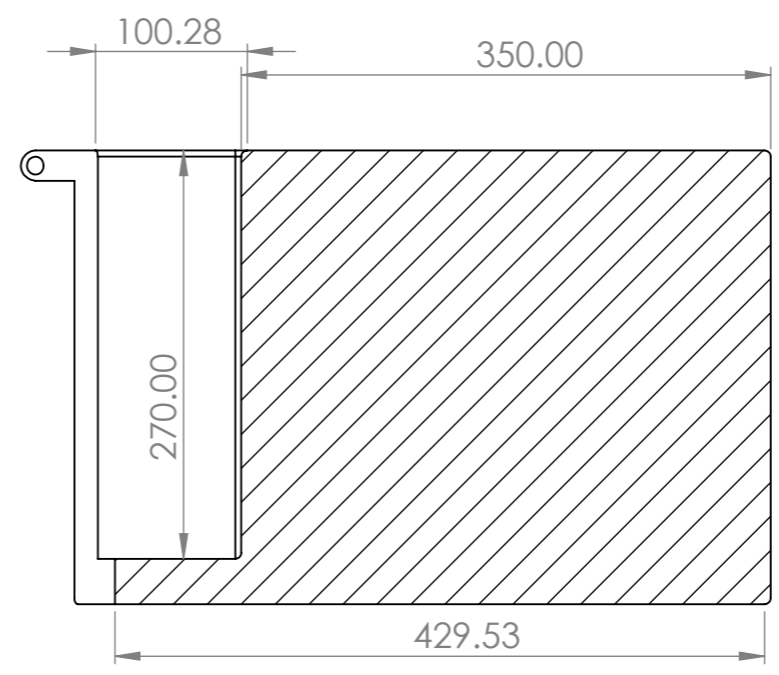
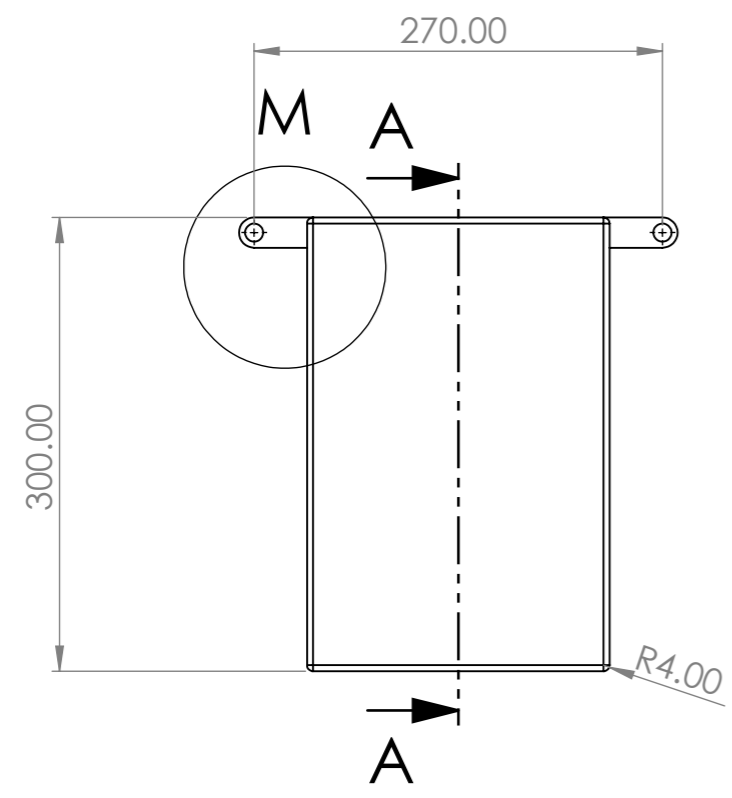
[Handwritten signature]



