

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Recreación virtual de las máquinas bélicas “Carros  
con Guadañas” de Leonardo da Vinci

Autora: Sandra Sánchez Ligeró

Tutor: Francisco Valderrama Gual

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

Sevilla, 2015



Departamento de  
Ingeniería Gráfica ETSI



Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Recreación virtual de las máquinas bélicas “Carros con Guadañas” de Leonardo da Vinci**

Autora:

Sandra Sánchez Ligeró

Tutor:

Francisco Valderrama Gual

Dep. de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2015

Trabajo Fin de Grado: Recreación virtual de las máquinas bélicas “Carros con Guadañas” de Leonardo da Vinci

Autora: Sandra Sánchez Ligeró

Tutor: Francisco Valderrama Gual

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El Secretario del Tribunal

*“Nadie dijo que fuera fácil tocar las nubes”*

# Agradecimientos

---

No ha sido fácil llegar hasta aquí, pero no he estado sola. Me gustaría dar las gracias a todas las personas que han participado en esta locura de alguna u otra forma, aunque unas simples palabras no basten.

En primer lugar, debo dar gracias a mi familia. A mis padres, por darme las alas: por toda la inversión, los apoyos y la confianza depositada en mí. Por estar en las buenas, en las no tan buenas y en las peores. En definitiva, por hacer de mí hoy una graduada en Ingeniería Aeroespacial. Os lo debo todo. Gracias también a mis hermanos y mis cuñadas, estabilizadores emocionales en todo momento y responsables de los tres motores de mi avión: Alejandro, Hugo y Paco, mi vida entera.

Gracias a mi tutor Francisco Valderrama Gual por embarcarse conmigo en esta aventura. Su ejemplo de dedicación, paciencia y profesionalidad han hecho apasionarme desde el primer día con el proyecto y disfrutar al máximo en su desarrollo.

A mis compañeros de piso por excelencia: Ángel, Vicente y Alfonso. Gracias por los infinitos malabares que habéis hecho cada día por evitar mi entrada en pérdida. A Marta, por su entusiasmo y por la habilidad de estar cerca en la distancia. A Abel, por la motivación. Y por supuesto a las de toda la vida: Esther, Estefanía y Guti, porque sé que son capaces de subirse al avión aunque no tuviera ni alas. Imprescindibles, incondicionales, amigas.

Por último, gracias a la ETSI por enseñarme a crecer en todos los sentidos. Le debo las risas con los trabajadores de copistería, los batidos de fresa en cafetería, y la mejor tripulación que pude imaginar: Víctor, José, Raúl, Carlos, Paco y Ángel, sin los que estas palabras carecerían de sentido.

Gracias, gracias de verdad.

En el transcurso del último siglo, las extraordinarias máquinas de Leonardo da Vinci han sido objeto de una atención creciente, que en ocasiones ha alcanzado matices casi obsesivos. En los últimos años, quizá fuertemente influidos por la obra de Dawn Brown, se han intensificado la producción de libros y catálogos que desvelan los sensacionales adelantos del genio da Vinci, y numerosos diseñadores se han atrevido a dar su propia interpretación a los diseños. En este contexto nace el presente Trabajo Fin de Grado.

En este documento se trata el diseño y modelado en CATIA V5 R19 de una de las máquinas bélicas más brillantes de Leonardo da Vinci: los carros con guadaña. En la representación que plasmó el renacentista en su Códice, estos carros conforman un artefacto militar mortífero y aterrador: provistos de cuchillas giratorias cortantes y arrastrados por caballos a la carrera, los carros avanzaban por el campo de batalla hiriendo de muerte a todos aquellos que participaran en las contiendas bélicas de la época. Sin embargo, a pesar de ser una de las máquinas bélicas más avanzadas de su tiempo, no existen evidencias de que fuera construida jamás.

En el Departamento de Ingeniería Gráfica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería ya se habían modelado hasta la fecha otros aparatos originarios del Códice Atlántico de Leonardo, como el automóvil o el barco de palas. Sin embargo, los carros nos parecieron un desafío en todos los sentidos: por una parte, la belleza y elegancia del diseño suponía un reto en el modelado de CATIA, al no ser éste un programa utilizado para este tipo de proyecto, y por otra parte, al no existir suficiente información para su recreación, las ideas que aportáramos tendrían que tener consistencia técnica para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina. Eso sí, sin alterar el análisis tecnológico desarrollado por Leonardo.

El Trabajo consta de 5 capítulos. En el primero de ellos, se habla del genio científico, del verdadero hombre del Renacimiento: Leonardo. Su biografía nos ayudará a entender su personalidad y los motivos que le llevan a diseñar la máquina bélica bajo estudio. Seguidamente se hará un repaso a alguna de sus obras como ingeniero militar, dando una leve pincelada a la mecánica aplicada. En el segundo capítulo se habla de nuestra herramienta por excelencia, el programa CATIA.

Consiste en una leve introducción del software para poder justificar al lector su uso en el proyecto.

Una vez descrita esta parte, en el siguiente capítulo se profundiza acerca del diseño de los carros. Tomando de referencia modelos de otros diseñadores, se analizan las posibilidades y alternativas que ofrece el modelo, así como las decisiones tomadas en los conflictos que han ido surgiendo. El capítulo se cerrará con una breve descripción de los materiales a los que optaba Leonardo para la hipotética recreación de los carros.

Finalmente, en el cuarto capítulo, se abordará el verdadero objetivo del Trabajo: el modelado. Se hace una descripción pieza a pieza de los diferentes conjuntos que conforman el carro hasta llegar a su representación completa. Se analizará cada carro por separado, estableciendo una comparación de nuestro diseño y el de Leonardo para asegurar de que el objetivo del documento se da por satisfecho. El quinto capítulo esclarecerá así las conclusiones pertinentes.

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| <b>Agradecimientos</b>   | <b>vi</b>                             |
| <b>Resumen</b>   | <b>vii</b>                            |
| <b>Índice</b>  | <b>ix</b>                             |
| <b>Índice de Tablas</b>  | <b>xi</b>                             |
| <b>Índice de Figuras</b>   | <b>xii</b>                            |
| <br>   |                                       |
| <b>1 LEONARDO DA VINCI</b>   | <b>¡Error! Marcador no definido.</b>  |
| 1.1. <i>Biografía</i>  | 1                                     |
| 1.1.1 Los primeros años en Florencia   | 1                                     |
| 1.1.2 Primera estadía en Milán (1482-1499)                                   | 3                                     |
| 1.1.3 Regreso a Florencia (1500-1506)  | 4                                     |
| 1.1.4 Al servicio de César Borgia  | <b>¡Error! Marcador no definido.</b>  |
| 1.1.5 Regreso a Milán (1506-1513)  | 5                                     |
| 1.1.6 Últimos años: Roma (1513-1516) y Francia (1516-1519)                   | 6                                     |
| 1.2. <i>Máquinas bélicas</i>   | 7                                     |
| 1.2.1 Carros con guadañas  | 10                                    |
| 1.3. <i>Mecánica Aplicada</i>  | 11                                    |
| <br>   |                                       |
| <b>2 USO DE CATIA V5R19</b>  | <b>14</b>                             |
| 2.1. <i>CAD</i>  | 14                                    |
| 2.2. <i>CAM</i>  | 15                                    |
| 2.3. <i>CAD/CAM</i>  | 15                                    |
| 2.4. <i>CATIA</i>  | 16                                    |
| 2.4.1 Módulos de Catia utilizados  | 18                                    |
| <br>   |                                       |
| <b>3 DISEÑO DE LOS CARROS CON GUADAÑAS</b>                                   | <b>20</b>                             |
| 3.1. <i>Primer carro: Mecanismos, partes y funcionamiento de la máquina</i>  | 20                                    |
| 3.1.1. Rueda   | 20                                    |
| 3.1.2. Linterna Central  | 22                                    |
| 3.1.3. Árbol motor   | 23                                    |
| 3.1.4. Guadañas de guerra  | 24                                    |
| 3.2. <i>Segundo carro: Mecanismos, partes y funcionamiento de la máquina</i> | 25                                    |
| 3.3. <i>Otros modelos</i>  | 25                                    |
| 3.3.1. Primer modelo   | 26                                    |
| 3.3.2. Segundo modelo  | <b>2¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 3.4. <i>Materiales</i>   | <b>2¡Error! Marcador no definido.</b> |

|          |  |                                |
|----------|--|--------------------------------|
| <b>4</b> | <b>MODELADO DE LOS CARROS CON GUADAÑAS</b> | <b>30</b>                      |
| 4.1.     | <i>Modelado del primer carro</i>           | 30                             |
| 4.1.1.   | Rueda                                      | 30                             |
| 4.1.1.1. | Part 1                                     | 31                             |
| 4.1.1.2. | Part 2                                     | 31                             |
| 4.1.1.3. | Part 3                                     | 32                             |
| 4.1.1.4. | Part 4                                     | 32                             |
| 4.1.1.5. | Part 5                                     | 33                             |
| 4.1.1.6. | Part 6                                     | 33                             |
| 4.1.1.7. | Part 7/8                                   | 34                             |
| 4.1.1.8. | Product 1                                  | 34                             |
| 4.1.2.   | Linterna Central                           | 35                             |
| 4.1.3.   | Tablero                                    | 36                             |
| 4.1.3.1. | Part 12                                    | 38                             |
| 4.1.3.2. | Part 13                                    | 39                             |
| 4.1.3.3. | Part 17-19                                 | 39                             |
| 4.1.3.4. | Part 15                                    | 39                             |
| 4.1.3.5. | Part 20-34                                 | 40                             |
| 4.1.4.   | Eje Central                                | 41                             |
| 4.1.5.   | Guadaña Trasera                            | 41                             |
| 4.1.6.   | Guías                                      | 42                             |
| 4.1.6.1. | Part 35-48                                 | 44                             |
| 4.1.6.2. | Part 49                                    | 45                             |
| 4.1.6.3. | Part 50-53                                 | 45                             |
| 4.1.7.   | Árbol Motor                                | 46                             |
| 4.1.8.   | Guadañas frontales                         | 4¡Error! Marcador no definido. |
| 4.1.9.   | Conjunto final                             | 48                             |
| 4.1.9.1. | Sección 1                                  | 49                             |
| 4.1.9.2. | Sección 2                                  | 50                             |
| 4.1.9.3. | Sección 3                                  | 50                             |
| 4.2.     | <i>Modelado del segundo carro</i>          | 51                             |
| 4.2.1.   | Rueda                                      | 51                             |
| 4.2.2.   | Soporte                                    | 52                             |
| 4.2.2.1. | Part 63                                    | 53                             |
| 4.2.2.2. | Part 64-71                                 | 53                             |
| 4.2.2.3. | Part 72-75                                 | 54                             |
| 4.2.3.   | Linterna Central 2                         | 54                             |
| 4.2.3.1. | Eje  | 55                             |
| 4.2.4.   | Conjunto de guadañas                       | 56                             |
| 4.2.5.   | Conjunto final                             | 5¡Error! Marcador no definido. |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSIONES</b>                        | <b>59</b>                      |
| <b>5</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                        | <b>60</b>                      |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Componentes del conjunto “RUEDAS”                | 35 |
| Tabla 2. Componentes del conjunto “LINTERNA CENTRAL”      | 36 |
| <b>¡Error!</b>  |    |
| Tabla 3. Componentes del conjunto “TABLERO”               | 37 |
| Tabla 4. Componentes del conjunto “EJE CENTRAL”           | 41 |
| Tabla 5. Componentes del conjunto “GUADAÑA TRASERA”       | 42 |
| Tabla 6. Componentes del conjunto “GUÍAS”                 | 43 |
| Tabla 7. Componentes del conjunto “ÁRBOL MOTOR”           | 47 |
| Tabla 8. Componentes del conjunto “GUADAÑAS FRONTALES”    | 48 |
| Tabla 9. Componentes del conjunto “RUEDAS”                | 52 |
| Tabla 10. Componentes del conjunto “SOPORTE”              | 53 |
| Tabla 11. Componentes del conjunto “LINTERNA CENTRAL 2”   | 55 |
| Tabla 12. Componentes del conjunto “CONJUNTO DE GUADAÑAS” | 56 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

## 1 LEONARDO DA VINCI

|   |   |
|---|---|
| Figura 1.1. Recreación de un retrato de Leonardo                          | 1 |
| Figura 1.2. Máquina para hacer limas (Códice Atlántico)                   | 2 |
| Figura 1.3. Leonardo como Platón en “La escuela de Atenas” (1511), Rafael | 6 |
| Figura 1.4. Ametralladoras  | 8 |
| Figura 1.5. Carro de combate  | 8 |

**¡Erro**

### r! Marcador no definido.

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Figura 1.6. Bombarda múltiple | 9 |
| Figura 1.7. Espingarda        | 9 |
| Figura 1.8. Catapulta         | 9 |

**¡Erro**

### r! Marcador no definido.

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.9. Bombardas en acción   | 10 |
| Figura 1.10. Los dos carros con guadañas de Leonardo contenidos en la hoja guardada en T. | 10 |
| Figura 1.11. Tornillo y rueda dentada   | 12 |
| Figura 1.12. Poleas y bloques de poleas   | 12 |
| Figura 1.13. Mecanismos de cigüeñales y volantes  | 13 |
| Figura 1.14. Resortes y levas   | 13 |

**¡Erro**

### r! Marcador no definido.

## 2 USO DE CATIA V5R19

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1. Proyecto Perwings realizado por la autora en la asignatura "Cálculo de Aeronaves" | 13 |
|---|----|

**¡Erro**

**r! Marcador no definido.**

### **3 DISEÑO DE LOS CARROS CON GUADAÑAS**

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.1. Rueda del carro extraída del Códice Atlántico de Leonardo da Vinci | 21 |
| Figura 3.2. Diseños de engranajes tipo jaula de Leonardo da Vinci              | 23 |
| Figura 3.3. Diseño de la parte frontal del carro de Leonardo da Vinci          | 24 |
| Figura 3.4. Diseño del segundo carro en la hoja del Códice Atlántico           | 25 |

**r! Marcador no definido.**

|  |    |
|--|----|
| Figura 3.5. Diseño extraído de “Atlas ilustrado de las máquinas de Leonardo” | 26 |
| Figura 3.6. Diseño extraído de la página “Grabcad”                           | 27 |

### **4 MODELADO DE LOS CARROS CON GUADAÑAS**

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| Figura 4.1. Rueda derecha.     | 30 |
| Figura 4.2. Cuarto de Rueda    | 31 |
| Figura 4.3. Diente metálico    | 32 |
| Figura 4.4. Radio              | 32 |
| Figura 4.5. Bulón              | 32 |
| Figura 4.6. Rosca              | 33 |
| Figura 4.7. Sujeción           | 33 |
| Figura 4.8. Cuchilla giratoria | 34 |
| Figura 4.9. Linterna Central   | 35 |
| Figura 4.10. Tablero           | 36 |
| Figura 4.11. Base del tablero  | 37 |

**or! Marcador no definido.**

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.12. Refuerzo                           | 39 |
| Figura 4.13. Detalle del eje de las ruedas      | 39 |
| Figura 4.14. Despiece del tablero               | 40 |
| Figura 4.15. Placas metálicas                   | 40 |
| Figura 4.16. Eje central                        | 41 |
| Figura 4.17. Guadaña trasera                    | 42 |
| Figura 4.18. Dimensiones de un caballo estándar | 43 |
| Figura 4.19. Guías                              | 43 |

|                               |       |      |              |
|-------------------------------|-------|------|--------------|
| Figura 4.20. Part 35-44       |       |      | 44           |
| Figura 4.21. Placas metálicas |       |      | 45           |
| Figura                        | 4.22. | Part | 49           |
|                               |       |      | <b>¡Erro</b> |

**r! Marcador no definido.**

|  |  |  |    |
|--|--|--|----|
| Figura 4.23. Part 50-53                                  |  |  | 46 |
| Figura 4.24. Árbol motor                                 |  |  | 46 |
| Figura 4.25. Guadañas frontales                          |  |  | 47 |
| Figura 4.26. Resultado final                             |  |  | 48 |
| Figura 4.27. Engranajes de la Sección                    |  |  | 49 |
| Figura 4.28. Sección 1                                   |  |  | 49 |
| Figura 4.29. Sección 3                                   |  |  | 50 |
| Figura 4.30. Rueda derecha                               |  |  | 51 |
| Figura 4.31. Soporte                                     |  |  | 52 |
| Figura 4.32. Base del tablero                            |  |  | 53 |
| Figura 4.33. Part 64-71                                  |  |  | 54 |
| Figura 4.34. Part 72-75                                  |  |  | 54 |
| Figura 4.35. Linterna Central 2                          |  |  | 55 |
| Figura 4.36. Fragmento del eje                           |  |  | 56 |
| Figura 4.37. Conjunto de Guadañas                        |  |  | 56 |
| Figura 4.38. Elementos de unión del conjunto de guadañas |  |  | 57 |
| Figura 4.39. Resultado final                             |  |  | 57 |



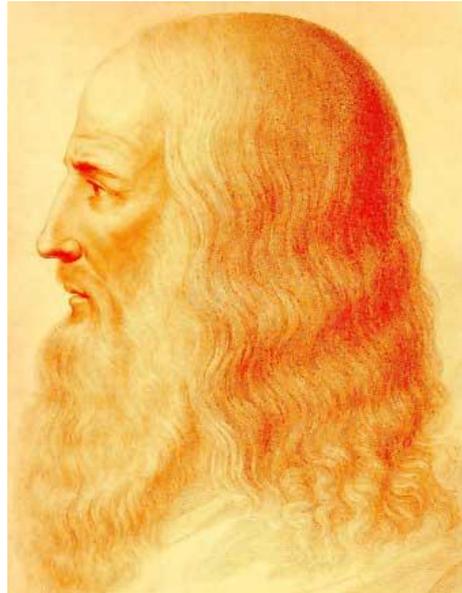


# 1 LEONARDO DA VINCI

*“Si un hombre es perseverante, aunque sea duro de entendimiento, se hará inteligente; y aunque sea débil se transformará en fuerte”*

*- Leonardo Da Vinci -*

**E**l siguiente capítulo trata de mostrar una visión general del creador de la máquina bélica bajo estudio: Leonardo Da Vinci, considerado “El hombre del renacimiento”. Este conocido polímata florentino fue a la vez pintor, anatomista, arquitecto, artista, botánico, científico, escritor, escultor, filósofo, ingeniero, inventor, músico, poeta y urbanista, por lo que resulta interesante el análisis de sus antecedentes para un mejor conocimiento de su carácter y personalidad.



