

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid



**Grado en Ingeniería en Diseño Industrial
y Desarrollo del Producto**

**MODELADO Y ANIMACIÓN
DE UN RELOJ DE PÉNDULO**

Cañibano Nagore, Rodrigo

Tutor: Delgado Urrecho, Javier
Departamento: CMeIM/EGI/ICGF/IM/IPF

Valladolid
Julio de 2014



Universidad de Valladolid



**Grado en Ingeniería en Diseño Industrial
y Desarrollo del Producto**

Trabajo Fin de Grado

MODELADO Y ANIMACIÓN DE UN RELOJ DE PÉNDULO

Cañibano Nagore, Rodrigo

ÍNDICE

1. Introducción.	[7]
2. Objetivos.	[9]
3. Historia de la medición del tiempo.	[11]
4. El reloj de péndulo.	[15]
4.1. Evolución.	[15]
4.2. Componentes y funcionamiento.	[16]
5. El reloj objeto de la animación.	[19]
5.1. Diseño.	[19]
5.2. Fuente.	[20]
5.3. Funcionamiento.	[21]
6. Planteamiento del proceso.	[23]
7. Desarrollo del proceso.	[25]
7.1. Modelado de reloj.	[25]
7.1.1. Generación de los engranajes.	[25]
7.1.1.1. Parametrizado de los engranajes.	
7.1.1.2. Modelado de los engranajes.	
7.2. Ensamblaje de los componentes del reloj	[35]
7.3. Animación de los mecanismos del reloj.	[43]
7.3.1. Uniones cinemáticas.	[43]
7.3.1.1. Revolute Joint.	
7.3.1.2. Gear Joint.	
7.3.2. Condiciones para la simulación de un mecanismo.	[48]
7.3.3. Estructuración de los mecanismos en el árbol de operaciones.	[49]
7.3.4. Creación de las simulaciones.	[50]

7.3.4.1. Simulación mediante comandos.	
7.3.4.2. Simulación mediante leyes.	
7.3.4.2.1. Creación de la ley.	
7.3.4.2.2. Asignación de la ley al comando.	
7.3.4.2.3. Simulación.	
7.3.5. Generación y grabación de animaciones.	[59]
7.3.5.1. Generación de la simulación.	
7.3.5.2. Compilación de la simulación.	
7.3.5.3. Reproducción de la simulación.	
7.3.6. <i>DMU Player Commands</i> .	[67]
7.3.6.1. <i>Simulation Player</i> .	
7.3.6.2. <i>Edit Sequence</i> .	
7.3.7. Generación de vídeo.	[70]
7.3.8. Aplicación del proceso de animación al modelo del reloj	[71]
7.3.8.1. Relación de componentes en <i>DMU Kinematics</i> .	
7.3.8.2. Creación de las uniones de engranaje.	
7.3.8.3. Definición de los elementos fijos.	
7.3.8.4. Simulación de los mecanismos.	
7.3.8.4.1. Engranajes.	
7.3.8.4.2. Péndulo.	
7.3.8.4.3. Escape.	
7.3.8.5. Creación de la secuencia escape-péndulo.	
7.3.8.6. Generación de los vídeos.	
8. Conclusiones.	[101]
9. Fuentes.	[103]
ANEXO I: Planos.	[105]

1. INTRODUCCIÓN.

En el contexto de la realización del Trabajo Fin de Grado, se ha desarrollado la actividad concerniente al modelado tridimensional virtual de un reloj de péndulo y la animación posterior del mismo. Para ello, se ha utilizado el *software CATIA V5*, desarrollado por la entidad francesa *Dassault Systèmes*.

Los distintos pasos a seguir durante el proceso tenían como finalidad la adquisición de conocimientos acerca del funcionamiento del módulo *DMU Kinematics* de *CATIA*, con el cual se realizan las animaciones de mecanismos. Además, también estaba presente el objetivo de utilizar *CATIA* de cara a realizar un análisis de la composición y funcionamiento de un reloj de péndulo, a través de su modelado, ensamblaje y simulación de sus movimientos.

El modelado y ensamblaje de los componentes del reloj ha supuesto una buena práctica con dos módulos de *CATIA* conocidos y manejados con anterioridad (*Part Design* y *Assembly Design*), ya que implicaron la reflexión acerca de las acciones a llevar a cabo para conseguir un óptimo resultado.

Una vez obtenido el conjunto del reloj, su simulación mediante *DMU Kinematics* abarcó la gran parte del trabajo. El desconocimiento previo de éste módulo ha conllevado la simultaneidad de la evolución de los resultados y el aprendizaje del funcionamiento de las distintas acciones y herramientas encaminadas a la generación de las simulaciones.

El trabajo acerca de un reloj de péndulo ha supuesto un gran ejemplo a partir del cual poder aprender a manejar el módulo de animación, dada su composición principal a partir de un sistema de engranajes y a su funcionamiento a través de la transmisión del movimiento del péndulo a las agujas.

CATIA es una herramienta de CAD 3D, dedicada al diseño, a la ingeniería, a la fabricación, a la arquitectura de sistemas y a la ingeniería de sistemas. Supone una ayuda para el desarrollo de un producto, desde su concepción en la fase de diseño hasta los análisis de finales, pasando por su desarrollo formal y funcional, concepción de conjunto y proceso de fabricación.

Está estructurado en doce áreas de aplicación, cada una de las cuales se centra en un campo concreto. Las distintas áreas son: *Infrastructure* (Gestión de datos y catálogos de componentes y simulación fotorrealista de componentes), *Mechanical Design* (Diseño mecánico), *Shape* (Diseño mediante superficies), *Analysis and Simulation* (Análisis mecánicos y de comportamiento), *AEC Plant* (Configuración de distribución en planta), *Machining* (Procesos de mecanizado), *Digital Mockup* (Simulaciones y generación de animaciones), *Equipment and Systems* (Canalizaciones y cableados), *Digital Process for Manufacturing* (Desarrollo de proceso (P.P.R.)), *Machining Simulation* (Simulación de mecanizado CN), *Ergonomics Design and Analysis* (Diseño ergonómico) y *Knowledgware* (Leyes y formulación).

Cada una de las áreas integra una serie de módulos de trabajo, cada uno de los cuales se centra en una aplicación concreta dentro de la temática global del área. Además, es posible desarrollar el trabajo con distintos módulos sobre el mismo producto. Para ello ha de cumplirse una condición, y es que los módulos involucrados requieran el mismo tipo de archivo.

CATIA trabaja con distintos tipos de archivos. Cada uno de ellos está asociado a un determinado número de módulos del programa, normalmente con similitud de aplicaciones entre ellos. El hecho de que algunos módulos compartan extensión de archivo de trabajo amplía las posibilidades de diseño dentro del proceso de desarrollo de un producto.

Con todo ello, se ha procedido a la ejecución del trabajo, partiendo de un planteamiento inicial y unos objetivos, con el fin de conseguir alcanzarlos a través de su desarrollo mediante la utilización del *software*.

2. OBJETIVOS.

La realización de esta actividad ha estado motivada por una serie de propósitos, los cuales han motivado el planteamiento y desarrollo de cada uno de los pasos llevados a cabo, con el fin de intentar llegar al resultado más satisfactorio posible. Más concretamente, los principales objetivos marcados inicialmente, previos al comienzo de las tareas, han sido los siguientes:

- Desarrollo de elemento conformado por componentes mecánicos, mediante la utilización de *CATIA*.
- Análisis de los distintos mecanismos que componen el conjunto.
- Comprensión del funcionamiento del reloj.
- Detección de las distintas variables físicas que intervienen en el movimiento de la máquina.
- Establecimiento del punto de partida del proceso en un diseño previo plasmado en sus planos técnicos.
- Utilización de un *software* informático de CAD como herramienta principal en la realización de las distintas tareas.
- Manejo de los módulos *Part Design*, *Assembly Design* y *DMU Kinematics* de cara a la realización de las distintas etapas del proceso.
- Familiarización con la interfaz del módulo *DMU Kinematics* y aprendizaje del manejo del mismo.
- Consecución de la animación más realista posible del reloj, intentado simular de la manera más fiable cada uno de sus movimientos, centrandó la atención en aquellos que resulten fundamentales dentro del conjunto.
- Creación de archivos de vídeo que muestren el funcionamiento del reloj, a través de los movimientos de sus distintos componentes y mecanismos.

3. HISTORIA DE LA MEDICIÓN DEL TIEMPO.

Desde épocas muy tempranas, el ser humano se vio con la necesidad de controlar el transcurso del tiempo. La medición del tiempo existe desde que el hombre comenzó a diferenciar entre el día y la noche. Así, las primeras mediciones del tiempo llevadas a cabo por las civilizaciones antiguas se basaban en observaciones astronómicas, considerando las posiciones del Sol en el cielo y las distintas fases lunares.

Sin embargo, estos fenómenos no eran suficientes, ya que la precisión que aportaban al fenómeno de la medición del tiempo era deficiente. De esta necesidad surgieron los relojes, los cuales permitieron medir las fracciones del día con mayor exactitud. Todo ello debido al descubrimiento desde épocas tempranas de la posibilidad de recurrir a los fenómenos físicos que se repetían de forma periódica y aprovechar su regularidad para elaborar instrumentos que midieran intervalos de tiempo.

El primer objeto creado por el hombre destinado a la medición del tiempo fue el reloj de sol, el cual indicaba los instantes del día según la sombra que proyectaba. Pero este sistema tenía un importante inconveniente, y es que no era útil en días no soleados y durante la noche. Para resolver tal contratiempo, la civilización egipcia desarrolló la clepsidra. La clepsidra era una vasija que, sirviéndose de agua, hacía factible la medición del tiempo sin importar las circunstancias solares. El ejemplar de clepsidra más antiguo poseído en la actualidad, encontrado en un templo egipcio, se estima fabricado hace aproximadamente 3.356 años.



Imagen 1: Clepsidra egipcia.

Los romanos también idearon un sistema para controlar el tiempo nocturno. Concretamente, utilizaban velas divididas en fragmentos; cada uno de los fragmentos consumidos correspondía a un período de la noche. Más tarde llegaron los relojes de arena, basados en el mismo concepto físico que las clepsidras egipcias, a diferencia de que en este caso el elemento del cual se hacía uso era la arena.

Durante la Edad Media surgieron los primeros mecanismos accionados por pesas, momento desde el cual los relojes se unieron al rápido crecimiento de la mecánica. Los primeros relojes mecánicos datan del siglo XIII, y su cometido era hacer sonar las campanas de iglesias, castillos o poblaciones. No obstante, poseían cierta inexactitud, debida a la contracción y

expansión que el acero con el que estaban fabricados sufría ante un cambio de temperatura, con el ajuste diario que ello conllevaba.

En el siglo XV se inventaron los relojes de aguja para marcar las horas y, en 1505, aparecieron los primeros relojes mecánicos de bolsillo, de la mano del herrero alemán Peter Henlein.

La primera gran revolución acaecida en el campo de los relojes se dio en el siglo XVII, cuando el científico Holandés Christian Huygens inventó el reloj de péndulo. Este nuevo mecanismo poseía la novedad de tener una exactitud similar a la de los relojes de Sol, siendo capaz de medir los segundos. La concepción de la idea del péndulo para su aplicación había sido formulada en 1636 por Galileo Galilei, el cual, debido al deterioro de su salud en sus últimos años de vida, no fue capaz de llevar la idea a la práctica.

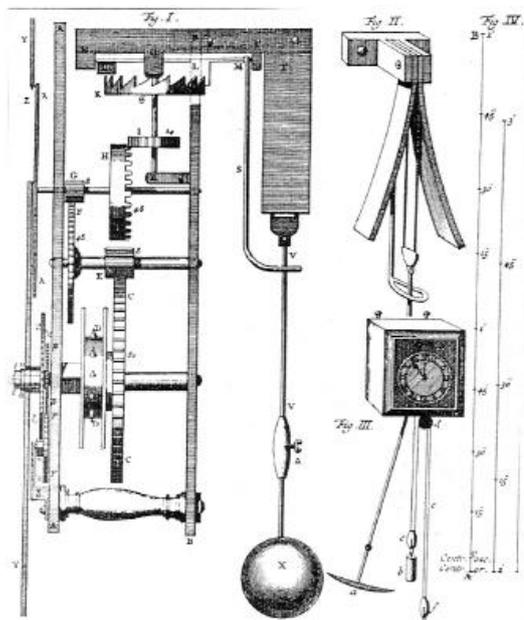


Imagen 2: Diseño del reloj de péndulo de C.Huygens.

En el año 1901, Alberto Santos Dumont y Louis Cartier crearon el primer reloj de pulsera. Sin embargo, su diseño no fue fabricado a gran escala hasta la Primera Guerra Mundial, cuando resultaba de gran utilidad para los oficiales y comandantes. Tras ella, su uso se popularizó en la sociedad.

A finales de la década de los 20, en 1929, el relojero Warren Albin Morrison inventó el reloj de cuarzo, el cual tenía una imprecisión de entre 30 y 0.3 segundos anuales. En 1957 surgieron los relojes de pulsera eléctricos; el precursor fue el Hamilton Electric. Estos relojes estaban alimentados por pequeñas pilas. Diminutos dispositivos hacían avanzar el segundero a saltos, y un engranaje convencional accionaba el movimiento más lento de la manecilla horaria y del minutero.

A mediados del siglo XX se construyeron también los primeros relojes atómicos, lo cuales constituyen la forma más fiable de medir el tiempo. Su medición es extremadamente precisa y, además, han sufrido una notable evolución a lo largo de los años.

Hoy en día se pueden encontrar relojes en multitud de lugares, fabricados en una gran cantidad de materiales y basados en múltiples mecanismos y dispositivos. Medir el tiempo se ha convertido en una obsesión humana y, para bien o para mal, el tiempo siempre controlará la acción del hombre.

4. EL RELOJ DE PÉNDULO.

4.1. Evolución.

Si bien sus orígenes se pueden remontar al siglo XIII, fue en 1656 cuando Christian Huygens construyó el primer ejemplar de reloj de péndulo.

Años atrás, en 1637, Galileo Galilei, con la ayuda de su hijo, había desarrollado las ideas básicas del mecanismo del péndulo, logrando reducir de quince minutos a 15 segundos el margen de imprecisión de los relojes.

Huygens comprobó, tras realizar diversos análisis del funcionamiento de péndulos, cómo las oscilaciones en torno a 100° existentes hasta el momento generaban mayor inexactitud que pequeñas oscilaciones. De esta forma, la amplitud del movimiento del péndulo se redujo a valores en torno a los 6° , hecho que condujo a la invención del escape de áncora, alrededor de 1670. A partir de entonces, el reloj más empleado fue el conocido como Reloj Real, en el que cada oscilación del péndulo correspondía a un segundo.

En torno a 1680, Guillermo Clement desarrolló los péndulos largos y estrechos, los cuales incrementaron la exactitud de los relojes. Además, en la década posterior, se les añadió el minutero.

En 1675 surgió el escape *deadbeat*, de la mano del astrónomo Richard Towneley. Este mecanismo, popularizado por el relojero George Graham, acabó sustituyendo al escape de áncora en 1715. El propio George Graham tuvo también un papel importante en la mejora del reloj de péndulo.

Se observó que la temperatura en épocas calurosas contraía el material, modificando la velocidad y llevando la medición del reloj a errores significativos. Fue George Graham en 1721 quien, con el invento del péndulo de mercurio consiguió dar solución a dicho contratiempo. Mediante unos frascos de mercurio situados en la base del péndulo, el mercurio se ampliaba o contraía para contrarrestar las diferencias de temperatura.

Además, también a comienzos del siglo XVIII, Howard Miller desarrolló el reloj de péndulo de pared, modelo que fue empleado durante más de 270 años debido a su exactitud, hasta la aparición del reloj de cuarzo en 1927.

A día de hoy, los relojes de péndulo son empleados como elementos de antigüedad y decoración, si bien se sigue también en algunos casos haciendo uso de ellos.

4.2. Componentes y funcionamiento.

El reloj de péndulo es una máquina que tiene como fin efectuar movimientos uniformes para obtener la mayor precisión posible de cara a una medición del tiempo.

Por ello, es necesario un movimiento capaz de repetirse con exactitud a lo largo del tiempo de forma equiparada. Uno de los importantes mecanismos que proporciona dicho movimiento es el mecanismo de escape, base del funcionamiento del reloj de péndulo.

En términos básicos, un reloj de péndulo es un sistema de engranajes dónde la energía necesaria para que las agujas realicen su giro surge del movimiento del péndulo, ayudado por el peso (más de uno en algunos casos).

La introducción del péndulo en el reloj supuso uno de los avances más importantes en el mundo de la relojería. El péndulo es un peso colgado que oscila libremente, a fin de aportar a través del mecanismo de escape el movimiento al sistema de engranajes, los cuales a su vez lo transmitirán a las agujas del reloj. Su tiempo de oscilación dependerá de su longitud y de la aceleración de la gravedad.

El mecanismo de escape basa su función en dejar escapar una pequeña cantidad de energía



Imagen 3: Reloj de Péndulo.

con el objetivo de mantener a través de su elemento regulador el movimiento oscilante del péndulo. Cada oscilación, la rueda de escape avanza un diente su posición. La forma de sus dientes es la que proporciona el impulso adicional para contrarrestar las posibles pérdidas por rozamiento. La energía que propicia dicho impulso proviene del peso del reloj, la cual se transmite a través del sistema de engranajes.

Con cada oscilación del péndulo, se produce un movimiento del escape, ya que ambos se encuentran ligados entre sí. El movimiento de este último es el que provoca el movimiento de giro de la rueda de escape. Dicha rueda de escape está situada en un eje común con una rueda dentada, al cual constituye el primer elemento del sistema de engranajes encargado de transmitir el movimiento hasta la agujas del reloj.

El otro mecanismo de importancia dentro del funcionamiento del reloj es aquel que tiene al peso como elemento fundamental. Dicho peso cuelga de una cuerda, al cual está enrollada a un tambor cilíndrico, el cual a su vez está ligado al sistema de engranajes mediante un eje común. Este hecho provoca que el peso caiga de manera lenta y progresiva, debido al movimiento de los engranajes.

Con todo ello, el reloj de péndulo supone una máquina capaz de realizar una medición del tiempo con una fiabilidad notable, a través de una serie de mecanismos que, interaccionado entre ellos, consiguen transmitir el movimiento oscilatorio del péndulo al movimiento angular de las agujas.

5. EL RELOJ OBJETO DE LA ANIMACIÓN.

5.1. Diseño.

El modelo del cual se va a realizar su modelado y animación es un reloj de madera, de pared, de líneas simples y estética clásica. Tiene una composición estructural sencilla y efectiva; todo su sistema de elementos y mecanismos se dispone de tal forma que cumplen su función de forma fiable y satisfactoria, conformando una estructura que se presenta en un volumen medio, teniendo en cuenta el material de fabricación y el número total de componentes. Ello no implica que el reloj sea de dimensiones reducidas, pues el diseño original le otorga unas medidas de 664x252x212mm.

La estructura que sirve de sustento a los distintos elementos que configuran el reloj cuenta con tres puntos de fijación al paramento; en concreto, tres piezas cilíndricas con un respectivo orificio convenientemente realizado para enclavar en el correspondiente elemento saliente del plano de sujeción. Presenta dos piezas longitudinales dispuestas en posición vertical, entre las cuales se sitúan los distintos ejes cilíndricos sobre los cuales giran los distintos engranajes del mecanismo global, así como el mecanismo de escape. La situada en posición frontal sustenta, además, el aro horario. Ambas están unidas a través de dos piezas de forma prismática, en las partes superior e inferior de las mismas. El péndulo tiene su punto de apoyo sobre uno de los cilindros de fijación, situado en la parte superior de la estructura.

Las agujas se sitúan en las prolongaciones frontales de uno de los mencionados ejes, fijadas convenientemente para su movimiento coordinado. Están rodeadas por el aro de superficie plana en el cual se encuentran los números (en caligrafía romana).

Por último, cabe reseñar la presencia de un mecanismo anexo a una la de las ruedas de uno de los engranajes compuesto por un trinquete y un cilindro del cual cuelga un peso. El objetivo de estos elementos es el de contrarrestar la pérdida de movimiento del conjunto por el rozamiento entre los componentes, y posibilitar así el correcto y continuo funcionamiento del reloj.

En total, el reloj cuenta con 71 piezas (48 básicas y las duplicaciones de algunas de ellas), más la cuerda que sirve de sujeción al peso.

En el Anexo I se adjuntan los planos originales del reloj. Destacar que las vistas de las distintas piezas están representadas según el sistema americano de proyección, si bien todas las dimensiones están expresadas en mm.

5.2. Fuente.

Los planos adjuntados se han obtenido de la página *web* www.woodenclocks.co.uk. Se trata de un enlace perteneciente a un diseñador industrial originario de Reino Unido llamado Brian Law. En él refleja y pone a disposición de cualquier internauta los distintos diseños personales de distintos relojes de péndulo pensados para su fabricación en madera. Además, aporta otros datos, como propiedades y características de las clases de madera apropiadas para la fabricación de los relojes y otros consejos relativos al proceso de ejecución de los mismos.

En lo concerniente al presente trabajo, de dicha página *web* se han obtenido, además de los citados planos, algún otro dato relativo al montaje del reloj, a través de varias infografías explicativas, anexas a la información sobre él.

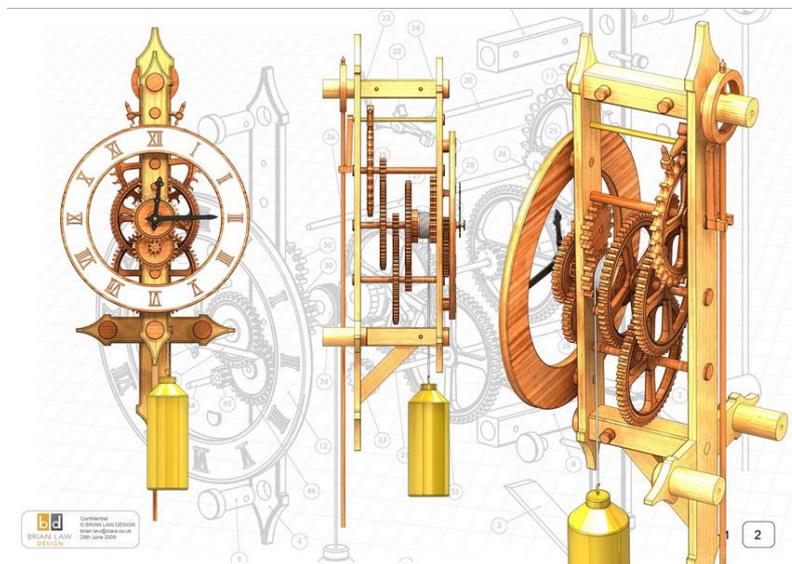
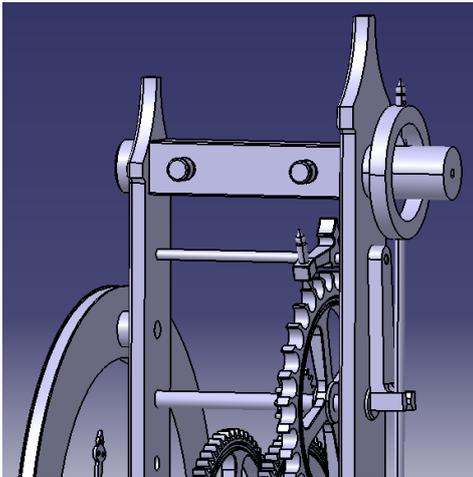


Imagen 4: Infografías del diseño del reloj de péndulo.

5.3. Funcionamiento.

Como en todo reloj de péndulo, la base de su funcionamiento está en la conversión del movimiento de oscilación del propio péndulo en el movimiento acompasado de rotación de las agujas.

Función clave es la del mecanismo de escape, encargado de la transmisión del movimiento del péndulo al sistema de engranajes, así como de facilitar las oscilaciones continuas de éste, evitando su detención.

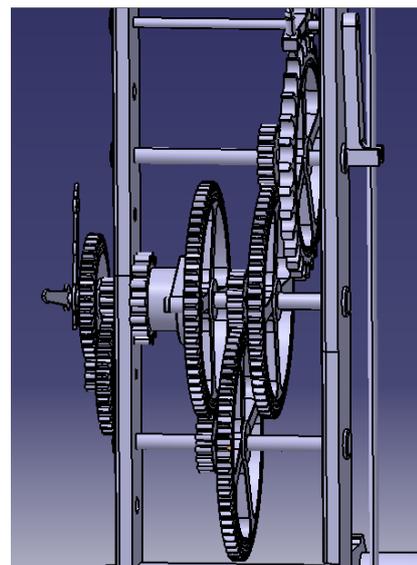


En el diseño tratado, el péndulo realiza su movimiento en la parte posterior del reloj. Una abrazadera ligada a un eje acompaña el movimiento de la barra del péndulo; a dicho eje se encuentra ensamblado también el escape. Sobre un eje situado bajo el anterior se haya la rueda del mecanismo de escape. De esta forma, ambas piezas interaccionan para conseguir la transmisión del movimiento hacia la parte frontal del reloj.

Tras el mecanismo de escape, la primera rueda dentada que interviene en el proceso es una de 16 dientes, solidaria al mismo eje de giro

que la rueda de escape. Así, el movimiento comienza a transmitirse a través los distintos engranajes. Esta rueda hace girar a otra mayor, de 60 dientes, formado el primero de ellos. Dicha rueda realiza su movimiento de rotación sobre un eje situado en una posición inferior. A este eje está también ligada una nueva rueda dentada, de 15 dientes en este caso, la cual gira a la vez que la rueda mencionada anteriormente. Esta nueva rueda conforma un engranaje con otra (también de 60 dientes) ubicada bajo ésta, en otro eje.

Al igual que en el caso anterior, solidaria a este eje inferior y en una posición más adelantada, se haya otra rueda de 15 dientes, la cual transmite su movimiento a una de 60 dientes situada sobre ella. Es el movimiento de esta última rueda el que corresponde con el del minuterero; de esta forma, dicha aguja se encuentra fijada al final del mismo eje que la rueda, en la parte frontal.



La transmisión del movimiento del eje que rige el minuterero al de la aguja horaria se consigue gracias a dos pares de engranajes dispuestos en la parte anterior del reloj, por delante de la pieza soporte. Uno de ellos está compuesto por dos ruedas de 10 y 30 dientes respectivamente. El segundo, por una corona de 32 dientes y un piñón de 8; la primera gira a la vez que la de 30 dientes del engranaje anterior, sobre el mismo eje, mientras que la segunda recibe la velocidad correspondiente a la aguja horaria, la cual está fijada a su mismo eje.

Por último, reseñar la presencia del sistema de peso ya mencionado, cuya caída progresiva durante el funcionamiento del reloj hace necesario recoger periódicamente la cuerda que lo sostiene. Ello es posible gracias a un engranaje compuesto por dos ruedas de 15 dientes cada una. Una de ellas está ligada al tambor dónde se enrolla la cuerda, y la otra, dispuesta sobre ella, a un eje saliente en la parte frontal que posibilita mediante una llave el giro del citado tambor, permitiendo así elevar el peso.

Así pues, el mecanismo completo del reloj cuenta con diez ruedas dentadas propias de la transmisión, las dos correspondientes al sistema de peso y la rueda de escape. Todas ellas, sustentadas sobre la estructura, junto con el péndulo, el escape, el sistema de peso, las agujas y el aro horario constituyen el conjunto de la máquina.

6. PLANTEAMIENTO DEL PROCESO.

El proceso tuvo su punto de partida con la elección del diseño de reloj sobre el cual se iba a trabajar. De entre los numerosos modelos disponibles en www.woodenclocks.co.uk, se eligió el ya presentado.

Una vez hecho esto, se procedió a concretar el guión de trabajo. Así, se establecieron las fases principales de lo que iba a ser el desarrollo del proceso:

- Fase 1: Modelado de las distintas piezas, a partir de los planos.
- Fase 2: Ensamblaje de las piezas, para la obtención del conjunto.
- Fase 3: Análisis acerca del funcionamiento global del reloj, así como de cada uno de sus mecanismos constituyentes, a fin de conocer la forma de transmisión del movimiento del péndulo a las agujas.
- Fase 4: Animación progresiva de los distintos mecanismos y componentes, hasta conseguir la simulación completa del conjunto.
- Fase 5: Configuración y compilación de las animaciones en archivos de vídeo.

Tras ello, se comenzó a llevar a cabo, paso a paso, cada una de las tareas.

7. DESARROLLO DEL PROCESO.

7.1. Modelado del reloj.

Como punto de partida del proceso de obtención del modelado 3D del reloj, se procedió a la generación tridimensional de cada una de las piezas, tomando como referencia los planos originales.