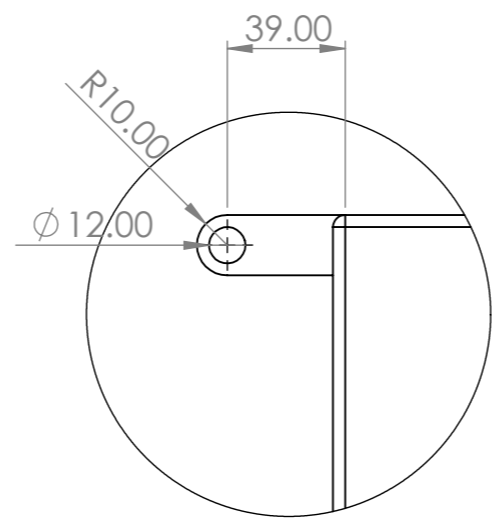
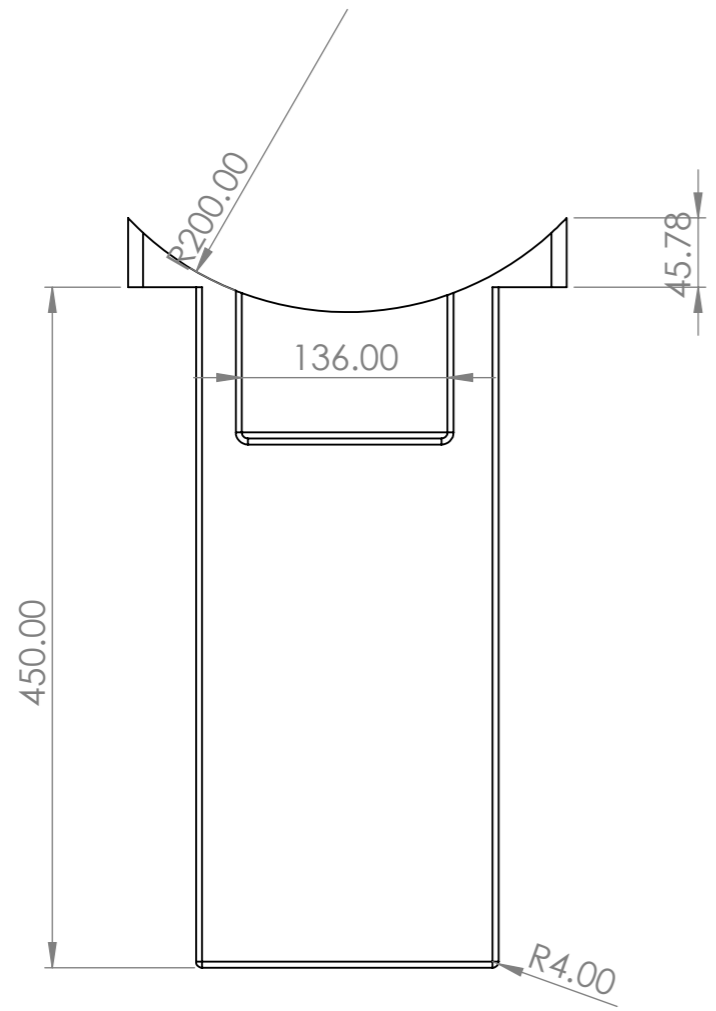
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Rectificadora de rodamientos	
NOMBRE				TÍTULO:	
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos			Muela abrasiva	
VERIF.					
APROB.					
FABR.				FIRMA	
CALID.				N.º DE DIBUJO	
			9		A3
			PESO:	ESCALA:1:2	