**Figura 1.1.** Recreación de un retrato de Leonardo

## 1.1 Biografía

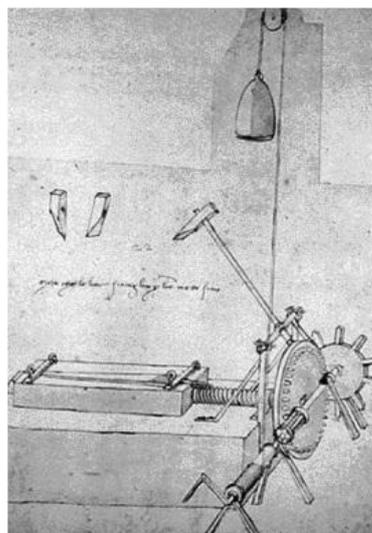
### 1.1.1 Los primeros años en Florencia

Hijo ilegítimo de Ser Piero, notario y terrateniente próspero, Leonardo nació el 15 de abril de 1452 en la propiedad familiar de su padre en Anchiano, una aldea de la pequeña población de Vinci, cerca

de Empoli. Su madre fue una joven campesina, con quien el padre de Leonardo tuvo una relación irregular y que poco después se casó con un artesano de la región. Leonardo creció en Anchiano, con su abuelo y poco antes de 1469 se fue a vivir a Florencia con Ser Piero, donde creció, fue tratado como un hijo legítimo y recibió la educación elemental usual en aquel tiempo: lectura, escritura y aritmética.

A sus quince años entró como aprendiz al taller de Andrés Verrocchio, donde aprendió, además de pintura y escultura, artes técnico-mecánicas. Además, allí se producían refinados trabajos de arte y complicados trabajos técnicos. En el adyacente taller de Antonio Pollaiuolo, también trabajó y probablemente allí fue atraído por los estudios de anatomía.

En 1472 Leonardo fue aceptado en el gremio de pintores de Florencia aunque permaneció cinco años más en el taller de su maestro y luego trabajó independientemente hasta 1481. En sus pinturas iniciales hay muchos bosquejos técnicos debido al interés que tenía en el conocimiento de materias técnicas al principio de su carrera. Leonardo luchó por dilucidar problemas generales como la transmisión de la fuerza o de la resistencia de los materiales; empezó a construir herramientas para ahorrar trabajo, inventadas por él: diseñó máquinas para torner y pulir y estudió la asociación de partes y el engrane de goznes y bisagras. En esos estudios, Leonardo combinó la máquina con las fuerzas vitales de la naturaleza.



**Figura 1.2.** Máquina para hacer limas (Códice Atlántico)

Florencia entró en guerra y aunque Leonardo no se sentía atraído por la causa de los Médicis, se

interesaba profundamente por la técnica militar y seguía interesado los acontecimientos. Se trataba de un período de transformación en la técnica de la guerra, en el que los recientes inventos, el dominio del hierro y el acero por el hombre ofrecían nuevos medios de destrucción. Leonardo había llenado ya páginas de sus cuadernos de apuntes con diseños de máquinas trituradoras y rodantes, y entonces se sumió en el estudio de nuevos problemas militares.

Sin embargo, Leonardo no despertó mucho interés con sus planes —Lorenzo de Médicis empleaba a otro artista florentino, Giuliano da Sangallo, como ingeniero militar—. No obstante, siguió observando el curso de la guerra y adaptando sus diseños a los requerimientos variables de la lucha. Sus proyectos, aunque bellamente realizados no le consiguieron encargos como ingeniero militar.

### 1.1.2 Primera estadía en Milán (1482-1499)

Leonardo llegó a Milán en 1482 y parece que tuvo razones profundas para irse: los altos impuestos hacían que varios patrones nunca pagaran los trabajos que encargaban, la competencia profesional era extremadamente fiera, y la guerra y la peste presentaban grandes peligros físicos.

Realmente, lo que atrajo a Leonardo fueron la más realista atmósfera académica de Milán y la brillante corte de Ludovico Sforza. En demanda de trabajo envió a éste una carta en la que describe distintas máquinas bélicas, métodos de asedio, carros blindados e instrumentos náuticos de su particular invención. Nada de lo anterior conmovió a Ludovico y Leonardo pasó más de cinco años sobreviviendo y tratando de lograr el favor del regente. Sin embargo, el artista llegó a permanecer diecisiete años en Milán, hasta que Ludovico cayó del poder en 1499. Estaba registrado entre el personal del palacio como pintor e ingeniero ducal. Llegó a ser altamente estimado y se mantenía ocupado como pintor y escultor y como diseñador de los festivales de la corte; también era consultado frecuentemente como asesor técnico en los campos de la arquitectura, las fortificaciones y cuestiones militares, además de servir como ingeniero hidráulico y mecánico. En esta fase de su vida el genio de Leonardo se reveló en toda su versatilidad, así como su pensamiento poderosamente creativo en lo artístico y lo científico, adquiriendo aquella calidad de único que provocó el asombro y admiración de sus contemporáneos.

Mucho del trabajo de Leonardo en Milán, y en otras épocas, compilado en sus cuadernos de notas y en hojas individuales, luego compilados en códices, se puede describir propiamente como “sueños tecnológicos”. En total suman miles de páginas escritas apretadamente y abundantemente ilustradas con croquis —el legado literario más voluminoso que cualquier pintor haya dejado tras de sí. De más

de 40 códices mencionados en las fuentes más viejas, sólo 21 han sobrevivido.

Dos características hacen especiales las notas de Leonardo: su uso de la escritura especular y la relación entre palabra y dibujo. Leonardo era zurdo; de modo que su escritura especular fue fácil y natural para él. No debe considerarse como una escritura secreta. Aunque inusual, su caligrafía se puede leer claramente y sin dificultad con la ayuda de un espejo, como lo testificaron sus contemporáneos. La segunda característica especial es la nueva función dada a la ilustración relacionada con el texto. En su método de enseñanza, Leonardo dio precedencia absoluta a la ilustración sobre la palabra escrita; o sea que el dibujo no ilustra el texto; en vez de ello, el texto sirve para explicar el dibujo. Al formular sus propios principios sobre la representación gráfica —que él mismo llamó demostraciones—, Leonardo fue un precursor de la moderna ilustración científica.

### 1.1.3 Regreso a Florencia (1500-1506)

A finales de 1499 los franceses entraron en Milán; Ludovico el Moro perdió el poder. Leonardo abandonó la ciudad acompañado de Pacioli y, tras una breve estancia en Mantua, llegó a Venecia. Acosada por los turcos, que ya dominaban la costa dálmata y amenazaban con tomar el Friuli, la *Signoria* de Venecia contrató a Leonardo como ingeniero militar.

En pocas semanas proyectó una cantidad de artefactos cuya realización concreta no se haría sino, en muchos casos, hasta los siglos XIX o XX: desde una suerte de submarino individual, con un tubo de cuero para tomar aire destinado a unos soldados que, armados con taladro, atacarían a las embarcaciones por debajo, hasta grandes piezas de artillería con proyectiles de acción retardada y barcos con doble pared para resistir las embestidas. Los costes desorbitados, la falta de tiempo y, quizá, las pretensiones de Leonardo en el reparto del botín, excesivas para los venecianos, hicieron que las geniales ideas no pasaran de bocetos.

De Venecia retornó a Florencia, donde ya estaba el 24 de abril de 1500, después de tan larga ausencia, fue aclamado con honores y reconocido como un hijo notable. Aquel mismo año fue nombrado como arquitecto experto en un comité que investigaba los daños en la fundación y en la estructura de la iglesia de S. Francesco al Monte.

### 1.1.4 Al servicio de César Borgia

Dominaba entonces la ciudad César Borgia, hijo del papa Alejandro VI. Descrito por el propio Maquiavelo como «modelo insuperable» de intrigador político y déspota, este hombre ambicioso y temido se estaba preparando para lanzarse a la conquista de nuevos territorios. Leonardo,

nuevamente como ingeniero militar, recorrió los territorios del norte, trazando mapas, calculando distancias precisas y proyectando puentes y nuevas armas de artillería. Pero poco después el *condottiero* cayó en desgracia: sus capitanes se sublevaron, su padre fue envenenado y él mismo cayó gravemente enfermo. En 1503 Leonardo volvió a Florencia, que por entonces se encontraba en guerra con Pisa, y concibió allí su genial proyecto de desviar el río Arno por detrás de la ciudad enemiga para cercarla, contemplando además la construcción de un canal como vía navegable que comunicase Florencia con el mar. El proyecto, considerado el tiempo y los siglos siguientes, nunca se realizó, pero siglos más tarde la autopista de Florencia al mar fue construida sobre la ruta exacta que Leonardo escogió para el canal.

El interés de Leonardo por los estudios científicos era cada vez más intenso. Asistía a disecciones de cadáveres, sobre los que confeccionaba dibujos para describir la estructura y funcionamiento del cuerpo humano; al mismo tiempo hacía sistemáticas observaciones del vuelo de los pájaros (sobre los que planeaba escribir un tratado), con la convicción de que también el hombre podría volar si llegaba a conocer las leyes de la resistencia del aire (algunos apuntes de este período se han visto como claros precursores del moderno helicóptero).

#### **1.1.5 Regreso a Milán (1506-1513)**

Cuando, en mayo de 1506, Carlos d'Amboise, gobernador del rey de Francia en Milán, solicitó a la Signoria, que Leonardo fuera a Milán durante algún tiempo, el artista no tuvo ninguna duda en aceptar la invitación cuando obtuvo el permiso. El gobernador francés de Milán, le ofreció el cargo de arquitecto y pintor de la corte; honrado y admirado por su nuevo patrón, Leonardo da Vinci proyectó para él un castillo y ejecutó bocetos para el oratorio de Santa Maria dalla Fontana, fundado por el mecenas. Su estadía milanesa sólo se interrumpió en el invierno de 1507, cuando colaboró en Florencia con el escultor Giovanni Francesco Rustici en la ejecución de los bronce del baptisterio de la ciudad.

Quizás excesivamente avejentado para los cincuenta años que contaba entonces, su rostro fue tomado por Rafael como modelo del sublime Platón para su obra *La escuela de Atenas*. Leonardo, en cambio, pintaba poco, dedicándose a recopilar sus escritos y a profundizar en sus estudios: con la idea de tener finalizado para 1510 su tratado de anatomía, trabajaba junto a Marcantonio della Torre, el más célebre anatomista de su tiempo, en la descripción de órganos y el estudio de la fisiología humana.



**Figura 1.3.** Leonardo como Platón en “La escuela de Atenas” (1511), Rafael

El ideal leonardesco de la «percepción cosmológica» se manifestaba en múltiples ramas: escribía sobre matemáticas, óptica, mecánica, geología, botánica; su búsqueda tendía hacia el encuentro de leyes, funciones y armonías compatibles para todas estas disciplinas, para la naturaleza como unidad.

#### **1.1.6 Últimos años: Roma (1513-1516) y Francia (1516-1519)**

D'Amboise murió en 1511. Leonardo permaneció en Milán hasta el 24 de septiembre de 1513, pero una nueva situación de inestabilidad política hizo que, ya de sesenta años, se trasladara junto a Melzi y Salai a Roma, donde se albergó en el belvedere de Giuliano de Médicis, hermano del nuevo papa León X.

En el Vaticano vivió una etapa de tranquilidad, con un sueldo digno y sin grandes obligaciones: dibujó mapas, estudió antiguos monumentos romanos, proyectó una gran residencia para los Médicis en Florencia y, además, reanudó su estrecha amistad con el gran arquitecto Donato Bramante, hasta el fallecimiento de éste en 1514.

En 1516, muerto su protector Giuliano de Médicis y con una vida tan solitaria, es fácil entender porqué Leonardo, a pesar de sus sesenta y cinco años, decidió aceptar la invitación del joven rey Francisco I para entrar a su servicio en Francia. Partió hacia Cloux y pasó allí tres años de su vida en una pequeña residencia cerca del palacio estival del rey en Amboise, sobre el Loira. Primer pintor, arquitecto y mecánico del rey era el orgulloso título que tenía; sin embargo, el admirador monarca le dio toda la libertad de acción. Para el rey trazó planos del palacio y jardín de Romoratin, destinado a ser la residencia de la Reina Madre. Pero el proyecto, trabajado cuidadosamente, combinando lo mejor de las características de las tradiciones italianas y francesas en arquitectura de palacios y

paisajes, tuvo que detenerse porque la región se vio amenazada por la malaria. Leonardo gastó la mayor parte de su tiempo ordenando y editando sus estudios científicos. Aparecieron los borradores finales de su tratado sobre la pintura y unas pocas páginas sobre anatomía.

A partir de 1517 su salud, hasta entonces inquebrantable, comenzó a desmejorar. Su brazo derecho quedó paralizado; pero, con su incansable mano izquierda, Leonardo aún hizo bocetos de proyectos urbanísticos, de drenajes de ríos y hasta decorados para las fiestas palaciegas. Convertida en una especie de museo, su casa de Amboise estaba repleta de los papeles y apuntes que contenían las ideas de este hombre excepcional, muchas de las cuales deberían esperar siglos para demostrar su factibilidad y aun su necesidad; llegó incluso, en esta época, a concebir la idea de hacer casas prefabricadas.

El 2 de mayo de 1519, Leonardo murió en Cloux y fue enterrado en la capilla del palacio de SaintFlorentin. Pero la capilla fue devastada durante la Revolución Francesa y completamente demolida a principios del siglo XIX. Por consiguiente, su tumba ya no se puede localizar. Su discípulo Francisco Melzi fue el heredero de su legado artístico y científico.

## 1.2 Máquinas bélicas

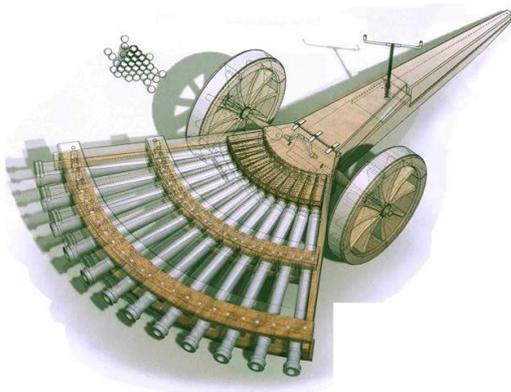
Es curiosa y desconcertante la actitud de Leonardo frente a la guerra y los aparatos bélicos. Personalmente era un hombre muy pacífico: a pesar de su formidable fuerza física andaba desarmado, contra la costumbre de la época. Amante de los animales y vegetariano, era famoso por comprar pájaros en los mercados y dejarlos en libertad. Aborrecía la guerra, a la que denominaba “locura bestial”, pero ya desde el Renacimiento estaba a la orden del día en el inestable escenario político italiano y europeo, y las máquinas bélicas estaban en el centro de los intereses de la época. Diseñó gran cantidad de armas, incluyendo una ballesta gigante, ametralladoras de múltiples cañones, torres de sitio, morteros e incluso un vehículo precursor de los tanques modernos, con la intención de ganar los favores y el respaldo financiero de los señores de la guerra.

Es por lo anterior que Leonardo proyecta máquinas bélicas sobre todo en los primeros años de su estancia en Milán (aproximadamente entre 1483 y 1490) junto con el Duque de Milán, Ludovico, y cuando regresa a Florencia, hacia 1502-1504 bajo las instrucciones de César Borgia. Los proyectos realizados en Milán son más variados, más espectaculares, pero a menudo están al límite de lo imposible. Los posteriores, en cambio, son más rigurosos y se centran fundamentalmente en problemas de estrategia militar de la época (desde un punto de vista tanto defensivo como ofensivo):

las armas de fuego.

Las máquinas de guerra que con tanta seguridad proponía Leonardo, en su mayoría quedaron reducidas a meros proyectos, pues no se construyó ni un solo carro blindado ni una sola máquina de asedio, ya que la realización de tales ingenios era problemática. De acuerdo con algunos autores, a la fértil inteligencia de Leonardo no le interesaba más que la idea, y a menudo se perdía en divagaciones artísticas muy interesantes de problemas técnicos que nada tienen que ver con la realidad; la conclusión de las obras le tenía sin cuidado. Es por ello que las propuestas bélicas de Leonardo no fueran tomadas en consideración en la corte, donde se prefirieron, al menos durante un cierto período, otros ingenieros menos geniales pero más pragmáticos.

Así, se presentan a continuación algunos diseños interesantes de su propia invención:



**Figura 1.4.** Ametralladoras



**Figura 1.5.** Carro de combate

### **Ametralladoras**

Esta ametralladora estaba dotada de una notable capacidad de tiro. Los cañones, una vez cargados y preparados para la explosión, garantizaban la cobertura de un amplio radio de acción. La estructura era fácil de transportar y, si era necesario, podía ser apuntada hacia un objeto distinto. La regulación de la altura de tiro de los cañones se efectuaba por medio de una manivela situada en la parte posterior de la máquina.

### **Carro de combate**

Uno de los proyectos más conocidos de Leonardo. La idea de un carro de combate protegido por un escudo gigante, dotado de una notable fuerza de disparo y con la posibilidad de moverse sobre el campo de batalla, era un proyecto muy ambicioso hasta para el genio da Vinci. Incluso con oportunas

modificaciones el diseño ofrece muchas lagunas. Frente a dificultades prácticamente irresolubles, Leonardo abandonó el proyecto.

### **Bombarda múltiple**

El dibujo se encuentra en la primera hoja del Códice Atlántico. Es fascinante y muy completo; representa en planta una bombardarda con dieciséis cañones dispuestos radialmente. La parte más interesante del proyecto se encuentra en el centro de la bombardarda, donde aparecen un par de palas mecánicas y algunos engranajes de rueda que desvelan sólo en parte el posible empleo de esta gran estructura.