Dadas sus formas geométricas predominantes sin contornos complejos o curvaturas variables, todas ellas fueron creadas con la ayuda del módulo *Part Design*. Este módulo, integrado dentro de *Mechanical Design*, se caracteriza facilitar el modelado de sólidos mediante extrusión o revolución, previa generación del boceto o *sketch* que caracteriza su contorno. Además, permite modificar el volumen base a través de operaciones de eliminación de material o redondeo de aristas, entre otras. Otras herramientas útiles son también las llamadas operaciones *booleanas*, las cuales permiten la combinación de distintos sólidos.

Así pues, progresivamente se fueron obteniendo una pieza tras otra. Es destacable el hecho de que fue necesaria en numerosas ocasiones la toma directa de medidas sobre los planos, dado el incompleto dimensionamiento de un notable número de piezas. De cara al mejor acabado de las mismas, también se aplicaron en algunos casos operaciones de redondeo de algunas de las aristas.

7.1.1. Generación de los engranajes.

Mención especial merece el modelado de las ruedas dentadas. Se trata de los componentes principales y de mayor importancia dentro del funcionamiento mecánico del reloj. Por ello, su generación se ha controlado de una manera más precisa, a través de la parametrización de las magnitudes principales que las caracterizan.

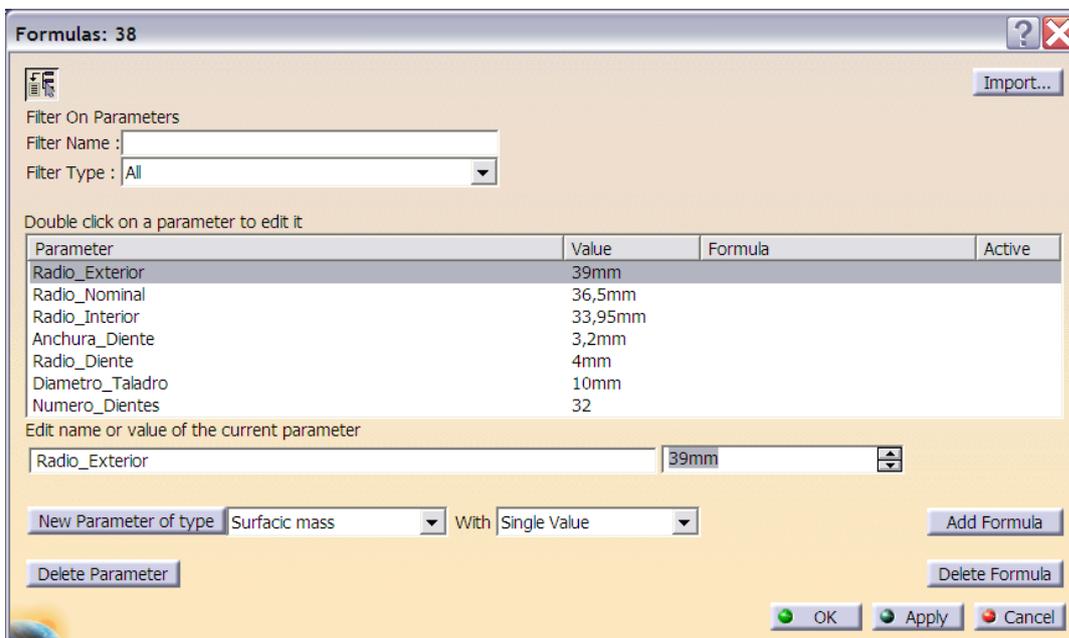
En *CATIA*, un parámetro es una variable con entidad propia la cual se relaciona con alguna dimensión o característica de una pieza modelada. La forma básica de uso habitual de un parámetro es asignándolo a una cota de un *sketch*; de esta forma, la dimensión de dicha cota queda restringida por su valor.

7.1.1.1. Parametrizado de los engranajes.

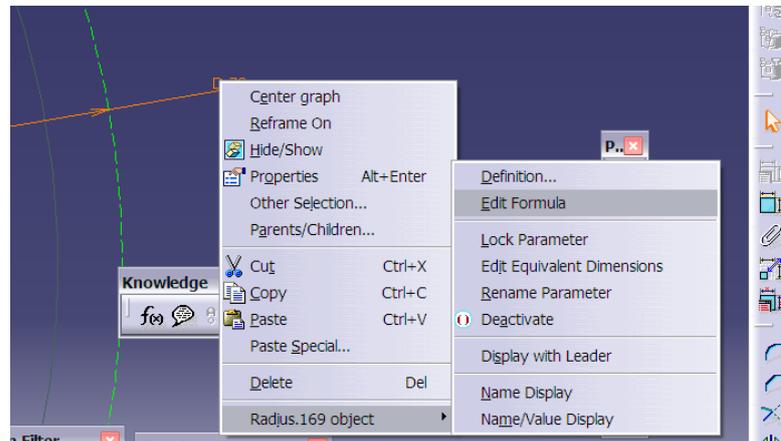
Para llevar a cabo este proceso, lo primero que se ha de llevar a cabo es la creación del parámetro. La herramienta que se ha de ejecutar (dentro del módulo *Part Design*) es *Formula*, la cual se encuentra en la primera posición la barra de nombre *Knowledge*.



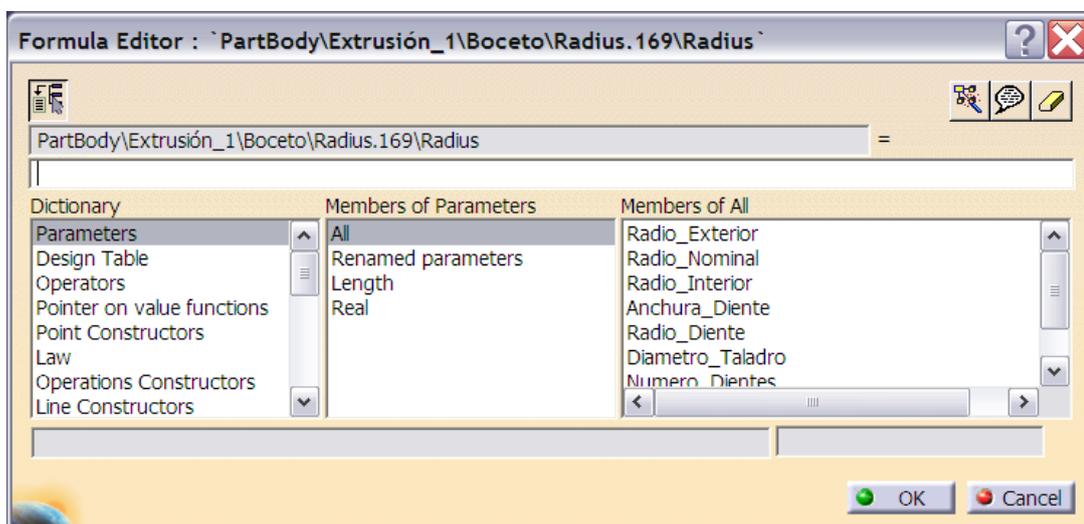
Al hacerlo, aparece la ventana correspondiente a la herramienta. En ella aparece como elemento principal una ventana en la que aparecerán todos los parámetros creados en el archivo actual. En caso de no haberse generado ninguno, la lista estará vacía. Para crear un nuevo parámetro se ha de hacer *click* sobre el botón *New Parameter of Type*. Al hacerlo, el mencionado parámetro aparece en la lista y junto a él, su valor. A continuación, en las casillas contiguas al botón anterior se puede elegir el tipo de variable (real, longitud, masa, ángulo, etc.) así como si se desea que tenga un único valor o varios. Una vez hecho esto, se le puede asignar el nombre deseado y su valor, en las casillas situadas sobre las anteriores. Una vez hecho esto, se valida la creación mediante *OK*.



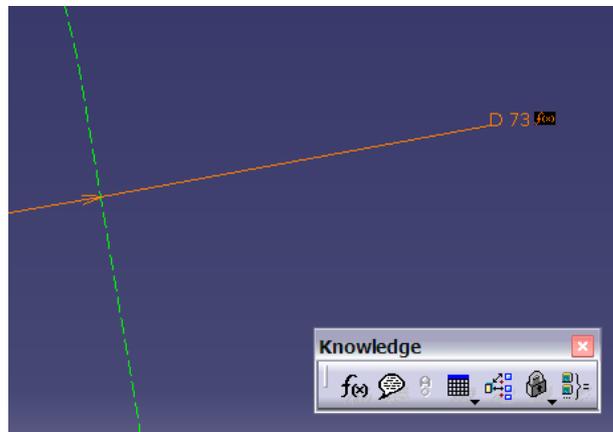
Una vez creado el parámetro, ya sólo falta asignarlo a la cota deseada. Para ello, una vez creada la cota durante la edición del boceto, se ha de acceder a la generación de una fórmula asociada a dicha cota, lo cual se lleva a cabo haciendo *click* en el botón derecho del ratón, sobre la cota en cuestión, y accediendo a las propiedades de lo que *CATIA* llama *object* y seleccionando la opción *Edit Formula*.



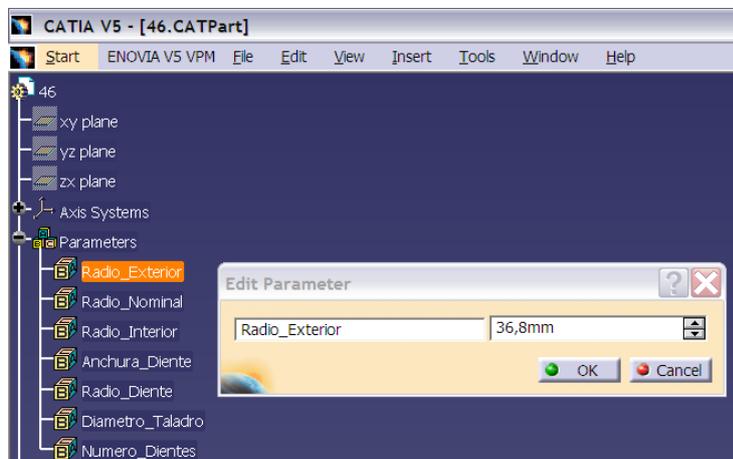
Al hacerlo, se muestra la ventana de edición de fórmulas asociada al objeto seleccionado, en este caso la cota, en la que aparecen tres columnas con datos. El siguiente paso es seleccionar *Parameters* en la columna de la izquierda (*Dictionary*). La columna *Members of Parameters* permite acotar la visualización de los parámetros en la columna de la derecha (*Members of...*): todos, según su tipo de variable o aquellos que han sido renombrados. De esta forma, se ha de hacer doble *click* sobre la referencia del parámetro que se quiere asignar a la cota; al hacerlo, el nombre del parámetro aparecerá en la casilla de la fórmula. Cuando esto sucede, significa que ya se ha asignado correctamente la variable, y ya sólo queda validar en *OK*.



Al salir de la herramienta, al lado de la cifra de cota aparece un símbolo f_x que indica la relación de ese valor con una fórmula, correspondiente en este caso al parámetro asignado.



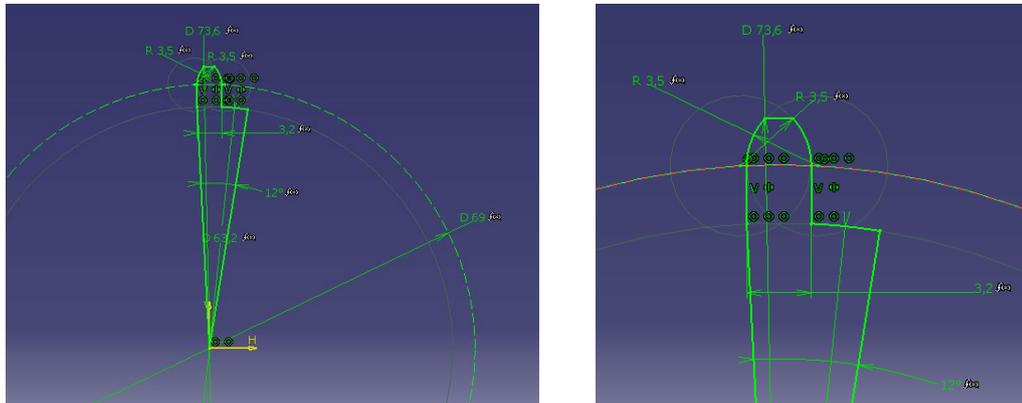
Los distintos parámetros creados se muestran en el árbol de operaciones englobados en un apartado de nombre *Parameters*. Es posible modificar su valor haciendo doble *click* en su referencia; al hacerlo, aparecerá la ventana de edición del parámetro, en la que se podrá variar su valor, así como modificar su nombre, si se desea.



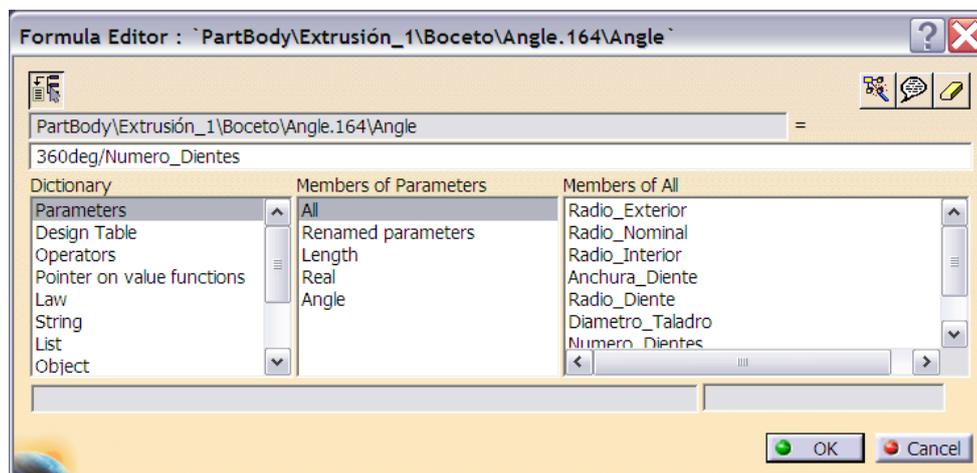
7.1.1.2. Modelado de los engranajes.

Para el dimensionamiento de las distintas ruedas dentadas, primeramente se ha realizado y extruido el boceto de uno de los dientes de cada engranaje y de su espacio de paso entre dientes correspondiente, para posteriormente crear mediante una matriz circular el resto de la pieza. Son varias las cotas de dicho boceto las que se han asociado a un

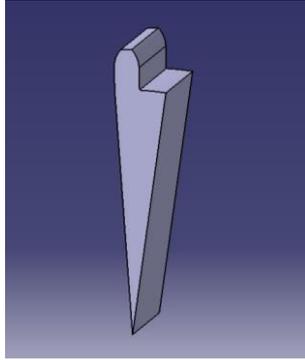
parámetro; en concreto, a las correspondientes a la circunferencia primitiva, a las circunferencias interior y exterior, al ancho del diente, al radio de curvatura del diente y al número total de dientes. Esto permite controlar y modificar las características del engranaje evitando la edición del boceto.



Además, en el caso del valor del ángulo, su fórmula corresponde al cociente entre los 360 grados del total de la circunferencia y el parámetro correspondiente al número de dientes. Es importante, a la hora de reflejarlo en la casilla de la ventana de edición de la fórmula, indicar las unidades de las cifras expresadas, en este caso el total de grados de la rueda dentada.

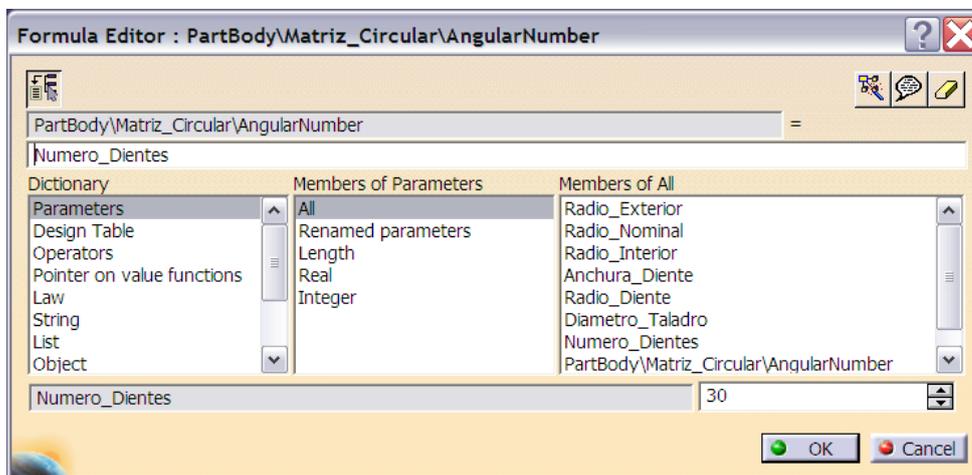


Una vez realizado el boceto parametrizado se procede a su extrusión con el espesor correspondiente, a través de la herramienta *Pad* (barra de herramientas *Based-Sketch Features*), indicando los milímetros a extruir. De esta forma se puede observar la forma sólida de una de las porciones angulares de la rueda dentada.



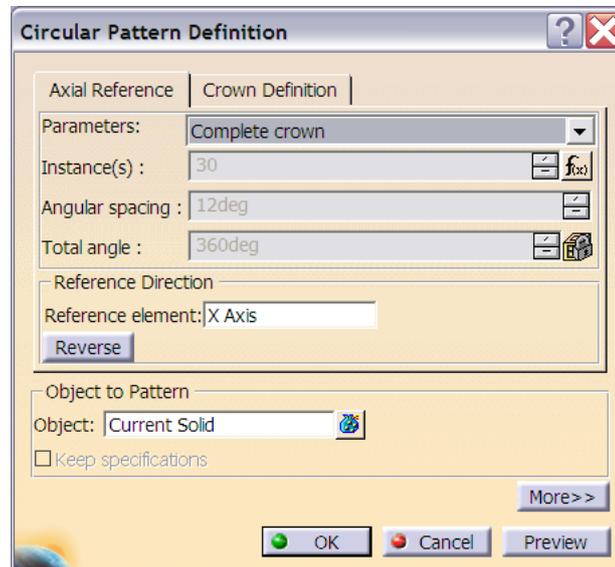
El siguiente paso se basa en la generación del total del engranaje, a partir de la porción angular sólida obtenida en el paso anterior. Ello se lleva a cabo mediante la herramienta *Circular Pattern*, presente en la barra de herramientas *Patterns*, integrada dentro de la barra *Transformation Features*.

Al ejecutarla, se muestra la ventana de edición de la matriz circular. En la casilla *Parameters* se ha de seleccionar las variables a partir de las cuales se va a definir la matriz; en este caso, se ha de elegir la opción *Complete Crown*, que implica la repetición del sólido los 360 grados. En la casilla inferior (*Instance(s)*) se ha de especificar el número de repeticiones; dada la parametrización global del engranaje, esta asignación se hará a través de la generación de una fórmula asociada, haciendo *click* en el botón f_x contiguo a la casilla.

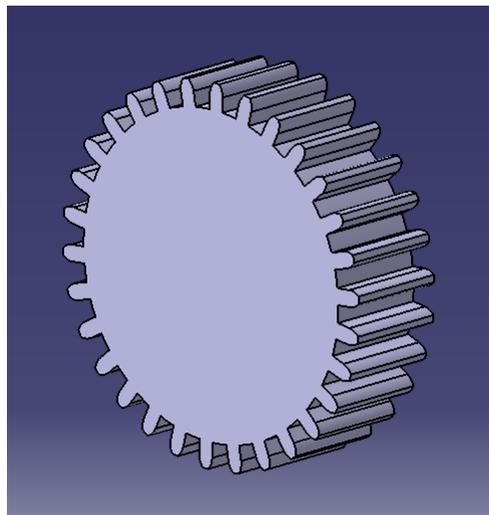


La ventana emergente es la correspondiente a la edición de la fórmula asociada el valor de *Instances*. Se ha de proceder como en el caso de la parametrización de las cotas del boceto, seleccionando en este caso el parámetro correspondiente al número de dientes del engranaje en cuestión. Al especificar el número de instancias, el resto de variables de generación quedan definidas, por lo que sólo queda indicar el eje de de referencia para

realizar la matriz en la casilla *Reference element* y el sólido a instanciar en *Object to Pattern*, en este caso, la porción angular extruida anteriormente.

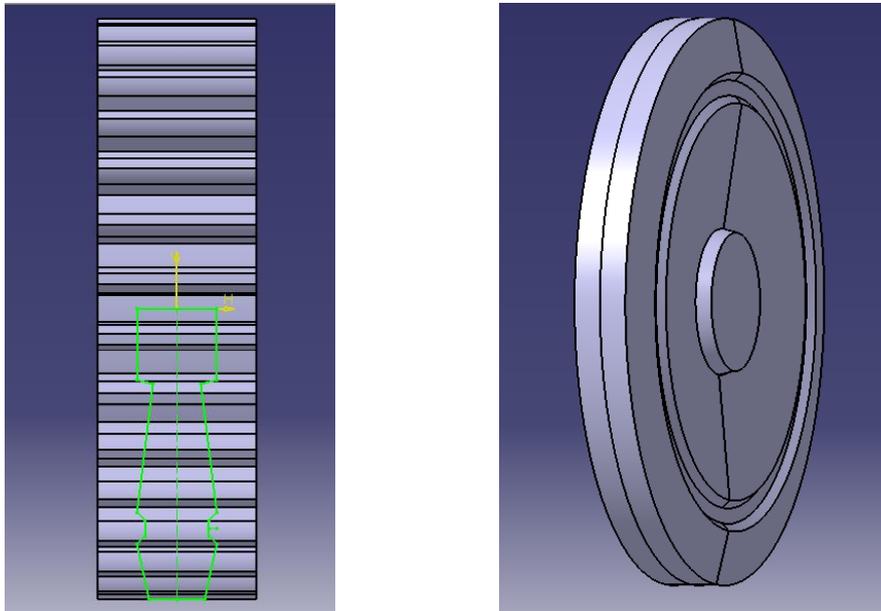


Una vez validada la creación de la matriz (mediante *OK*), el sólido obtenido es semejante al que se muestra en la imagen inferior. En este punto, el engranaje cuenta con la forma base de sus dientes, pero todavía no posee su contorno definitivo.

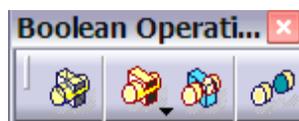


Para dotarle de su forma final, se ha de realizar un boceto en su plano de perfil y generar de por revolución el sólido correspondiente a dicho contorno. La herramienta que genera un sólido por revolución recibe el nombre de *Shaft*, y se encuentra en la barra *Sketch-Based Features*. Al ejecutarla, se han de indicar el boceto generador del sólido, el eje de revolución y

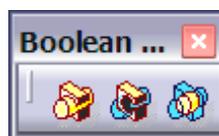
el ángulo de revolución (en este caso 360°). Destacar que el boceto debe de tener un contorno cerrado para poder llevar a cabo la operación de revolución. Estas operaciones se han de realizar en un nuevo *Body*, independiente del *PartBody* del archivo.



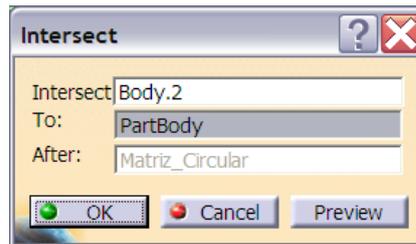
El siguiente paso radica en la intersección de ambos sólidos, con el fin de conformar la forma definitiva de la rueda dentada. El hecho de que los sólidos se hayan generado en un *Body* independiente cada uno de ellos radica en la forma en la cual van a relacionarse para conformar la geometría final del engranaje. Una vez obtenidos e incluidos uno de ellos en el *PartBody* (la matriz circular con la geometría de los dientes) y el otro en un nuevo *Body* (el contorno de la rueda) van a ser interseccionados mediante una operación *booleana*.



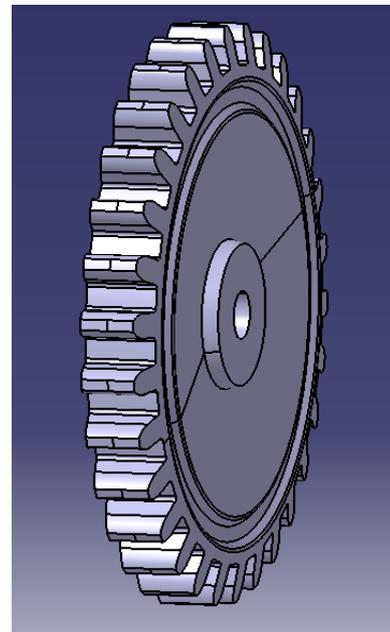
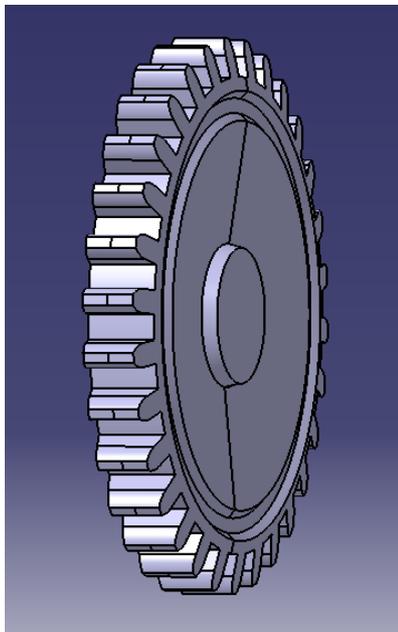
La barra *Boolean Operations* contiene herramientas que posibilitan la obtención de nuevos sólidos a partir de otros ya generados. En este caso, la herramienta de la cual se va a hacer uso se encuentra dentro de subbarra del mismo nombre, cuya denominación es *Intersect*.



Al ejecutar la herramienta se muestra su ventana correspondiente. En ella se pide primeramente el primer elemento sólido (*Intersect*); se ha de seleccionar el perteneciente al *Body* creado. A continuación, en la casilla *To* se ha de seleccionar el elemento junto con el cual se va a crear el nuevo sólido aunque, si no existe ningún otro *Body* creado en el archivo, automáticamente se selecciona *PartBody* como opción, la cual contiene precisamente al otro sólido involucrado. Por lo tanto no es necesario realizar ninguna acción más, salvo validar (*OK*).



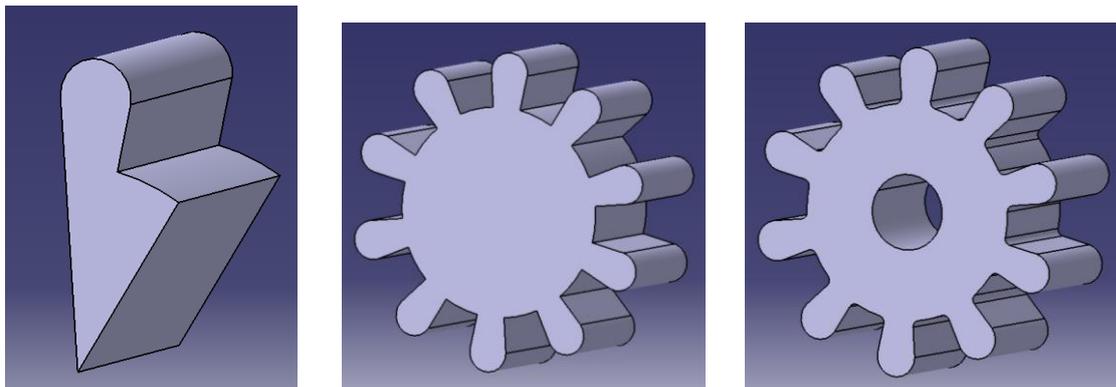
Una vez hecho esto ya se posee la rueda dentada con su forma definitiva. Tan sólo queda realizar el taladro central a través del cual girará sobre el eje de rotación, mediante la herramienta *Hole* (Barra *Sketch-Based Features*) y redondear mínimamente las aristas oportunas para un mejor acabado, a través de la herramienta *Edge Fillet*, presenta en la barra *Fillet* (Barra *Dress-Up Features*).



El proceso desarrollado corresponde con el modelado de uno de los tipos de engranajes presente en el conjunto del reloj. Para modelar el otro grupo de engranajes semejantes se ha

llevado a cabo un proceso similar, exceptuando la necesidad de realizar la intersección del sólido base, ya que la forma de esta familia posee una forma más sencilla.

Así, se modeló primeramente una porción angular para después generar mediante una matriz circular el total de la rueda. Posteriormente se realizó el taladro central y los redondeos de aristas oportunos.