8 7 6 5 4 3 2 1

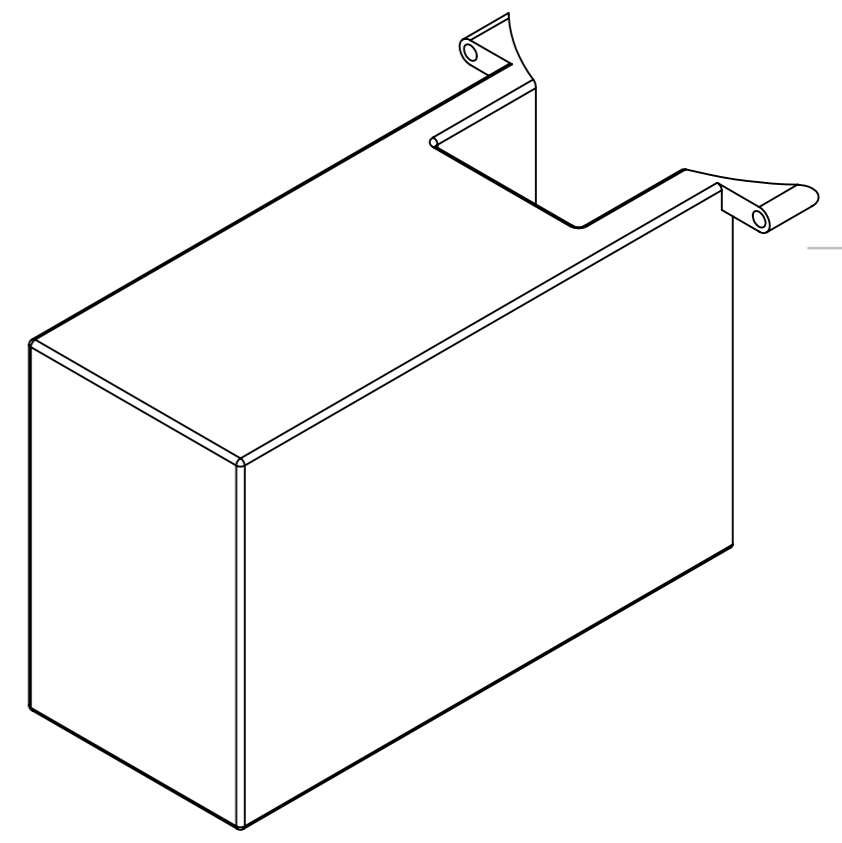
F
E
D
C
B
A



CORTE A-A