### **Espingarda**

Entre las numerosísimas producciones de proyectos militares destaca el espacio dedicado al desarrollo y a la ideación de los cañones. Esta espingarda permitía al tirador establecer la posición del cañón antes del tiro sin tener que mover toda la estructura; de hecho el cañón podía ser girado e inclinado a placer para apuntar en más de una dirección. También estaban previstas unas cubiertas de madera para proteger el arma.



**Figura 1.6.** Bombarda múltiple



**Figura 1.7.** Espingarda

### **Catapulta**

Son muchos los proyectos de catapultas. Ésta aprovecha un particular mecanismo de doble ballesta que produce una elevada cantidad de energía para lanzar los proyectiles, de piedra o de material incendiario, a distancias considerables. Las operaciones de carga de las dos grandes ballestas se efectuaban mediante una manivela situada en un lado de la catapultilla.

### **Bombardas en acción**

Un dibujo extremadamente claro y de rara belleza. La hoja representa dos bombardas tomadas precisamente en el momento de la explosión del disparo. Aparte de en el proyecto de la bombardarda,

estructura ya conocida en la época, Leonardo piensa también en grandes proyectiles que, una vez lanzados, se dividen en varias partes, cubriendo así una mayor superficie de impacto.

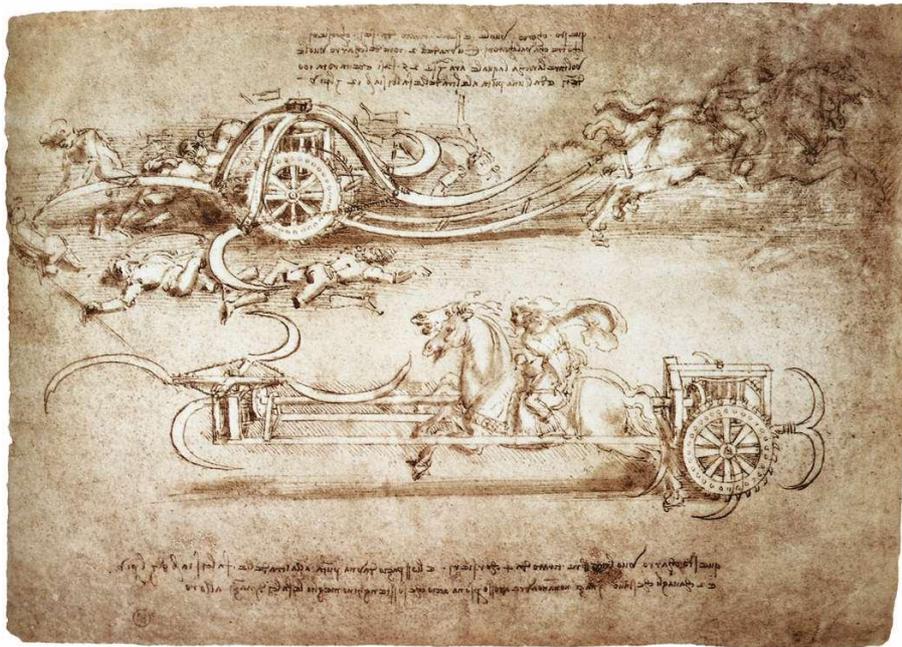


**Figura 1.8.** Catapulta



**Figura 1.9.** Bombardas en acción

### 1.2.1 Carros con guadañas



**Figura 1.10.** Los dos carros con guadañas de Leonardo contenidos en la hoja guardada en Turín.

Entre los más espectaculares dibujos de máquinas realizados por Leonardo en los primeros años de su estancia en Milán se encuentran los dos estudios de los carros armados de guadañas, en cuyo diseño nos detendremos. Esta devastadora máquina de la muerte consiste en unos carros, arrastrados por caballos a la carrera y provistos de cuchillas cortantes, que avanzaban por el campo de batalla y

herían de muerte a quienes estuviesen cerca. Aunque Leonardo proporcione algunas informaciones sobre el sistema mecánico de accionamiento de los dos carros, estamos ante dos imágenes en las cuales prevalece la idea general del carro en su conjunto, como arma de mortífero poder. Quizá dibujos como éstos acompañaban a la carta con la que Leonardo, nada más llegar a Milán, se presentó a Ludovico el Moro.

Como en otros dibujos que datan de esos años, el proyecto de máquina se transforma en una representación dramática, dominada por el furioso movimiento de las figuras humanas y animales que accionan o sufren la acción de las máquinas. En este caso, hay incluso un sentido de malestar frente a la máquina como causa de la muerte, un sentimiento expresado en una nota en la que Leonardo subraya que estos carros “a menudo hicieron no menos daño a los amigos que a los enemigos”. A pesar de ser el diseño de una de las armas más avanzadas de su tiempo, no hay evidencias de que fuera construida jamás.

Con un detallado análisis de los engranajes, los más versados pueden apreciar que, tanto en el dibujo como en la reconstrucción, podría haber errores mecánicos. Se podría pensar que Leonardo ha introducido intencionadamente errores para ocultar el correcto funcionamiento, o que, centrado en la belleza y elegancia del diseño, ha olvidado el aspecto técnico de la máquina. Las escasas indicaciones que dio Leonardo sobre su funcionamiento y dimensiones, han dado lugar a numerosas interpretaciones de distintos diseñadores a lo largo de la historia. Es por ello que como Trabajo Fin de Grado resulta un reto la posibilidad de elaborar un modelo tridimensional viable.

En definitiva, por lo novedoso que resulta para su tiempo, el desafío que conlleva su diseño, las posibilidades de simplificaciones que ofrece y la belleza y elegancia que desprende, hemos decidido embarcarnos en el desarrollo de esta máquina como objetivo del proyecto.

### **1.3 Mecánica Aplicada**

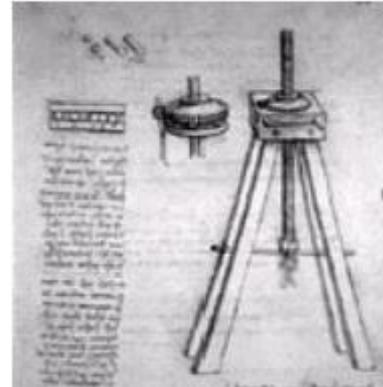
Lo más novedoso de las contribuciones técnicas de Leonardo es su análisis de los componentes (los órganos) de las máquinas, llevado a cabo durante el decenio de 1490. Él consideró las máquinas como ensambles de distintos dispositivos elementales, y sistemáticamente las descompuso en sus órganos básicos estudiando su rendimiento. Es decir, desarrolló lo que podríamos llamar la anatomía de las máquinas. Consideremos algunos de sus elementos preferidos:

### El tornillo y la rueda dentada

Leonardo clasificó metódicamente los diferentes tipos de tornillos. Buscó medir su potencia y especificar sus aplicaciones potenciales en las máquinas y las operaciones mecánicas. También diseñó máquinas para hacer tornillos. Dedicó atención a los piñones, concentrándose en los perfiles de los dientes y clasificando con precisión los tipos de movimientos producidos por varias combinaciones de ruedas dentadas y piñones.



**Figura 1.11.** Tornillo y rueda dentada



**Figura 1.12.** Poleas y bloques de poleas

### Poleas, bloques de poleas, ejes y rodamientos

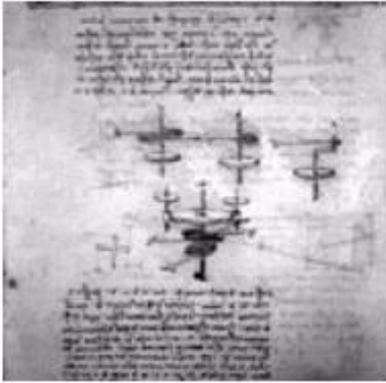
Leonardo hizo énfasis en las ventajas del uso eficiente de los conjuntos de poleas y las poleas, sobre todo para facilitar el levantamiento de cargas pesadas. También analizó muchos sistemas para soportar ejes móviles en particular para disminuir la fricción. Sus diseños de rodamientos para ejes verticales y resistentes a la presión son notables.

### Mecanismos de cigüeñales y volantes

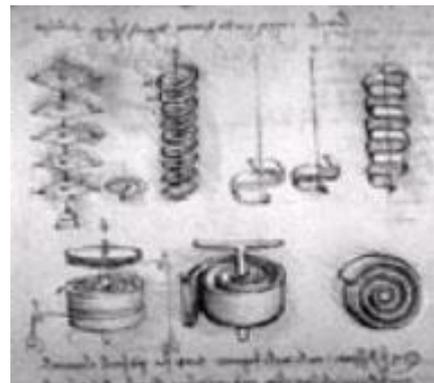
Leonardo sugirió el uso de mecanismos de cigüeñales para convertir el movimiento rotatorio en lineal, como en el resorte de la máquina de cuerda automática del Códice de Madrid I. También analizó en detalle el papel de las ruedas volantes en facilitar y regular el movimiento de los ejes rotativos.

### Resortes y Levas

Leonardo diseñó lo que se puede llamar correctamente un catálogo visual de resortes. Recalcó su utilidad en cerraduras y en la relojería, y propuso soluciones a la fuerza regulada. También diseñó una máquina para hacer resortes. Su interés en las levas, así mismo, está ligado a la misma determinación de mejorar y regular los relojes, como se muestra en sus estudios de los escapes del péndulo y en los escapes con impulsor y leva sinusoidal.



**Figura 1.13.** Mecanismos de cigüeñales y volantes



**Figura 1.14.** Resortes y Levas

### **Transmisión con bandas**

Algunas veces Leonardo hizo uso de cuerdas y correas para generar movimiento rotatorio o lineal alternado a partir de movimiento rotatorio continuo, como el producido por una rueda hidráulica o un animal.

### **Engranajes tipo jaula, de rodillo o linterna**

Leonardo empleó con frecuencia este tipo de engranajes para transmitir el movimiento entre ejes perpendiculares. El piñón consta de dos discos paralelos, los cuales encierran alrededor de un perno unos barrotes cilíndricos que engranan con las espigas de la rueda corona. Será el más usado en nuestra máquina.

## 2 USO DE CATIA V5R19

---

**E**l mundo de la ingeniería, al igual que el de la arquitectura y el de toda actividad que implique el diseño de algo que después se materialice físicamente, ha cambiado enormemente con la aparición y desarrollo del Diseño Asistido por Ordenador, CAD – Computer Aided Design - y de la Fabricación Asistida por Ordenador CAM – Computer Aided Manufacturing-. Hoy en día, el diseño y desarrollo de nuevos productos o la modificación de los existentes se ha convertido en un elemento clave para la mejora de la capacidad de innovación y competitividad de las empresas industriales actuales. Por ello, resulta necesario el conocimiento y el manejo de estas aplicaciones informáticas como herramientas de diseño e ingeniería.

CATIA constituye el sistema CAD 3D más avanzado del mercado; lleva varios años implantado fuertemente a nivel internacional en sectores como el de automoción y el aeronáutico, y cada día son más las empresas que demandan esta tecnología de desarrollo. Debido a esta y a otras razones, el Departamento de Ingeniería Gráfica de la Universidad de Sevilla cuenta con su licencia, y el diseño de este Trabajo Fin de Grado será llevado a cabo a través de este software. A continuación, se introducirán algunos conceptos básicos sobre el programa necesarios para la comprensión del modelado de la máquina.

### 2.1. CAD

El término CAD (Computer Aided Design o Diseño Asistido por Ordenador) hace referencia a una herramienta software que, mediante el uso del ordenador, permite crear, modificar, analizar y optimizar planos y modelos en dos y tres dimensiones, y manipular de una manera fácil elementos geométricos sencillos. Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Los modelados en 3D añaden superficies y sólidos.

El usuario puede asociar a cada entidad una serie de propiedades: color, capa, estilo de línea, nombre, definición geométrica, etc., que permiten manejar la información de forma lógica. Además, se pueden generar imágenes o vídeos de los modelos 3D para obtener una previsualización realista del producto, aunque se prefiera exportar los modelos a programas especializados en visualización y animación a menudo.

Los sistemas CAD actúan en los campos de diseño mecánico, estructural, arquitectura e ingeniería civil, sistemas de información cartográfica y geográfica, industrial, de instalaciones, etc. Se utiliza en todo el proceso de ingeniería desde el diseño conceptual y el diseño de productos hasta la definición de los métodos de fabricación. Esto permite que un ingeniero tanto de forma interactiva como automática analice variantes de diseño, para encontrar el diseño óptimo para la fabricación y reducir al mínimo el uso de prototipos físicos.

Entre los beneficios del CAD se incluyen menores costos de desarrollo de productos, mayor productividad, mejor calidad del producto y el tiempo más rápido al mercado.

- Una mejor visualización del producto final, subconjuntos y componentes en un sistema CAD acelera el proceso de diseño.
- El software CAD ofrece una mayor precisión, por lo que los errores se reducen.
- Un sistema CAD proporciona más fácil, la documentación del diseño, incluida las geometrías y dimensiones, listas de materiales, etc.
- El software CAD ofrece fácil reutilización de los datos de diseño y las mejores prácticas.

## 2.1 CAM

El término CAM (Computer Aided Manufacturing / Fabricación Asistida por Ordenador) agrupa las aplicaciones encargadas de traducir las especificaciones de diseño originadas a través de las tecnologías CAD a otras especificaciones de producción. Es decir, es un puente entre el CAD y el lenguaje de programación de las máquinas herramientas con una intervención mínima del operario.

Una vez que el modelo geométrico se encuentra en el sistema CAM, independientemente del proceso de mecanizado, es necesario definir la zona que se quiere mecanizar, cómo y con qué herramienta.

Algunos ejemplos de CAM son: el fresado programado por control numérico, la realización de agujeros en circuitos automáticamente por un robot, y la soldadura automática de componentes SMD en una planta de montaje.

## 2.3. CAD/CAM

Por las ventajas que presentan en conjunto, se suele combinar el diseño y la fabricación asistidos por computadora en los sistemas CAD/CAM. Esta combinación permite la transferencia de información desde la etapa de diseño a la etapa de fabricación de un producto, sin necesidad de volver a capturar

manualmente los datos geométricos de la pieza. La base de datos que se desarrolla durante el CAD es procesada por el CAM, para obtener los datos y las instrucciones necesarias para operar y controlar la maquinaria de producción, el equipo de manejo de material y las pruebas e inspecciones automatizadas que establecen la calidad del producto.

Una función de CAD/CAM importante en operaciones de mecanizado es la posibilidad de describir la trayectoria de la herramienta para diversas operaciones, como por ejemplo torneado, fresado y taladrado con control numérico. Las instrucciones o programas se generan en computadora, y pueden modificar el programador para optimizar la trayectoria de las herramientas. El ingeniero o el técnico pueden entonces mostrar y comprobar visualmente si la trayectoria tiene posibles colisiones con prensas, soportes u otros objetos.

Otra ventaja es que en cualquier momento es posible modificar la trayectoria de la herramienta para tener en cuenta otras formas de piezas que se vayan a mecanizar. También, los sistemas CAD/CAM son capaces de codificar y clasificar las piezas que tengan formas semejantes en grupos, mediante codificación alfanumérica.

## 2.4. CATIA

CATIA (Computer-Aided Three dimensional Interactive Application) es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por computadora comercial realizado por Dassault Systèmes, ingeniería filial del grupo Dassault (fabricante francés de aviones militares y civiles).

En un principio nació como un programa de diseño CAD, pero actualmente engloba todas las herramientas necesarias para la concepción, análisis, simulación, presentación, fabricación, producción y mantenimiento del diseño. La principal peculiaridad de CATIA es que provee una arquitectura abierta para el desarrollo de aplicaciones y para personalizar el programa.

CATIA es mucho más que un software de diseño, es una herramienta de integración del proceso de desarrollo de producto. Actualmente cuenta con más de ciento cincuenta módulos de las más diversas aplicaciones, y en cada nueva versión siguen ampliando y desarrollando nuevas funcionalidades en función de necesidades: módulos que pueden ser altamente específicos, módulos especiales para industrias dedicadas al diseño, módulos para el mecanizado, etc. Desde el diseño de componentes, su ensamblaje 3D y obtención de los correspondientes planos 2D, hasta módulos para analizar y simular el mecanizado de piezas, realizar análisis por elementos finitos, diseño eléctrico,

electrónico y de tuberías o incluso análisis ergonómico, necesario en determinados casos.

Otro aspecto a destacar de este programa es la extensa librería de materiales de la que dispone, desde madera y piedra, hasta metales y materiales de construcción, sin contar que permite al usuario crear los materiales que necesite, siempre y cuando proporcione las características técnicas y parámetros necesarios para definirlo, tales como la densidad, módulo de Young, coeficiente de Poisson y coeficiente de expansión térmica. Y no sólo eso, sino que además permite crear y trabajar con materiales compuestos, cada vez más empleados en la industria aeronáutica.

Actualmente la versión más extendida de CATIA es la V5, pero la nueva V6 ya ha empezado a comercializarse. Por el momento y hasta nuevo aviso, desde Dassault llega que ambas versiones van a convivir por tiempo, de momento, indefinido.



**Figura 2.1.** Proyecto Perwings realizado por la autora en la asignatura “Cálculo de Aeronaves”

El producto conseguido con CATIA es realmente potente y muy bueno. Las posibilidades en cuanto a desarrollo paramétrico sorprenden, sin olvidar la extremada precisión de trabajo, y a pesar de lo complejo que es, su sencillez de uso de agradece. Es probable que con CATIA se pueda diseñar cualquier cosa por muy compleja que pueda ser. Ejemplo de ello es el trabajo realizado en la asignatura “Cálculo de Aeronaves”, en la que diseñamos una aeronave entera (externa e internamente) sólo con algunos conceptos básicos aprendidos en la asignatura “Diseño Asistido por Ordenador” impartida por el propio Departamento de Ingeniería Gráfica, usando dos o tres módulos.