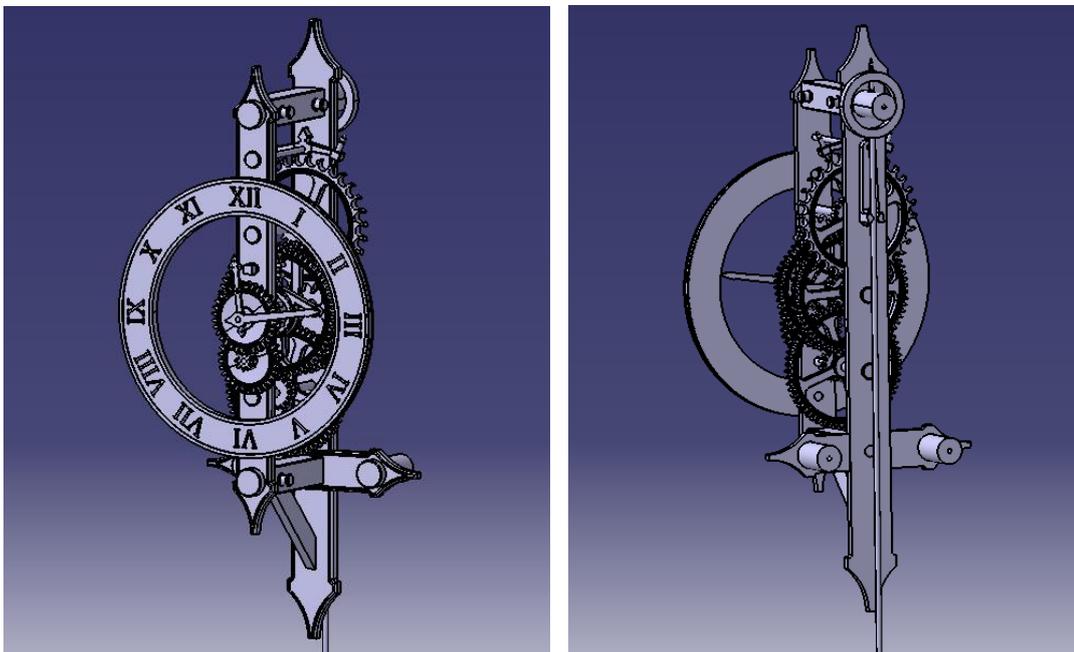


El hecho de la parametrización de las ruedas dentadas ha facilitado la mayor rapidez a la hora de obtener los distintos tamaños de las mismas ya que, una vez modelado uno de ellos, para obtener los semejantes a él sólo fue necesaria la variación de los valores de los parámetros oportunos en cada caso, sin tener que volver a realizar toda la secuencia de operaciones.

Cabe reseñar que se ha respetado las formas previstas en los planos para las distintas ruedas dentadas; esto es, el hecho de que estas estén pensadas para su fabricación en madera ha hecho que el autor no haya considerado su geometría habitual, en especial la de los dientes (habitualmente generados mediante evolvente).

7.2. Ensamblaje de los componentes del reloj.

Previo a la animación, se llevó a cabo el ensamblaje del conjunto, a través del módulo *Assembly Design*. Este módulo de *CATIA* está pensado para la unión de las distintas piezas que componen el total de un cuerpo. Cada una de ellas es insertada en el archivo que contendrá al conjunto y es posicionada y restringida con respecto a los componentes colindantes. Las principales herramientas de restricciones que ofrece el módulo al respecto relacionan los elementos afectados mediante coincidencias, contacto de superficies, distancias, paralelismos, perpendicularidades o ángulos.



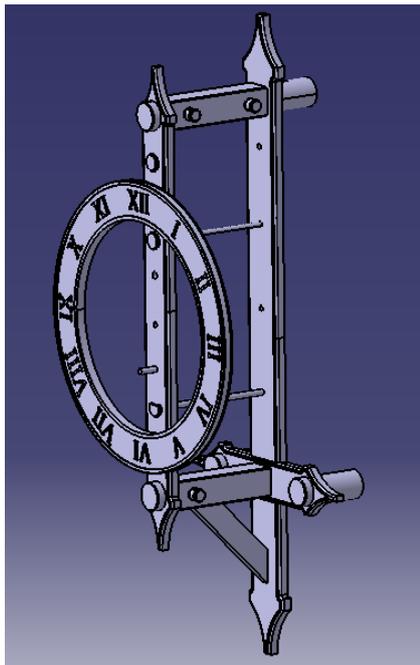
Este primer ensamblaje facilitó, no sólo la comprensión de la interacción entre las distintas piezas, sino que también comenzó a aclarar los detalles del funcionamiento global del reloj. Mencionar igualmente que, durante el proceso de ensamblaje, se realizaron algunas pequeñas modificaciones en ciertas piezas, con el fin de posibilitar un mejor acoplamiento entre ellas.

Por otro lado debido a una restricción impuesta por una de las herramientas utilizadas para la animación, la cual se explicará más adelante, fue necesaria la realización de ciertos subensamblajes de algunos componentes. Las piezas que integran cada subensamblaje se caracterizan por no poseer ningún movimiento relativo entre ellas, dentro del conjunto global del mecanismo del reloj.

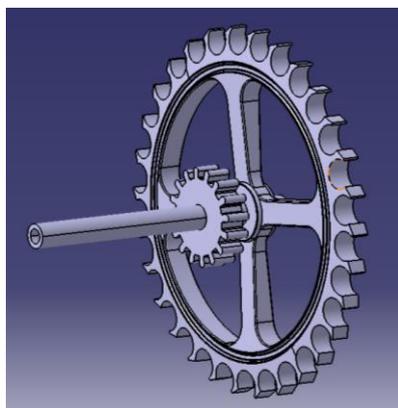
De esta forma se crearon once subensamblajes, previo al trabajo final con el módulo de animación, los cuales se explican a continuación. En todos ellos se ha tenido especial

precaución en el correcto posicionamiento relativo entre los elementos, para no interferir en el óptimo funcionamiento del conjunto.

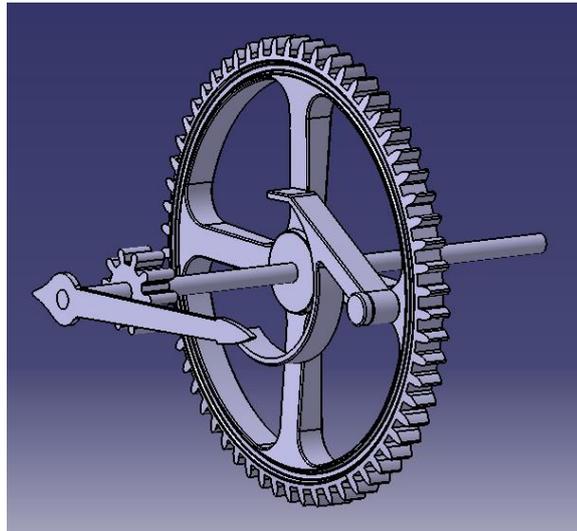
1. El subensamblaje principal constituye la estructura fija del reloj, la cual sirve de sustento a los componentes móviles. Está compuesto por un total de 28 piezas (Piezas 1/2/3/4/5/6/7(x2)/8/9(x2)/10(x2)/11(x3)/12/13(x2)/19(x6)/27(x2)/44).



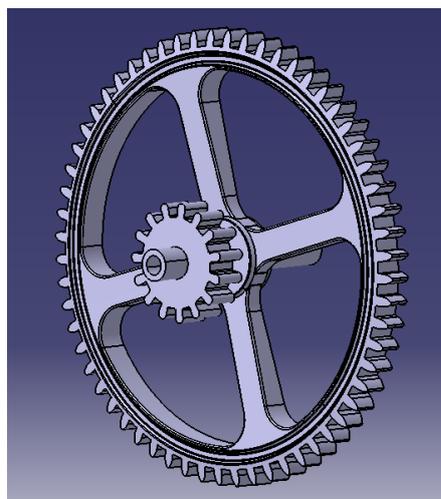
2. El siguiente subensamblaje está compuesto tres piezas, a saber, la rueda del mecanismo de escape (pieza 25), la rueda dentada a través de la cual se transmite el movimiento de la primera, de 16 dientes (pieza 26), y el eje al cual están fijadas estas (pieza 28), el cual gira alrededor de uno de los ejes fijo de la estructura (pieza 27).



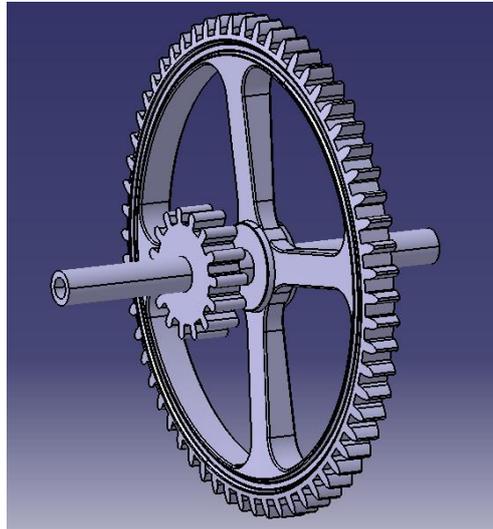
3. El tercero de los subensamblajes lo componen 6 piezas: una rueda dentada de 60 dientes (pieza 35), un piñón de 10 dientes (pieza 39) y el eje de rotación al cual van fijados (pieza 29); además, también forman parte de este conjunto el tope del trinquete del sistema de peso (pieza 31) y la pieza que lo fija a la primera rueda mayor del conjunto (pieza 37) y, por último, la aguja minuteru, situada en el extremo frontal del eje cuyo movimiento está regido por éste (pieza 48).



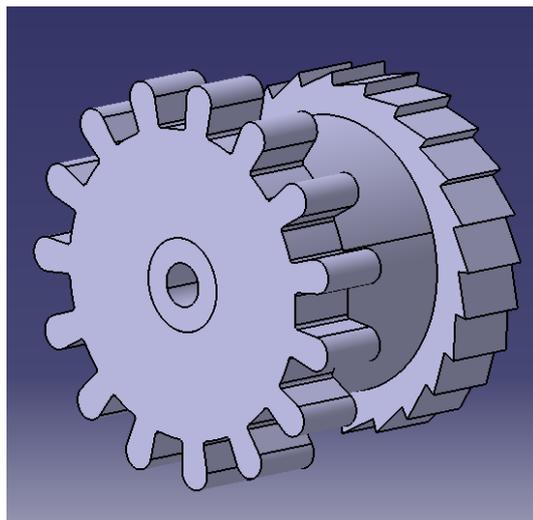
4. El siguiente subensamblaje lo componen dos ruedas dentadas y el eje de rotación al cual van fijadas. La mayor de las ruedas tiene 60 dientes (pieza 35) y el piñón 15 dientes (pieza 33). El eje (pieza 32) gira concéntricamente sobre eje perteneciente al subensamblaje anterior (pieza 29).



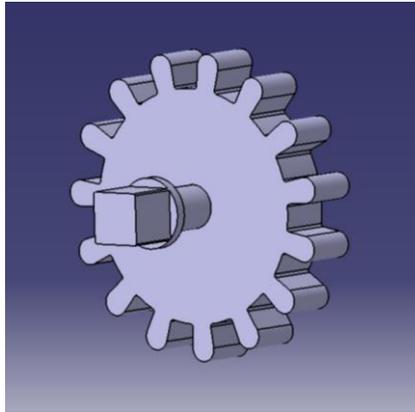
5. Los componentes del siguiente subensamblaje son los mismos que los del anterior. Está compuesto por dos ruedas dentadas, una de 60 dientes (pieza 35) y un piñón de 15 dientes (pieza 33) y por un eje de rotación (pieza 28), al cual están fijadas, que gira de forma concéntrica sobre uno de los ejes fijos de la estructura del reloj (pieza 27).



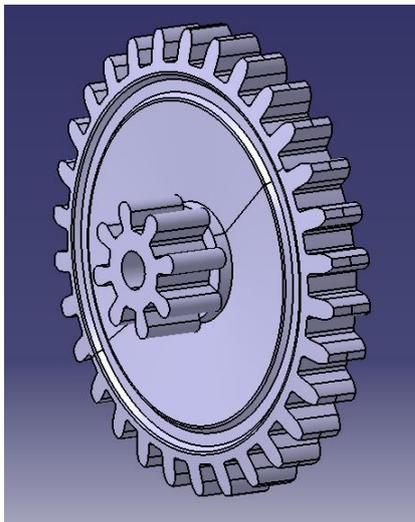
6. El sexto subensamblaje lo componen el tambor cilíndrico dónde se enrolla la cuerda que sostiene al peso (pieza 34), la rueda del trinquete al cual va ligado (pieza 36) y la rueda dentada a través de la cual se recoge la cuerda del peso (pieza 30), también fijada al tambor. Todos ellos giran sobre el eje perteneciente al tercer subensamblaje (pieza 29).



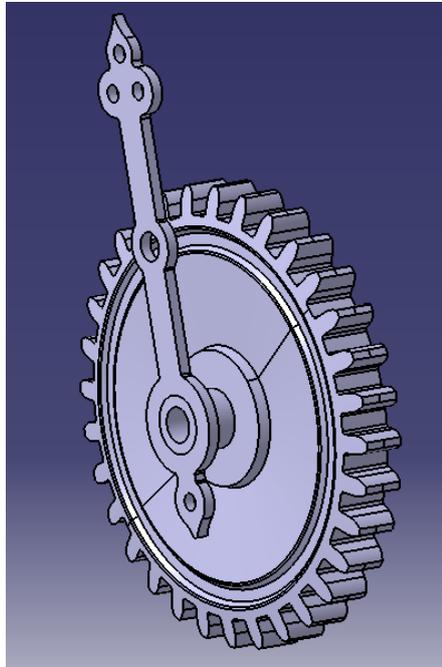
7. El séptimo subensamblaje está relacionado con el anterior, ya que está compuesto por el engranaje y la llave que activan el giro del tambor que recoge la cuerda del peso. La rueda dentada (pieza 30), de 15 dientes, va fijada al eje de la pieza de accionamiento (pieza 47), la cual atraviesa la pieza frontal de la estructura del reloj.



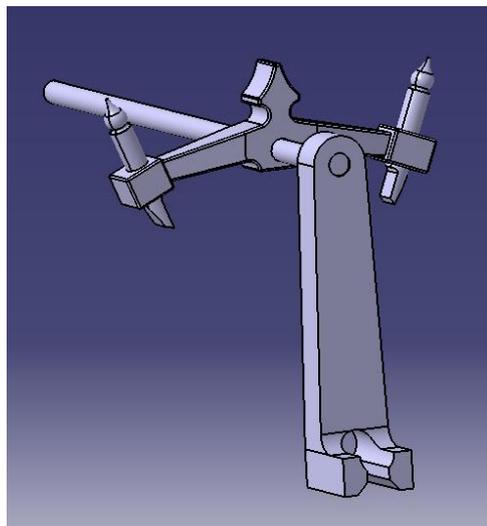
8. El subensamblaje subsiguiente está compuesto por dos ruedas dentadas que constituyen parte del mecanismo de reducción del movimiento del minuterio a la aguja horaria. La mayor de ellas posee 30 dientes (pieza 46), mientras que la menor cuenta con 8 dientes (pieza 45). Ambas giran concéntricamente respecto a un eje de la estructura fija situado en la parte frontal (pieza 44).



9. El noveno subconjunto lo integran tres piezas: Una rueda de 32 dientes (pieza 38), la aguja horaria (pieza 49) y el eje al cual ambas van fijadas (pieza 40). El mencionado eje gira sobre el componente homólogo del tercer subensamblaje (pieza 29).



10. El décimo subensamblaje constituye el escape junto con la pieza que lo liga al movimiento del péndulo, así como el eje de rotación de estas. En total lo componen: la pieza base del escape (pieza 22), los dos pines encargados de hacer contacto con la rueda del mecanismo (piezas 23 y 24), la pieza ligada al péndulo (pieza 21) y el eje de rotación (pieza 20).



11. El último subconjunto lo conforman todas las piezas del péndulo: el pin de apoyo para el balanceo (pieza 15), el aro superior (pieza 14), la varilla (pieza 16), el peso del péndulo (pieza 17) y la pieza de sujeción inferior del mismo (pieza 18).



Una vez obtenidos todos los subensamblajes, se procedió a trabajar sobre la animación del conjunto del mecanismo, a fin de indagar las posibilidades ofrecidas por *CATIA* en el campo de las simulaciones de mecanismos y de dar los pasos para conseguir una animación realista del funcionamiento del reloj.

7.3. Animación de los mecanismos del reloj.

La animación del reloj se ha llevado a cabo utilizando *DMU Kinematics*. Este módulo de trabajo está integrado dentro del área de aplicaciones denominada *Digital Mockup*, la cual engloba todas las aplicaciones que incluye *CATIA* relativas a la creación de simulaciones, análisis espacial, de tolerancias y disposición relativa de componentes, entre otros.

En concreto, el *DMU Kinematics* es un módulo que posibilita la creación de animaciones y simulación de cualquier tipo de mecanismo o máquina, mediante la creación de uniones cinemáticas que permiten los movimientos necesarios entre los distintos componentes.

El archivo con el que trabaja este módulo es de tipo *Product* (con extensión *.CATProduct*), el mismo que se utiliza a la hora realizar un ensamblaje. En primer lugar pues, se han de insertar utilizando el módulo *Assembly Design* los distintos componentes que van a intervenir en la simulación. Una vez hecho esto, se pasa a trabajar con *DMU Kinematics*.

7.3.1. Uniones cinemáticas.

Lo primero que se ha de hacer antes de poder animar cualquier mecanismo es establecer las relaciones oportunas entre los elementos implicados. Los distintos tipos de uniones posibles se encuentran en la barra de herramientas de nombre *Kinematic Joints* (derivada de la barra *DMU Kinematics*, que se tratará posteriormente).



Esta barra cuenta con un total de diecisiete herramientas:

- Unión de revolución (*Revolute Joint*).
- Unión prismática (*Prismatic Joint*).
- Unión cilíndrica (*Cylindrical Joint*).
- Unión de tornillo (*Screw Joint*).
- Unión esférica (*Spherical Joint*).
- Unión de plano (*Planar Joint*).

- Unión rígida (*Rigid Joint*).
- Unión de punto sobre curva (*Point Curve Joint*).
- Unión de curva deslizante (*Slide Curve Joint*).
- Unión rodillo de curvas (*Roll Curve Joint*).
- Unión punto sobre superficie (*Point Surface Joint*).
- Junta universal (*Universal Joint*).
- Unión CV (*CV Joint*).
- Unión de engranaje (*Gear Joint*).
- Unión de cremallera (*Rack Joint*).
- Unión de cable (*Cable Joint*).
- Unión basad en ejes (*Axis-based Joint*).

Dada la estructura del reloj, los movimientos relativos entre sus distintos componentes y el planteamiento del proceso, sólo ha sido necesaria la utilización de las herramientas *Revolute Joint* y *Gear Joint*.

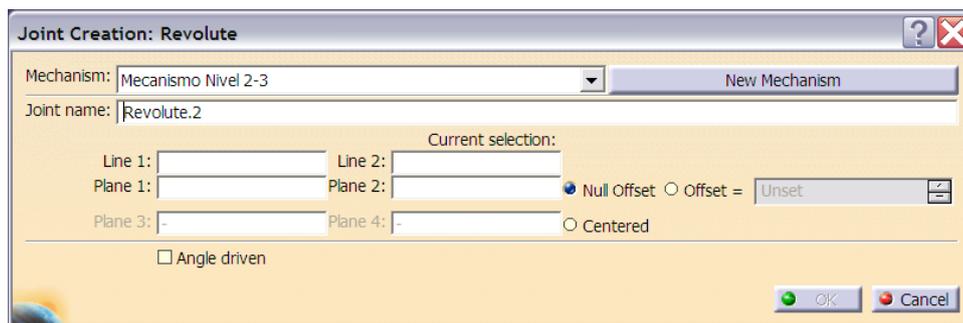
7.3.1.1. *Revolute Joint*.

La herramienta *Revolute Joint* permite la ligadura de dos elementos pertenecientes a dos piezas distintas (es decir, a archivos *Part* o *subProduct* independientes), a través de la relación entre dos aristas o ejes de los mismos. Al activar la herramienta, se muestra una ventana de edición en la que se disponen distintos datos y parámetros a cumplimentar y seleccionar.

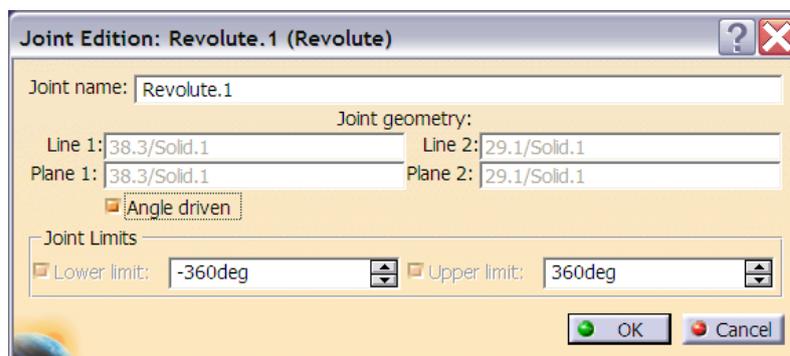
En primer lugar el usuario ha de indicar el mecanismo al cual va a pertenecer la unión, pudiendo crear uno nuevo, a través de *New Mechanism*, o seleccionar uno ya existente, desplegando la lista contigua a *Mechanism*. Al crear un nuevo mecanismo, es posible asignarle el nombre que se desee; posteriormente, este aparecerá en la lista de mecanismos con la misma denominación. En caso contrario el programa asignará uno por defecto.

Una vez hecho esto, se procede a introducir los datos relativos a la unión. Al igual que en el caso del mecanismo, se le puede asignar un nombre, en la casilla *Joint name*, modificando el predeterminado.

Los elementos que intervienen en la unión son una línea y un plano de cada uno de los elementos. La primera línea a seleccionar (*Line 1*) corresponde con el eje de giro del primer componente, mientras que la segunda (*Line 2*) es el referido al segundo. A continuación se ha de seleccionar un plano perteneciente al primer elemento, perpendicular al eje de giro definido (*Plane 1*) y posteriormente hacer lo mismo en el caso del segundo (*Plane 2*). Ambos planos pues, serán paralelos, y pertenecerán, respectivamente, a la misma pieza (mismo archivo *Part*) a la cual se ha hecho referencia al seleccionar cada uno de los ejes. Puede establecerse una distancia nula entre ellos, activando *Null Offset* o, por el contrario, especificar una separación activando *Offset* e introduciendo el valor de la distancia deseado.



Para que sea posible llevar a cabo la animación de los elementos implicados en el mecanismo, se ha de activar *Angle Driven*. En caso contrario, el programa mostrará un mensaje de advertencia instando al usuario a añadir un comando a la unión. Un comando es un parámetro de accionamiento que rige los movimientos de los elementos constituyentes de un mecanismo. Al activar *Angle Driven* se crea automáticamente un comando asociado a esa unión. Es posible establecer el rango de desplazamiento de los componentes, editando la unión, y variando los valores máximo y mínimo en *Joint Limits*.



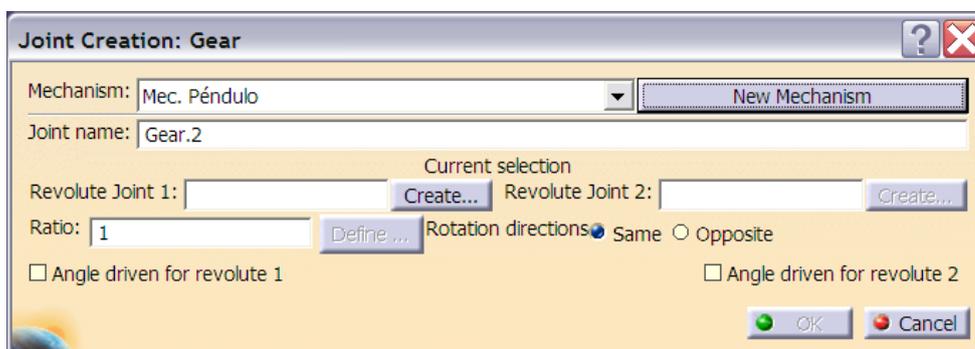
7.3.1.2. Gear Joint.

La herramienta *Gear Joint* permite la creación de un engranaje a partir de dos parejas de elementos constitutivos de sendas uniones de revolución. Al ejecutar la herramienta aparece una ventana de edición, similar a la de *Revolute Joint*. De igual forma, primeramente se selecciona o se crea el mecanismo al cual va a pertenecer la unión, y se le asigna a esta el nombre deseado.

Tras ello, es necesario seleccionar las dos uniones de revolución que van a relacionarse (*Revolute Joint 1* y *Revolute Joint 2*). Ambas pueden haber sido creadas con anterioridad o, en caso contrario, pueden definirse haciendo *click* en *Create...*. En este caso, aparecerá la ventana de creación de unión de revolución, y se procederá según lo presentado en el punto anterior.

Un hecho importante y a tener en cuenta a la hora de crear una unión de engranaje es que sólo se pueden ver implicados en total piezas de tres archivos *Part* o *subProduct* distintos. Ello conlleva que los elementos que llevan asociada la función de eje de rotación en las uniones de revolución involucradas deben de pertenecer al mismo archivo, ya que los otros dos componentes (normalmente las ruedas dentadas), relativos a *Revolute Joint 1* y *Revolute Joint 2* respectivamente, formarán parte cada uno de ellos de un archivo independiente.

Una vez especificadas las dos uniones de revolución que van a conformar el engranaje, se ha de cumplimentar la casilla *Ratio*. El valor a introducir corresponde con la relación de transmisión de los engranajes. Otra condición a concretar es el sentido de rotación de las ruedas, esto es, si ambas girarán en el mismo sentido o lo harán en el contrario. Este hecho se especifica activando en *Rotate directions* la opción *Same*, en caso de que el sentido de giro sea el mismo, u *Opposite*, en caso contrario. Si la opción seleccionada es esta última, el valor de la relación de transmisión pasará a ser negativo en su casilla.



Por último, se ha de elegir el elemento sobre el cual se tendrá el control del movimiento. Para ello, se seleccionará *Angle driven for revolute 1* o *Angle driven for revolute 2* dependiendo de si se desea que el componente controlado sea el perteneciente a la primera unión de

revolución o a la segunda. Si no se lleva a cabo este paso, no será posible la animación del engranaje, pues no se creará ningún comando asociado al mismo.

Cabe destacar también que, al crear una unión de engranaje, ésta pasa a ser la unión que prevalece en el mecanismo, es decir, las uniones de revolución asociadas a ella se convierten en 'hijas' suyas, pero sin influencia a la hora de condicionar la animación. Los comandos relacionados a las uniones de revolución desaparecen (en caso de haber sido creados anteriormente) al crearse la unión de engranaje, siendo el comando ligado a ésta el único que queda activo y manipulable.

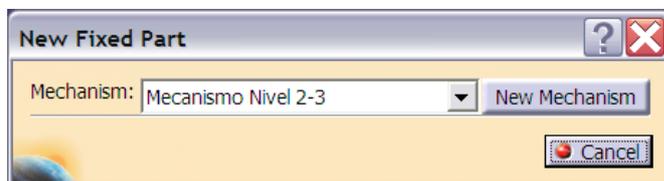
7.3.2. Condiciones para la simulación de un mecanismo.

Además de establecer las uniones cinemáticas entre los distintos componentes de un mecanismo, existen otras acciones que han de llevarse a cabo para que *CATIA* permita realizar una animación del mismo. Una de ellas es la ya mencionada creación de comandos: se ha de crear al menos un comando asociado a cada unión cinemática de elementos.

Otra de las medidas a tomar es la fijación de uno de los componentes de un mecanismo. Esta acción se lleva a cabo a través de la herramienta *Fixed Part*, presente en la barra de herramientas *DMU Kinematics*.



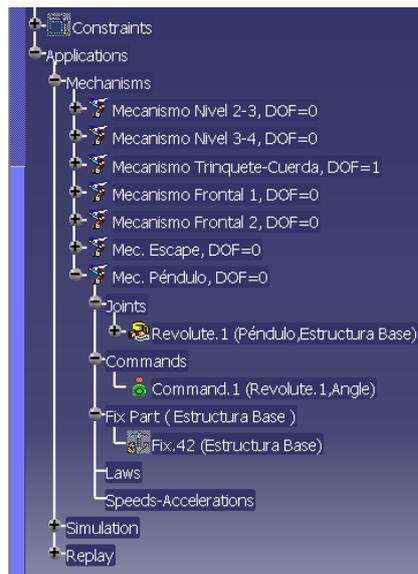
Accionado la herramienta, se muestra una ventana en la que se da la opción de seleccionar a que mecanismo va a involucrar la fijación. De igual forma, si éste no existe, permite su creación. Una vez hecha esta especificación, se ha de seleccionar el componente a fijar.