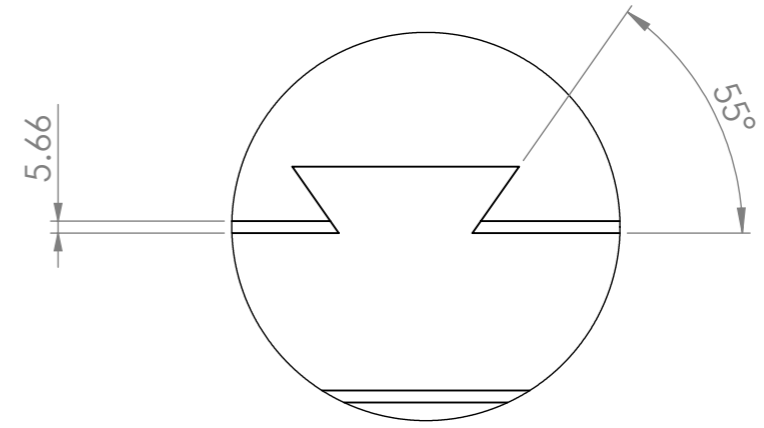
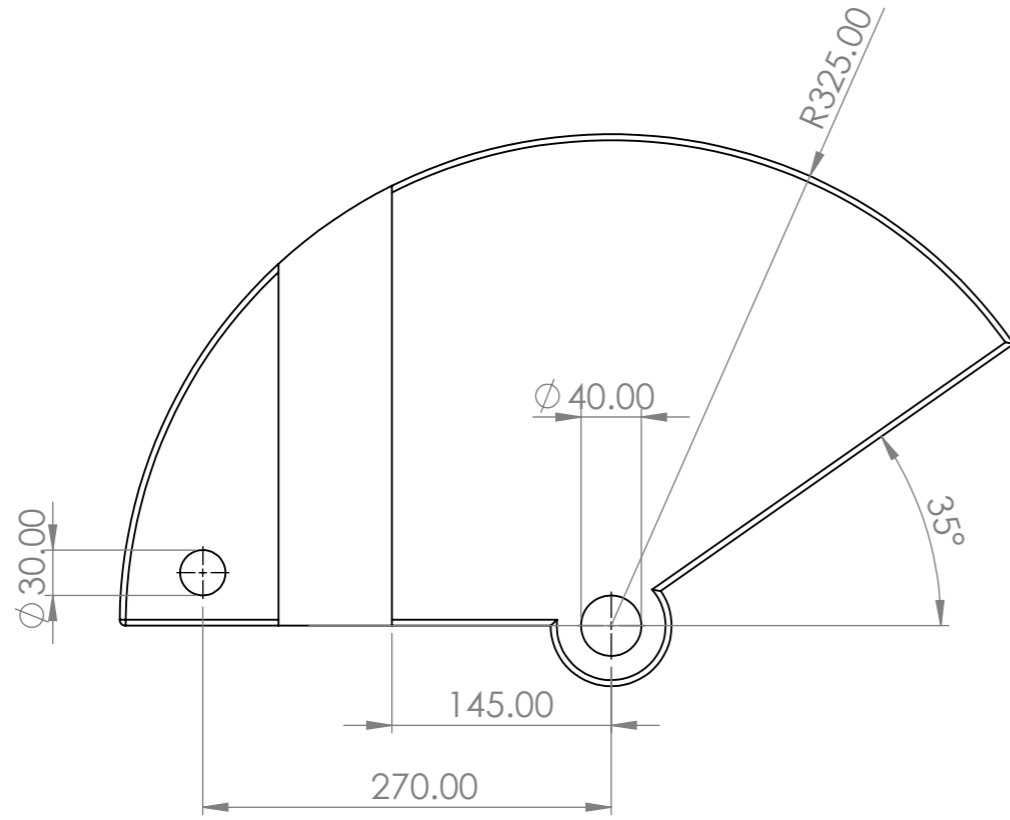
DETALLE M
ESCALA 2 : 5