Una vez expuesto el amplio abanico de posibilidades y ventajas que CATIA ofrece al usuario, consideramos que el uso de dicho programa en este Trabajo de Fin de Grado queda sobradamente justificado. Concretamente, la versión con la que hemos trabajado ha sido CATIA V5 R19.

#### **2.4.1. Módulos de Catia Utilizados**

##### **Sketcher**

Creación de forma rápida y precisa de perfiles en 2D. Mediante métodos sencillos se pueden crear y editar geometrías en 2D, así como relaciones entre dichos elementos geométricos. Una vez creados los elementos se le pueden aplicar restricciones, pudiendo generar así perfiles más complejos.

##### **Part Design**

Permite diseñar con precisión elementos mecánicos en 3D, permitiendo controlar los requisitos del diseño desde un nivel muy básico hasta uno muy avanzado. Esta aplicación combina la gran capacidad del diseño basado en elementos y la flexibilidad de las operaciones booleanas; permitiendo múltiples métodos distintos para el diseño, pudiendo añadir especificaciones a medida que se crea o una vez ya creado.

Una estructura de árbol presenta gráficamente la organización de la jerarquía de características del diseño, que permite una clara comprensión del impacto sobre el elemento que tienen los cambios de diseño.

Las funciones están agrupadas en función de su “filosofía”, según requieran el uso de perfiles creados previamente, de superficies; se apliquen directamente en las entidades, creen modificaciones o establezcan restricciones... Tenemos así por ejemplo los siguientes comandos: extrusión, cavidad, eje, ranura, agujero, nervio, vaciado de nervio, refuerzo, redondeo, chaflán, desmoldeo, vaciado, simetría especular, crear rosca, darle espesor a una superficie, cerrar una superficie, rotar, escalar, crear simetría, crear una matriz, realizar operaciones booleanas...

##### **Assembly Design**

Ensamblaje de conjuntos que permite de forma sencilla establecer restricciones entre los elementos mecánicos el montaje, posicionar de forma automática cada parte y comprobar la corrección del montaje. Los elementos se pueden usar varias veces en un solo montaje o en varios distintos sin duplicar la información. Al establecer restricciones, un “asistente” propone la más correcta según los elementos seleccionados. Genera perspectivas estalladas y detecta colisiones y holguras entre las piezas. Genera una tabla de materiales que permite un correcto recuento de piezas,

independientemente de la complejidad del conjunto.

### **DMU Kinematics**

Define, simula y analiza mecanismos para DMU de todos los tamaños, usando una amplia variedad de tipos de juntas, uniones y articulaciones, o bien generándolas automáticamente transformando las restricciones del ensamblaje. Simula el movimiento del mecanismo fácilmente, lo que permite verificar la corrección del mismo, ya que proporciona análisis de interferencias y distancias mínimas durante el movimiento. Permite simulaciones combinadas mediante la integración de otras aplicaciones.

## 3 DISEÑO DE LOS CARROS CON GUADAÑAS

**E**n el presente capítulo abordaremos de forma concreta el diseño de los carros con guadaña, empezando por el segundo que aparece en la hoja del Códice Atlántico, y dejando el primero para el final. En el primer apartado analizaremos por separado cada uno de los ensamblajes y sistemas mecánicos que lo componen, explicando además su funcionamiento. Se comentarán las soluciones de compromiso que se han tomado en contraste con el diseño de Leonardo, así como la justificación de las dimensiones de la máquina. Además, se discutirán los modelos de diseñadores posteriores. En la segunda parte del capítulo se hablará de la asignación de materiales escogida en relación con la época de Leonardo.

### 3.1. PRIMER CARRO: Mecanismo, partes y funcionamiento de la máquina.

De este diseño de Leonardo sólo contamos con la información dada en la hoja del Códice Atlántico que aparece en la página 8 de este documento. Podemos ver el carro superior representado no sólo en su aspecto completo, sino también en acción de guerra, con los cuerpos mutilados de los combatientes. El carro inferior sin embargo, tiene una representación más limpia, con una imagen que aporta alguna información sobre los engranajes y las ruedas del sistema motor. Además de la información gráfica, contamos con dos anotaciones a pie del diseño; una de ellas (ya comentada) reza: “a menudo hicieron no menos daño a los amigos que a los enemigos”, mientras que la otra da una idea acerca de la dimensión de las guadañas de la parte frontal del carro. Utiliza una medida de la época que equivale a casi 5 metros, y aclara que hay que asegurarse de que estas cuchillas no alcancen a los caballos. El resto del diseño es cosa nuestra.

Por esta razón, el modelo ofrece muchas alternativas de diseño y ha dado pie a múltiples interpretaciones de distintos diseñadores, que iremos comentando a lo largo del documento.

#### 3.1.1 Rueda

La rueda ha sido nuestro punto de partida del diseño. Es un elemento de suma importancia porque es la fuente de potencia: encargada de mover la linterna central, responsable del movimiento de las cuchillas de la parte frontal. Elegimos un diámetro de 1,5 m. inspirados por un documental en el que se lleva a cabo la recreación del carro.



**Figura 3.1.** Rueda del carro extraída del Códice Atlántico de Leonardo da Vinci

En la figura anterior, correspondiente al diseño original de Leonardo, vemos que la rueda está formada por varios elementos. Lo más sensato es hacer la rueda en dos mitades, para facilitar el ensamblaje de todas las piezas que intervienen en el montaje.

Los elementos de la rueda son:

- **Bulones.** Tienen una doble función. Por un lado, mantienen la integridad de la rueda, ya que ésta está compuesta por dos mitades y puede despegarse. Con este elemento se asegura la sujeción y el correcto funcionamiento de la rueda. Por otro lado, su longitud permite engranar con la linterna central, y de este modo transmitir la energía rotatoria a los dos sistemas de cuchillas, el posterior y el anterior.
- **Radios.** Son cada una de las barras que unen rígidamente la zona central con la perimetral.
- **Dientes metálicos.** Necesarios para el agarre al suelo del carro.
- **Rosca.** Es el soporte de los radios y la cuchilla giratoria. Tiene un agujero en el centro para albergar al eje.
- **Eje.** Es el elemento de unión de las dos ruedas del carro. Además, permiten que éstas no se

desplacen transversalmente. Tal y como hemos considerado nuestro diseño, el eje permanecerá fijo: sin movimiento.

- **Cuchilla giratoria.** Su función es impedir que los enemigos puedan acceder al carro por la parte trasera. Su movimiento es solidario con el de la rueda, y debe tener un diámetro adecuado para que no toque el suelo a su paso.

En el dibujo de Leonardo, aparentemente aparece una rueda construida de una sola pieza y de un grosor considerable. Con la dimensión que le hemos dado al diámetro, sería imposible la realización así planteada de la rueda para la época, ya que sería necesaria la obtención de un tablón de madera de gran magnitud. Es decir, un árbol que tenga como mínimo un tronco de 1.5 metros de diámetro. Es por esta razón que se ha decidido hacer cada mitad de rueda en cuatro partes, ensambladas cuidadosamente entre sí.

Las dos ruedas se harían de la misma forma, a excepción de los bulones. Una de las ruedas tiene que tener bulones largos para transmitir el movimiento, y la otra ha de tenerlos cortos para no intervenir en él. Por lo demás, el diseño es idéntico.

### 3.1.2 Linterna Central

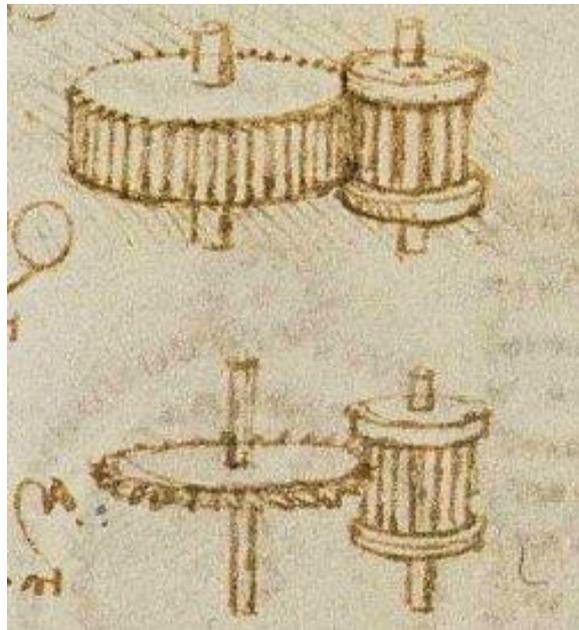
Como ya hemos comentado antes, Leonardo empleó con frecuencia este tipo de engranajes para transmitir el movimiento entre ejes perpendiculares. El carro, arrastrado vigorosamente por caballos, se agarraba al suelo con dos grandes ruedas dentadas y una de ellas, con mayor longitud de bulones, transmitía el movimiento rotatorio al engranaje tipo jaula principal, que hemos llamado “Linterna Central”. Es el punto de unión de todas las partes del carro.

La linterna es un tambor de barras, diseñado especialmente para que los dientes de la rueda dentada, que hemos llamado “bulones”, penetren en su interior y puedan arrastrarlo en su movimiento. El funcionamiento es similar al de una transmisión por engranajes, pudiendo transferir el movimiento giratorio entre dos ejes perpendiculares.

Para el acoplamiento con la rueda será necesario tener en cuenta la relación de transmisión entre la rueda dentada y la linterna para que los dientes aseguren un correcto funcionamiento de la máquina. Lo veremos más adelante en el modelado.

En el diseño de Leonardo, la linterna viene sujeta por varios pilares unidos entre sí. Este soporte es creado para que el eje pueda estar bien sujeto y no tenga movimiento de precesión. También se le añaden unos cojinetes al eje con el objetivo de poder sustituirlos en caso de desgaste y evitar dañar la estructura.

Este tipo de transmisión tuvo gran importancia en su época, pero en la actualidad está totalmente en desuso debido a que presenta muchísimos inconvenientes (grandes pérdidas energéticas, transmisión discontinua del movimiento, materiales poco duraderos, gran tamaño...) respecto a los otros sistemas empleados actualmente (polea-correa, cadena-piñón, y sistema de engranajes).



**Figura 3.2.** Diseños de engranajes tipo jaula de Leonardo da Vinci

### 3.1.3 Árbol motor

Mediante un largo árbol motor, el movimiento rotatorio de la linterna es transmitido al arma principal del carro, una estructura constituida por cuatro guadañas.

El árbol motor consiste en dos guías inferiores, encargadas de dirigir a los caballos, y en una guía superior responsable del movimiento de la parte frontal del carro. Esta última pasará entre las cabezas de los caballos, y llevará incorporados engranajes tanto al principio como al final de la guía. Todas las guías han de tener longitud suficiente para que los caballos no sean dañados por las guadañas (tal y como indicaba Leonardo en sus anotaciones). Para el diseño de las guías se tendrá en

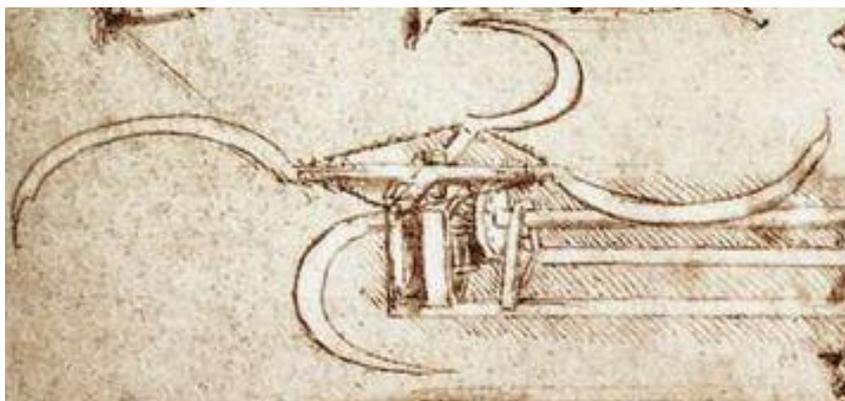
cuenta el tamaño estándar de un caballo. Lo veremos más adelante en el modelado.

### 3.1.4 Guadañas de guerra

El fin último de todos los engranajes es accionar el juego de guadañas de la parte frontal. El soporte ha de ser robusto para resistir el impacto de las cuchillas contra los combatientes.

La guadaña era una herramienta que en principio se usaba para fines agrícolas. Sin embargo, es un útil que por su disponibilidad, fue bastante fácil de adoptar como arma de guerra, dando como resultado una cuchilla muy afilada que podía, sin problemas, decapitar a un hombre o desmembrarlo. Esta reconversión de herramienta agrícola en arma de guerra debió resultar, aparte de contundente, bastante atractiva para las tropas de a pie.

Sin embargo, la guadaña tenía una serie de carencias, lo cual es perfectamente lógico tanto en cuanto su finalidad no era rebanar cuellos enemigos, sino el heno o el pasto en las eras. De entrada, el filo situado en la parte cóncava de la cuchilla no era lo más adecuado para aprovechar la energía cinética que le proporcionaba su peso, y su forma excesivamente curvada, no le permitía herir de punta. No quiere decir esto que la guadaña, tal cual, no fuera de por sí un arma temible, pero sí bastante mejorable. Con todo, su escaso precio y abundancia hizo que el uso de la guadaña perdurase hasta épocas tan recientes como finales del siglo XVIII y principios del XIX en el este de Europa, en manos de una infantería pobremente equipada cuyos mandos no podían proveerla de armas de fuego.

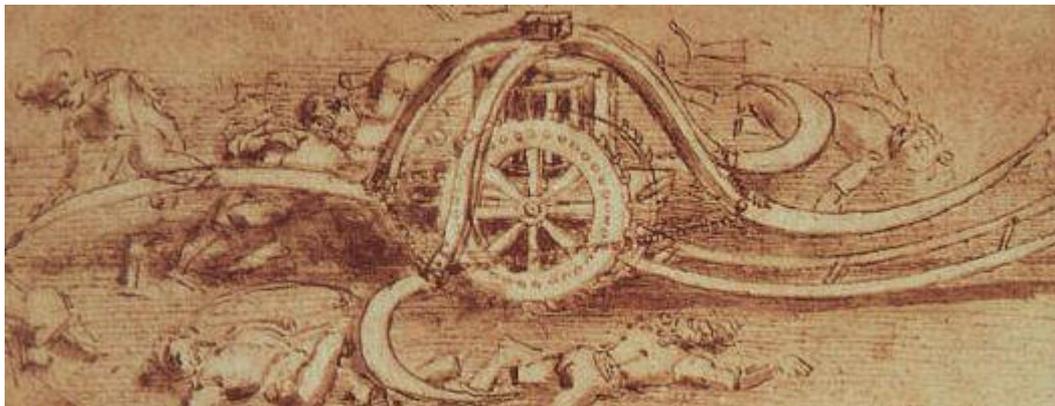


**Figura 3.3.** Diseño de la parte frontal del carro de Leonardo da Vinci

### 3.2. SEGUNDO CARRO: Mecanismo, partes y funcionamiento de la máquina.

El segundo carro aprovecha parte de la estructura del primero. La rueda es la misma y el mecanismo que conforma con la linterna central también. Sin embargo, carece de pilares que soporten el eje. Para solucionar el problema de precesión que puede presentarse, se entierra una mayor parte del eje en la base del carro, además de acortarlo con respecto al primer diseño.

El sistema de árbol motor es ahora más sencillo, pues sólo son necesarias dos guías que sirvan de intermediarias entre los caballos y la parte anterior del carro. Sin embargo, el sistema de guadañas ahora es más complejo. En el primer carro, las guadañas se presentan a una altura considerable, posiblemente para causar estragos en caballos enemigos. Ahora en el segundo, se decide colocarlas a baja altura, posiblemente destinadas a herir a las tropas de pie.



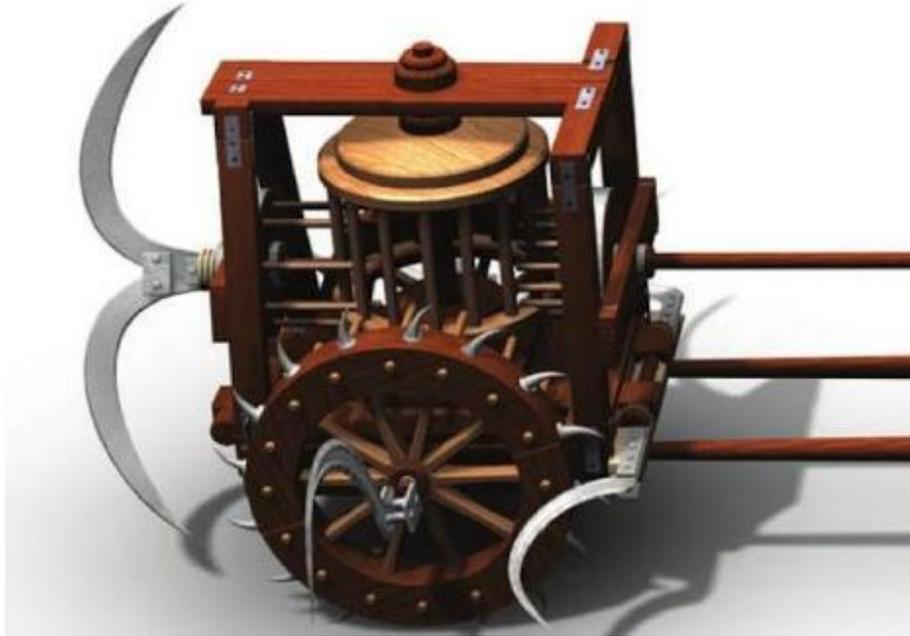
**Figura 3.4.** Diseño del segundo carro en la hoja del Códice Atlántico

### 3.3. OTROS MODELOS.

Tal y como se ha comentado anteriormente, las pocas indicaciones que dio Leonardo sobre el diseño han dado pie a distintos diseñadores a hacer su propia interpretación del dibujo que aparece en el Códice Atlántico. En concreto, en este apartado veremos dos modelos diferentes, uno perteneciente al libro “*Atlas ilustrado de las máquinas de Leonardo*”, y otro que hemos encontrado en la red. En un principio, fueron escogidos como referencia para este Trabajo Fin de Grado. Sin embargo, los problemas no tardaron en aparecer. Parece que la belleza y la elegancia del modelo han prevalecido frente al correcto funcionamiento de la máquina, olvidando el verdadero objetivo del proyecto.