Todas estas acciones conducen a un hecho indispensable en *CATIA* para que se pueda llevar a cabo la animación de un mecanismo, y es que éste no tenga ningún grado de libertad. Los grados de libertad establecen el número de posibilidades de movimiento que posee un mecanismo. En *CATIA*, el valor ha de ser nulo, lo cual indica que los elementos presentes en un mecanismo están fijos, o sus posibilidades de movimiento están controladas por un comando. Los grados de libertad poseídos por un mecanismo en cada momento son indicados junto a la denominación del mismo, en el árbol de operaciones a través de las siglas *DOF* (del inglés *Degrees Of Freedom*).

7.3.3. Estructuración de los mecanismos en el árbol de operaciones.

Todas las acciones ejecutadas con el módulo *DMU Kinematics* se agrupan en el árbol de operaciones del archivo correspondiente en un apartado denominado *Applications*, el cual se genera automáticamente al crear el primero de los mecanismos. En concreto, los mecanismos generados se disponen en el árbol dentro de *Mechanisms*, un subapartado de *Applications*.



A su vez, de cada mecanismo surgen cinco nuevos grupos de datos: *Joints*, *Commands*, *Fix Part*, *Laws* y *Speeds-Accelerations*. El primero aúna todas las uniones con las que cuenta el mecanismo, las cuales a su vez contienen las restricciones asociadas a ellas. El segundo muestra todos los comandos generados para cada mecanismo. *Fix Part* muestra el componente carente de la posibilidad de movimiento. En *Laws* se engloban las leyes de movimiento asociadas a los elementos del mecanismo, mientras que en *Speeds-Accelerations* se incluyen los análisis cinemáticos realizados acerca del mismo.

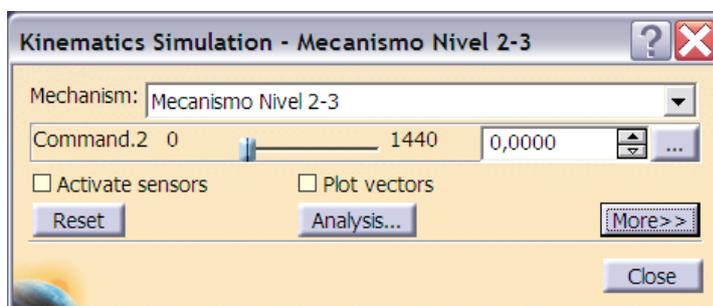
7.3.4. Creación de las simulaciones.

Existen dos formas posibles de realizar la simulación de un mecanismo: mediante comandos o a través de leyes. Las herramientas para llevarlas a cabo, respectivamente, son *Simulation with Commands* y *Simulation with Laws*, y se encuentran en una barra de herramientas (de nombre *Simulations*) integrada dentro la barra *DMU Kinematics*.



7.3.4.1. Simulación mediante comandos.

La creación de una simulación a través de los comandos de un mecanismo se basa en el control del movimiento de los componentes de las uniones constituyentes del mismo.

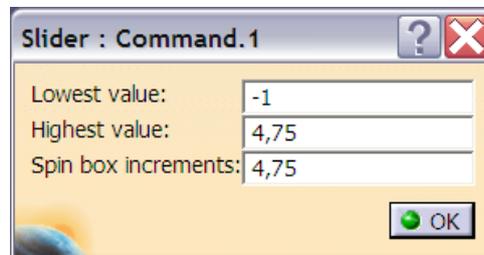


Al ejecutar la herramienta *Simulation with Commands*, como es habitual, se permite la selección del mecanismo cuyos movimientos se van a simular, en la casilla *Mechanism*. En caso de seleccionar un mecanismo que no cumple con todas las condiciones para ser simulado, se mostrará un mensaje de aviso, indicando las medidas a tomar (fijación de uno de los componentes, creación de un comando, etc.)

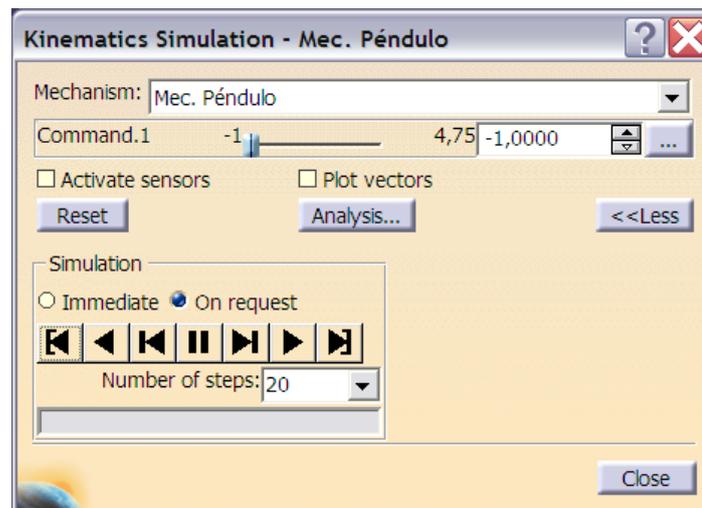
Bajo la casilla *Mechanism* se muestra el nombre del comando y una barra con un icono deslizable por la misma. Los valores que acotan los límites de la mencionada barra corresponden con el rango de movimiento del elemento.

Estos valores pueden ser modificados haciendo *click* en el botón . En la ventana emergente, se permite introducir el límite inferior (*Lowest value*), así como el superior

(*Highest value*); ambos han de ser coherentes con los valores del rango de movimiento, introducidos en la creación de la unión referida. También es posible fijar el valor correspondiente de los incrementos de desplazamiento generados (*Spin Box Increments*).



La casilla situada a la derecha de la barra de posición indica la situación del componente. Mediante las flechas contiguas se pueden dar saltos de posición equivalentes al valor del incremento mencionado anteriormente. De igual forma, puede introducirse el valor posicional de forma manual.



Al pulsar la el botón *More*, se despliegan más opciones de simulación. Al activar la orden *On request* se activan una serie de botones con los cuales se puede realizar la simulación de forma automática, permitiendo avanzar o retroceder durante ella, paso a paso, o directamente hasta el punto final o inicial, así como pausarla. El valor presente en la casilla *Number of steps* está relacionado con el número de cálculos de las distintas posiciones de los componentes durante su movimiento, y puede variar de 5 a 80.

Por último, al ejecutar *Reset*, las piezas del mecanismo vuelven a la posición en la que se encontraban previamente a la simulación.

7.3.4.2. Simulación mediante leyes.

En la simulación mediante comandos el movimiento de los elementos se controla, como ya se ha visto, por medio de la creación de sucesivos puntos de control a lo largo de una línea de tiempo, esto es, mediante 'saltos' de posición.

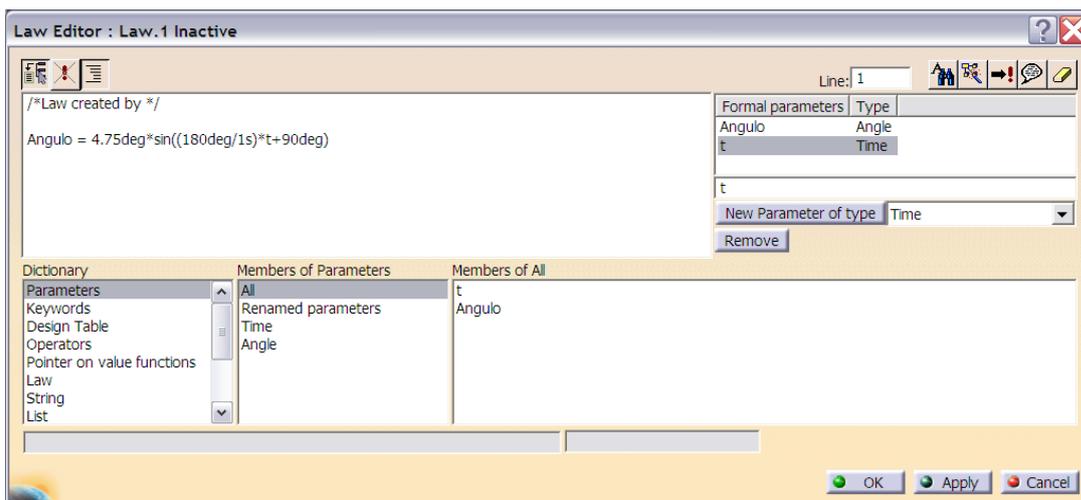
En el caso de la simulación mediante leyes, el movimiento del mecanismo lo rige una ley ligada al comando asociado al componente de la unión a animar.

7.3.4.2.1. Creación de la ley.

Con la creación de la ley, se pretende dotar al componente o componentes del mecanismo en cuestión de un movimiento regido por una ecuación matemática.

Existen varias formas de crear una ley asignable a un comando. En este caso, la manera elegida ha sido mediante la creación gráfica de una curva 2D asociada a la ley. Una curva contenida en un boceto puede ligarse a un comando; de esta forma, el movimiento asociado a ese comando evoluciona según la trayectoria de dicha curva. Todos los pasos que siguen se realizarán en un archivo *Part* independiente.

En primer lugar es necesaria la creación de la ley matemática. Para ello, se ha de ejecutar la herramienta *Law*, presente en la barra de herramientas *Relations*, contenida a su vez en la barra de nombre *Knowledge*. Al hacerlo, aparece la ventana de creación y edición de la ley.

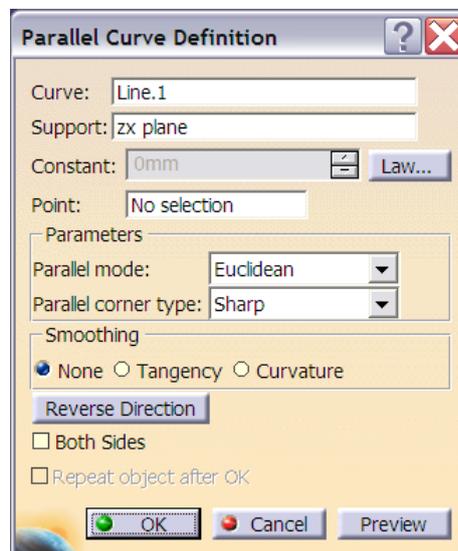


Los pasos básicos a seguir son la introducción de la ecuación matemática, previa creación de las variables que intervienen en ella. El botón a activar para su creación es *New Parameter of type*; cada vez que se lleva a cabo ese paso, una nueva variable es creada. Es de importancia reseñar la posibilidad de elegir el tipo de variable a crear (real, de tiempo, de ángulo, de longitud, etc.), seleccionando la deseada en cada caso de la lista desplegable contigua al botón de creación. Bajo éste, se encuentra *Remove*, que permite eliminar una variable.

El cuadro situado en la parte superior izquierda de la ventana es el lugar dónde se ha de introducir el texto correspondiente a la ecuación. Se ha de tener especial cuidado la corrección de *script* introducido, aludiendo a las variables con el mismo nombre con el que fueron creadas y especificando las unidades en las que están expresadas las cifras. Una vez realizados estos pasos, se confirma la creación (o edición) de la ley haciendo *click* en *OK*. La ley aparece en el árbol de operaciones en un apartado de nombre *Relations*.

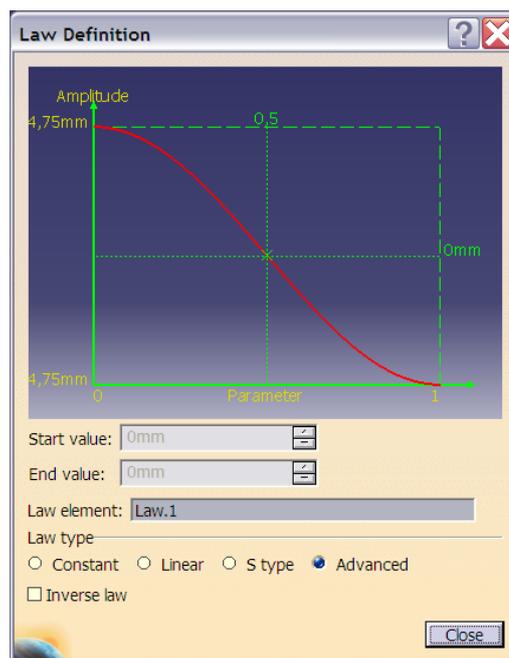
Una vez creada la ley matemática, se ha de crear una curva 2D que la represente gráficamente. La creación de dicha curva se genera utilizando el módulo *Generative Shape Design*. En él, la barra *Wireframe* contiene todas las herramientas necesarias para ello.

Así, y en primer lugar, con la ayuda de *Line*, se crea una línea horizontal. La longitud exacta de esta línea no va a tener relevancia en los pasos posteriores, si bien es recomendable que tenga una dimensión coherente con respecto al recorrido de la curva representativa de la ecuación, principalmente por motivos prácticos. A continuación, se ejecuta la herramienta *Parallel Curve*. Al hacerlo, aparece su ventana de definición correspondiente.



Las dos primeras casillas, *Curve* y *Support*, hacen referencia a la línea a partir de la cual se quiere crear la nueva, y al plano en el cual estarán contenidas ambas líneas, respectivamente. De esta forma, se seleccionarán la línea creada previamente y posteriormente el plano que la contiene.

Una vez hecho esto, se ha de activar el botón *Law...*. Al hacerlo, aparece la ventana de definición de la ley, en la que se establecen las condiciones geométricas que va a seguir la nueva curva creada. Para asignarla la ley matemática generada previamente, ha de seleccionarse la opción *Advanced* en el apartado *Law Type* y, a continuación, seleccionar en la casilla *Law element* la ley creada. En la mitad superior de la ventana se muestra la gráfica correspondiente a la ecuación que rige dicha ley. Es especialmente destacable con respecto a ella el hecho de que, por defecto, *CATIA* evalúa la función entre 0 y 1, no siendo posible modificar este hecho.



Tras ello, se ha de cerrar la ventana de definición de la ley de la nueva curva, y se confirma su creación haciendo *click* en *OK*, en la ventana de definición de la misma. De esta forma se crea una curva que representa de forma gráfica la ecuación matemática.

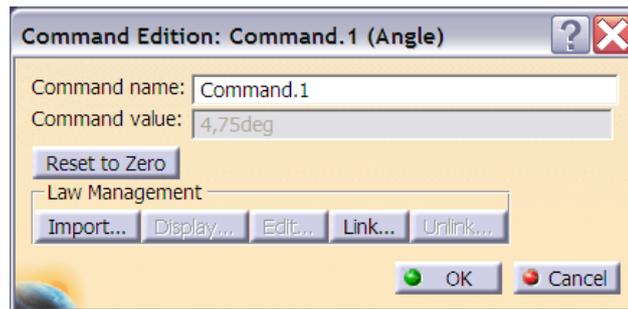
La siguiente acción es la proyección de la nueva curva en un boceto pues, como ya se ha mencionado, es indispensable que ésta esté contenida en un *sketch*. Una vez hecho esto, ya se puede llevar a cabo la relación de la curva con el comando.

7.3.4.2.2. Asignación de la ley al comando.

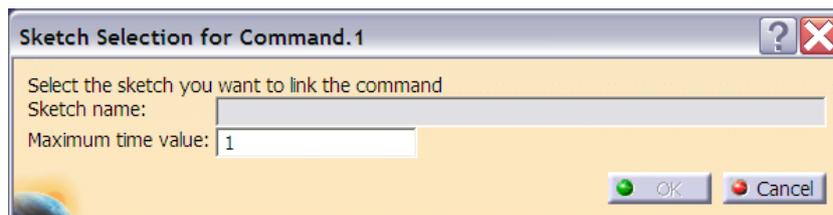
Para poder ligar la ley creada al comando deseado, en primer lugar se ha de insertar en el archivo *Product* dónde se encuentra el conjunto con los mecanismos el archivo *Part* que contiene el boceto con la curva que representa la ley. Este paso, como es habitual, se llevará

a cabo utilizando el módulo *Assembly Design*, con la ayuda de la herramienta *Existing Component*.

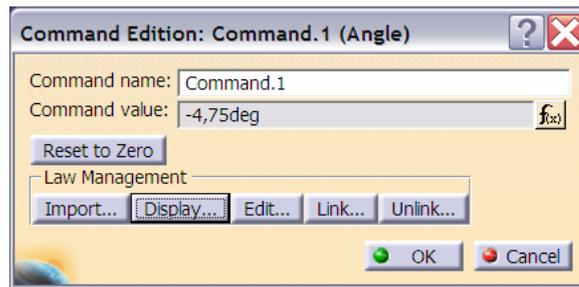
El siguiente paso radica ya en ligar la ley al comando a través del boceto de la gráfica. Para ello, se ha de activar la edición del comando, haciendo doble *click* sobre su icono presente en el árbol de operaciones. A continuación, aparece una ventana en la que se ha de activar el botón *Link...*, presente dentro de *Law Management*.



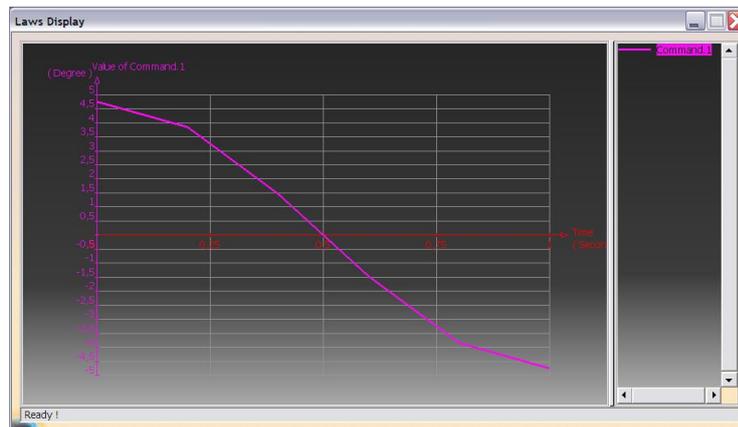
Al hacerlo, se muestra una nueva ventana, en la que se solicita el boceto el cual se quiere ligar al comando. De esta forma, en la casilla *Sketch name* se ha de seleccionar en el árbol de operaciones el boceto que contienen a la curva representativa de la ley. Bajo esta casilla, se encuentra otra de nombre *Maximum time value*, en la cual se ha de introducir el tiempo en segundos que durará la simulación, es decir, el tiempo que tardará el componente en cuestión en realizar el movimiento regido por la curva representada en el boceto. Una vez hecho esto, se hará *click* en *OK* para validar la acción.



Una vez seleccionado el boceto, en el apartado *Law Management* de la ventana de edición del comando, se activan los botones *Display...*, *Edit...* y *Unlink...*



El primero muestra la representación de la gráfica de la nueva función matemática ligada al comando. En el eje de ordenadas se plasman los valores en las unidades introducidas en la ecuación en cada caso (ángulo, longitud, etc.); en el eje de abscisas se muestra el tiempo en segundos, y su valor máximo corresponde con el introducido en la casilla *Maximum time value* de la selección de boceto.



El botón *Edit...* permite la edición del boceto, mientras que *Unlink...* posibilita desligar el boceto, posibilitando su sustitución por otro o simplemente la eliminación de su enlace con el comando.

Al activar el botón *Reset to Zero*, presente también en la ventana, se consigue establecer como posición de reposo de los componentes móviles del mecanismo aquella que se les ha asignado al insertarlos en el archivo *Product* de trabajo. Implica por tanto que, mientras no sean manipulados, o no se realice una simulación de los mismos, conservarán su posición primitiva.

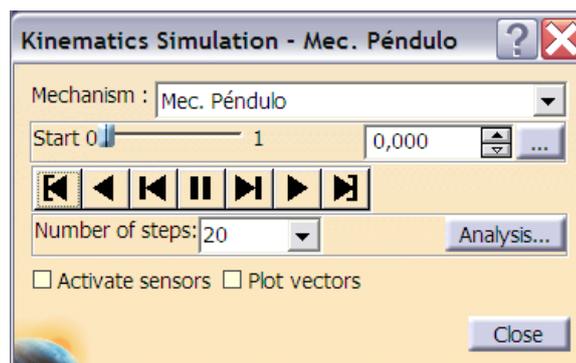
Por último, simplemente queda validar la acción mediante *OK*. Mediante este paso, se ha establecido una relación entre el comando y la variable tiempo. Más concretamente, la creación de la ley y su vinculación al mecanismo posibilita el control de sus movimientos, en relación con la duración real de estos. Así, es posible dotar de mayor exactitud y rigurosidad a los desplazamientos de los distintos componentes, a fin de conseguir una óptima simulación.

7.3.4.2.3. Simulación.

Una vez que se han realizado los pasos anteriores ya se puede proceder a la animación. Al ejecutar *Simulation with Laws*, se permite la elección entre cualquiera de los mecanismos existentes. Al igual que en el caso de simulación mediante comandos, aparecerá un mensaje de aviso en caso de que el mecanismo seleccionado no satisfaga todos los requisitos para su simulación. Más concretamente, si se desea simular mediante una ley y el mecanismo no tiene asociada ninguna, el mensaje transmitirá la necesidad de añadir una relación entre un comando de ese mecanismo y el parámetro tiempo.

En caso positivo, se mostrará la ventana de simulación con leyes. Su apariencia es similar a la ventana de simulación mediante comandos. El apartado *Mechanism* muestra el nombre del mecanismo elegido. Bajo él, una barra con un icono deslizable a lo largo de ella, permite realizar la simulación manual. En este caso, los valores que acotan esta barra corresponden con el tiempo que se desea simular el mecanismo, es decir, el valor inferior será siempre 0, mientras que el superior representará el número máximo de segundos que durará la animación.

Este valor, el cual puede ser modificado a través del botón , no podrá ser superior en ningún caso al número de segundos introducido en la casilla *Maximum time value*, durante la asignación del boceto ligado al comando. En caso contrario, al llegar a ese valor durante la animación, ésta se detendrá y se mostrará un mensaje de error, avisando de la imposibilidad de evaluar la ecuación matemática más allá de ese máximo. Ello se debe a que los límites establecidos en la simulación, sobrepasan los de acotación de la ley ligada al comando.



La casilla situada a la derecha de la barra muestra el momento (en segundos) en el que se encuentra la animación. Mediante las flechas contiguas es posible realizar incrementos y decrementos de cinco milésimas. Si se desea, también es posible introducir el valor de forma manual.

Al igual que en la simulación mediante comandos, los botones situados bajo la barra permiten la simulación automática del mecanismo, a través de las distintas acciones de avance, retroceso, inicio y pausa. El valor de la casilla *Number of steps* se refiere de nuevo al número de cálculos de las distintas posiciones de los componentes durante su movimiento.

7.3.5. Generación y grabación de animaciones.

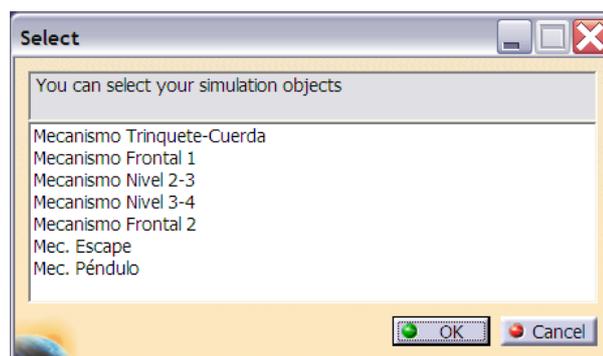
Las herramientas *Simulation with Commands* y *Simulation with Laws* permiten, como ya se ha visto, realizar simulaciones controlando el movimiento de los componentes implicados en un mecanismo. Sin embargo, no es posible reproducir de nuevo una simulación realizada, una vez que se cierra cualquiera de las dos herramientas.

Para ello el módulo *DMU Kinematics* cuenta con la barra de herramientas *DMU Generic Simulation Commands* (integrada dentro de la barra *DMU Generic Animation*), la cual cuenta que tres herramientas que posibilitan la generación, compilación y posterior reproducción de una simulación: *Simulation*, *Compile Simulation* y *Replay*.



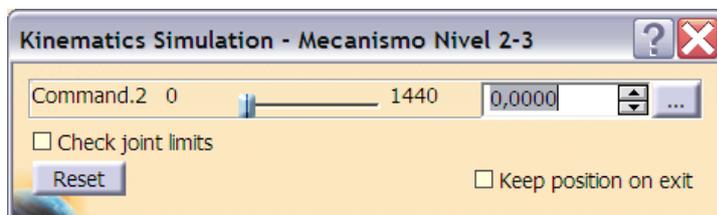
7.3.5.1. Generación de la simulación.

Al ejecutar la herramienta *Simulation*, lo primero que se muestra es una ventana con la lista de todos los mecanismos creados previamente. Se ha de seleccionar pues, aquellos que se desee que intervengan en la simulación a generar, confirmándolo haciendo *click* en *OK*.

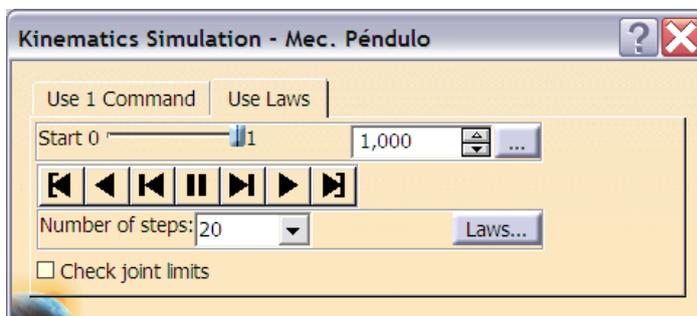


Tras ello, aparece en pantalla la ventana de edición de la simulación, así como tantas ventanas como mecanismos vayan a intervenir en la simulación. En estas ventanas, denominadas *Kinematics Simulation*, se muestra una barra con un elemento deslizable por la misma que permite, al igual que en la herramienta de simulación por comandos, la variación

de la posición del componente en cuestión dentro del rango de desplazamiento. Asimismo, aparecen la casilla con el valor actual de la posición, las flechas para poder variar esta y el botón  para variar los límites de movimiento.



En caso de que alguno de los mecanismos tenga asociada una ley, aparecerá en la ventana la opción de simularlo mediante comando o mediante leyes. De nuevo, las opciones básicas mostradas para esta simulación son las mismas que las que aparecen al ejecutar la herramienta *Simulation with Laws*: la barra representativa de la línea temporal, los botones para el control automático de la simulación, la casilla con la indicación del estado posicional actual del mecanismo, el valor *Number of steps* y el botón  para variar los valores extremos del intervalo de animación. Además, se muestra también el botón *Laws...*, el cual muestra la gráfica representativa de la ley asociada al comando del mecanismo.



La ventana de edición de la simulación está encabezada por el nombre de la simulación a crear, el cual puede modificarse en *Name*. Cuenta con una serie de herramientas básicas. La primera de ellas es una barra que, como en el resto de las presentes en las creaciones y ediciones de animaciones, representa la línea temporal de la simulación, a través de un icono que se desplaza a lo largo de ella. Bajo ella, se presentan los botones que permiten controlar la simulación de forma automática:

 *Jump to Start* permite el salto al inicio de la simulación.

 *Play Backward* reproduce la simulación en sentido inverso, desde el final de la misma hasta el comienzo.

 *Step Backward* retrocede una posición en la simulación.

 *Pause* detiene la simulación en curso.

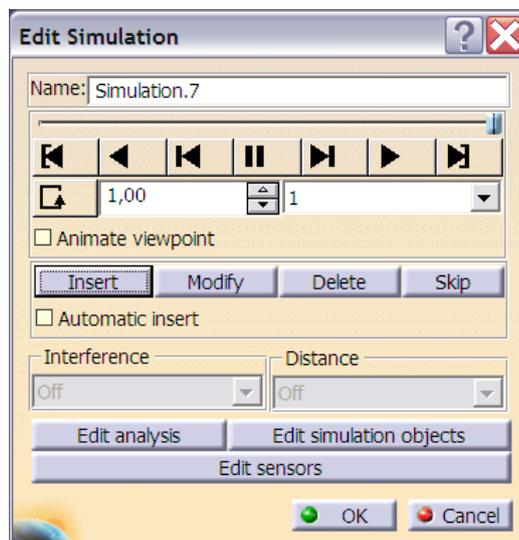
 *Step Forward* avanza una posición en la simulación.

 *Play Forward* reproduce la simulación en sentido cronológico.