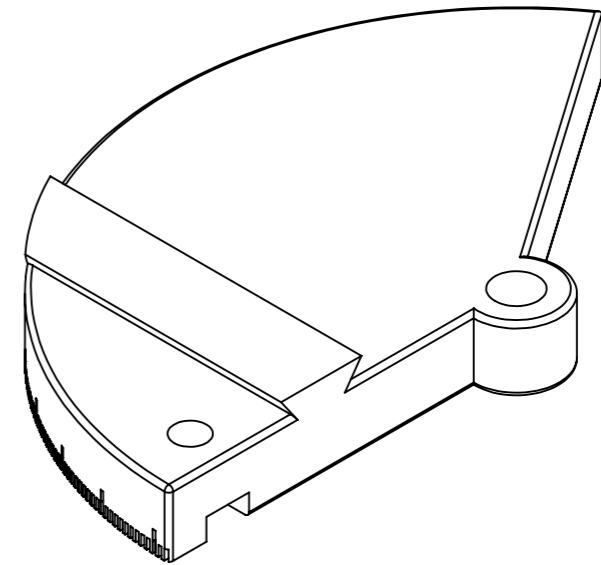
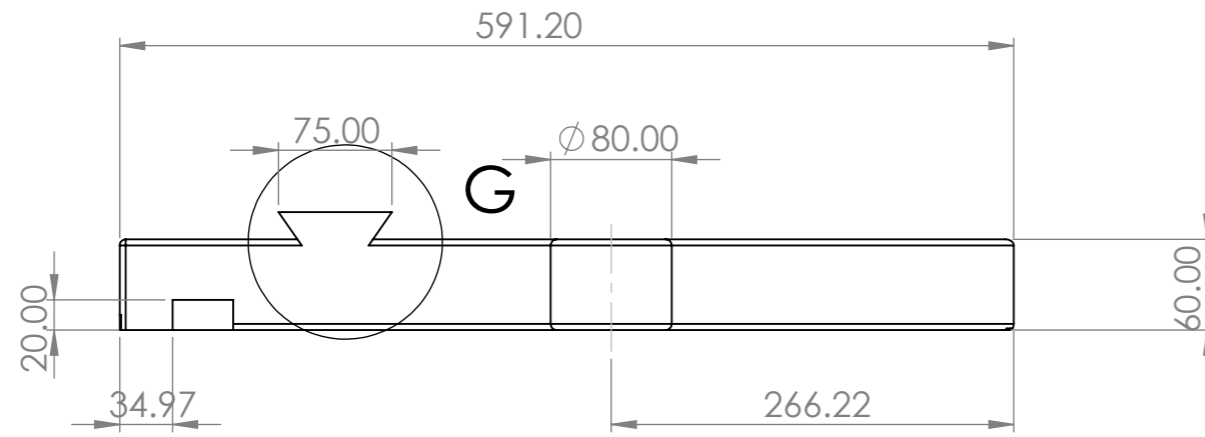
F
E
D
C
B
A