Así, a continuación veremos detalladamente los dos modelos y los fallos que han ido apareciendo en el transcurso del proyecto.

### 3.3.1. Primer modelo

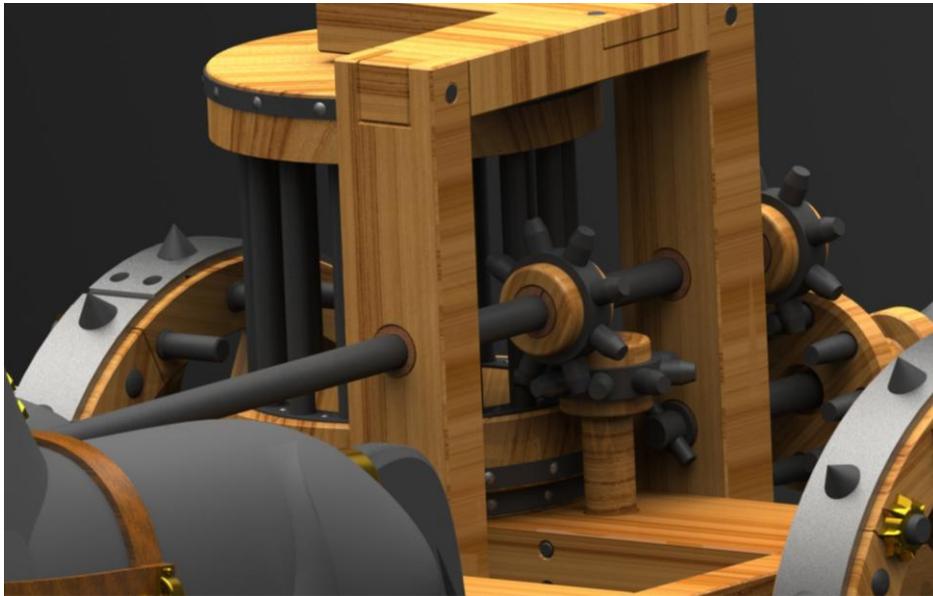


**Figura 3.5.** Diseño extraído de “*Atlas ilustrado de las máquinas de Leonardo*”

En el modelo vemos que, efectivamente, las espigas de las ruedas van moviendo la linterna central, al igual que en el diseño de Leonardo. En principio hasta aquí no hay fallo, pero si nos fijamos bien en el resto de engranajes, ocurre algo raro. Los discos laterales están introducidos totalmente en la linterna central, y de ser así el movimiento no ocurriría. Este fenómeno ocurre tanto en el disco dentado correspondiente al árbol motor como en el disco dentado correspondiente a la guadaña trasera. Además, en el dibujo se ve claramente como al girar los dientes de los discos laterales, las espigas chocan con la base de la linterna central, impidiendo otra vez el movimiento.

Para solucionar estos inconvenientes, se ha quitado la tapa de arriba de la linterna central y se han acortado las espigas de ésta, de modo que quedan a una altura adecuada para engranar los discos dentados de los laterales. Además, se han colocado los discos un poco más hacia arriba, de modo que las espigas no corten la base de la linterna central.

### 3.3.2. Segundo modelo



**Figura 3.6.** Diseño extraído de la página “Grabcad”

Este dibujo muestra una posible alternativa al diseño que propuso Leonardo. Nos llamó mucho la atención por lo sofisticado del modelo. La rueda dentada empuja a la linterna central, que se encuentra desplazada del centro de la máquina. La linterna traslada el movimiento a un pequeño engranaje situado en la base del carro. Éste mueve a uno idéntico, responsable del movimiento en el eje, que sí está centrado. El traslado de movimiento es limpio, y la belleza del carro es extraordinaria. Nos pareció un modelo interesante e intentamos imitar el mecanismo, pero, al igual que en el diseño anterior, los problemas no tardaron en aparecer.

En primer lugar, lo primero que salta a la vista es el engranaje trasero. Se intuye que si el engranaje sujeto al eje gira, probablemente choque con los dientes del engranaje de la guadaña trasera. Es más, si nos fijamos en la rueda dentada, las espigas probablemente no lleguen a chocar nunca con la linterna central.

El error que es más difícil ver a simple vista es el siguiente: cuando realizamos los cálculos para asegurar que los engranajes coincidan, es imposible que tal y como está montado, el mecanismo funcione. La relación entre engranajes es la siguiente: para que encajen adecuadamente, el paso entre espigas ha de ser el mismo. Es decir, matemáticamente, ha de cumplirse esta relación:

$$\frac{2\pi R_1}{N_1} = \frac{2\pi R_2}{N_2}$$

Siendo R el radio correspondiente al disco de espigas, y N el número de dientes del disco.

Por un lado, si tomamos como referencia la rueda dentada pequeña centrada en la base, aparentemente  $R_1 \sim 150 \text{ mm}$  y  $N_1 \sim 10$ . Para que la linterna tenga el tamaño de la figura,  $R_2 \sim 500 \text{ mm}$ , y  $N_2 \sim 30$ . Aunque pongamos las espigas más finas, es imposible que las espigas de la rueda penetren en la linterna y tengan el mismo paso.

Por otro lado, si tomamos como primer elemento de referencia la rueda,  $R_1 \sim 650 \text{ mm}$  con  $N_1 \sim 16$ , obtenemos para la linterna  $R_2 \sim 500 \text{ mm}$ , y  $N_2 \sim 12$ . Con estos datos nos saldría la rueda pequeña de  $R_3 \sim 150 \text{ mm}$ , y  $N_3 \sim 3$ , lo cual contrasta con la figura.

En definitiva, una vez más cobra más importancia el efecto visual que lo puramente mecánico, y el modelo, tal y como está planteado, no funciona.

### 3.4. MATERIALES.

A pesar de que no existan evidencias de que los carros con guadañas fueran construidos jamás, en este capítulo se hará referencia a los materiales que pudo haber usado Leonardo en su hipotética realización. En su época, a caballo entre la Edad Media y la Edad Moderna, los componentes básicos del armamento ofensivo y defensivo eran el hierro y la madera.

#### **Madera**

La madera se revela en la Edad Media como el elemento más sencillo para trabajar y transportar. Debido a los miles de bosques en Europa y en otros continentes, su abundancia hace que se convierta en un artículo de comercio e intercambio. Es por ello que se produjo en la época medieval el cambio de carácter de los bosques. En la Antigüedad, en Europa Occidental predominaban los bosques foliáceos (robleales, hayales), que ocupaban suelos relativamente fértiles y proporcionaban madera fina. Su exterminio originó el aumento del peso específico de las variedades coníferas, y en la actualidad son éstas las que forman la mayor parte de las reservas forestales de la parte occidental del continente. No es de extrañar que Leonardo, teniendo acceso a la flora italiana con estas características, usara cualquiera de las maderas que mencionaremos a continuación:

- Madera conífera.
  - o Son las más antiguas y las más utilizadas habitualmente en construcción y carpintería, ya que proporcionan las mejores calidades de madera en cuanto se refiere a las características de trabajo y resistencias mecánicas. Son maderas blandas, ligeras y fáciles de trabajar. En esta tipología encontramos todas las variedades de pino. Entre ellas, el Pino Silvestre es la madera de carpintería y construcción por excelencia: rojiza y de grano fino.
  
- Madera de Roble.
  - o Es la madera que mejor resiste las alternativas de sequedad y de humedad .Es dura, resistente, tenaz, densa, poco alterable, de labra fácil y admite buen pulimento. Sin embargo es cara, resquebraja y es atacada por los gusanos.
  
- Madera de Haya.
  - o Esta madera es dura y pesada, se alabea mucho y aguanta mal las alternativas de sequedad y humedad, agrietándose; se pudre y está expuesta a la carcoma, conservándose sumergida durante mucho tiempo o exponiéndose al calor. Sin embargo, es la que mejor se impregna, con la ventaja de poder emplearse en cualquier clase de obra hidráulica marítima, por ser tan resistente como la madera de Roble y más barata. Se presta al curvado y se tornea bien.

## Hierro

El hierro se generaliza en la Edad Media sustituyendo completamente al uso de bronce, considerado el mejor material de uso en aquella época. Es un producto de lujo usado principalmente para la fabricación de espadas, armaduras y otras armas de la época: la habilidad del herrero se presenta entonces como característica indispensable para su manejo. El herrero será considerado como el responsable de fabricar armas, cruces, espadas y armaduras invencibles: un personaje enaltecido al que se dota de poderes superiores. Sin embargo, no todas las religiones ven con buenos ojos el hierro. Así, en aquella época, la madera era considerada parte del bien, y el hierro sólo una representación del mal. Por tanto, nunca se debía emplear el hierro como único componente, y puede ser esta la explicación de que la mayoría de las armas contengan algún componente de madera.

Una vez más, al no haber información ninguna acerca de la realización, usaremos la más conveniente para nosotros en el diseño. Afortunadamente, CATIA ofrece una amplia biblioteca de materiales que nos facilitará la posibilidad de modificar la textura de las diferentes piezas.

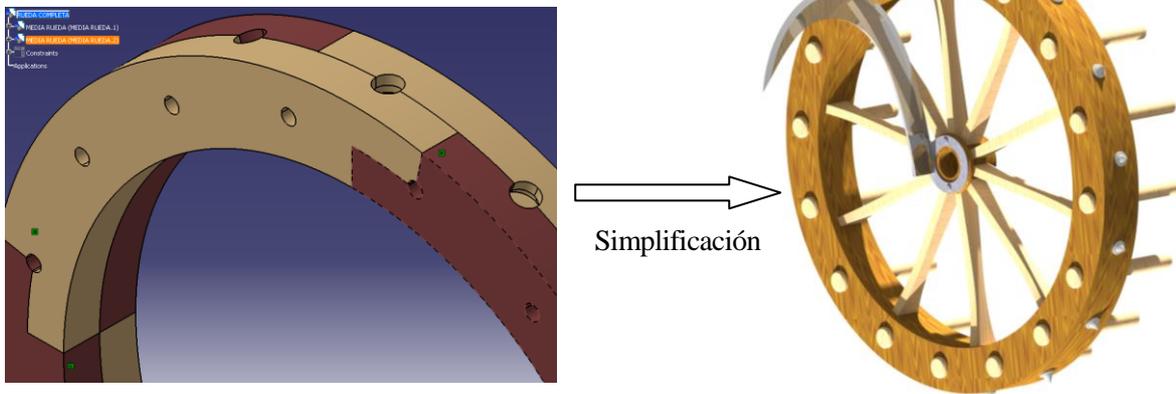
## 4 MODELADO DE LOS CARROS CON GUADAÑAS

En el capítulo anterior, hemos dado nuestra propia interpretación del modelo de Leonardo, describiendo el diseño al detalle y desmenuzando las piezas que componen el conjunto. A continuación y en base a lo anterior, vamos a centrarnos en el modelo CATIA, la parte más importante de este Trabajo Fin de Grado.

### 4.1. Modelado del primer carro

Constituye la mayor parte del trabajo, ya que el segundo carro puede obtenerse a partir de ciertas modificaciones en el primero.

#### 4.1.1 Rueda



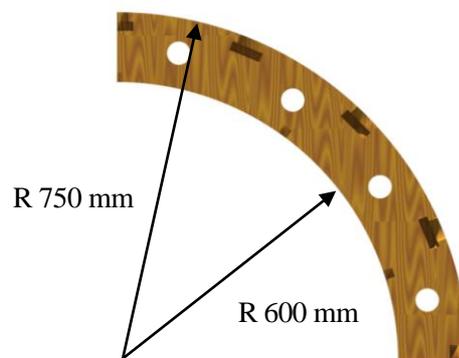
**Figura 4.1.** Rueda derecha

La rueda, tal y como hemos comentado con anterioridad, posee varios elementos. Cada pieza se ha hecho por separado, y luego se han ensamblado todas en el módulo “Assembly Design”. Dada la cantidad de piezas a insertar en la rueda, se decidió hacer ésta en dos mitades con el objeto de facilitar el montaje. En un principio, se pensó hacer cada mitad de rueda en cuatro partes, ya que su diámetro, al ser de 1.5 metros, empujaba a ello. Desde el punto de vista práctico, encontrar un árbol

de tales dimensiones hubiese sido complicado. Sin embargo, ensamblar cuatro partes de rueda con sus correspondientes juntas y enganches, sumado al resto de piezas del conjunto, añade al modelo un peso computacional que causaría problemas en el normal funcionamiento del programa. Se decide entonces hacer la primera simplificación: la mitad de la rueda se hará de una sola pieza, y contendrá los huecos correspondientes a los dientes metálicos, los radios y los bulones o espigas. A continuación veremos cómo se ha realizado cada pieza.

#### 4.1.1.1 Part 1

Dado que el elemento está dotado de simetría radial, haremos sólo una cuarta parte. Con la ayuda del módulo “Sketcher” dibujaremos el perfil, que ha de contener agujeros espaciados  $22.5^\circ$  para los bulones y para los dientes metálicos, así como el hueco para los radios, distanciados  $36^\circ$ . De esta forma, una vez apliquemos simetría, deben aparecer en la rueda 16 dientes metálicos, 16 bulones y 10 radios. El diámetro exterior será de 1500 mm, y el interior de 1200 mm. Una vez dibujado el perfil, le aplicaremos una extrusión en el módulo de “Part Design”, que nos permitirá darle el grosor de 150 mm.

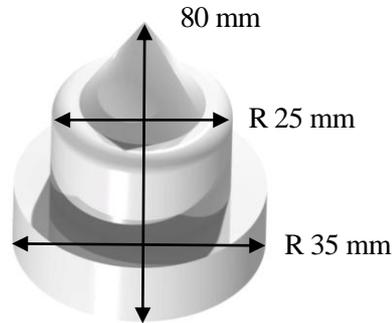


**Figura 4.2.** Cuarto de Rueda

#### 4.1.1.2 Part 2

Esta pieza, a la que hemos llamado diente metálico, tiene la función de agarrar al suelo a la máquina. En un principio se pensó hacer la cuchilla más afilada y curvada, inspirándonos en modelos de otros diseñadores. Sin embargo, descubrimos que no sería adecuada para el fin que persigue, ya que en terreno de piedra la punta quedaría inservible. Para la realización de la base hemos usado las mismas herramientas que en el Part anterior, “Sketcher” y extrusión. La parte cónica que sobresale de la rueda, se ha hecho usando revolución y es de unos 40 mm de altura, y la parte enterrada de otros 40.

Se ha hecho una plataforma en la base de mayor diámetro para que sea imposible el movimiento en dirección radial de la rueda. En caso de que el diente sea dañado, el diseño de Part 1 admite una fácil sustitución por la manera en que se ha planteado el ensamblaje.

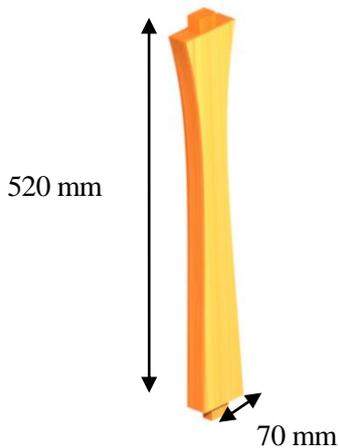


**Figura 4.3.** Diente metálico

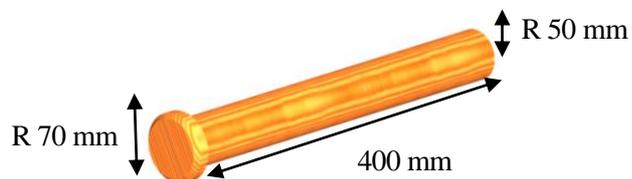
#### 4.1.1.3 Part 3

Los radios de la rueda, como hemos comentado anteriormente, tienen la función de unir rígidamente la zona central con la perimetral. Tienen una longitud de 520 mm, y cuentan con unas partes salientes en los extremos para que, mediante presión, se puedan introducir en las ruedas. Además, de esta forma se facilita la sustitución en caso de fallo del radio.

Se ha usado la herramienta “Spline” en el Sketcher para darle la curvatura, y luego se ha aplicado extrusión.



**Figura 4.4.** Radio



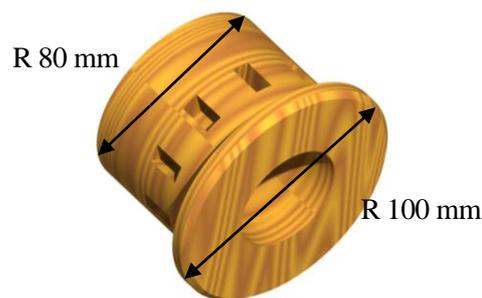
**Figura 4.5.** Bulón

#### 4.1.1.4 Part 4

Los bulones tienen la función, en la rueda derecha, de mantener unidas las dos mitades de las ruedas y de trasladar el movimiento rotatorio a la linterna central a través de su longitud. Es por ello que tienen 400 mm de largo. Sin embargo, esta longitud es distinta en la rueda izquierda, ya que si fuera la misma la rueda izquierda participaría en el engranaje y el conjunto no se movería. Por esta razón, los bulones de la rueda izquierda tienen una longitud de 200 mm. Están colocados a  $22.5^\circ$  entre ellos en un radio de 675 mm, y forman un total de 16 piezas. Más tarde veremos cómo esta decisión afecta al resto de engranajes del carro.

#### 4.1.1.5 Part 5

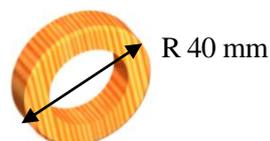
Es la rosca cilíndrica que sirve de elemento de unión entre el eje y los radios. Para éstos tiene una serie de perforaciones en la superficie, y para el eje un boquete de 90 mm de diámetro en el centro. Por esta razón, ha de contar con un diámetro considerable para asegurar la integridad de la pieza.