 *Jump to End* permite el salto hasta la situación final de la simulación.

La generación de una simulación se basa en la creación a lo largo de su línea temporal de una serie de puntos de control. Estos puntos (o *viewpoints*) establecen la posición de los componentes del mecanismo en un instante determinado de la simulación. Son necesarios un mínimo de dos *viewpoints* para crear una animación.

El icono *Change Loop Mode*, situado bajo el botón *Jump to Start*, permite, haciendo *click* sobre el sucesivas veces, hacer que al reproducir la simulación ésta lo haga sólo una vez, que se reproduzca de principio a fin e inversamente indefinidamente, o que lo haga sólo de comienzo a fin, también de forma continua.



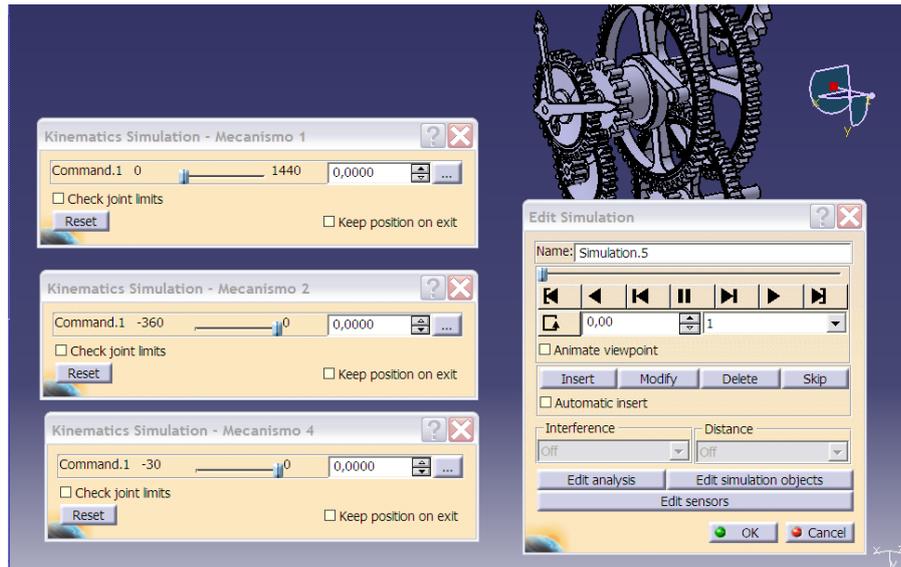
El número presente en la casilla contigua al botón anterior indica el *viewpoint* en el que se encuentra la simulación en cada instante. Puede variarse por medio de las flechas situadas a la derecha de la casilla.

La forma de introducir un punto de control en una simulación se basa en situar al mecanismo en las condiciones de posición deseadas y a continuación insertar el *viewpoint* en la línea de tiempo. Esta inserción se consigue gracias al botón *Insert*, situado en la zona media de la ventana. Una vez que se ha insertado, se avanza o retrocede en la simulación con la ayuda de *Step Backward* y *Step Forward* (o manualmente actuando sobre la barra de la línea de tiempo) hasta la siguiente posición requerida, para proceder de la misma forma, insertado el nuevo *viewpoint*. Los botones contiguos a *Insert* permiten la modificación de un punto de control (*Modify*), su eliminación (*Delete*) o su omisión (*Skip*).

La activación de la casilla *Automatic insert* provoca la creación automática de puntos de control durante la manipulación del estado de la línea de tiempo y las posiciones de los componentes del mecanismo.

El valor que se muestra en la casilla contigua a la que indica el *viewpoint* actual en cada momento representa el intervalo existente entre cada punto de control (*interpolation step*). Puede variar desde un máximo de 1 hasta un mínimo de 0.01. Es útil para controlar la generación de nuevos *viewpoints*, avanzando (o retrocediendo) la animación los incrementos deseados hasta alcanzar la posición deseada del nuevo punto de control. Por defecto, el tiempo real que *CATIA* computa a cada intervalo entre dos puntos de control consecutivos es de un segundo.

Otro aspecto destacable es que, una vez creados los dos *viewpoints* correspondientes al comienzo y al final de la simulación, al generar los nuevos puntos de control, situados entre los mencionados anteriormente, a través del control del desplazamiento con *interpolation step*, las nuevas posiciones de los elementos de los mecanismos, correspondientes a dichos nuevos *viewpoints* son calculadas automáticamente, facilitando el proceso.

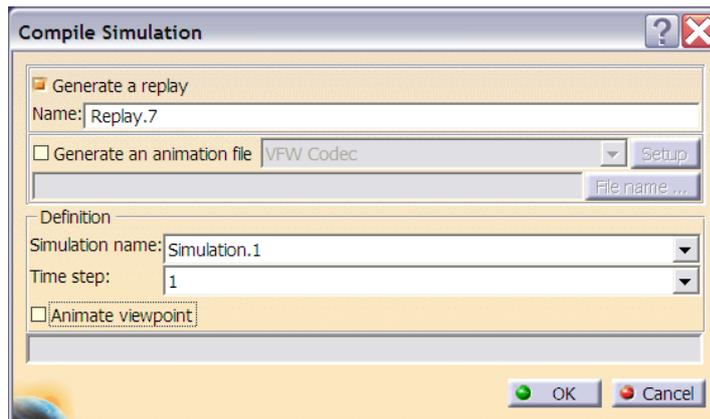


Con todo ello, para realizar la simulación en la que intervienen varios mecanismos se ha de posicionar cada uno de ellos al crear cada punto de control, antes de activar el botón *Insert*. Es importante la colocación relativa entre los componentes de los distintos mecanismos que intervienen en la simulación; se ha de situar cada uno de ellos en una posición que coincida con un *viewpoint* (normalmente con el valor máximo o mínimo de desplazamiento).

Al finalizar la generación de la simulación, se valida su creación mediante el botón *OK*. Al hacer esto, en el árbol de operaciones se presenta dicha simulación con su nombre, dentro de un subapartado de *Applications* llamado *Simulation*. Haciendo doble *click* sobre esta referencia, es posible editar la simulación.

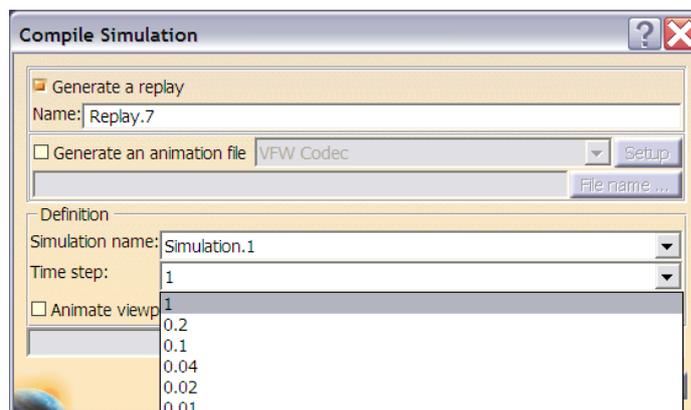
7.3.5.2. Compilación de la simulación.

Una vez creada una simulación, es posible crear una entidad que guarde la información correspondiente a dicha simulación, y así poder reproducirla tantas veces como se desee. A través de la herramienta *Compile Simulation* se pueden crear varios tipos de reproducciones de una animación. La más básica es la que se conoce como *Replay*, y es creada a nivel interno del archivo *Product* con el que se trabaja.

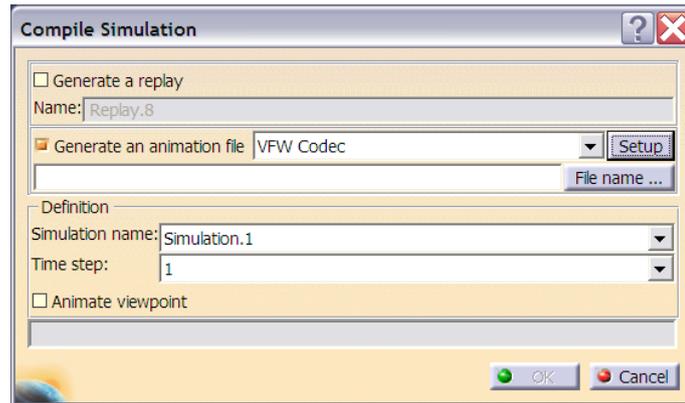


Al ejecutar la herramienta, el usuario se encuentra por defecto en la ventana emergente con una opción (*Generate a replay*) seleccionada que implica la creación de un *Replay*. Bajo ella es posible introducir el nombre del mismo, en la casilla *Name*.

Los parámetros de definición de la compilación se encuentran en el área *Definition*. En primer lugar, se ha de seleccionar en *Simulation name* la simulación a compilar, de la lista de todas las existentes en el archivo. A continuación se ha de concretar el parámetro *Time step*, desplegando las opciones de su casilla asociada. Este valor está asociado al número de posiciones que calcula el *software* entre dos *viewpoints* consecutivos a la hora de generar el vídeo de la simulación; a menor valor (variable desde 1 hasta 0.01), mayor calidad del mismo, sin variar en ningún momento su duración.



Existe también la opción de generar a partir de una simulación un archivo de vídeo con la misma. Para ello, se ha de seleccionar la opción *Generate an animation file*. A su derecha se puede elegir el tipo de archivo a crear desplegando la lista de opciones y, haciendo *click* en el botón *Setup* de su derecha, se puede configurar las características del vídeo generado. En la casilla situada bajo estas opciones se permite introducir el nombre del archivo mientras que, ejecutando el botón *File name...* de su derecha, se lleva a cabo la especificación su localización de almacenamiento.

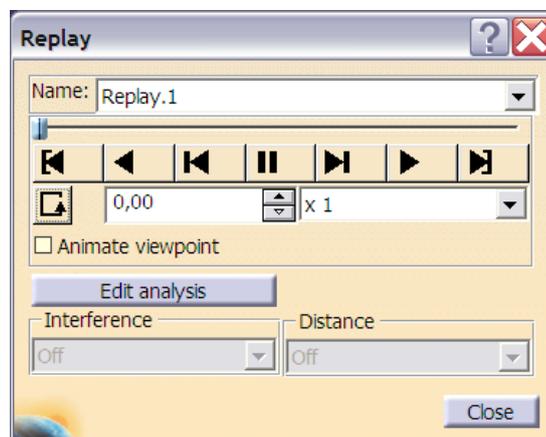


7.3.5.3. Reproducción de la simulación.

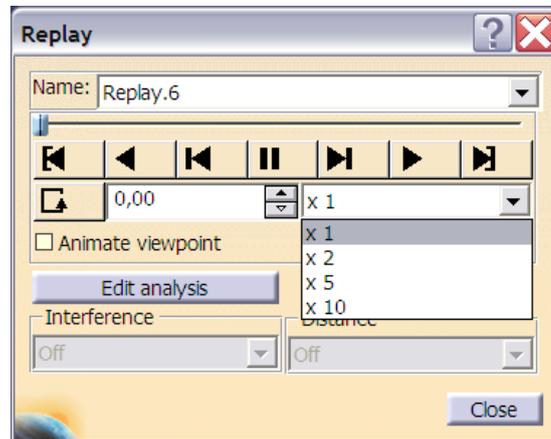
Una vez generado un *Replay*, la manera de reproducirlo es ejecutando la herramienta del mismo nombre. Al hacerlo, se muestra su ventana asociada, a través de la cual se puede controlar la reproducción con la ayuda de diversos parámetros y acciones.

En primer lugar, desplegando la casilla *Name* se posibilita la elección del *Replay* a reproducir, entre todos los ya generados, presentes en la lista. En una posición inferior se encuentra una barra con un icono deslizable sobre ella, igual a la presente en la venta de edición de simulación.

Asimismo, bajo ella, se sitúan los botones de edición automática de la reproducción del *Replay*, al igual que la casilla indicativa del *viewpoint* actual, con las flechas contiguas de avance y retroceso incremental, y el botón *Change Loop Mode*, que posibilita el control de las repeticiones de la reproducción (una única vez, de principio a fin e inversamente indefinidamente o sólo de comienzo a fin, también de forma continua). Todos ellos funcionan de igual forma que en la edición de la mencionada herramienta de simulación.



Una diferencia destacable con respecto a esta, es la sustitución de la casilla correspondiente a *interpolation step* por otra denominada *Skip ratio*. Al desplegarla, se permite al usuario seleccionar la velocidad de reproducción del *Replay*, desde la original de generación (x 1) hasta un máximo de diez veces mayor (x 10).



7.3.6. DMU Player Commands.

En el módulo *DMU Kinematics* existe una barra de herramientas denominada *DMU Player Commands*, integrada dentro de la barra *DMU Generic Animation*, la cual contiene dos herramientas que permiten la reproducción de simulaciones ya generadas (*Simulation Player*) y la combinación entre ellas (*Edit Sequence*), para conformar lo que *CATIA* denomina una 'secuencia'.



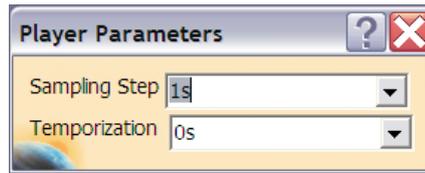
7.3.6.1. Simulation Player.

La herramienta *Simulation Player* es un reproductor de simulaciones. Al ejecutar, aparece en pantalla una pequeña ventana que integra los elementos básicos para visualizar una animación ya existente. Cuenta con una barra que representa la línea de tiempo de la simulación, a través de un icono que se desplaza a lo largo de ella. A su derecha se encuentra una casilla en la cual se puede observar el instante temporal de la reproducción en cada momento, en unidades de tiempo (segundos). A la derecha de esta se encuentran seis botones que permiten controlar de forma automática la reproducción: saltar al comienzo o al final de la misma, avanzar o retroceder paso a paso, reproducir la simulación en sentido cronológico o inverso y detenerla.



Además en la parte izquierda cuenta con la opción *Change loop Mode*, para poder visualizar la reproducción una única vez, poderlo hacer indefinidamente de principio a fin, o en sentido cronológico e inverso de manera sucesiva, haciendo *click* sobre su icono.

Por último, la herramienta otorga la posibilidad de fijar el intervalo de cálculo entre cada punto de control al reproducir la simulación (*Sampling Step*) y el tiempo transcurrido entre la visualización de dos puntos de control sucesivos (*Temporization*), ambos en unidades de tiempo, mediante el icono situado a la derecha de la ventana (*Parameters*). Al activarlo, se mostrará la ventana en la que se podrán introducir los valores deseados.



Al utilizar esta herramienta, y en especial a la hora de trabajar con los parámetros mencionados, así como con el valor referente al instante temporal de la reproducción, se ha de tener presente el hecho de que, por defecto, *CATIA* establece un tiempo de un segundo entre cada uno de los puntos de control generados durante la creación de la simulación. Por lo tanto, la reproducción siempre tendrá una duración en segundos igual al número de *viewpoints* generados al crearla.

Además, la herramienta *Simulation Player* permite también reproducir una secuencia creada con *Edit Sequence*.

7.3.6.2. *Edit Sequence*.

La herramienta *Edit Sequence* permite la combinación de varias simulaciones ya creadas, así como su edición. Al ejecutarla, se muestra la ventana correspondiente a la herramienta. En la pestaña *Edit Action* se encuentran los parámetros básicos de la herramienta.

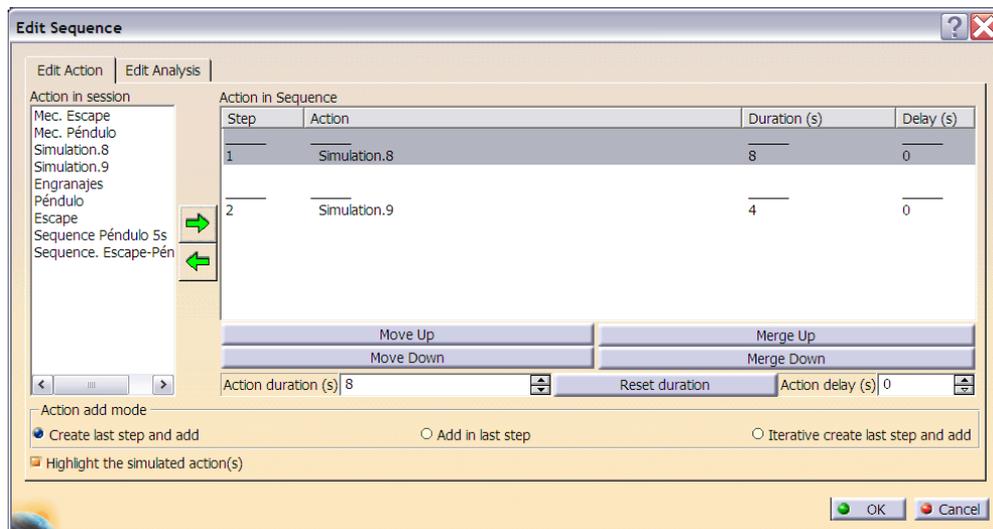
En la parte izquierda de la ventana, en el cuadro de nombre *Action in session*, se muestran todos los componentes manipulables con la herramienta; en términos básicos, las simulaciones ya creadas. El cuadro de la derecha (*Action in Sequence*) es el área de trabajo activo de la herramienta. Aquellas simulaciones con las cuales se quiera trabajar se deberán traspasar a él desde el cuadro *Action in session*, lo cual se llevará a cabo mediante las flechas situadas entre ambos, las cuales permiten también realizar la operación en sentido inverso.

Una vez que se disponen de las simulaciones con las que se desea trabajar en el cuadro *Action in Sequence* son varias las acciones que se pueden llevar a cabo, mediante los comandos situados bajo ella.

En el cuadro, junto a la denominación de cada simulación, se muestran tres datos referidos a ella: su orden de reproducción en función de las simulaciones con las que esté trabajando en cada momento (*Step*), su duración en segundos (*Duration*) y los segundos de retraso o espera establecidos para su reproducción (*Delay*).

Los botones *Merge Up* y *Merge Down* permiten, respectivamente, agrupar una simulación con la situada en la posición anterior o posterior de la lista, a fin de que ambas se

reproduzcan de manera simultánea. Cuando este paso se lleva a cabo las dos simulaciones implicadas pasan a formar un único elemento.



Los botones *Move Up* y *Move Down* permiten cambiar el orden de reproducción de las simulaciones, posicionándolas delante de su predecesora (*Move Up*) o tras su sucesora (*Move Down*). También permiten separar dos simulaciones previamente combinadas (mediante *Merge Up* o *Merge Down*).

La casilla *Action duration* determina los segundos que dura la simulación seleccionada, valor que puede ser modificado introduciendo en dicha casilla la duración deseada. Por defecto, la duración inicial de cada simulación depende del número de puntos de control creados durante su generación; el número de segundos que transcurran durante su reproducción será igual al de *viewpoints* que posea. No obstante, ello no impide su modificación. En caso de que se desee recuperar la duración inicial (por defecto) de una simulación, se hará *click* en el botón *Reset duration*, contiguo a la casilla anterior.

La casilla *Action delay* establece los segundos de demora que transcurrirán hasta que una simulación comience a reproducirse. Este valor se puede establecer para cada una de las simulaciones (o agrupación de simulaciones) involucradas.

Por último, las opciones presentes en *Action add mode* determinan el mecanismo de enlace entre las sucesivas simulaciones.

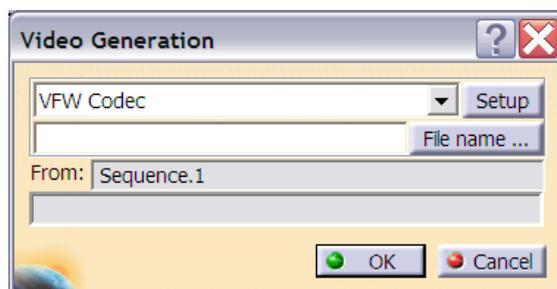
Una vez que se disponen de todas las simulaciones dispuestas y combinadas de la manera deseada, y se han establecido todas sus duraciones y relaciones temporales, se puede validar la creación mediante *OK*. Al hacerlo, el programa crea una secuencia. Una secuencia es, pues, una simulación que integra a varias simulaciones individuales combinadas entre sí. Las secuencias creadas se disponen en el árbol de operaciones en un subapartado de *Applications* denominado *Sequences*, y pueden ser reproducidas a través de *Simulation Player*.

7.3.7. Generación de vídeo.

Un aspecto que se ha de tener en cuenta es que, debido a los parámetros con los que trabaja el *software*, además de por las características del ordenador con el que se trabaje, las reproducciones de las simulaciones no siempre van a cumplir las especificaciones establecidas. Para poder observar la reproducción en escala de tiempo real, es necesaria la generación de un vídeo.

En el caso de una simulación, como ya se ha mencionado, es posible generar un vídeo de la misma utilizando la herramienta *Compile Simulation*. En el caso de una secuencia, se ha de recurrir a la herramienta *Generate Video* para generar un archivo que contenga la simulación contenida en ella. Dicha herramienta se encuentra en la pestaña *Tools/Simulation/Generate Video*.

Tras ejecutarla, se debe seleccionar en el árbol de operaciones la secuencia de la cual se desea crear el archivo de vídeo. Una vez hecho esto, se mostrará la ventana asociada a la generación del vídeo, en la cual se introducirá el nombre y la carpeta dónde se guardará el archivo, a través del botón *File Name*.



A través del botón *Setup* se puede modificar los parámetros de creación del vídeo y, en la casilla contigua a él, es posible elegir el tipo de archivo a crear. Para validar la generación del vídeo, se ha de hacer *click* en *OK*.

7.3.8. Aplicación del proceso de animación al modelo del reloj.

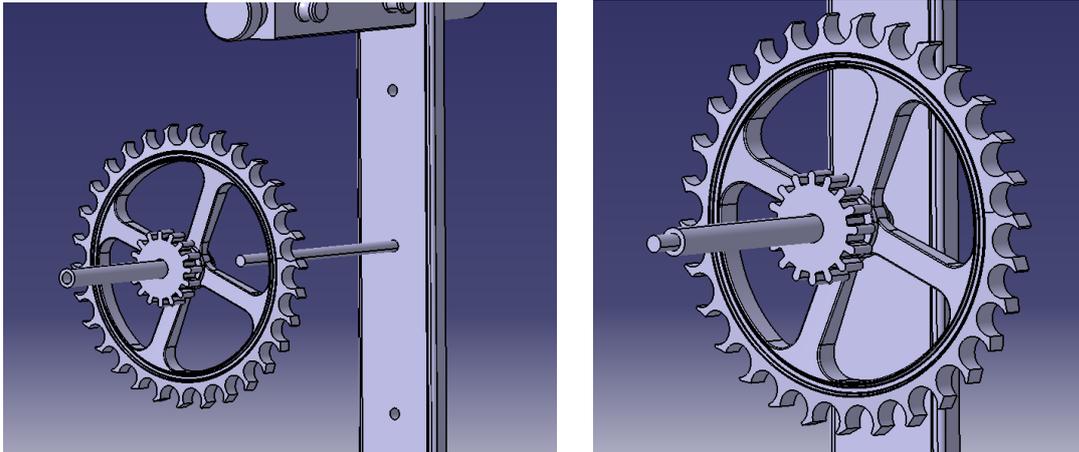
7.3.8.1. Relación de componentes en *DMU Kinematics*.

El punto de partida del proceso que lleva a la consecución de la animación del reloj parte con el ensamblaje de los distintos componentes. De esta forma, al igual que el proceso llevado a cabo en el primer ensamblaje, se han ido disponiendo todas las piezas de forma conjunta hasta obtener el reloj completamente montado. Con tal fin, se ha trabajado con el módulo *Assembly Design*, para la inserción de las mismas en el archivo *Product* de trabajo, para posteriormente establecer las relaciones de posición y cinemáticas entre los mismos, por medio de las herramientas del módulo de animación.

En lo que a la inserción de los componentes se refiere, en este caso la diferencia con el ensamblaje previo radica en que en lugar de insertar pieza a pieza, se ha hecho lo propio con cada uno de los subensamblajes creados para posibilitar y facilitar la posterior simulación de sus movimientos. Todo ello con la ayuda de la herramienta *Existing Component* (barra *Product Structure Tools*).

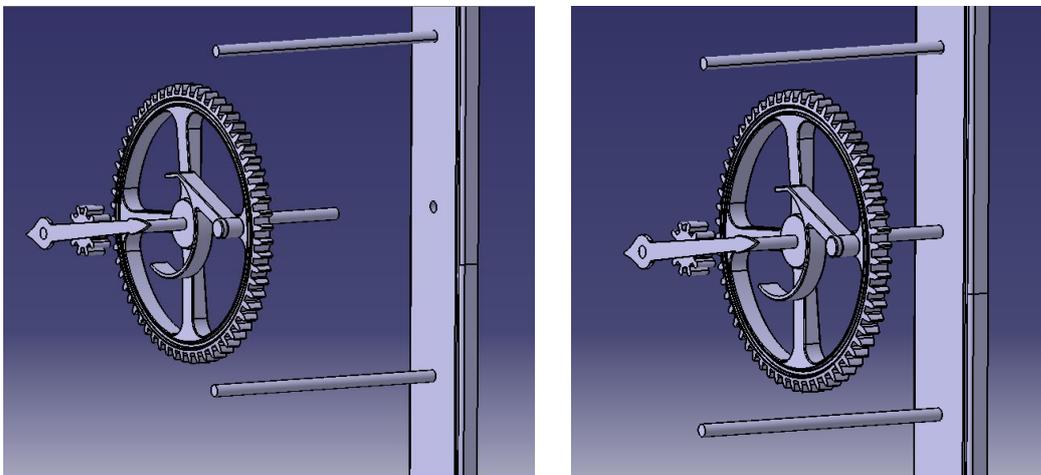
En primer lugar, se ha insertado el subensamblaje correspondiente a la estructura fija del reloj, pues la base sobre la que reposan el resto de componentes. A continuación, se añadieron el resto de subensamblajes. Se optó por comenzar por el segundo de los explicados en el punto 7.2., esto es, aquel en el cual está integrada la rueda del mecanismo de escape, la primera rueda dentada de la transmisión y su eje de rotación.

Una vez hecho esto, se ha procedido al establecimiento de las relaciones cinemáticas relativas entre ambos, a través de lo cual se ha posicionado también uno respecto del otro. La forma de llevarlo a cabo ha sido mediante la herramienta *Revolute Joint*. A través de ella se ha establecido una relación de revolución entre el eje superior de la estructura fija del reloj (correspondiente con la pieza número 27 de los planos originales) y el eje perteneciente al subensamblaje (pieza 28), seleccionando sus ejes de revolución y sendos planos de referencia. Para ello, se ha creado previamente el primer mecanismo del conjunto, dentro del cual ha quedado integrada la unión de revolución.

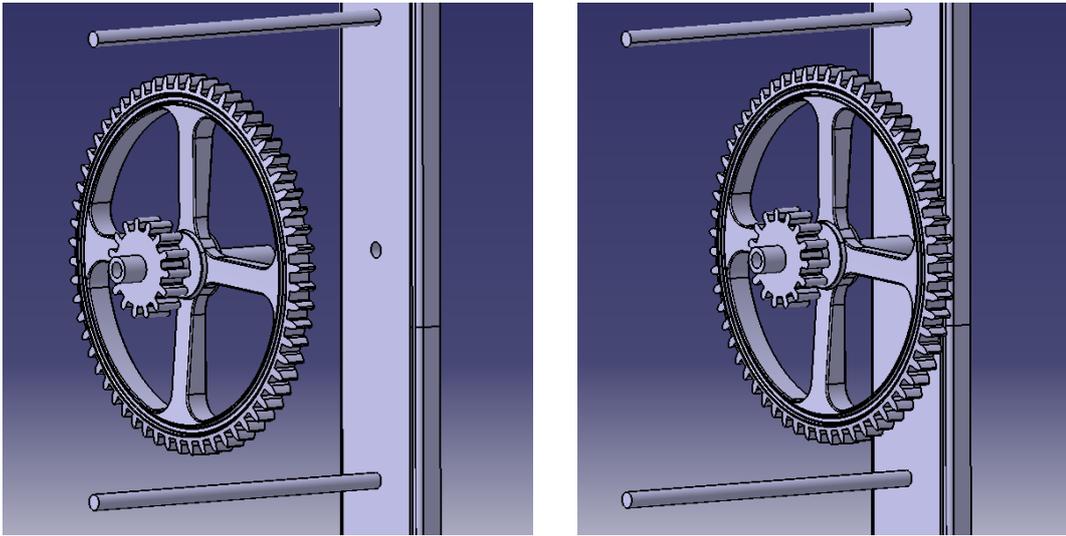


En lo sucesivo se ha procedido de igual forma, ya que los siguientes subensamblajes se relacionan entre sí también mediante uniones de revolución.