8 7 6 5 4 3 2 1

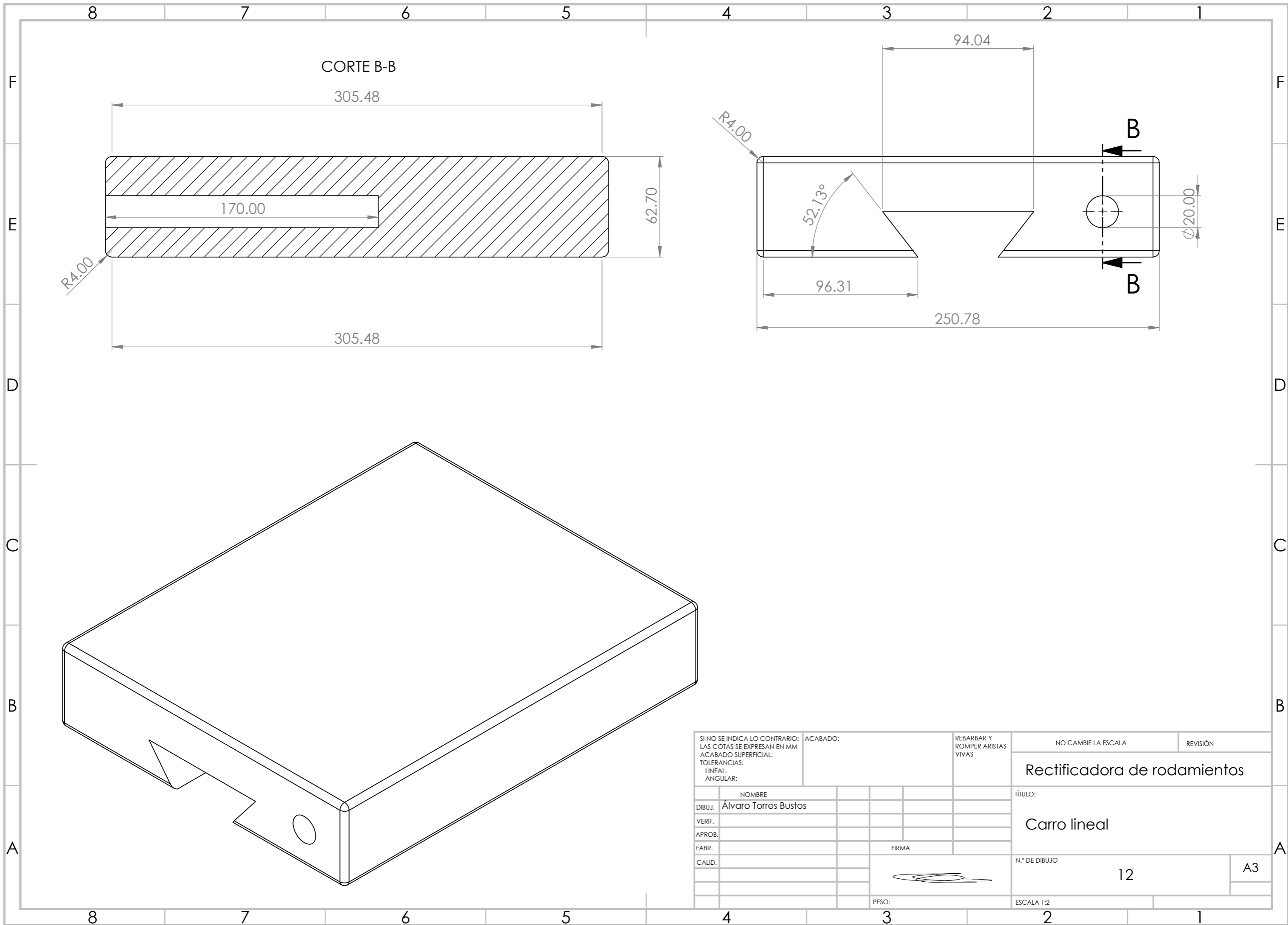
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE				TÍTULO:	
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos			Rectificadora de rodamientos	
VERIF.				Deposito	
APROB.				N.º DE DIBUJO	
FABR.	FIRMA			10	
CALID.				A3	
PESO:			ESCALA:1:5		