**Figura 4.6.** Rosca

#### 4.1.1.6 Part 6

Son unas piezas circulares cuya función es reforzar la unión de las dos mitades de rueda para asegurar su correcto funcionamiento. Se colocan en la cara oculta de la rueda, de manera que su eje coincida con el bulón. Su diámetro inferior es algo más pequeño que el diámetro de la espigas, para que la presión con la que son introducidos sea suficiente para cumplir su función.



**Figura 4.7.** Sujeción

#### 4.1.1.7 Part 7/8

La función de este elemento es evitar que los enemigos accedan al carro por su parte trasera. Son dos piezas por separado, pero se ha decidido la representación conjunta para esclarecer el funcionamiento. El Part7 se compone de una placa plana, sujeta a la rosca mediante tornillos, y una placa saliente responsable de la sujeción de la guadaña. El Part 8 es la guadaña en sí misma, cuya altura máxima no pasa de los 666 mm, evitando así la posibilidad de choque con el suelo. Para su realización en CATIA, se ha dibujado el perfil mediante “Spline”. Luego, se ha extruido 10 mm y, mediante la opción de vaciado siguiendo una curva, se ha afilado el borde exterior.



**Figura 4.8.** Cuchilla giratoria

#### 4.1.1.8 Product 1

Recapitulando, tenemos la siguiente tabla resumen:

| RUEDAS |        |          |           |                 |
|--------|--------|----------|-----------|-----------------|
| Tipo   | Número | Cantidad | Material  | Nombre          |
| Part   | 1      | 2        | Teak      | Mitad Rueda     |
| Part   | 2      | 16       | Magnesium | Diente Metálico |
| Part   | 3      | 10       | Cedar     | Radio           |
| Part   | 4      | 16       | Cedar     | Bulón           |
| Part   | 5      | 1        | Teak      | Rosca           |
| Part   | 6      | 16       | Cedar     | Sujeción        |

|         |   |   |                 |                    |
|---------|---|---|-----------------|--------------------|
| Part    | 7 | 1 | Brushed metal 1 | Placa Circular     |
| Part    | 8 | 1 | Magnesium       | Cuchilla giratoria |
| Product | 1 | 1 | -               | Derecha            |
| Product | 2 | 1 | -               | Izquierda          |

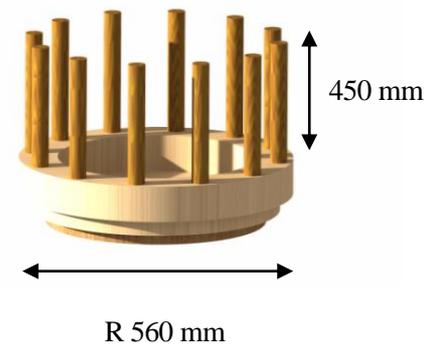
**Tabla 1.** Componentes del conjunto “RUEDAS”

#### 4.1.2 Linterna Central

Para el diseño de la linterna, se ha tenido en cuenta el radio de las espigas de la rueda, así como el número de éstas. Tal y como vimos en la sección dedicada a los modelos de otros autores, la relación que deben cumplir este conjunto y el anterior es:

$$\frac{2\pi R_1}{N_1} = \frac{2\pi R_2}{N_2}$$

Siendo:  $R_1 = 675 \text{ mm}$ ,  $N_1 = 16$ ,  $R_2 = 506.25 \text{ mm}$ , y  $N_2 = 12$ .



**Figura 4.9.** Linterna Central

| LINTERNA CENTRAL |        |          |          |                  |
|------------------|--------|----------|----------|------------------|
| Tipo             | Número | Cantidad | Material | Nombre           |
| Part             | 9      | 1        | Cedar    | Base de linterna |
| Part             | 10     | 12       | Teak     | Espiga gruesa 1  |
| Part             | 11     | 1        | Oak      | Disco giratorio  |
| Product          | 3      | 1        | -        | Linterna Central |

**Tabla 2.** Componentes del conjunto “Linterna Central”

En un principio se construyó la linterna con una tapadera superior, siguiendo uno de los modelos citados en el tercer capítulo. Debido a los problemas que comentamos, el diseño tuvo que sufrir ciertas modificaciones, y la tapadera tuvo que ser suprimida. Para suplantar la función de amarre que ejercía con las espigas, se aumentó el diámetro de las espigas, y consecuentemente el de los agujeros de la base, así como su profundidad. Como resultado, las espigas tienen 70 mm de diámetro y los

agujeros serán considerados con un diámetro ligeramente inferior para que mediante presión, las espigas puedan encajarse.

La base contiene un agujero central para albergar el eje de la linterna, que se moverá solidariamente con ésta. Más adelante nos centraremos en este elemento.

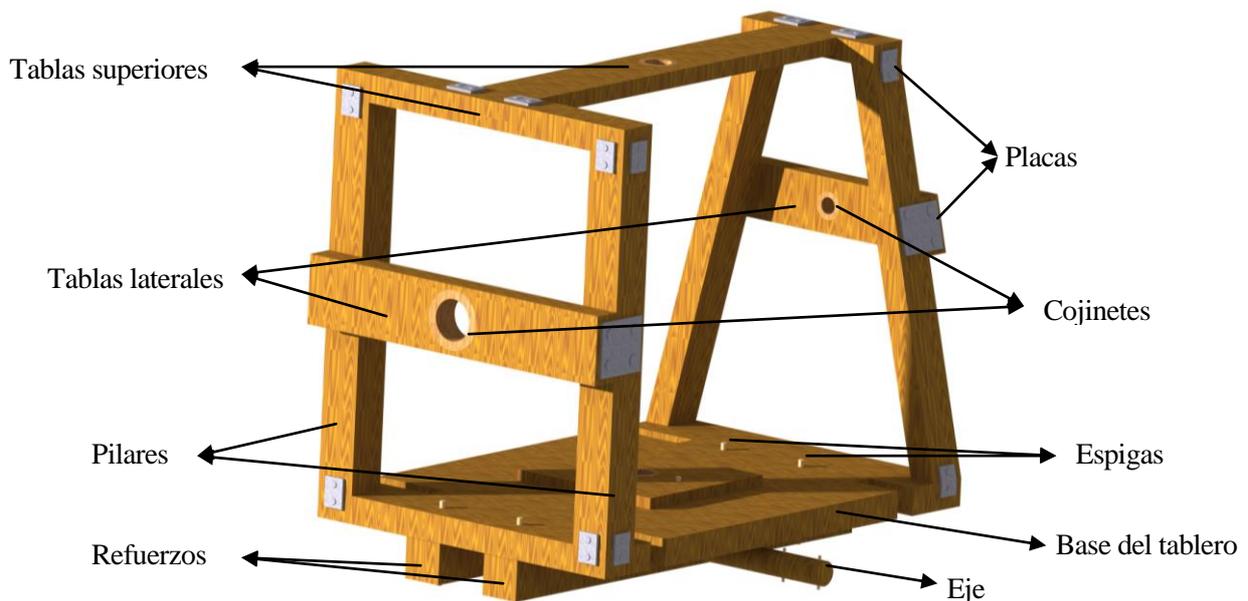
Es fundamental que esta parte del carro esté bien diseñada, ya que se encarga de hacer rotar a la guadaña trasera, así como del movimiento del arma más mortífera: las cuatro guadañas de la parte frontal, por las cuales Leonardo diseñó el carruaje.

### 4.1.3 Tablero

Las razones por las que parece que Leonardo diseñó esta parte del carro, a nuestro parecer, son:

- Evitar el movimiento de precesión del eje de la linterna central.
- Soportar la guadaña trasera giratoria.
- Sujetar la guía responsable del movimiento de la parte frontal.
- Servir de elemento de unión entre las dos ruedas.

A continuación presentaremos todas las piezas que componen el conjunto:



**Figura 4.10.** Tablero

| TABLERO |        |          |                 |                  |
|---------|--------|----------|-----------------|------------------|
| Tipo    | Número | Cantidad | Material        | Nombre           |
| Part    | 12     | 1        | Teak            | Base de tablero  |
| Part    | 13     | 2        | Teak            | Refuerzo         |
| Part    | 14     | 1        | Oak             | Cojinete 1       |
| Part    | 15     | 1        | Teak            | Eje 1            |
| Part    | 16     | 2        | Oak             | Cojinete 2       |
| Part    | 17     | 4        | Cedar           | Espiga 1         |
| Part    | 18     | 4        | Cedar           | Espiga 2         |
| Part    | 19     | 2        | Cedar           | Espiga 3         |
| Part    | 20     | 2        | Teak            | Pilar 1          |
| Part    | 21     | 12       | Brushed metal 1 | Placa 1          |
| Part    | 22     | 1        | Teak            | Tabla lateral 1  |
| Part    | 23     | 1        | Oak             | Cojinete 3       |
| Part    | 24     | 2        | Brushed metal 1 | Placa 2          |
| Part    | 25     | 1        | Teak            | Tabla Superior 1 |
| Part    | 26     | 1        | Teak            | Tabla Superior 2 |
| Part    | 27     | 1        | Teak            | Tabla Superior 3 |
| Part    | 28     | 1        | Oak             | Cojinete 4       |
| Part    | 29     | 2        | Teak            | Pilar 2          |
| Part    | 30     | 1        | Teak            | Tabla lateral 2  |
| Part    | 31     | 2        | Brushed metal 1 | Placa 3          |
| Part    | 32     | 2        | Brushed metal 1 | Placa 4          |
| Part    | 33     | 2        | Brushed metal 1 | Placa 5          |
| Part    | 34     | 1        | Oak             | Cojinete 5       |
| Product | 4      | 1        | -               | Tablero          |

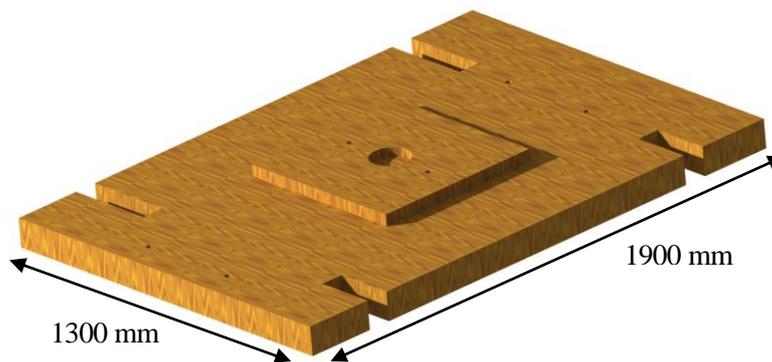
**Tabla 3.** Componentes del conjunto “TABLERO”

#### 4.1.3.1 Part 12

La base del tablero tiene un espesor de 100 mm y es una pieza clave de este ensamblaje. La idea original era hacer esta pieza tal y como se hacía antiguamente: cogiendo varios tacos de madera y ensamblándolos entre sí mediante colas, espigas, o placas metálicas, debido a la dificultad de encontrar un tablón de madera de tales dimensiones (al igual que pasaba con la rueda). Nuevamente, este diseño aportaría lentitud y coste computacional, por lo que se llegó a la segunda simplificación del modelo: el tablón se hará a partir de una sola pieza.

Una vez tomada esta decisión, se realizó una extrusión de un rectángulo de 1300 mm de ancho y 1900 mm de largo, y luego se fue moldeando conforme a las necesidades que iban surgiendo en el diseño. Para alojar la linterna en medio del tablero, se ha diseñado un cuadrado en la parte central con un agujero para el eje. La razón por la que se ha incluido más material es meramente estructural: tiene que soportar el peso de la linterna. Además, tener más grosor en esa parte le permite al eje penetrarse más en la base, y reducir su movimiento transversal.

Se han hecho ranuras a los laterales del tablero para que la rueda, en su movimiento, no interfiera con sus espigas en la base. Los agujeros pasantes que pueden apreciarse en las caras del tablero corresponden a la colocación posterior de unas espigas, que sujetarán dos tableros de refuerzo e impedirán el movimiento del eje de las ruedas.



**Figura 4.11.** Base del tablero

#### 4.1.3.2 Part 13

Los refuerzos se colocan en la parte inferior de la base para que sirvan de apoyo estructural y la base del tablero no flechte. Además, cumplen otra función: sujetar el eje de las ruedas. Con objeto de que el movimiento del eje no desgaste las paredes de los refuerzos, hemos puesto cojinetes que en caso de ser erosionados permiten una cómoda sustitución. Los refuerzos permanecen unidos a la base gracias a las espigas colocadas a lo largo de su longitud. Su modelado consta de una extrusión y algunos vaciados para los agujeros, de 20 mm de diámetro para las espigas y de 110 mm para el cojinete.



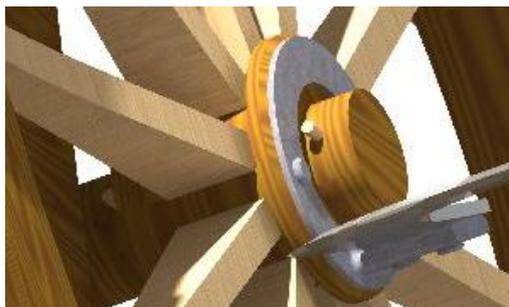
**Figura 4.12.** Refuerzo

#### 4.1.3.3 Part 17-19

Son los “Part” que corresponden a las espigas situadas en la parte inferior del tablero. Hay tres tipos, ya que varían en diámetro y longitud según donde vayan colocadas, pero el diseño es idéntico para todas. Poseen un diámetro ligeramente superior al de los agujeros destinados a su colocación para introducirlas a presión.

#### 4.1.3.4 Part 15

El eje de las ruedas, de 95 mm de diámetro, además de conectar el movimiento entre las dos ruedas permite que éstas no se desplacen transversalmente gracias a las espigas situadas en los extremos, como podemos ver en la figura. Al igual que el diseño anterior, se ha extruido un perfil (esta vez circular) y se ha hecho un vaciado para los agujeros.

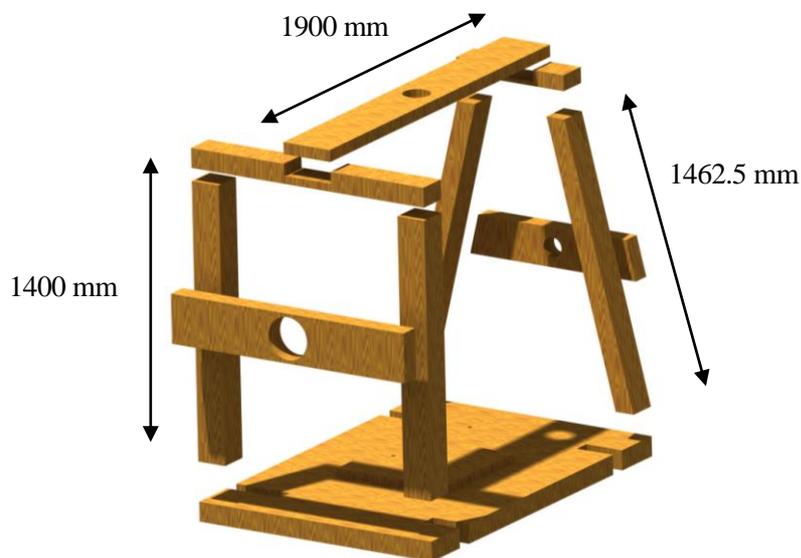


**Figura 4.13.** Detalle del eje de las ruedas

#### 4.1.3.5 Part 20-34

Son todos aquellos tablonces de madera que conforman el resto de la estructura, así como cojinetes y placas metálicas.

Hay distintos tipos de tablonces según la función que cumplen. Los pilares, se disponen verticalmente en la parte frontal y de manera oblicua en la parte trasera con el objeto de dar altura suficiente para albergar la linterna central. Los tablonces laterales, hechos con la intención de soportar algún eje, disponen de cojinetes para minimizar el efecto del roce y se disponen horizontalmente. Por último, los tablonces que comportan la parte de arriba encajan entre ellos para su fin último: sujetar el eje de la linterna.



**Figura 4.14.** Despiece del tablero

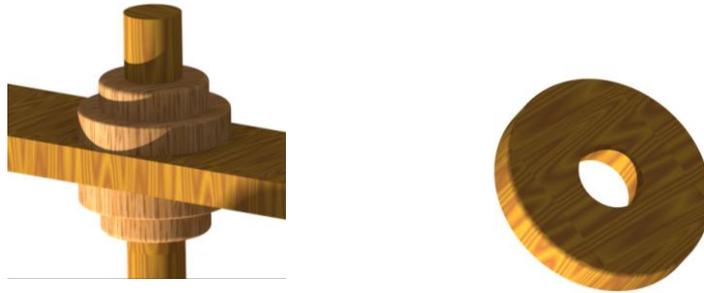
Todos estos tablonces necesitan un adecuado ensamblaje para el correcto funcionamiento de la máquina. Entre las opciones estaban las espigas, de cuyo ejemplo tenemos el segundo modelo que presentamos en el apartado del capítulo 3, y las placas metálicas que al final hemos utilizado. Dependiendo de la zona para la que estén pensadas, las placas adoptan diferentes formas y dimensiones. Sólo en esta parte del carruaje, existen 5 tipos, algunos de los cuales se presentan en la siguiente figura:



**Figura 4.15.** Placas metálicas

#### 4.1.4 Eje Central

Es el eje correspondiente al conjunto de la linterna. De 95 mm de diámetro y 1700 mm de longitud, tiene impedido el movimiento de precesión gracias a las dos piezas cilíndricas que vemos en la imagen. Se incluye en este conjunto un disco giratorio colocado en la parte inferior del eje con el fin de facilitar el giro de la linterna.