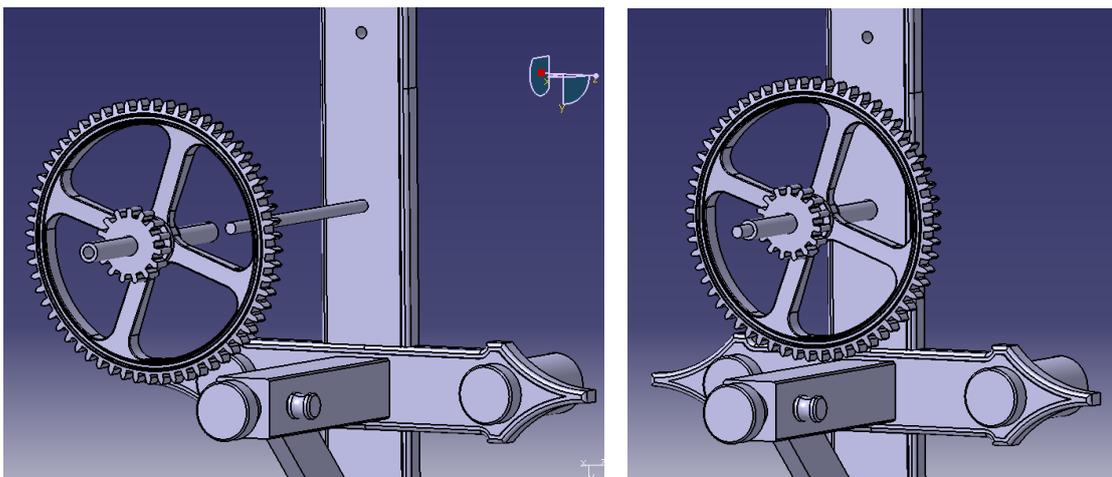
Así pues, el tercer grupo de componentes de ha insertado en el conjunto, y relacionado de nuevo con la estructura fija por medio de una unión de revolución, integrada dentro de un nuevo mecanismo. En este caso, se ha ligado el eje perteneciente al ensamblaje (pieza 29) con el taladro de la estructura fija (pieza 1) a la cual se acopla, a través de sus respectivos ejes.



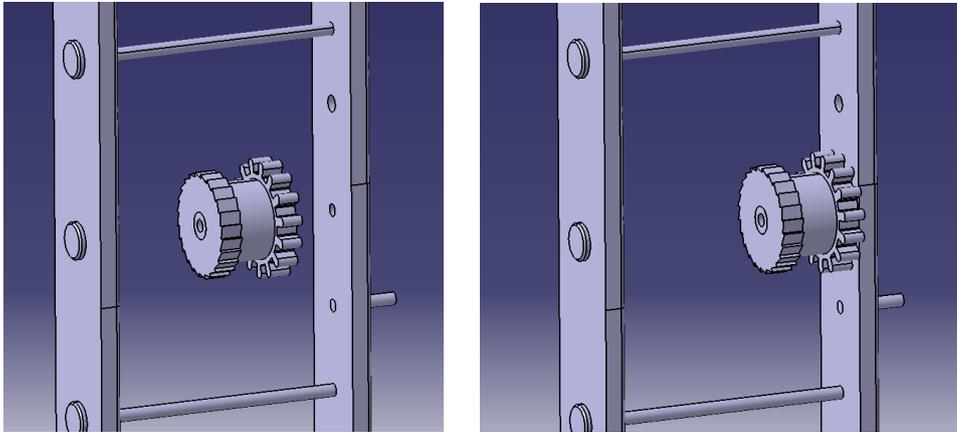
El siguiente subensamblaje (Subensamblaje 4) se integra en el primer mecanismo creado, al cual ya está asociado el segundo subconjunto. Esto se debe a que ambos van a estar relacionados a través de una unión de engranaje, hecho que se explicará posteriormente. Con todo ello, el eje de rotación (pieza 32) de liga mediante una unión de revolución al mismo taladro que en el caso del subensamblaje anterior.



Siguiendo adelante, se procede de la misma forma con el quinto subconjunto. En este caso su eje (pieza 28) va ligado al eje inferior de la estructura fija (pieza 27). La nueva unión de revolución pertenece al segundo de los mecanismos creados, ya que tanto ella como la asociada al tercer subensamblaje van a conformar más adelante otra unión de engranaje.



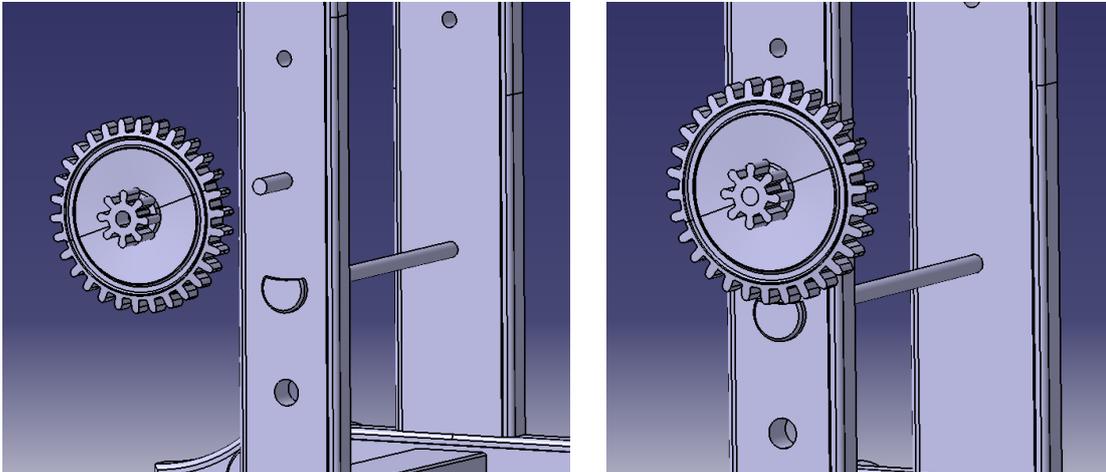
El siguiente subensamblaje (piezas 30, 34 y 36) se relaciona a la estructura fija mediante una unión de revolución, para conformar un nuevo mecanismo. El eje del taladro del tambor se relaciona con el correspondiente de la estructura.



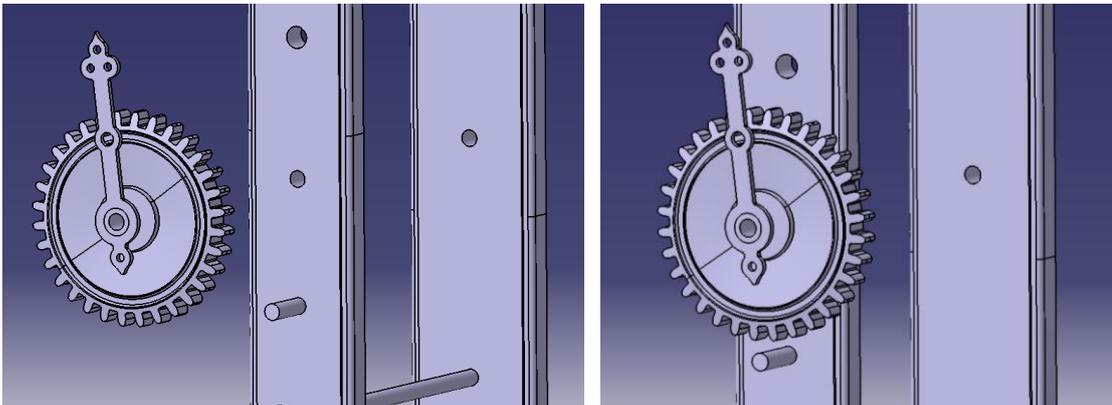
El séptimo subensamblaje se asocia a la pieza frontal de la estructura fija de nuevo mediante una unión de revolución creado dentro de un nuevo mecanismo. El eje de la pieza de accionamiento se relaciona con el eje del taladro de la pieza frontal, dónde va alojado.



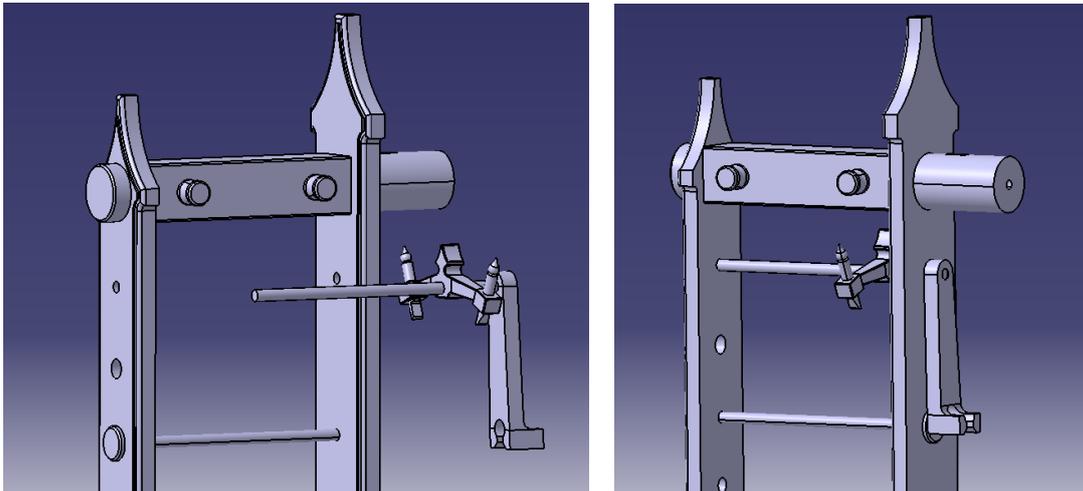
El octavo subconjunto está ligado de nuevo al ensamblaje de la estructura fija. Ambas ruedas dentadas, dispuestas ya concéntricamente, se asocian al eje frontal presente en la pieza de sustento frontal (pieza 44). La unión de revolución se creará en un nuevo mecanismo.



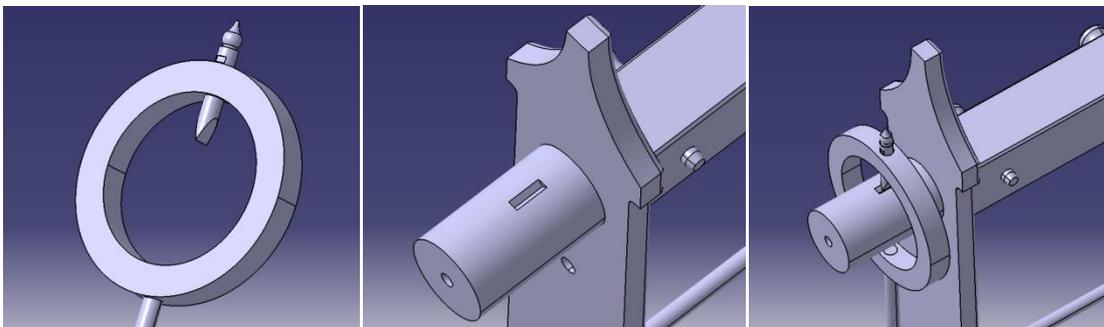
El siguiente subensamblaje, de manera similar al anterior, se asocia mediante la unión de revolución a la pieza frontal de la estructura fija. El eje (pieza 40) al cual van fijadas la rueda dentada y la aguja horaria se relaciona con el taladro de la pieza frontal. Esta unión de revolución se creará dentro del mecanismo que contiene la unión del octavo subensamblaje.



Con el décimo subensamblaje se procede de la misma forma relacionando, en un nuevo mecanismo y mediante una unión de revolución, el eje (pieza 20) con la estructura fija, a través de los taladros de ésta. Dado que esta unión será la única del mecanismo, se deberá activar en la ventana de creación de la misma la opción *Angle driven*, para facilitar la animación del mismo.



Por último, tras insertarlo en el archivo, el subconjunto correspondiente al péndulo se liga a la estructura, de nuevo mediante una unión de revolución. En este caso los elementos a relacionar son dos aristas, y no ejes como en los casos anteriores. En concreto, a la hora de especificar los parámetros en la ventana de creación de la unión se seleccionará la arista final del pivote de balanceo del péndulo, así como la de la ranura angular de la estructura dónde éste apoya. Mencionar además que, en el caso del pivote, se ha de crear una superficie plana en el para poder referenciarla con respecto a una de la estructura. Al igual que en el subensamblaje anterior, se ha de activar la opción *Angle driven*, pues el movimiento del péndulo no va asociado dentro del mecanismo a ningún otro componente.



7.3.8.2. Creación de las uniones de engranaje.

Una vez insertados todos los componentes y establecidas las posiciones y relaciones básicas de movimiento entre ellos a través de *Revolute Joint*, se ha llevado a cabo la generación de las uniones de engranaje en aquellos mecanismos en los que procedía llevar a cabo tal acción.

Previamente a la explicación de este proceso, se va a mostrar una tabla resumen de la estructura final del conjunto de los mecanismos y sus componentes, a fin de facilitar la comprensión de su configuración final en la estructura del archivo *Product* de trabajo.

En ella se muestran las distintas uniones de revolución ya mencionadas en el punto anterior, con los respectivos subensamblajes involucrados en cada una de ellas (reseñados en el punto 7.2.), y las referencias de las piezas que componen cada uno de ellos. Además, se indica el mecanismo al cual pertenece cada una de las *Revolute Joint*, y si estas forman parte dentro de ese mecanismo de una unión de engranaje.

MECANISMO	GEAR JOINT	REVOLUTE JOINT	SUBENSAMBLAJES	PIEZAS
Mecanismo 1	Sí	Rev. Joint 1	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 2	25/26/28
		Rev. Joint 2	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 4	32/33/35
Mecanismo 2	Sí	Rev. Joint 1	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 3	29/31/35/37
		Rev. Joint 2	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 5	28/33/35
Mecanismo 3	Sí	Rev. Joint 1	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 6	30/34/36
		Rev. Joint 2	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 7	30/47
Mecanismo 4	Sí	Rev. Joint 1	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 8	45/46
		Rev. Joint 2	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 9	38/40/49
Mecanismo 5 (Escape)	NO	Rev. Joint 1	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 10	20/21/22/23/24
Mecanismo 6 (Péndulo)	NO	Rev. Joint 1	Subensamblaje 1	*
			Subensamblaje 11	14/15/16/17/18

*Piezas 1/2/3/4/5/6/7(x2)/8/9(x2)/10(x2)/11(x3)/12/13(x2)/19(x6)/27(x2)/44.

Así pues, en cuatro de los mecanismos es necesario generar una unión de engranaje a partir de las dos *Revolute Joint* ya creadas en cada uno de ellos. Como se puede observar en la tabla, es destacable que, en todas las uniones de revolución, y más especialmente en aquellas que están ligadas a un *Gear Joint*, interviene la estructura fija del reloj (Subensamblaje 1). Este hecho se debe a que, como se introdujo en el punto 7.3.1.2., en una unión de engranaje sólo se pueden ver involucrados un total de tres archivos *Part* o *subProduct* distintos. Por ello, en todos los casos la estructura fija es el componente común de las uniones de revolución, por ser la más apropiada para ello.

Además, de cara al correcto establecimiento de los parámetros que define una unión de engranaje, ha de tenerse claro un concepto, el de relación de transmisión en un engranaje. La relación de transmisión entre dos ruedas dentadas establece la relación entre las velocidades angulares con las que giran cada una de ellas. Matemáticamente, se define como el cociente entre la velocidad angular de la rueda de salida (a la cual es transmitido el movimiento) y de la velocidad angular de la rueda de entrada (la que transmite el movimiento). También se puede expresar como el cociente entre número de dientes de la rueda de entrada y la de la salida.

$$r = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Siendo:

ω_1 Velocidad angular de la rueda de entrada.

ω_2 Velocidad angular de la rueda de salida.

Z_1 Número de dientes de la rueda de entrada.

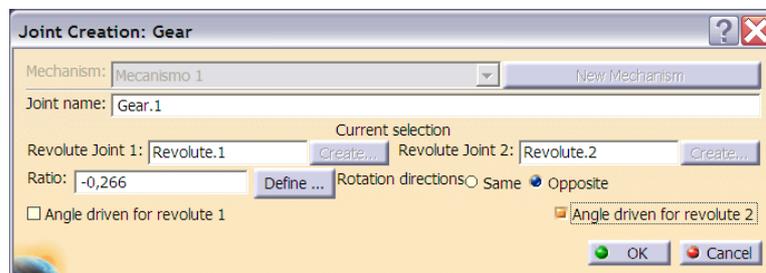
Z_2 Número de dientes de la rueda de salida.

En este caso, se conocen el número de dientes de todos los engranajes, por lo que no existe ningún inconveniente a la hora de averiguar el valor a introducir en la casilla *Ratio* de la ventana de creación de las distintas uniones de engranaje.



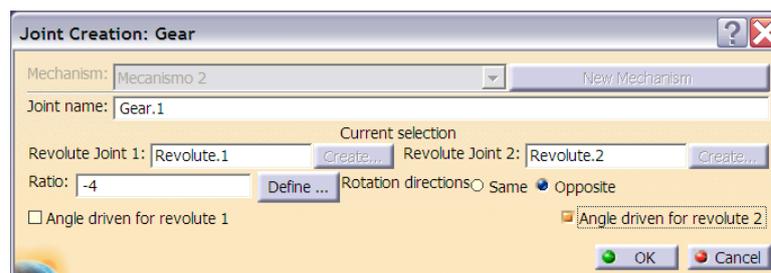
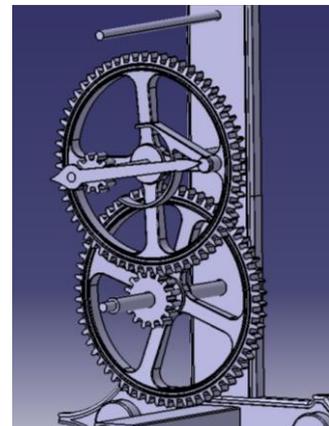
Mecanismo 1: La unión de engranaje en este mecanismo relaciona los subensamblajes 2 y 4 y, más concretamente, el piñón de 16 dientes perteneciente al primero de ellos con la corona de 60 dientes, integrante del segundo. Su relación de transmisión es 0.266 ($16/60=0.266$). Se seleccionará *Opposite* en la opción *Rotation directions*, ya que las ruedas, girarán en sentido contrario. Al hacer esto, el valor de la relación de transmisión se volverá automáticamente negativo (-0.266).

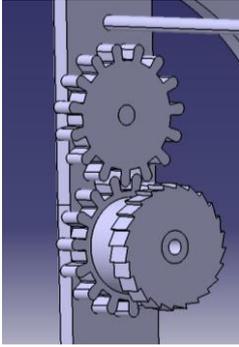
Por último, mencionar que, una vez seleccionadas ambas uniones y especificada la relación de transmisión y el sentido de giro, se seleccionara la opción *Angle Driven for Revolute 2*, a fin de, a la hora de generar la simulación, controlar la posición del subensamblaje 4.



Mecanismo 2: El segundo mecanismo relaciona a través de la unión de engranaje a los subensamblajes 3 y 5. La rueda dentada de 60 dientes del primero transmite el movimiento al segundo por medio del piñón de 15 dientes. Así, la relación de transmisión tiene un valor de 4.

El subensamblaje a controlar en este caso es el 5, seleccionado en segundo lugar, en la casilla *Revolute Joint 2*. Así, se activará la opción *Angle driven for Revolute 2*.

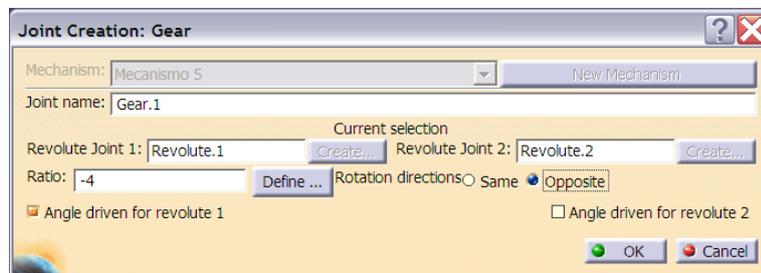
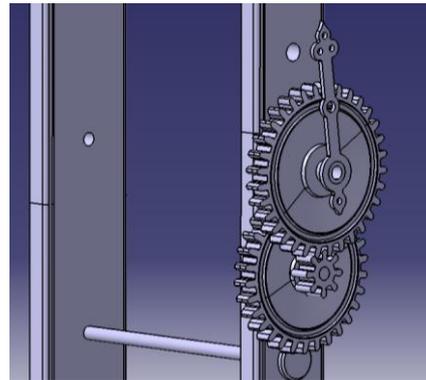




Mecanismo 3: En el mecanismo 3 se relacionan los subsamblajes 6 y 7. En concreto los elementos que participan en la transmisión del movimiento del uno al otro son las dos ruedas dentadas iguales que poseen ambos, de 15 dientes. Su relación de transmisión será pues, de 1. Se ha de activar, además la opción *Angle driven for Revolute 1*, a fin de poder controlar el movimiento del subsamblaje 6.

Mecanismo 4: El último de los mecanismos que cuenta con una unión de engranaje es el cuarto, y relaciona los movimientos de los subsamblajes números 8 y 9. En este caso los componentes ligados son el piñón de 8 dientes del octavo y la corona de 32 dientes del noveno.

La relación de transmisión es pues, 4, y la unión de revolución a controlar, la que integra al subsamblaje 8 (*Revolute 1*).



De esta forma, al haber activado convenientemente la opción *Angle driven* en cada uno de ellos, todos los mecanismos tienen un valor de $DOF=0$, esto es, como ya se ha explicado en el punto 7.3.2., que todos ellos tienen un valor de grados de libertad nulo, indispensable para su animación.

7.3.8.3. Definición de los elementos fijos.

Por último, previo a la simulación, se han de especificar en cada uno de los mecanismos el elemento fijo, a través de la herramienta *Fixed Part*. En este caso y, como es lógico, la estructura fija (Subensamblaje 1) será la elegida para tal fin, ya que carece de movimiento alguno y, además, interviene en todos los mecanismos creados.

Es indiferente el momento en el que se realice este paso durante la creación de los mecanismos, si bien ha de ejecutarse siempre antes de proceder a generar las simulaciones. En caso contrario, el programa advertirá de tal hecho, sugiriendo al usuario llevar a cabo la acción.

7.3.8.4. Simulación de los mecanismos.

7.3.8.4.1. Engranajes.

Una vez que los mecanismos creados se encuentran en disposición de ser animados, se puede proceder a trabajar con las herramientas de simulación, si bien, en lo que respecta a los engranajes, es preciso tener en cuenta una acción previa.

Mediante las mencionadas herramientas, *CATIA* simula independientemente los movimientos de cada uno de los mecanismos. En el caso en el que se desee representar una transmisión de movimiento de un mecanismo a otro, como es el caso, se ha de llevar a cabo tratando de forma simultánea durante la creación de la simulación los desplazamientos de los componentes de los mecanismos involucrados, teniendo en cuenta sus posiciones relativas en cada instante.

Así es como se ha de proceder pues, con los mecanismos que integran a los engranajes de la transmisión del movimiento desde el péndulo hasta las agujas. Cada par de ruedas dentadas forman parte de un mecanismo; de esta forma, se ha prestar especial atención, desde el mecanismo posterior hasta el anterior, al movimiento relativo entre las ruedas consecutivas, pertenecientes a mecanismos distintos.

De igual forma, las ruedas pertenecientes a un mismo mecanismo, componentes de un *Gear Joint*, pero pertenecientes a distinta unión de revolución, también han de posicionarse de forma óptima, ya que su desplazamiento relativo, regido por la unión de engranaje, ha de ser coherente.

Con todo ello, y a fin de plasmar la simulación del reloj con el mayor realismo posible, se ha procedido a situar las ruedas dentadas, relacionadas en la transmisión, con sus dientes en

contacto, pues es la situación a partir de la cual es más sencillo el control de sus posiciones relativas durante la generación de la animación.

Para ello, se ha llevado a cabo tal acción en el módulo *Assembly Design*, con la ayuda de la barra de herramientas *Move*. En concreto, ha sido necesaria la utilización de las herramientas *Manipulation* y *Stop manipulate on clash*, situadas en la primera y cuarta posición de la misma, respectivamente.



La herramienta *Move* permite variar la colocación de un componente de un ensamblaje (ya sea un *Part* o un *subProduct*). Al ejecutarla, se muestra su ventana asociada, con las distintas opciones de desplazamiento de los elementos: longitudinalmente con respecto a uno de los ejes principales de coordenadas, sobre uno de los planos principales, girar alrededor de uno de los ejes principales o alguno de las anteriores pero con respecto a un elemento de referencia a seleccionar.

En la parte superior se indica la opción seleccionada en cada momento. En la inferior, aparece una opción activable (*With respect to constraints*); al hacerlo, los desplazamientos que se lleven a cabo respetarán las posibles restricciones creadas previamente entre los componentes del ensamblaje, es decir, no se podrán provocar desplazamientos que contravengan dichas restricciones.

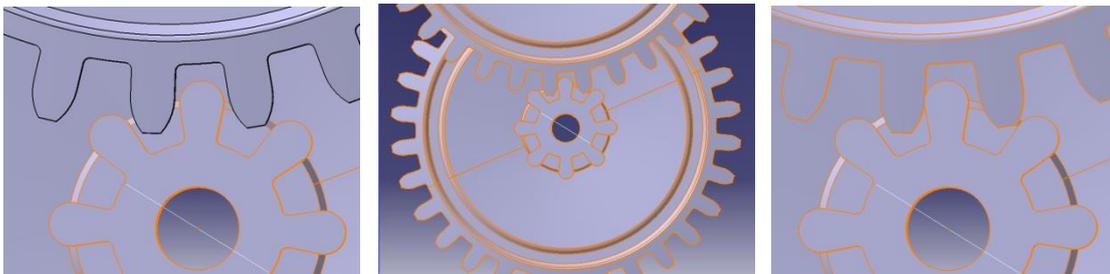


La herramienta *Stop manipulate on clash* no es ejecutable, sino activable. Su función es provocar la detención del movimiento o desplazamiento de un componente (llevado a cabo con la herramienta *Manipulation*) al chocar o interceptar con otro componente del ensamblaje. Haciendo *click* sobre ella se activará, mientras que al volverlo a hacer se

desactivará. Además, para que tenga efecto, se deberá activar la opción *With respect to constraints* al utilizar la herramienta *Manipulation*.

Para situar los distintos engranajes sucesivos en la transmisión, en posición de contacto, se procederá pues de la siguiente forma. En primer lugar, se activará la herramienta *Stop manipulate on clash*. A continuación, se ejecutará la herramienta *Manipulation*, tras lo cual se activará la opción *With respect to constraints* y se seleccionará la opción de movimiento situada en la esquina inferior derecha: *Drag around any axis*.

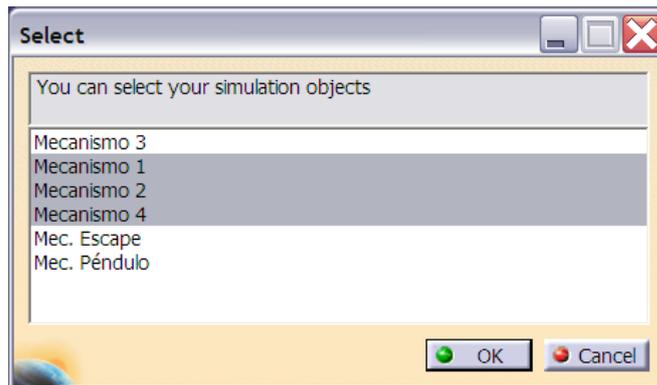
Esta opción permite el giro del elemento deseado alrededor de un eje previamente seleccionado. Así pues activada la opción, se seleccionará el eje de revolución de la rueda dentada a mover (con desplazar una en cada caso será suficiente). Una vez hecho esto, ya se puede hacer girar el engranaje en cuestión, hasta hacer colisionar uno de sus dientes con uno de su par. Se ha de prestar atención al sentido de giro de cada uno de ellos, pues de ello dependerá el lugar correcto de contacto entre los dientes.



Cuando se produzca el contacto entre ambos engranajes, las aristas del engranaje con el cual colisiona el desplazado tornarán a color naranja, a la vez que deja de ser posible seguir con el movimiento de giro (en ese sentido).