DETALLE G
ESCALA 2:5

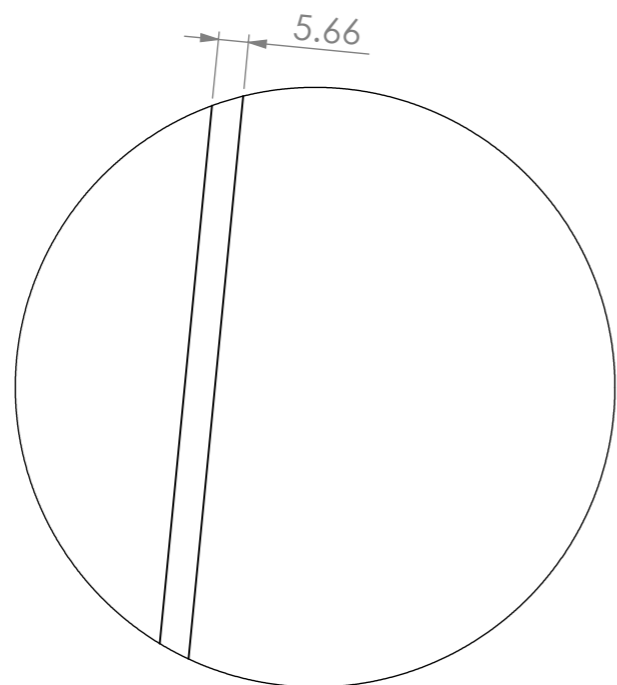
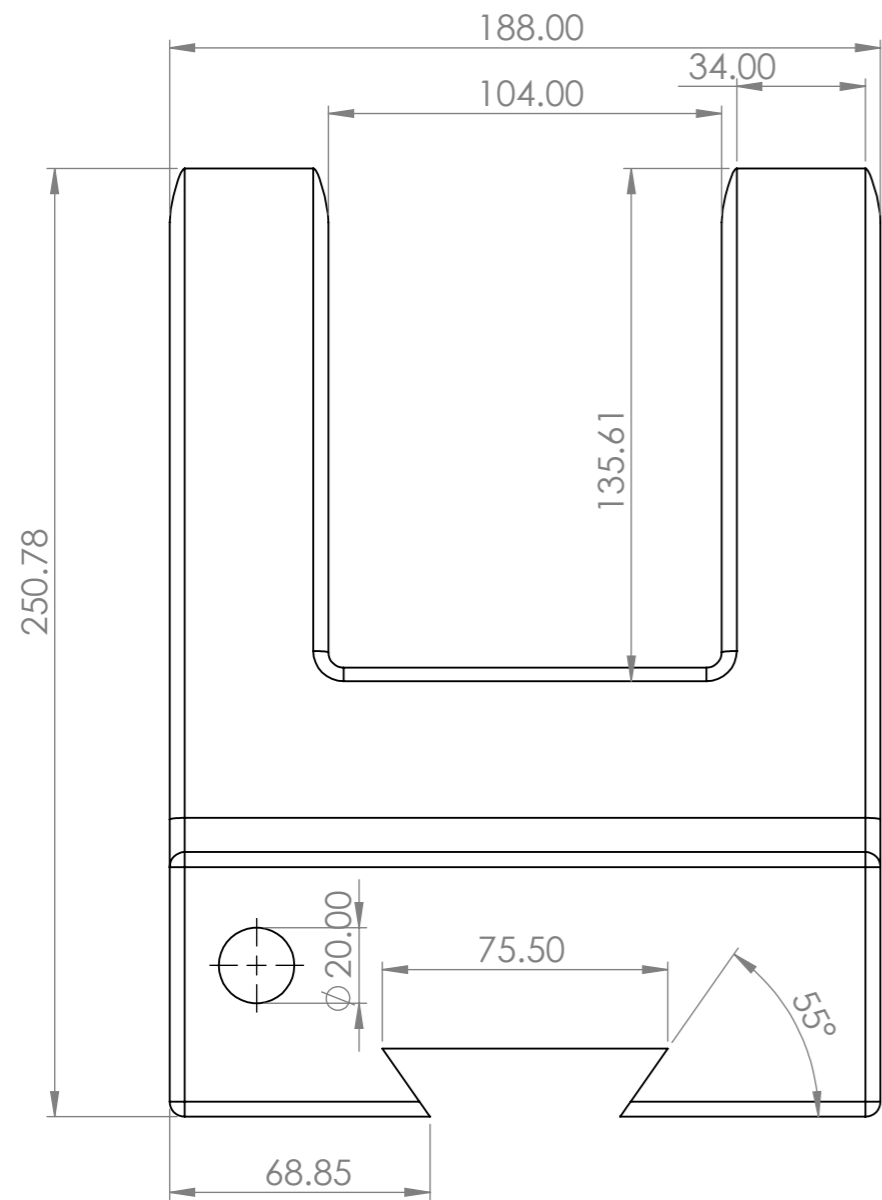