**Figura 4.16.** Eje central

| EJE CENTRAL |        |          |          |                 |
|-------------|--------|----------|----------|-----------------|
| Tipo        | Número | Cantidad | Material | Nombre          |
| Part        | 35     | 1        | Teak     | Eje 2           |
| Part        | 36     | 2        | Oak      | Agarres         |
| Part        | 37     | 1        | Teak     | Disco rotatorio |

**Tabla 4.** Componentes del conjunto “EJE CENTRAL”

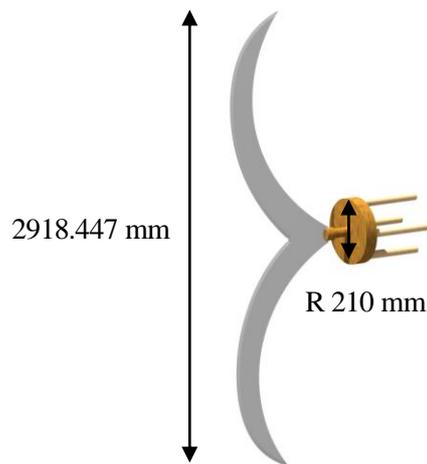
#### 4.1.5 Guadaña trasera

A las cuchillas giratorias colocadas en las ruedas se les suma esta guadaña para evitar que los enemigos se acerquen al carro por la parte trasera. A pesar de casi sus 3 metros de longitud, se ha colocado a una altura suficiente para que no toque el suelo en su movimiento. Además, se han realizado los cálculos pertinentes para el engranaje con la linterna central:

$$\frac{2\pi R_1}{N_1} = \frac{2\pi R_2}{N_2}$$

Siendo:  $R_1 = 506.25 \text{ mm}$ ,  $N_1 = 12$ ,  $R_2 = 168.75 \text{ mm}$ , y  $N_2 = 4$ .

A continuación se presentan los resultados:



**Figura 4.17.** Guadaña trasera

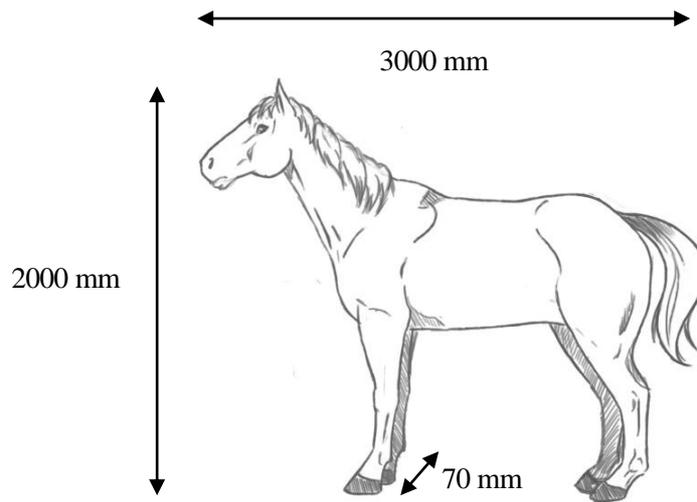
| GUADAÑA TRASERA |        |          |           |                 |
|-----------------|--------|----------|-----------|-----------------|
| Tipo            | Número | Cantidad | Material  | Nombre          |
| Part            | 38     | 1        | Teak      | Base circular   |
| Part            | 39     | 1        | Teak      | Eje 3           |
| Part            | 40     | 1        | Teak      | Soporte guadaña |
| Part            | 41     | 4        | Cedar     | Espiga 4        |
| Part            | 42     | 1        | Magnesium | Guadaña         |
| Product         | 5      | 1        | -         | Guadaña trasera |

**Tabla 5.** Componentes del conjunto “GUADAÑA TRASERA”

#### 4.1.6 Guías

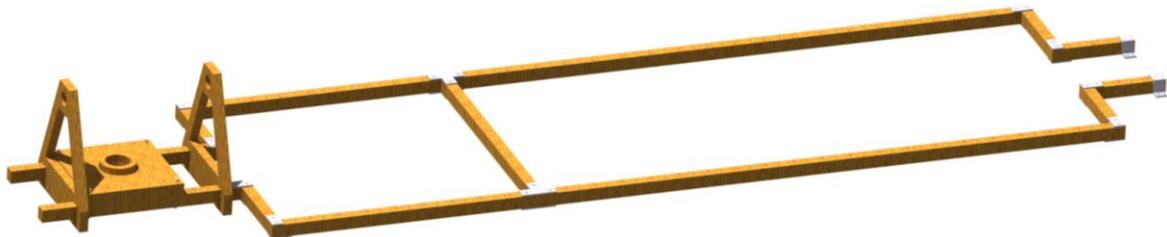
En la hoja del Códice Atlántico, Leonardo dibujó como única fuente de propulsión dos caballos, uno a cada lado del árbol motor que se encarga de dar movimiento a las guadañas de la parte frontal. Gran amante de los animales, añadió una anotación a pie del diseño aclarando que era imprescindible que los caballos no sufrieran ningún daño por parte de las cuchillas. Por esta razón, las guías son un elemento clave del diseño, y han de cumplir dos funciones: guiar y proteger a los caballos en la

batalla.



**Figura 4.18.** Dimensiones de un caballo estándar

Para cumplir dicha especificación, los datos de partida han sido las dimensiones del caballo, obtenidas directamente del famoso libro de Neufert, “*Arte de proyectar en Arquitectura*”. Partiendo de esta base se ha diseñado el resto de la estructura, dando como resultado la hoja que se presenta a continuación.



**Figura 4.19.** Guías

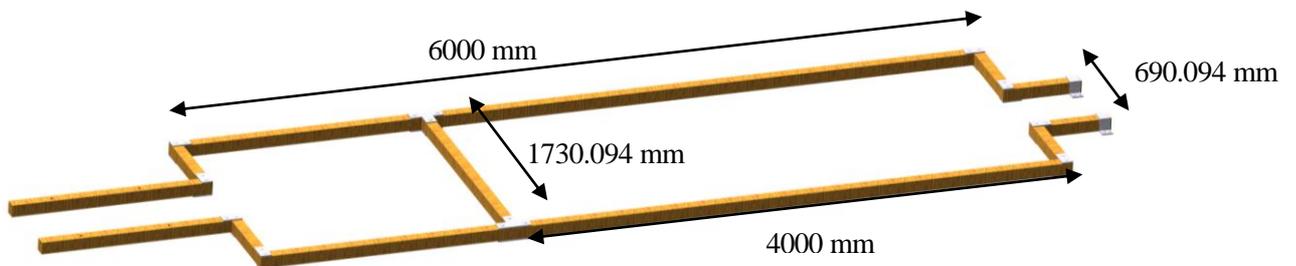
| GUÍAS |        |          |          |        |
|-------|--------|----------|----------|--------|
| Tipo  | Número | Cantidad | Material | Nombre |
| Part  | 43     | 1        | Teak     | Guía 1 |
| Part  | 44     | 1        | Teak     | Guía 2 |
| Part  | 45     | 1        | Teak     | Guía 3 |
| Part  | 46     | 1        | Teak     | Guía 4 |
| Part  | 47     | 1        | Teak     | Guía 5 |

|         |    |   |                 |                |
|---------|----|---|-----------------|----------------|
| Part    | 48 | 8 | Brushed Metal 1 | Placa 6        |
| Product | 6  | 2 | -               | Caballos       |
| Part    | 49 | 1 | Teak            | Guía 6         |
| Part    | 50 | 4 | Brushed Metal 1 | Placa 7        |
| Part    | 51 | 2 | Brushed Metal 1 | Placa 8        |
| Part    | 52 | 2 | Teak            | Triángulo      |
| Part    | 53 | 1 | Teak            | Cuadrado       |
| Part    | 54 | 1 | Oak             | Pieza circular |
| Part    | 55 | 4 | Cedar           | Espiga 5       |
| Part    | 56 | 1 | Oak             | Cojinete 6     |
| Product | 7  | 1 | -               | Guías          |

**Tabla 6.** Componentes del conjunto “GUÍAS”

#### 4.1.6.1 Part 35-48

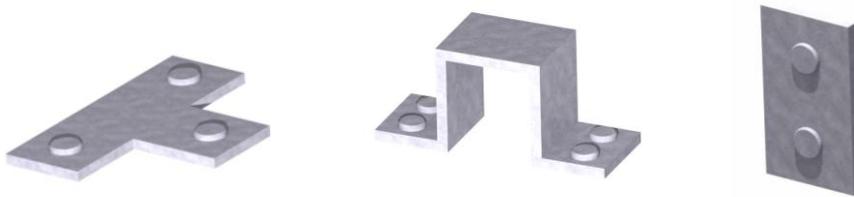
A continuación veremos con más detalle la parte de los caballos. Las guías tienen un ancho disponible de 1730.094 mm, por lo que cumplen sobradamente con la restricción de los 70 mm de ancho de cada caballo. La guía que se dispone transversalmente tiene la función de limitar a los caballos en su avance, para que no sean dañados por las guadañas. El espacio disponible a lo largo para los caballos es de 4000 mm, de nuevo cumpliendo sobradamente con los 3000 mm de longitud de los caballos. La altura en este caso no supone una limitación, aunque cabe mencionar que entre las cabezas de los caballos irá el árbol motor: el eje encargado de mover la linterna de la parte frontal del carro.



**Figura 4.20.** Part 35-44

La parte trasera de la estructura corresponde a la zona que va unida al tablero y consta de dos tablas de 500 mm, de los cuales 425 están en contacto con la base del tablero para evitar al máximo el momento flector de las guías. La parte delantera es la encargada de soportar toda la estructura frontal del carro.

En cuanto al ensamblaje, una vez más se recurre a las placas metálicas, que, tal y como ocurría en el ensamblaje anterior, son de diferentes formas y tamaños. Se han colocado en la cara superior e inferior de las guías para reforzar la unión.



**Figura 4.21.** Placas metálicas

#### 4.1.6.2 Part 49

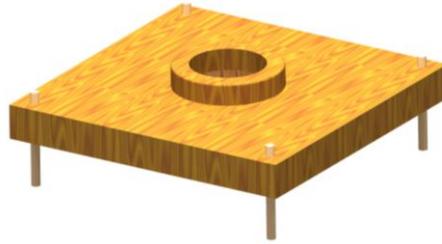
Este elemento se ha diseñado con objeto de aportar estabilidad a la unión que se produce en la parte frontal del carro. Contiene 3 orificios, uno destinado al árbol motor que presentaremos más adelante, y los otros dos para las guías que hemos visto en la sección anterior.



**Figura 4.22.** Part 49

#### 4.1.6.3 Part 50-53

Estas piezas están enfocadas al soporte de la estructura frontal. Se compone de un cuadrado de \_\_\_ de espesor con un agujero en el centro para el eje de la linterna que soporta las cuatro guadañas, el cojinete correspondiente a este eje, y una pieza circular que permite que el eje no se desvíe y que la linterna pueda girar libremente.



**Figura 4.23.** Part 50-53

#### 4.1.7 Árbol motor

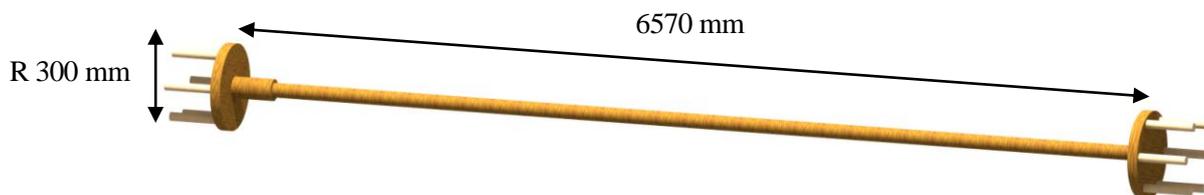
Es una pieza clave del diseño, ya que sin ella el carro no cumpliría su función. Se trata de una guía circular con dos engranajes a los extremos. Transmite el movimiento rotatorio de la linterna central a la linterna delantera, provocando la rotación de las cuatro guadañas. Para los engranajes, sólo ha sido necesario realizar un cálculo, el correspondiente a la linterna central, pues el otro engranaje conecta con otro de las mismas características.

Los cálculos, de nuevo, son tal que:

$$\frac{2\pi R_1}{N_1} = \frac{2\pi R_2}{N_2}$$

Siendo:  $R_1 = 506.25 \text{ mm}$ ,  $N_1 = 12$ ,  $R_2 = 253.125 \text{ mm}$ , y  $N_2 = 6$ .

Los resultados se presentan a continuación:



**Figura 4.24.** Árbol motor

| ÁRBOL MOTOR |        |          |          |                 |
|-------------|--------|----------|----------|-----------------|
| Tipo        | Número | Cantidad | Material | Nombre          |
| Part        | 57     | 2        | Teak     | Base engranaje  |
| Part        | 58     | 12       | Cedar    | Espiga 6        |
| Part        | 59     | 1        | Teak     | Cilindro hueco  |
| Part        | 60     | 1        | Teak     | Guía cilíndrica |
| Product     | 8      | 1        | -        | Árbol motor     |

**Tabla 7.** Componentes del conjunto “ÁRBOL MOTOR”

#### 4.1.8 Guadañas frontales

Por último, llegamos a la parte en torno a la cual gira todo el diseño: las cuatro guadañas de la parte frontal. Este conjunto está compuesto por el engranaje que les da movimiento y el eje grueso en el que están colocadas. Siguiendo las indicaciones que dejó Leonardo a pie del diseño, las guadañas miden casi 5 metros de diámetro, en concreto, la circunferencia que las circunscribe es de 4775 mm, por lo que daríamos por satisfecha su petición.



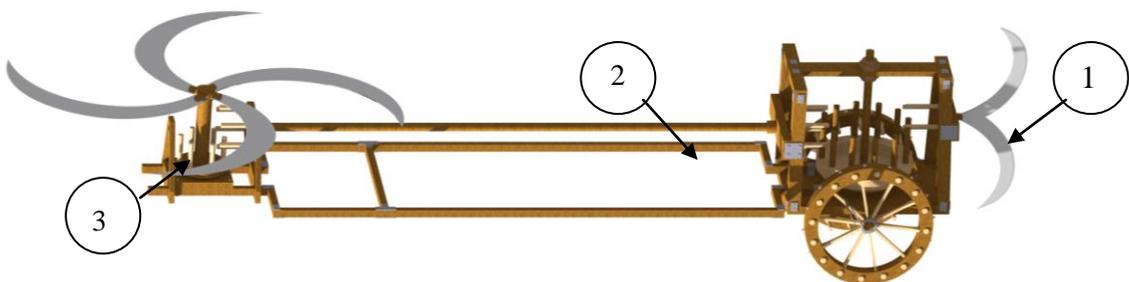
**Figura 4.25.** Guadañas frontales

| GUADAÑAS FRONTALES |        |          |           |                    |
|--------------------|--------|----------|-----------|--------------------|
| Tipo               | Número | Cantidad | Material  | Nombre             |
| Part               | 57     | 2        | Teak      | Base engranaje     |
| Part               | 58     | 12       | Cedar     | Espiga 6           |
| Part               | 61     | 1        | Teak      | Soporte Guadañas   |
| Part               | 62     | 4        | Magnesium | Guadañas           |
| Product            | 9      | 1        | -         | Guadañas frontales |

**Tabla 8.** Componentes del conjunto “GUADAÑAS FRONTALES”

#### 4.1.9 Conjunto final

A continuación presentamos el resultado final del carro, en contraste con el diseño de Leonardo:

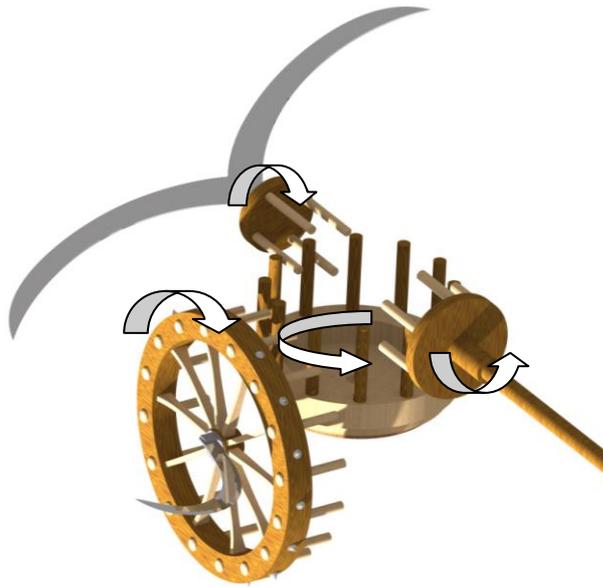


**Figura 4.26.** Resultado final

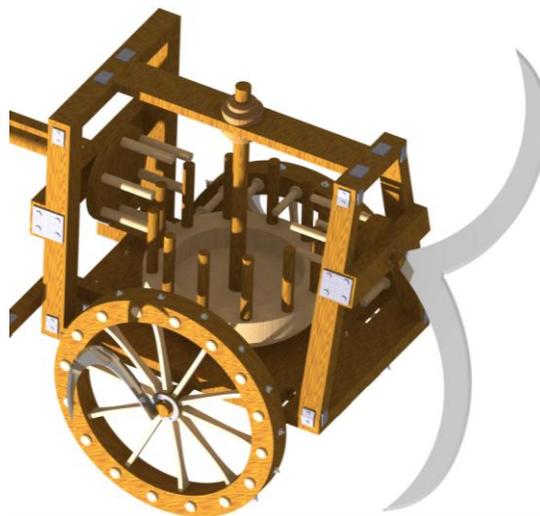
#### 4.1.9.1 Sección 1

Se trata de la sección del diseño más definida de Leonardo, y por ello nuestro modelo se asemeja bastante en esta parte. El mecanismo de transmisión de movimiento es exactamente el mismo, pero a simple vista se aprecian una serie de diferencias respecto a la hoja del Códice Atlántico:

- La rueda de Leonardo parece más robusta en comparación con nuestro modelo, pero nuestros radios están colocados de perfil.
- La linterna de Leonardo tenía una tapa superior, pero desde el punto de vista técnico, el engranaje no sería posible tal y como lo diseñó Leonardo. El conjunto de engranajes es tal que:



**Figura 4.27.** Engranajes de la Sección 1



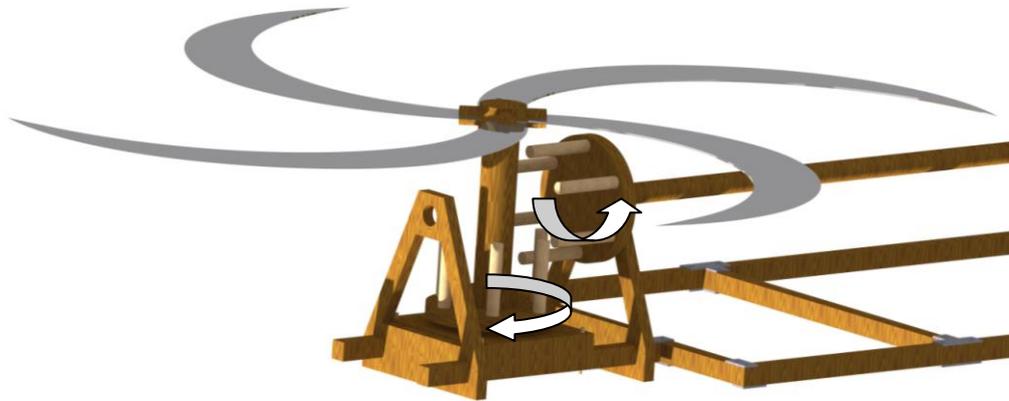
**Figura 4.28.** Sección 1

#### 4.1.9.2 Sección 2

Es la parte encargada de la propulsión del carruaje. El diseño de las guías es similar al nuestro, a excepción de una barra transversal. En el dibujo de Leonardo las guadañas pasan a escasos centímetros de la cara de los caballos, y aparentemente éstos parecen no estar suficientemente sujetos a la estructura como para no sufrir daños. Precisamente para asegurar la supervivencia de los animales se hizo esta modificación en el diseño.