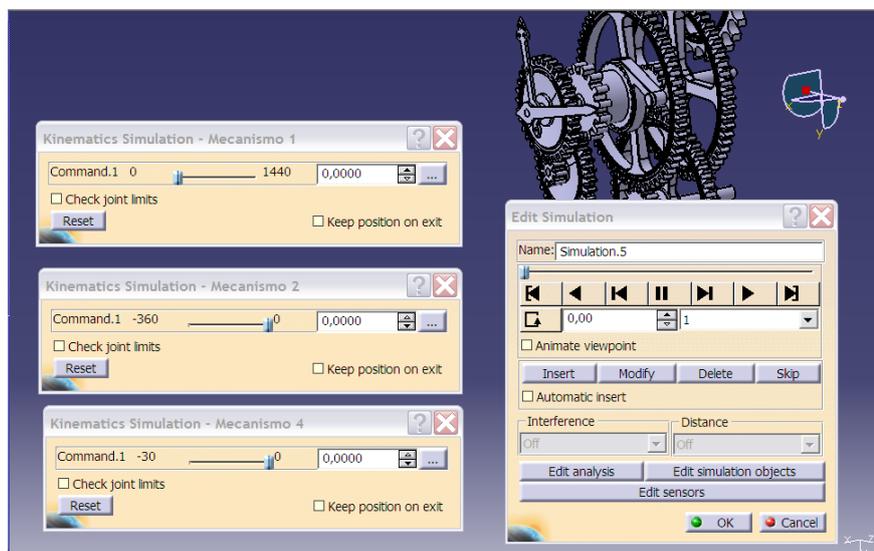
Una vez situadas todas las ruedas dentadas en su posición de partida, se procederá a generar la simulación de todo el conjunto de la transmisión de los engranajes en el módulo *DMU Kinematics*, a través de la herramienta *Simulation* (barra de herramientas *DMU Generic Animation*).

Al ejecutarla, se seleccionarán primeramente los tres mecanismos a simular (1, 2 y 4) en la ventana *Select*.



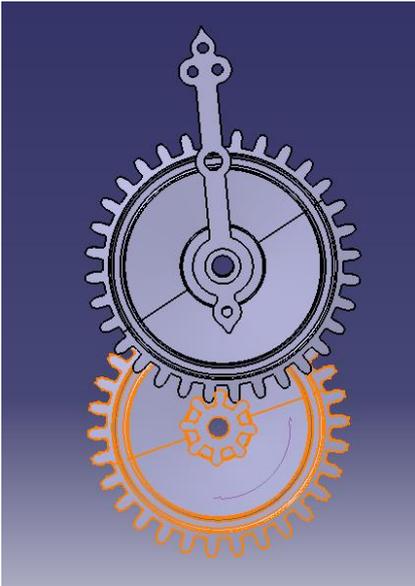
Una vez hecho esto, aparecerá la ventana de edición de la simulación, junto con las respectivas ventanas de control del comando de cada uno de los mecanismos.

El primer paso a realizar, previo a la inserción de los puntos de control de la animación, es el establecimiento de los límites de movimiento de los engranajes, esto es, el rango de giro de las ruedas sobre las que se tiene control por medio de los comandos. Para ello, se va a establecer como objetivo la simulación de un movimiento de las agujas equivalente al transcurso de 15 minutos.



Partiendo de ese fin, se ha de llevar a cabo el cálculo del número de grados que gira cada una de las ruedas dentadas, teniendo en cuenta la relación de transmisión entre ellas.

En primer lugar se comenzará por el mecanismo 4, por ser el frontal, y estar ligado al movimiento de la aguja horaria. En este mecanismo, se tiene control sobre el par de ruedas situadas bajo el engranaje ligado a la aguja. De esas dos ruedas dentadas, es el piñón de 8 dientes (pieza 45) el que transmite el movimiento a la rueda superior.

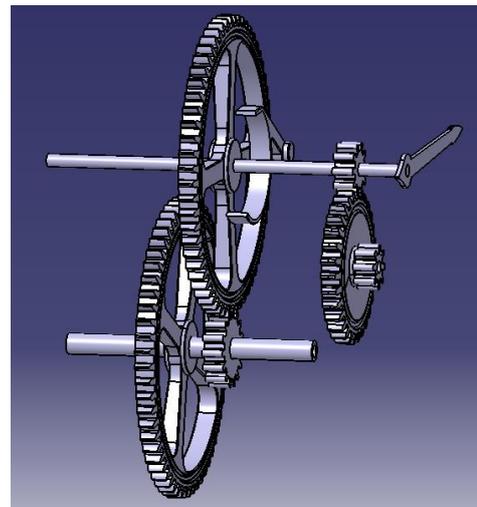


En un transcurso de 15 minutos, la aguja horaria gira 7.5° , ángulo que girará también la rueda dentada asociada a ella. La relación de transmisión entre el piñón y dicha rueda es de 0.25. De ello resulta que el número de grados que girarán el par de ruedas asociadas será de 30, dado que ese giro será en sentido antihorario, el rango del movimiento de éstas será de $[-30, 0]$, el cual se establecerá en el comando asociado al mecanismo 4. Como se puede observar, el cálculo llevado a cabo para llegar al valor final ha sido el producto de los 7.5° de giro de la rueda asociada a la aguja por el inverso de la relación de transmisión entre ella y el piñón.

$$7.5^\circ \times (1/0.25) = 30^\circ$$

Prosiguiendo con el cálculo de los rangos de movimiento, el siguiente es el del comando ligado al segundo mecanismo, compuesto por el subensamblaje 3 y el subensamblaje 5. La unión de revolución a la cual está asociado este último es sobre la que se tiene el control de movimiento, por lo que se ha de calcular el giro de las ruedas pertenecientes a él.

Primeramente, se observa que la rueda dentada de 30 dientes del subensamblaje 8 (pieza 46), la cual gira 30° , recibe la transmisión de movimiento del piñón de 10 dientes (pieza 39) del subensamblaje 3. La relación de transmisión entre ambas es pues, $1/3$, con lo que el piñón girará tres veces más, es decir, 90° .



$$30^\circ \times (1/(1/3)) = 90^\circ$$

Se puede deducir que el cálculo es correcto, ya que el minuterero está asociado al tercer subensamblaje, y un cuarto de circunferencia es el giro que realiza la aguja en 15 minutos, el cual es, coherentemente, en sentido horario.

La transmisión entre los dos subensamblajes del mecanismo 2 se produce a través de la rueda de 60 dientes del subensamblaje 3 (pieza 35) y el piñón motor de 15 dientes del subensamblaje 5 (pieza 33). De ello deriva que la relación de transmisión entre ambas es de 0.25. Sabiendo que la rueda de 60 dientes gira 90° , se realiza el cálculo del giro del piñón.

$$90^\circ \times (1/0.25) = 360^\circ$$

Las ruedas dentadas del subensamblaje 5 harán por tanto un giro completo. El sentido de giro será antihorario, en oposición al del subensamblaje 3, por lo que el rango de movimiento del comando será $[-360, 0]$.



De esta forma se prosigue al cálculo de los límites de movimiento asociados al mecanismo 1. En él, es el subensamblaje 4 sobre el que se tiene control de movimiento.

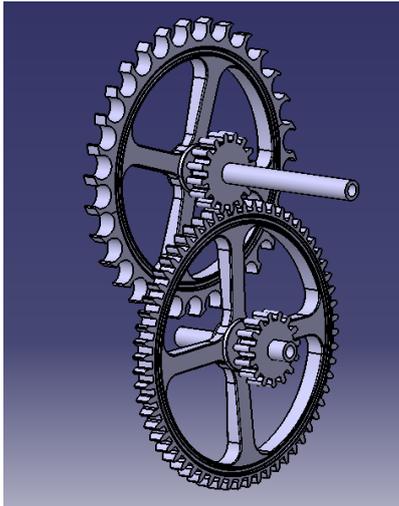
El piñón de 16 dientes de este subensamblaje (pieza 33) es el que transmite el movimiento a la rueda de 60 dientes del subensamblaje 6 (pieza 35). Su relación de transmisión tiene entonces un valor de 0.25. Teniendo en cuenta el giro de 360° de la rueda mayor y la mencionada relación, se calcula el giro del piñón.

$$360^\circ \times (1/0.25) = 1440^\circ$$

Por ello, se concluye que las dos ruedas dentadas del subensamblaje 4 realizan un desplazamiento correspondiente a cuatro giros completos, en este caso, en sentido horario. El rango a establecer para el comando del primer mecanismo será por lo tanto $[0, 1440]$.

Por último, se va a proceder al cálculo del giro de la rueda del mecanismo de escape (Subensamblaje 2), si bien su desplazamiento no influye en el establecimiento de los rangos de movimiento para la simulación.

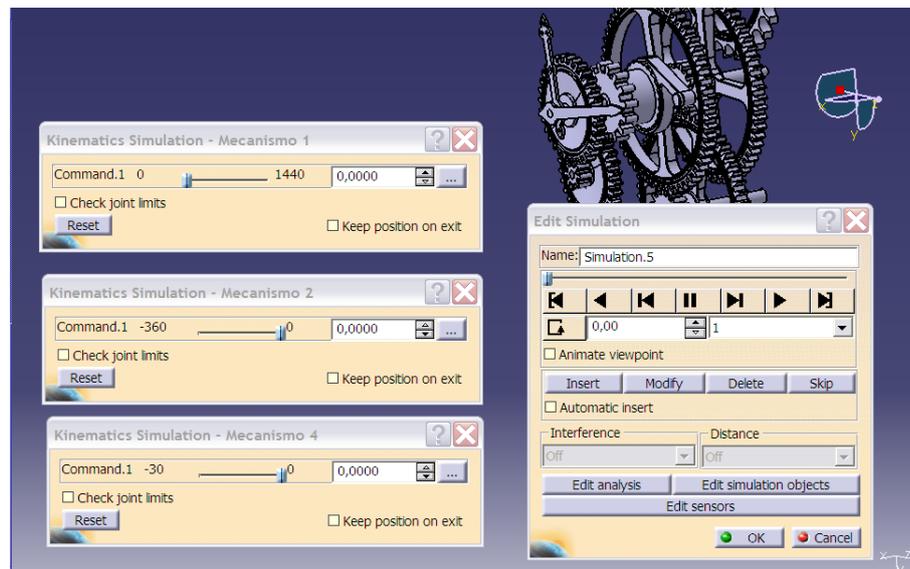
Partiendo del giro de 1440° de la rueda de 60 dientes del subensamblaje 4 (pieza 35) y teniendo en cuenta el piñón de 16 dientes, integrante del segundo subensamblaje, el cual le transmite el movimiento, se realizan los cálculos. La relación de transmisión entre ambos es $(16/60)$, por lo que el giró saldrá de realizar la siguiente operación.



$$1440^{\circ} \times (1/(16/60)) = 5400^{\circ}$$

Con lo que se deduce que la rueda del mecanismo de escape gira un total de 15 vueltas, es decir, cada minuto realiza un giro completo, o lo que es lo mismo, 6° cada segundo.

Establecidos los límites de movimiento asociados a los comandos de cada uno de los tres mecanismos, se puede proceder a la generación de la simulación. Destacar previamente el hecho de que, como se puede observar de lo desarrollado anteriormente, ninguno de los subensamblajes móviles (todos, a excepción del subensamblaje 1) está ligado a más de un mecanismo. Este hecho se debe a que, en caso contrario, se crearían inconsistencias a la hora de realizar la simulación, ya que el movimiento de los engranajes implicados estaría regido por más de un comando, y estos no podrían satisfacer las condiciones de movimiento de más de uno a la vez. Por ello, los mecanismos se han creado emparejando los subconjuntos dos a dos, siguiendo la progresión de la transmisión del movimiento.

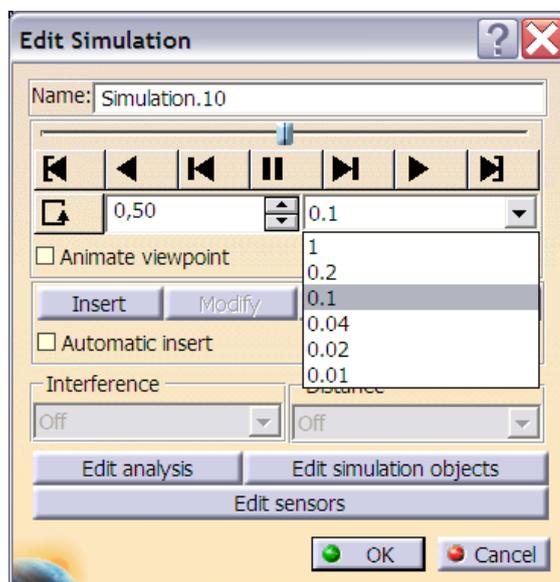


Primeramente, se establecerán las posiciones iniciales de cada uno de los comandos de los mecanismos: todos estarán en su posición 0. Una vez hecho esto, se insertará en primer

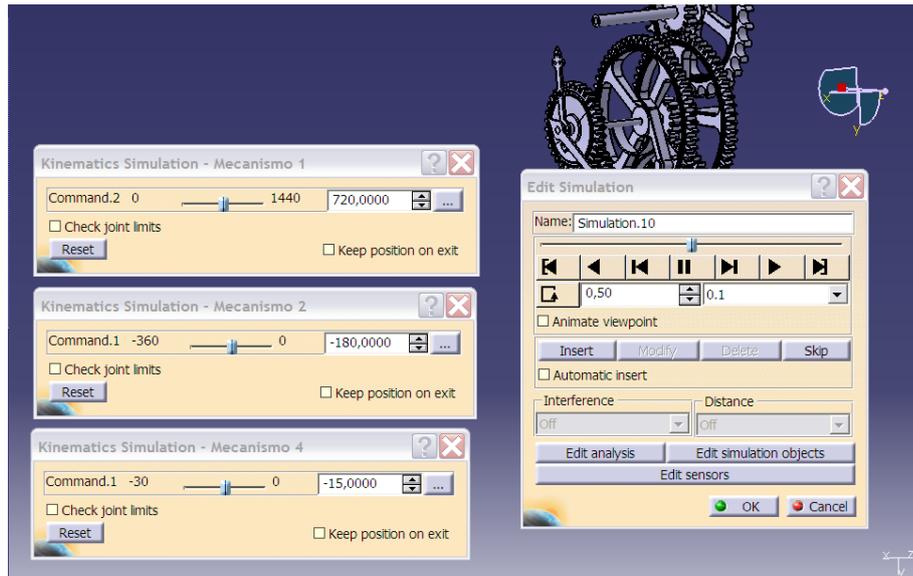
punto de control. Tras ello se procederá a insertar el segundo, correspondiendo con las posiciones finales de los engranajes de cada mecanismo, es decir, en 1440, -360 y -30 respectivamente.

Una vez creados los *viewpoint* inicial y final, se procederá a la generación de puntos de control intermedios, a fin de dotar de mayor precisión a la simulación. Para ello, un método útil es crear un *viewpoint* por cada incremento de un número de grados determinado que se produzca en el movimiento del subensamblaje 4 (Mecanismo 1); en este caso se ha tomado como valor incremental 45°.

La forma de llevarlo a cabo es calculando las posiciones intermedias entre las ya insertadas. Así, el tercer punto de control corresponderá con la posición 720 del mecanismo 1, punto medio del intervalo [0,1440]. Para crearlo, se hará uso de los botones de control de la simulación *Step Backward* y *Step Forward* y de los valores de la casilla *interpolation step*.



Teniendo en cuenta que el punto de control inicial de la simulación se denomina con el valor 0, mediante incrementos de posición de 0.1 (o 0.2 y 0.1), se conseguirá la posición 0.5, es decir, la posición intermedia entre el *viewpoint* inicial (0) y el final (1). En este instante, se puede observar cómo, efectivamente, el comando asociado al mecanismo 1 se ha desplazado hasta la posición 720 y, además, los ligados al segundo y tercer mecanismo también han hecho el mismo desplazamiento hasta sus respectivas posiciones medias, -180 y -15.



Una vez hecho esto, se insertará el nuevo punto de control, en el que se guardarán las mencionadas posiciones. Se procederá de igual forma en la inserción de los sucesivos *viewpoints*, hasta generar un total de 33 (incluido el inicial de valor 0), número necesario para conseguir el incremento de 45° entre cada uno de ellos en la posición del mecanismo 1.

Para desplazarse de un punto de control a otro, generados ambos previamente, se deberá establecer el valor 1 en la casilla *interpolation step*. En caso contrario, variaciones de posición a lo largo de la línea de tiempo no estarán asociadas a ningún *viewpoint*, hasta que no se genere uno que guarde las nuevas posiciones.

Así pues, una vez creados todos los puntos de control, se puede realizar una primera comprobación de cómo al reproducir la simulación, mediante el botón *Play Forward*, todos los engranajes se mueven correctamente unos respecto a otros, y cómo las agujas giran los grados correspondientes al transcurso de los 15 minutos establecidos inicialmente. Al validar en *OK*, la simulación es creada y referenciada en el árbol de operaciones, dentro del subapartado *Simulation*, el cual está integrado a su vez en *Applications*.

7.3.8.4.2. Péndulo.

La acción que se ha de llevar a cabo para poner en funcionamiento el reloj consiste en separar el péndulo de su posición vertical de equilibrio un determinado ángulo y liberarlo. Al hacerlo, comienza un movimiento oscilatorio y periódico, debido a la acción de la gravedad.

Para oscilaciones pequeñas (valores angulares cercanos a 0), como es el caso de las que realiza el péndulo, la ecuación que representa su posición en función del tiempo corresponde con la ecuación de un M.A.S. (Movimiento armónico simple).

$$\theta = \theta_0 \sin(\omega_0 t + \phi)$$

Siendo:

θ Posición del péndulo en cada instante de tiempo.

θ_0 Amplitud máxima de las oscilaciones.

ω_0 Frecuencia angular.

t Tiempo.

ϕ Posición inicial del movimiento.

De esta forma, de cara a la animación realista del péndulo, se ha de conseguir que éste realice un movimiento que cumpla con la ecuación anterior. Por ello, será necesaria la asignación al comando del mecanismo que incluye el subensamblaje del péndulo (número 11) de una ley que contenga dicha ecuación.

Para ello, en primer lugar se creará un nuevo archivo *Part*. Una vez hecho esto se ejecutará el módulo *Part Design, Generative Shape Design, o Knowledge Advisor*, indistintamente. A continuación se llevará a cabo la creación de la ley, para lo cual se hará uso de la herramienta *Law*, presente en la barra de herramientas *Relations*, integrada a su vez dentro de la barra *Knowledge*.

Al ejecutarla, aparece la ventana de creación y edición de la ley. En primer lugar, se crearán los parámetros correspondientes con las dos variables de la ecuación matemática: la posición angular y el tiempo. El parámetro correspondiente a la primera de ellas será de tipo *Angle*, mientras que el segundo será de tipo *Time*. Cada uno de ellos recibirá una denominación identificativa; Angulo y t, en este caso, por ejemplo. Reseñar que se han de evitar las tildes en las referencias de los parámetros, ya que no son admitidas como válidas por el programa.

A continuación, se ha de introducir la expresión de la ecuación en el cuadro de texto. En función de lo expuesto anteriormente, ' θ ' pasará a denominarse 'Angulo', mientras que la variable tiempo conservará su denominación. De esta forma, se ha de proceder al establecimiento de los valores de la amplitud, la frecuencia angular y de la posición inicial del movimiento.

En condiciones normales, el péndulo realiza unas oscilaciones que generan un arco de amplitud total inferior a 10° (según pautas del diseñador), por lo que un valor coherente para establecer como amplitud total de dicho movimiento es 9.5° . De esta forma el valor que tendrá θ_0 en la ecuación será de 4.75° , ya que representa la amplitud desde el punto de equilibrio del péndulo, es decir, la mitad del ángulo total desarrollado durante una oscilación completa.

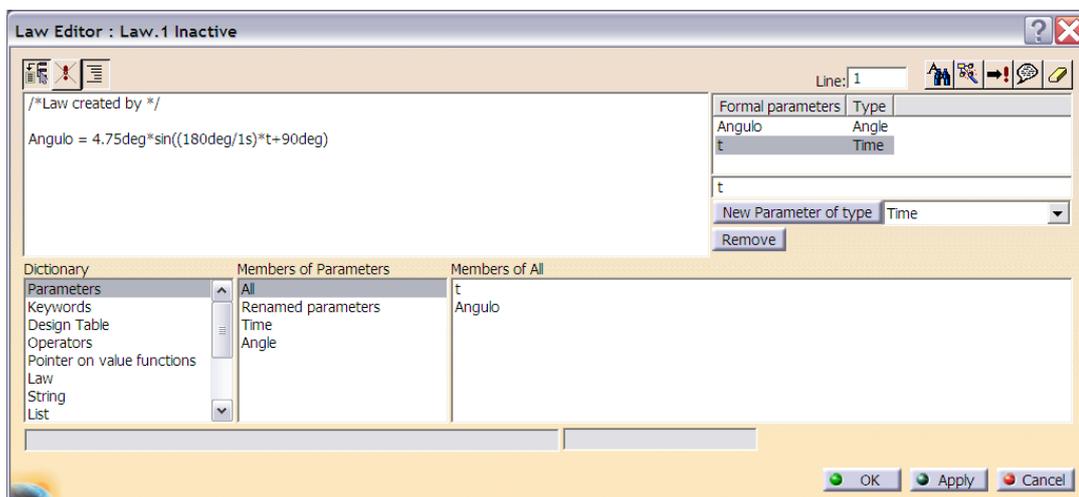
El siguiente valor a concretar es el de la frecuencia angular (ω_0). La función que rige la ecuación del movimiento del péndulo es una función senoidal, y cada oscilación del péndulo (1s) corresponde con el avance de 180° de dicha función. Por ello, el valor de la frecuencia angular será $\omega_0 = 180^\circ / s$.

Por último, cabe determinar el desfase de la función senoidal, que establecerá la posición de comienzo del movimiento del péndulo. Siendo $\phi = 0$, el péndulo comenzaría su movimiento en la posición de equilibrio, situación carente de coherencia. Por lo tanto, será necesario variar la posición de partida al punto en el que el péndulo se encuentre en un instante de amplitud máxima, hecho que la función seno alcanza cuando $\phi = \pm 90^\circ$. El signo de ϕ implica el posicionamiento en del péndulo en cada una de sus amplitudes máximas.

Con todo ello, la ecuación a introducir en el cuadro de texto será la siguiente:

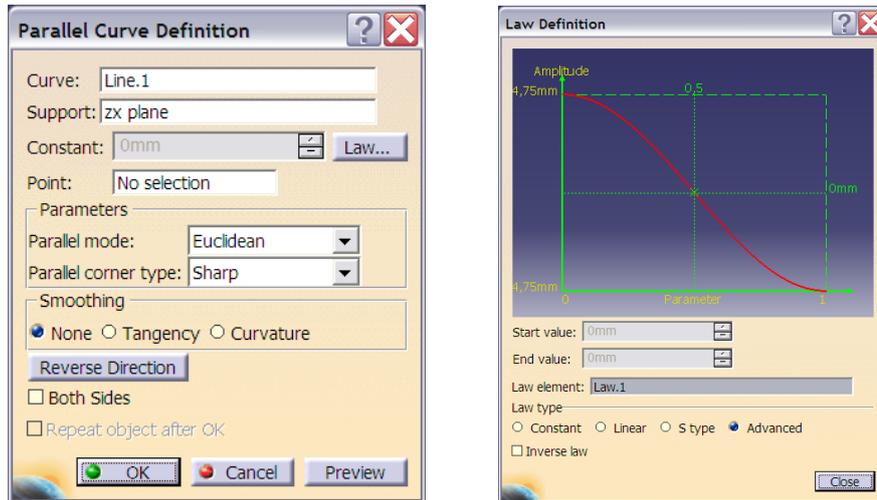
$$\text{Angulo} = 4.75\text{deg} * \sin((180\text{deg}/1\text{s}) * t + 90\text{deg})$$

Cómo se puede observar, a continuación de cada valor se ha de especificar las unidades de éste, respetando el código utilizado por el *software*. En este caso, las unidades en grados se especifican mediante *deg*, y los segundos mediante *s*. Además el símbolo *** representa a la operación producto.



Una vez introducida la ecuación, se comprobará la no existencia de ningún error en la definición de la misma mediante el botón *Apply*. En caso de existirlo, al hacer *click* sobre dicho botón se mostrará una ventana en la que se indicará el fallo presente en cada caso. Mediante *OK* se validará la creación de la ley, la cual quedará reflejada en el árbol de operaciones en el apartado *Relations*.

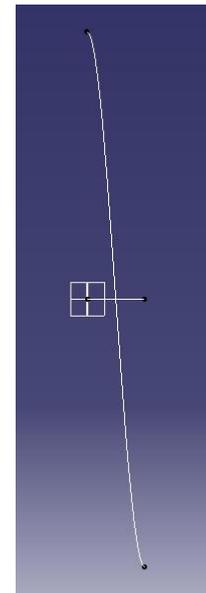
En este punto se procederá a ejecutar el módulo *Generative Shape Design*. Con la ayuda de la herramienta *Line* (barra *Wireframe*), se creará en uno de los planos principales una línea horizontal de 1mm de longitud. Este valor puede variar, ya que no influirá en pasos posteriores. A continuación se ejecutará la herramienta *Parallel Curve*, tras lo cual se mostrará la ventana de definición de la curva paralela a crear.



En primer lugar, se seleccionaran la línea creada previamente y el plano en el cual fue generada en las casillas *Curve* y *Support*, respectivamente. A continuación, se hará *click* en el botón *Law*, para después activar en la ventana emergente de definición de la ley (*Law Definition*) la opción *Advanced* en el apartado *Law type* y seleccionar en la casilla *Law element* la ley generada anteriormente, desde su icono en el árbol de operaciones.

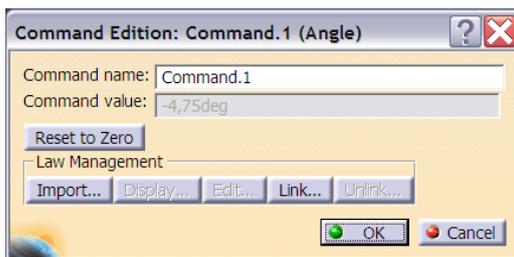
Una vez hecho esto, se cerrará la ventana *Law Definition* y se validará mediante *OK* la creación de la curva, la cual representará gráficamente la ecuación asociada a la ley. En función de la longitud dotada a la línea horizontal primitiva, la curva se representará de manera más o menos extendida horizontalmente. Reseñar que, como se puede observar, ésta representa el movimiento correspondiente a una oscilación del péndulo, es decir, al transcurso de un segundo.

El último paso consiste en generar un boceto y proyectar la curva sobre él. Así, se creará uno en el mismo plano de soporte de las dos curvas creadas previamente (herramienta *Positioned Sketch*, barra *Sketcher*) y, a través de la herramienta *Project 3D Elements* (barra de herramientas *Operation*) se llevará a cabo la proyección de la curva. Tras ello, se guardará el archivo *Part*.



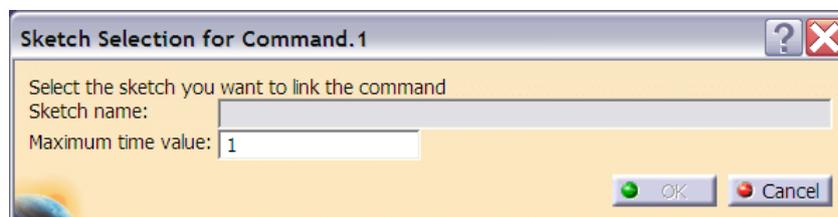
A continuación, se procederá con la generación de la animación del péndulo. Previamente a la ejecución de la herramienta *Simulation*, se ha de ligar la ley al comando que rige el movimiento del mecanismo 6, el cual contiene la unión de revolución en la que está integrado el subensamblaje correspondiente al péndulo (Subensamblaje 11).

En primer lugar, se insertará en el *Product* de trabajo, utilizando el módulo *Assembly Design* y la herramienta *Existing Component* (barra de herramientas *Product Structure Tools*), el archivo *Part* creado en los pasos anteriores. Tras ello, se pasará a trabajar con *DMU Kinematics*.

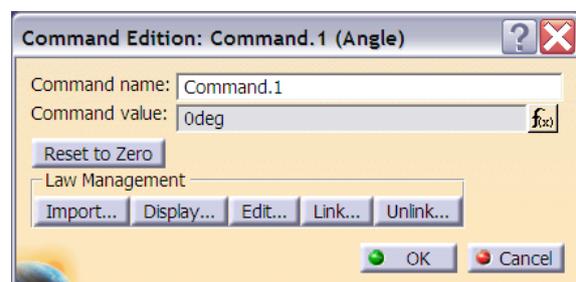


En el árbol de operaciones, se activará la edición del comando del mecanismo 6, haciendo doble *click* sobre su referencia. Tras aparecer la ventana asociada al comando, se hará *click* en el botón *Link*; al hacerlo, aparecerá la ventana en la que se ha de seleccionar el boceto contenido en el archivo *Part* insertado. Además, en la casilla

Maximum time value se introducirá un valor de 1, ya que, como se ha mencionado anteriormente, la curva generada representa el movimiento del péndulo a lo largo de un segundo. A continuación, se validará mediante *OK* la asignación del boceto al comando.