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
				Rectificadora de rodamientos	
NOMBRE				TÍTULO:	
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos			Carro oscilatorio	
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
			FIRMA	N.º DE DIBUJO	
				11	
			PESO:	ESCALA:1:5	
				A3	

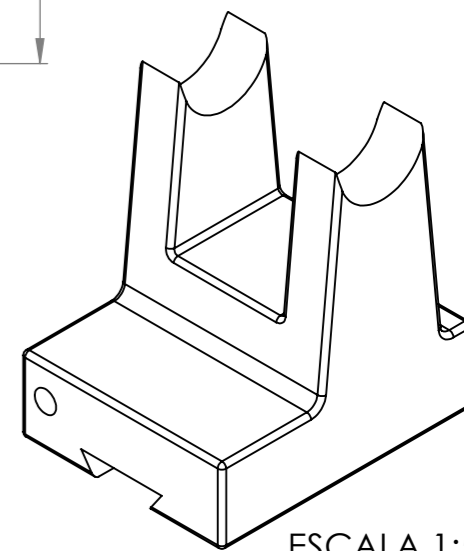
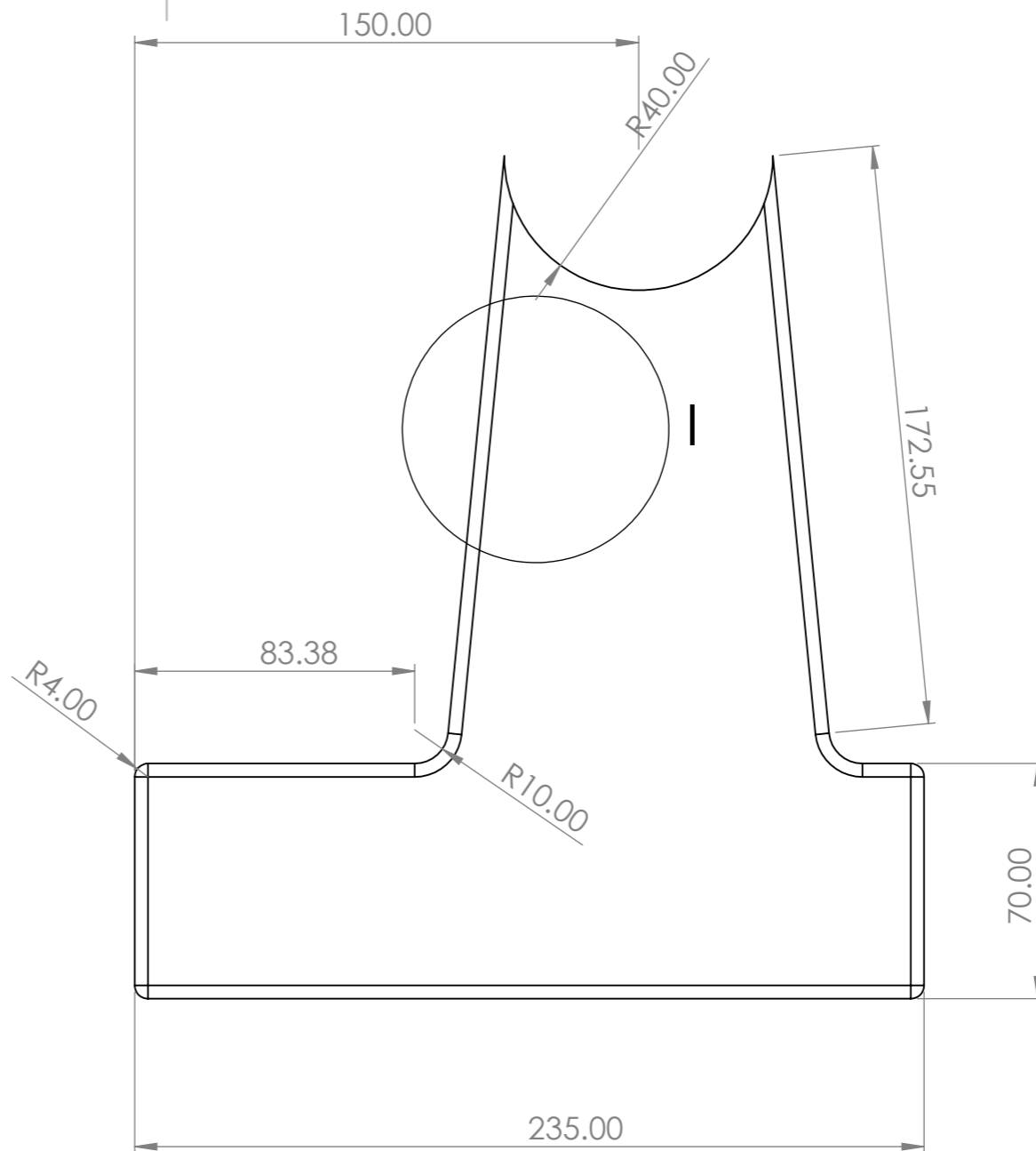


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			TÍTULO:		
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos		Rectificadora de rodamientos		
VERIF.			Carro lineal		
APROB.			N.º DE DIBUJO		
FABR.			12		A3
CALID.			ESCALA 1:2		
PESO:					

[Handwritten signature]



DETALLE I
ESCALA 1:1



ESCALA 1:5

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			TÍTULO:		
DIBUJ.	Álvaro Torres Bustos		Rectificadora de rodamientos		
VERIF.			Sistema portador de muela		
APROB.			N.º DE DIBUJO		
FABR.			13		A3
CALID.			ESCALA 1:2		
PESO:					