#### 4.1.9.3 Sección 3

Es la parte del diseño menos definida. No se ve bien la estructura frontal en el dibujo, pero la solución que le hemos dado cumple la misma función que en el diseño original.



**Figura 4.29.** Sección 3

## 4.2 Modelado del segundo carro

A continuación abordaremos el modelado del primer carro que aparece en la hoja del Códice Atlántico. Aunque en el dibujo prima más la representación dramática, puede verse el mecanismo a la perfección. No obstante, veremos ahora nuestra propia interpretación del diseño.

Aprovechando que ya se ha realizado uno de los carros, hemos aprovechado alguna de las partes del modelo, por lo que la descripción de éstas será algo más breve.

### 4.2.1 Rueda

Tiene el mismo diseño que la rueda en el primer carro, con excepción de las cuchillas giratorias situadas a los laterales.

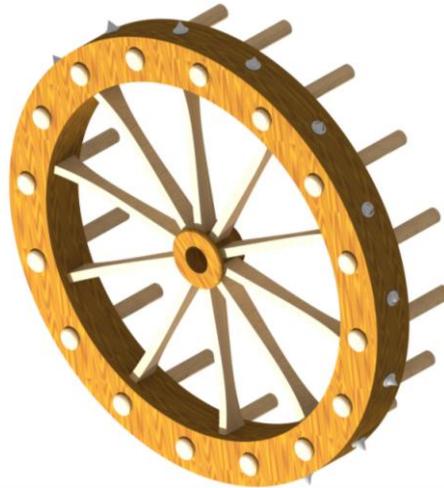


Figura 4.30. Rueda derecha

| RUEDAS |        |          |           |                 |
|--------|--------|----------|-----------|-----------------|
| Tipo   | Número | Cantidad | Material  | Nombre          |
| Part   | 1      | 2        | Teak      | Mitad Rueda     |
| Part   | 2      | 16       | Magnesium | Diente Metálico |
| Part   | 3      | 10       | Cedar     | Radio           |
| Part   | 4      | 16       | Cedar     | Bulón           |
| Part   | 5      | 1        | Teak      | Rosca           |
| Part   | 6      | 16       | Cedar     | Sujeción        |

|         |    |   |   |            |
|---------|----|---|---|------------|
| Product | 10 | 1 | - | Derecha2   |
| Product | 11 | 1 | - | Izquierda2 |

**Tabla 9.** Componentes del conjunto “RUEDAS”

#### 4.2.2 Soporte

Esta pieza clave del diseño cumple varias funciones:

- Permite que los caballos arrastren el carruaje mediante dos guías curvadas.
- Es el elemento de unión entre las dos ruedas.
- Soporta la linterna y el conjunto de las guadañas.

El resultado es el siguiente:



**Figura 4.31.** Soporte

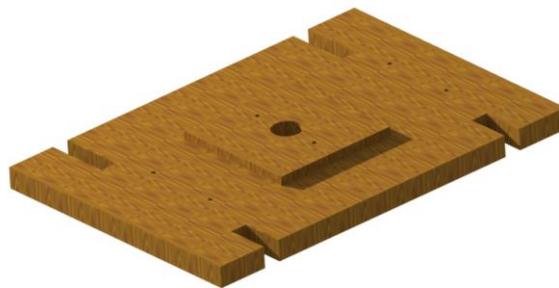
| SOPORTE |        |          |          |                    |
|---------|--------|----------|----------|--------------------|
| Tipo    | Número | Cantidad | Material | Nombre             |
| Part    | 63     | 1        | Teak     | Base del tablero 2 |
| Part    | 64     | 1        | Teak     | Refuerzo 2         |
| Part    | 65     | 2        | Teak     | Refuerzo 3         |
| Part    | 66     | 1        | Teak     | Eje 4              |
| Part    | 67     | 2        | Oak      | Cojinete 7         |
| Part    | 68     | 2        | Cedar    | Espiga 7           |
| Part    | 69     | 4        | Cedar    | Espiga 8           |
| Part    | 70     | 4        | Cedar    | Espiga 9           |

|         |    |   |           |                 |
|---------|----|---|-----------|-----------------|
| Part    | 71 | 1 | Oak       | Cojinete 8      |
| Part    | 72 | 2 | Teak      | Guía 7          |
| Part    | 73 | 2 | Magnesium | Barra metálica  |
| Part    | 74 | 2 | Magnesium | Agarre metálico |
| Part    | 75 | 1 | Teak      | Barra caballos  |
| Product | 12 | 1 | -         | Soporte         |

**Tabla 10.** Componentes del conjunto “SOPORTE”

#### 4.2.2.1 Part 63

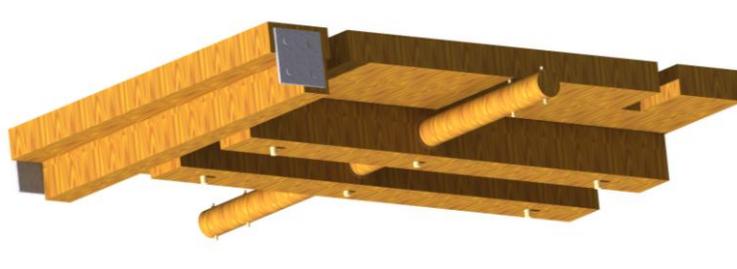
El tablero tiene características similares al del primer carro: tiene las mismas dimensiones, cuenta con los huecos para los bulones de las ruedas y con los agujeros para las espigas. Así, el cuadrado del centro tiene la misma función: soporte estructural. El hueco para el eje es de 95 mm de diámetro, y la parte enterrada tiene una profundidad de 70 mm, a diferencia de los 30 mm del primer carro. Esto es debido a que este modelo no cuenta con una estructura soporte para el eje: no hay ningún mecanismo que impida el movimiento de precesión, y se decide enterrar el eje todo lo posible.



**Figura 4.32.** Base del tablero 2

#### 4.2.2.2 Part 64-71

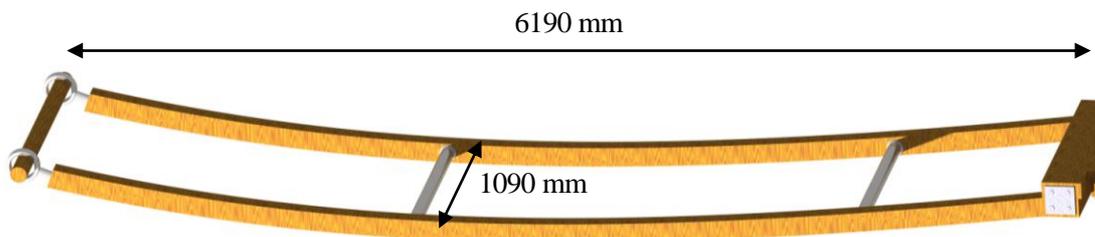
Se han colocado tres refuerzos con objeto meramente estructural, uno paralelo al eje y dos colocados transversalmente. Los transversales cuentan con un cojinete que evita el roce del eje con las paredes, así como espigas que lo sujetan a la base del tablero. El eje, al igual que en el primer carro, tiene la función de evitar que las ruedas se desplacen a lo largo de su longitud con las espigas colocadas a sus extremos. Para albergar las guías que conectan a los caballos con esta estructura, se ha colocado el tablero paralelo al eje con la placa metálica en los laterales. El resultado de todo esto es como sigue:



**Figura 4.33.** Part 64-71

#### 4.2.2.3 Part 72-75

Son las dos guías curvadas que aparecen en el diseño de Leonardo. Contiene dos barrotes metálicos que aportan consistencia a la estructura, así como dos enganches metálicos para la barra que une los caballos al carro. Las guías tienen suficiente curvatura para que no choquen con las guadañas que veremos a continuación, así como suficiente longitud para no dañar a los caballos de delante.



**Figura 4.34.** Part 72-75

#### 4.2.3 Linterna Central 2

A diferencia del carro anterior, esta linterna sí tiene permitida la tapa superior. La razón es sencilla, no tiene más engranaje que el de la rueda. Haciendo los cálculos de siempre:

$$\frac{2\pi R_1}{N_1} = \frac{2\pi R_2}{N_2}$$

Siendo:  $R_1 = 675 \text{ mm}$ ,  $N_1 = 16$ ,  $R_2 = 506.25 \text{ mm}$ , y  $N_2 = 12$ .

Los resultados son:

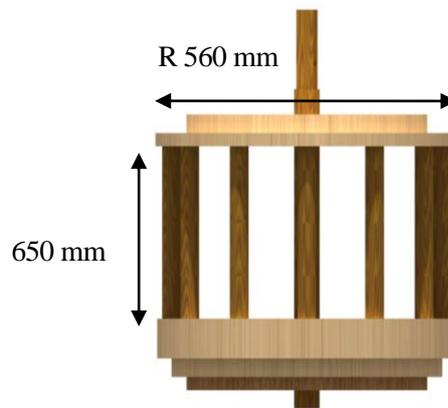


Figura 4.35. Linterna Central 2

| LINTERNA CENTRAL 2 |        |          |          |                    |
|--------------------|--------|----------|----------|--------------------|
| Tipo               | Número | Cantidad | Material | Nombre             |
| Part               | 76     | 1        | Cedar    | Tapa inferior      |
| Part               | 77     | 1        | Cedar    | Tapa superior      |
| Part               | 78     | 1        | Oak      | Disco giratorio    |
| Part               | 79     | 12       | Teak     | Espiga 10          |
| Part               | 80     | 1        | Teak     | Eje 5              |
| Product            | 13     | 1        | -        | Linterna Central 2 |

Tabla 11. Componentes del conjunto “LINTERNA CENTRAL 2”

#### 4.2.3.1. Eje

La pieza más particular de la linterna es el eje, que toma un diseño bastante distinto al del carro anterior. Como podemos ver en la imagen, está compuesto por dos partes: una parte cilíndrica, que acompaña a la linterna en su movimiento, y una parte cuadrada sobresaliente. La razón por la que el eje toma este peculiar diseño está relacionada con las guadañas que se colocarán a posteriori. Para impedir el movimiento de éstas a lo largo del eje, basta con que la base de las guadañas se apoye en la parte cilíndrica y la parte superior se limite con una espiga de madera. De esta forma, cualquier posible traslación de las guadañas está impedida.



**Figura 4.36.** Fragmento del eje

#### 4.2.4 Conjunto de guadañas

Llegamos ahora a la parte más espectacular del diseño: el conjunto de guadañas.

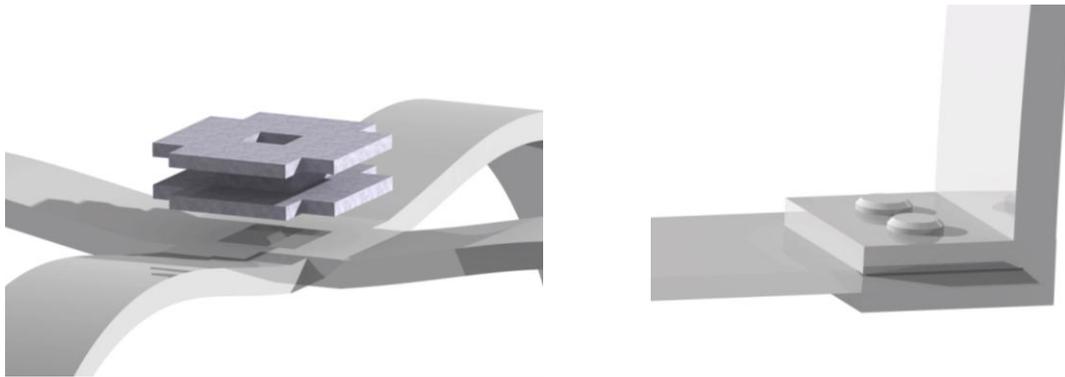


**Figura 4.37.** Conjunto de Guadañas

| CONJUNTO DE GUADAÑAS |        |          |                 |                      |
|----------------------|--------|----------|-----------------|----------------------|
| Tipo                 | Número | Cantidad | Material        | Nombre               |
| Part                 | 81     | 4        | Magnesium       | Metal curvado        |
| Part                 | 82     | 4        | Magnesium       | Guadaña              |
| Part                 | 83     | 1        | Brushed metal 1 | Pieza central        |
| Product              | 14     | 1        | -               | Conjunto de guadañas |

**Tabla 12.** Componentes del conjunto “CONJUNTO DE GUADAÑAS”

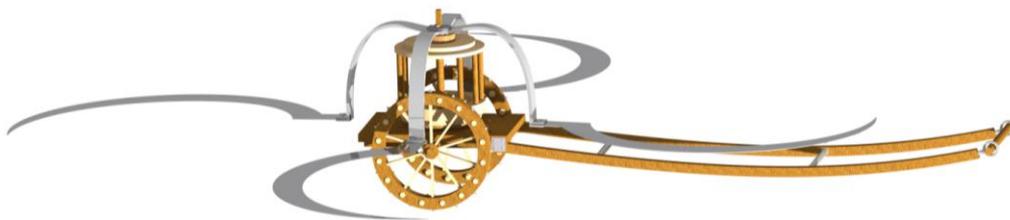
Cabe destacar los elementos de unión de esta pieza. Haciendo un zoom a los detalles, podemos ver como encajan los cuatro metales soporte en una pieza cuadrada pensada para ello. Para sujetar las guadañas, se ha provisto al metal curvado de una ranura en la que encaje, así como de dos tornillos que aseguran la inmovilización.



**Figura 4.38.** Elementos de unión del conjunto de guadañas

#### 4.2.5 Conjunto final

Veremos a continuación el resultado final:



**Figura 4.39.** Resultado final

En primer lugar, tal y como se dio en el carro anterior, la rueda es más robusta en el diseño de Leonardo, pero nuestros radios aparecen de perfil. La curva del metal que soporta las guadañas parece más pronunciada en nuestro diseño, pero está justificado como medida de seguridad. Además, nuestras guías aparecen más altas, pero no interfiere en el giro de las guadañas. Por lo demás, los dos modelos se asemejan bastante.

## 5 CONCLUSIONES

---

Tras varios meses de trabajo finalmente hemos llegado a nuestro objetivo: el modelado de los dos carros de Leonardo da Vinci. Por una parte, a lo largo del proyecto nos hemos encontrado con problemas de todo tipo que hemos ido solventando de la mejor manera posible, siendo flexibles y autodidactas. Por otra parte, ha servido para crecer desde el punto de vista técnico y profesional, con la consecuente formación adquirida.

Este Trabajo ha ayudado a conocer en profundidad el carácter y la genialidad del verdadero hombre del Renacimiento, Leonardo. El patrimonio técnico y científico de Leonardo representa un tesoro y una fuente casi inagotables de ideas y conocimientos. Resulta difícil conocer toda la obra del científico; hasta las máquinas conocidas esconden secretos y pueden ser ulteriormente mejoradas. Sin embargo, se ha hecho un estudio profundo de los artefactos bajo estudio y hemos completado nuestro conocimiento sobre el polímata con todo tipo de información.

Entre los problemas que han ido surgiendo, el más destacable ha sido la falta de información acerca del dimensionado y funcionamiento de la máquina. Incluso cuando parecía que se había alcanzado la correcta interpretación de un mecanismo, emergían problemas técnicos que requerían nuevas soluciones de diseño. Esto nos ha obligado a improvisar en muchas ocasiones, dotándonos de una gran versatilidad.

Por último, el manejo de CATIA ha sido imprescindible en todo momento. Dado que es uno de los softwares más usados en la industria aeronáutica, este Trabajo ha contribuido favorablemente a mi formación académica y profesional. Se ha profundizado tanto en el modelado de cada pieza como en su posterior ensamblaje, aprendiendo a base de prueba y error en numerosas ocasiones. Las horas ante el ordenador han dado sus frutos y han incrementado mis conocimientos iniciales del programa.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

Valencia Giraldo, A. *El ingeniero Leonardo da Vinci*. Medellín, Colombia, 2004

<http://www.biografiasyvidas.com/monografia/leonardo/>

Domenico Laurenza, Mario Taddei, Edoardo Zanon, *Atlas ilustrado de las máquinas de Leonardo*, Edición:  
Suseta

[http://www.bizkaia.net/Home2/Archivos/DPTO8/Temas/Pdf/ca\\_GTcapitulo1.pdf?idioma=CA](http://www.bizkaia.net/Home2/Archivos/DPTO8/Temas/Pdf/ca_GTcapitulo1.pdf?idioma=CA)

[https://es.wikipedia.org/wiki/Fabricaci%C3%B3n\\_asistida\\_por\\_computadora](https://es.wikipedia.org/wiki/Fabricaci%C3%B3n_asistida_por_computadora)

<http://www.sistemaformacion.com/utilidades-de-catia-para-la-ingenieria-y-el-diseno>

<https://cadcamcae.wordpress.com/2007/05/28/%C2%BFque-es-catia-o-quien/>