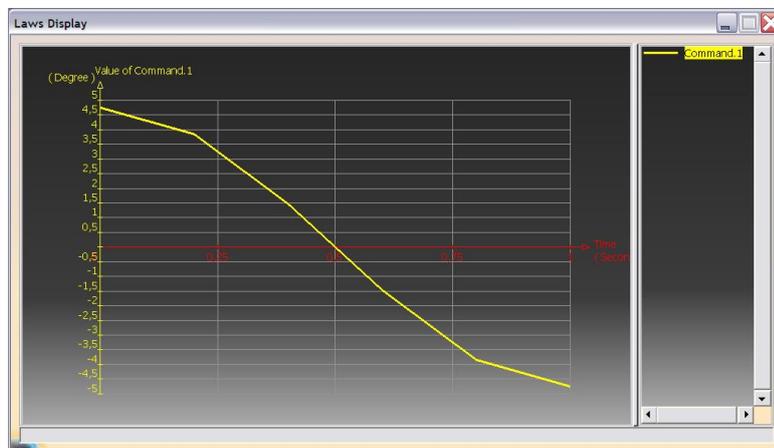


Por último, se hará *click* sobre el botón *Reset to Zero* en la ventana de edición del comando, a fin de establecer la posición de equilibrio del péndulo (en la cual se ha situado el subensamblaje que compone tras insertarlo) como la que éste debe poseer cuando no se esté realizando ninguna simulación o manipulación sobre él.



Activando el botón *Display*, aparece en pantalla una ventana en la que se muestra la representación gráfica de la ecuación matemática ligada a la ley asignada. En ella, se representa la evolución de la posición que poseerá el péndulo en función de su amplitud

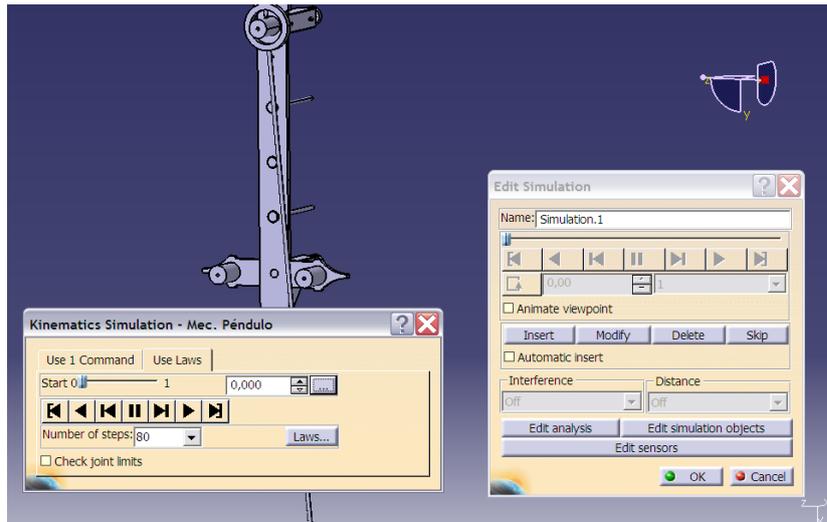
angular en grados (eje de ordenadas) a lo largo del tiempo establecido de un segundo (eje de abscisas), es decir, durante el desplazamiento equivalente a una oscilación.



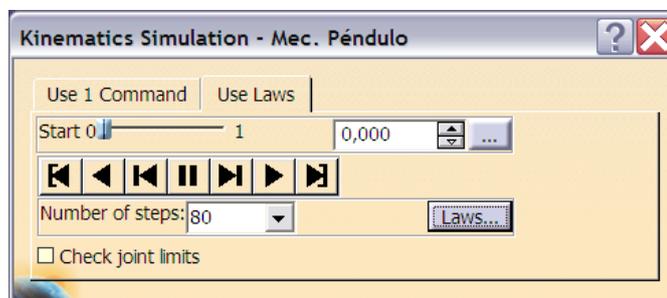
Tras ello, se validará la edición del comando mediante el botón *OK*.

Una vez llevada a cabo la asignación de la ley, existirán dos novedades en el árbol de operaciones. Por un lado en el subapartado *Laws*, dentro del mecanismo correspondiente al péndulo, se mostrará una fórmula que representa la asociación de la ley al comando, a través de la evaluación de la ecuación matemática; esto es, la relación entre la variable tiempo y el desplazamiento angular del péndulo. Por otro lado, reseñar la aparición dentro del *Part* que contiene la ley y el *sketch* que la representa de un icono que indica la creación de una ley gráfica, es decir, al asignar el boceto al comando se ha establecido un vínculo matemático entre ambos, a través de la curva contenida en el primero de ellos. Por defecto este icono recibirá el nombre de *Law.1*.

En este punto es posible proceder a la generación de la simulación del movimiento pendular. Se ejecutará pues, la herramienta *Simulation*. Al hacerlo, aparecerá la ventana de edición de la simulación, así como la de control de movimiento del mecanismo, regido por el comando.



El primer paso a realizar es seleccionar, dentro de la ventana de control del mecanismo (*Kinematics Simulation*), la pestaña *Use Laws*, ya que la simulación que se va a llevar a cabo va a estar regida por la ley asignada al comando. Una vez hecho esto, se hará click en el botón  para establecer la duración asignada a la simulación del recorrido establecido por la ley. El valor a introducir será de un segundo, el mismo que se introdujo en la casilla *Maximum time value*, durante la asignación del boceto al comando, ya que es la duración de una oscilación.



A continuación, se posicionará el péndulo en su posición inicial (0), que corresponde con la de su amplitud máxima. Tras ello, se establecerán el número de *steps* que se desea que tenga la simulación del recorrido establecido por la ley. A mayor número de *steps*, mayor precisión y realismo en la simulación del movimiento. Por lo tanto, se establecerá el máximo permitido por el *software* (80), ya que un valor muy pequeño de *steps* sería insuficiente para recrear con exactitud el movimiento que establece la gráfica de la ecuación matemática del M.A.S..

El siguiente paso será activar la opción *automatic insert* en la venta de edición de la simulación y después comenzar a generar la simulación. Para ello, se reproducirá el movimiento del péndulo mediante el botón *Play forward* de la ventana de simulación del mecanismo. Al hacer *click* sobre él, el movimiento del péndulo progresa, a la vez que se van

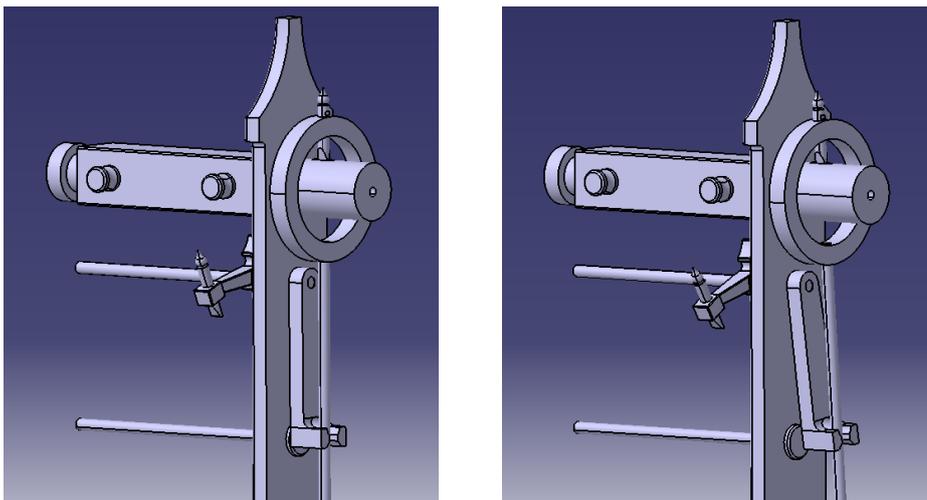
creando los sucesivos puntos de control de la simulación (debido a la activación previa de *automatic insert*). Al llegar al final, se habrá generado el movimiento correspondiente a una oscilación, el cual estará subdividido en 80 *viewpoints*. Para generar las sucesivas oscilaciones, se realizará la misma operación, alternando los botones *Play back* y *Play forward*, en función del sentido de la oscilación requerido en cada caso.

De esta forma, la simulación representará tantas oscilaciones como se desee y, al finalizar la generación, contará con un número de puntos de control equivalente al producto del número de dichas oscilaciones por los 80 *viewpoints* en los que se subdivide cada una de ellas. Cuando se quiera confirmar la generación de la simulación, se validará mediante *OK*.

7.3.8.4.3. Escape.

Las acciones a desarrollar para generar la simulación del mecanismo de escape son análogas a las necesarias para conseguir la generación de la del péndulo.

De esta forma, en primer lugar se creará un nuevo archivo *Part* en el que se generará la ley que regirá el movimiento, también oscilatorio, del eje que contiene el escape y la pieza que liga éste con el péndulo. La ecuación matemática será igual que la definitoria del movimiento pendular, a excepción del valor de θ_0 . La amplitud máxima del subensamblaje 10 durante su movimiento está determinada por la amplitud máxima de las oscilaciones del péndulo, a través de la pieza 21. Esta pieza recibe el movimiento del eje del péndulo (pieza 16) y lo transmite al escape a través de eje de rotación al cual van fijados ambos (pieza 20).

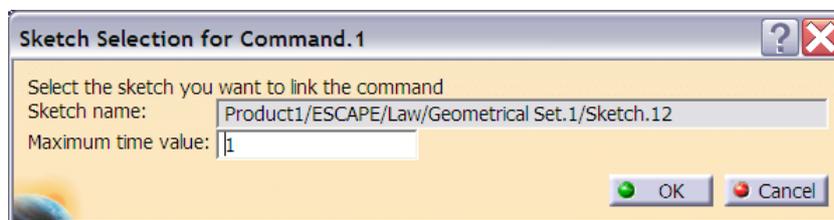


Cuando el péndulo alcanza su amplitud máxima (4.75°), la pieza 21 (y, consecuentemente, también el escape) se desvía de su posición de reposo un ángulo de 8.35° . De esta forma, la

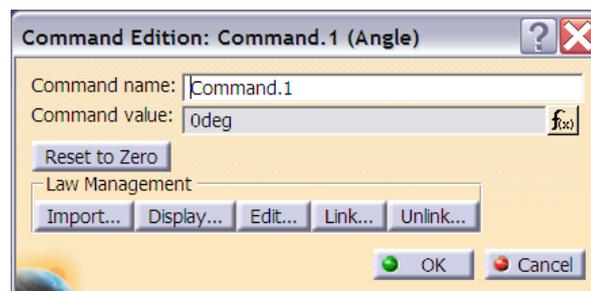
ecuación que determina el movimiento oscilatorio del subensamblaje 10 queda de la siguiente forma:

$$\text{Angulo} = 8.35\text{deg} * \sin((180\text{deg}/1\text{s}) * t + 90\text{deg})$$

Una vez creada la ley a través de la expresión anterior, se creará la curva representativa de la misma y se proyectará en un *sketch*. Tras ello, se insertará el archivo *Part* en el *Product* de trabajo y se ligará la ley al comando del mecanismo asociado al escape, introduciendo de nuevo un segundo como el tiempo de duración del movimiento establecido por la curva presente en el boceto.



También se hará *click* sobre el botón *Reset to Zero* para fijar la posición de reposo del subensamblaje en su situación de equilibrio, al igual que se actuó en el caso del péndulo.



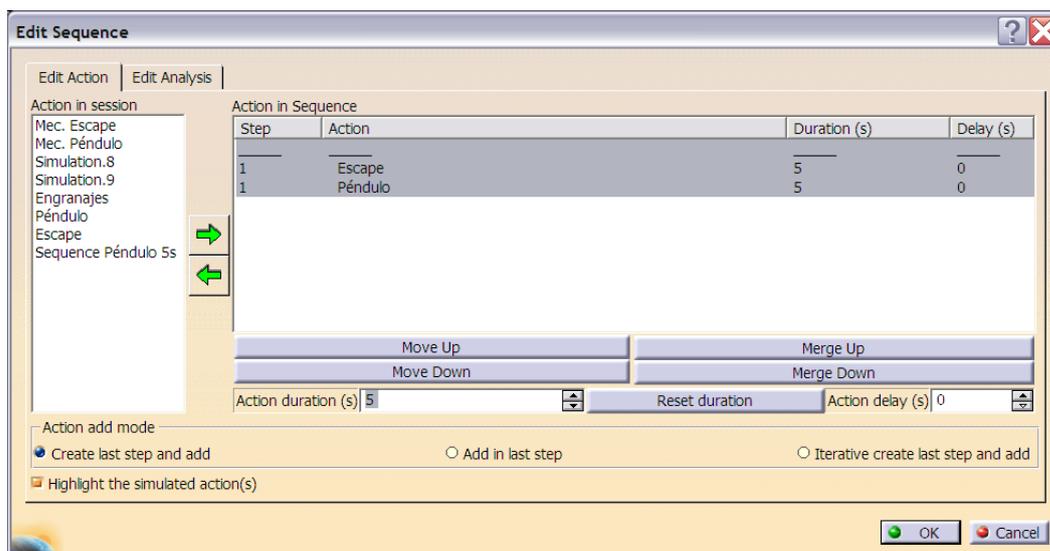
Tras ello, se generará la simulación del mecanismo mediante *Simulation*. Los pasos a dar son los mismos que en el caso del mecanismo del péndulo, tan sólo se ha de prestar atención en generar las mismas oscilaciones que se generaron para el péndulo, siendo también coincidente la posición de comienzo.

7.3.8.5. Creación de la secuencia escape-péndulo.

Los subensamblajes 10 y 11, constituyentes, respectivamente, del conjunto que contiene al escape junto con la ligadura al péndulo y del propio péndulo, desarrollan durante el funcionamiento del reloj un movimiento oscilatorio simultáneo.

Tras los pasos anteriores, se poseen las simulaciones independientes de cada uno de los mecanismos que integran al escape y al péndulo. Por lo tanto, la siguiente acción consistirá en combinar las simulaciones de ambos, a fin de conseguir una simulación conjunta que reproduzca sus desplazamientos armonizados.

Para ello se hará uso de la herramienta *Sequence* (barra de herramientas *DMU Player Commands*). Al ejecutarla, se traspasarán al cuadro de trabajo (*Action in Sequence*) las simulaciones correspondientes al escape y al péndulo. Tras hacerlo, se modificarán las duraciones de cada una de ellas. Ambas deberán durar lo mismo, y el número de segundos de tal duración deberá corresponder con el número de oscilaciones generadas para ambos durante la creación de sus simulaciones individuales. Por lo tanto, el valor de segundos a introducir será igual que el número de oscilaciones que vaya a contener la simulación.



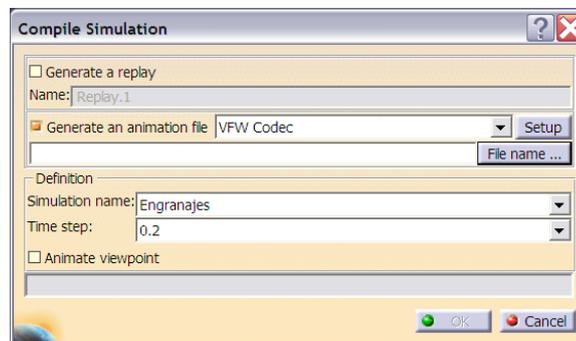
Una vez hecho esto, se deberán combinar ambas simulaciones, lo cual se realizará, indiferentemente, mediante uno de los dos botones previstos para tal fin: *Merge Up* o *Merge Down*. El primero combinará a la situada en primer lugar con su sucesora y el segundo hará lo propio con la situada en segundo lugar y su predecesora.

Por último, se validará la creación de la secuencia generada mediante el botón *OK*.

7.3.8.6. Generación de los vídeos.

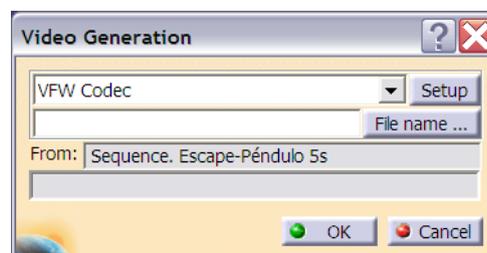
Una vez generadas todas las simulaciones y secuencias, se crearán los vídeos que guarden en un archivo externo dichas reproducciones.

En el caso de la simulación de la transmisión de los engranajes, se llevará a cabo mediante la herramienta *Compile Simulation* (barra de herramientas *DMU Generic Simulation Commands*). En la ventana emergente, se seleccionará primeramente la opción *Generate an animation file*. En el apartado *Definition* se elegirán la simulación a compilar en la casilla *Simulation Name* y la precisión del vídeo en la casilla *Time step*. Un valor de 0.2 en este último parámetro es suficiente para conseguir un vídeo de buena calidad.



Para especificar el nombre del archivo y su localización se hará *click* sobre el botón *File name...* La generación del vídeo se activará mediante *OK*.

En el caso de la secuencia que contiene la simulación del escape y del péndulo, su vídeo se creará mediante la herramienta *Generate Video*, presente en la pestaña *Tools/Simulation/Generate Video*. Tras ejecutar la herramienta, se seleccionará en el árbol de operaciones la secuencia. Al hacerlo, se mostrará en pantalla la ventana asociada a la generación del vídeo.



El último paso a dar consistirá en especificar el nombre y la localización del archivo a generar, a través del botón *File name...* Para ejecutar la generación del vídeo, se hará *click* en *OK*.

8. CONCLUSIONES.

Tras finalizar el proceso de trabajo basado en el reloj de péndulo, se puede decir que se han cumplido satisfactoriamente los objetivos básicos establecidos inicialmente. A través de la progresión en las acciones llevadas a cabo y los avances conseguidos, se han adquirido los conocimientos necesarios para poder trabajar con soltura con el módulo *DMU Kinematics* de *CATIA*.

El trabajo autónomo basado en la investigación e indagación acerca del funcionamiento de las distintas herramientas y operaciones presentes en el módulo ha permitido una mayor asimilación de los conceptos clave. De igual forma, ha supuesto un reto personal basado en la capacidad propia para solventar las dificultades encontradas y conseguir un objetivo mediante la ayuda de un área desconocida, como era el módulo *DMU Kinematics*.

La habilidad adquirida en el manejo del módulo durante el desarrollo del trabajo supone un avance más en el manejo personal del *software* con el cual ya se había trabajado, utilizando otras áreas de aplicación.

El hecho de que el elemento base del trabajo haya sido una máquina como el reloj de péndulo, ha posibilitado la relación de la práctica con *CATIA* con el diseño y desarrollo mecánico. De esta forma, ha sido necesario el análisis de los distintos componentes del conjunto, así como de los mecanismos que estos conformaban, a fin de poder avanzar a lo largo de las distintas fases del trabajo.

El proceso de animación del reloj ha derivado en un estudio del funcionamiento del mismo, desde el movimiento oscilatorio del péndulo hasta el giro de las agujas, pasando por el sistema de transmisión del movimiento a través de los engranajes.

En lo referido a la animación, en este trabajo se han establecido las pautas básicas para la simulación de los mecanismos del reloj de estudio, siendo éstas aplicables en todo momento a cualquier otro diseño basado en la misma constitución estructural y funcional. De esta forma, partiendo de las ideas plasmadas en este trabajo, quedan establecidas las líneas para profundizar acerca de la animación del mecanismo de escape.

Por medio de lo expuesto en el presente documento, cualquier persona interesada puede conocer y desarrollar por sí mismo el proceso de animación del reloj de péndulo. Además, en caso de no estar familiarizado con el módulo *DMU Kinematics*, puede adquirir los conocimientos básicos para poder trabajar con él de manera efectiva.

Con todo ello, se pone fin al documento del presente trabajo de fin de grado, desarrollado durante el curso 2013/2014, siendo el autor estudiante de Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo del Producto en la Universidad de Valladolid.

9. FUENTES.

Bibliografía

GONZÁLEZ FREIXER, XAVIER: *Módulo de cinemática DMU de CATIA V5*. Marcombo, Barcelona, 2013.

GONZÁLEZ CABANES, Francisco Javier: *Recreación virtual en CATIA V5 del primer reloj de péndulo de Christian Huygens*. Universidad de Sevilla, 2005.

Web

catiadoc.free.fr [Julio de 2014]

notaculturaldeldia.blogspot.com.es [Julio de 2014]

www.ecured.cu [Julio de 2014]

www.relojes-especiales.com [Julio de 2014]

minimosymaximos.blogspot.com.es [Julio de 2014]

Imagen 1: relojes-especiales.com [Julio de 2014]

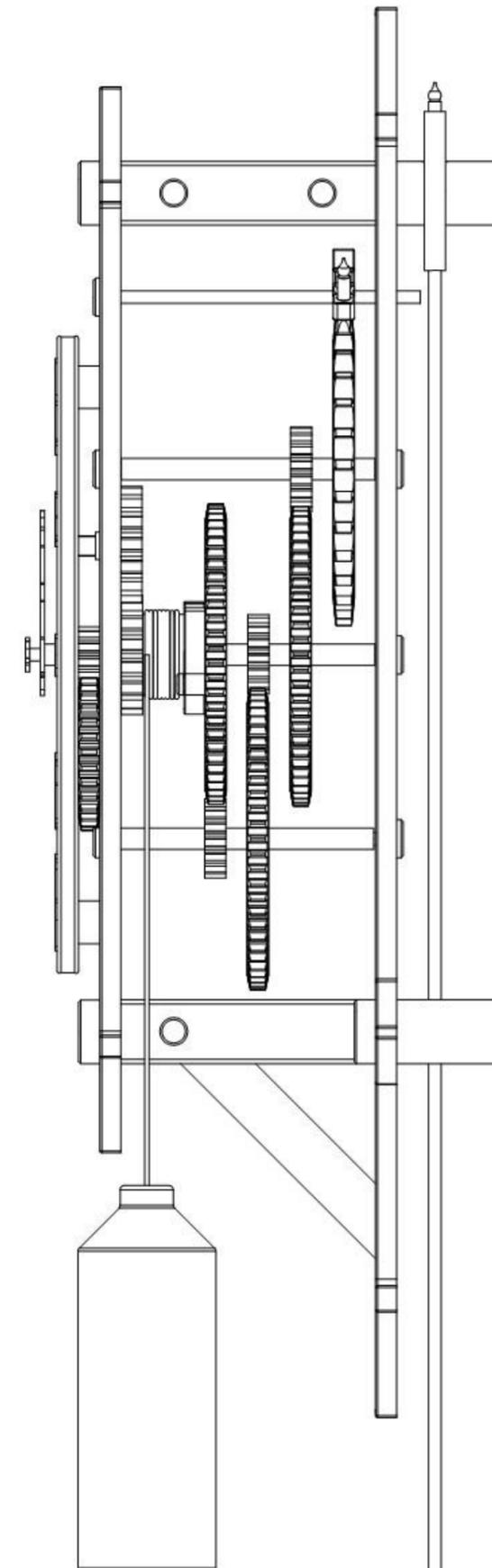
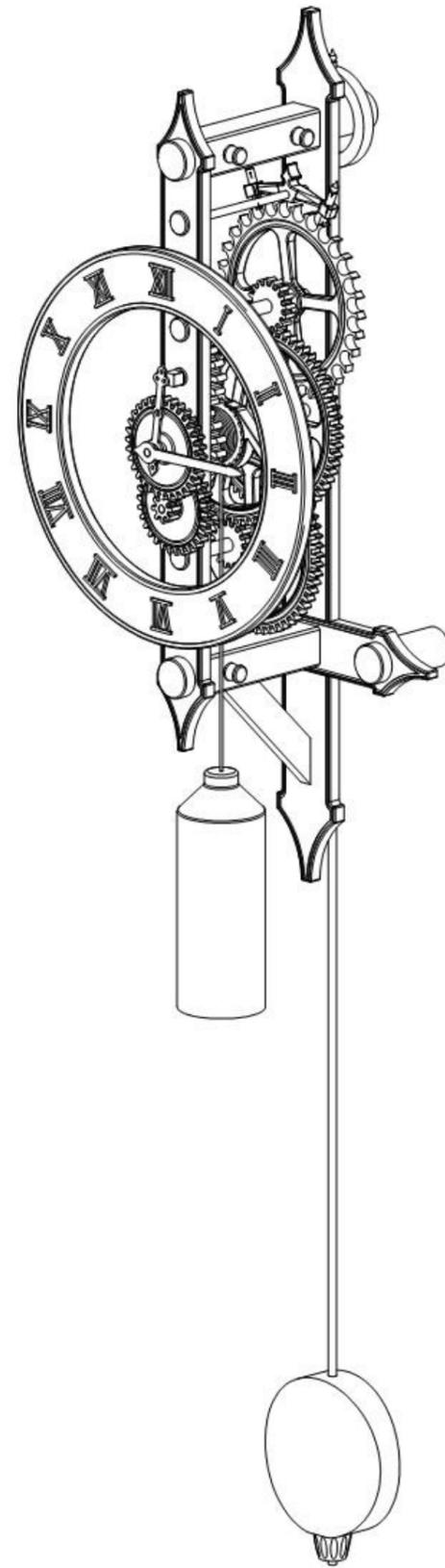
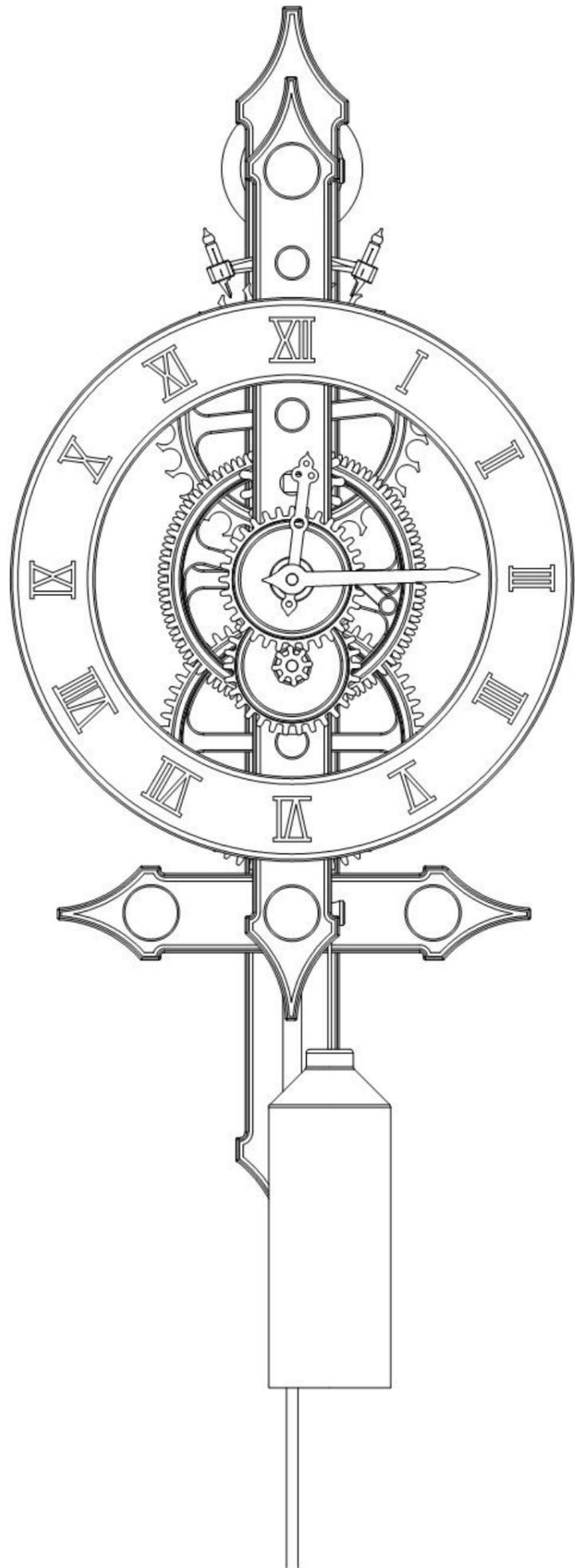
Imagen 2: intercentres.edu.gva.es [Julio de 2014]

Imagen 3: www.relojesdeparedonline.es [Julio de 2014]

Imagen 4: www.woodenclocks.co.uk [Julio de 2014]

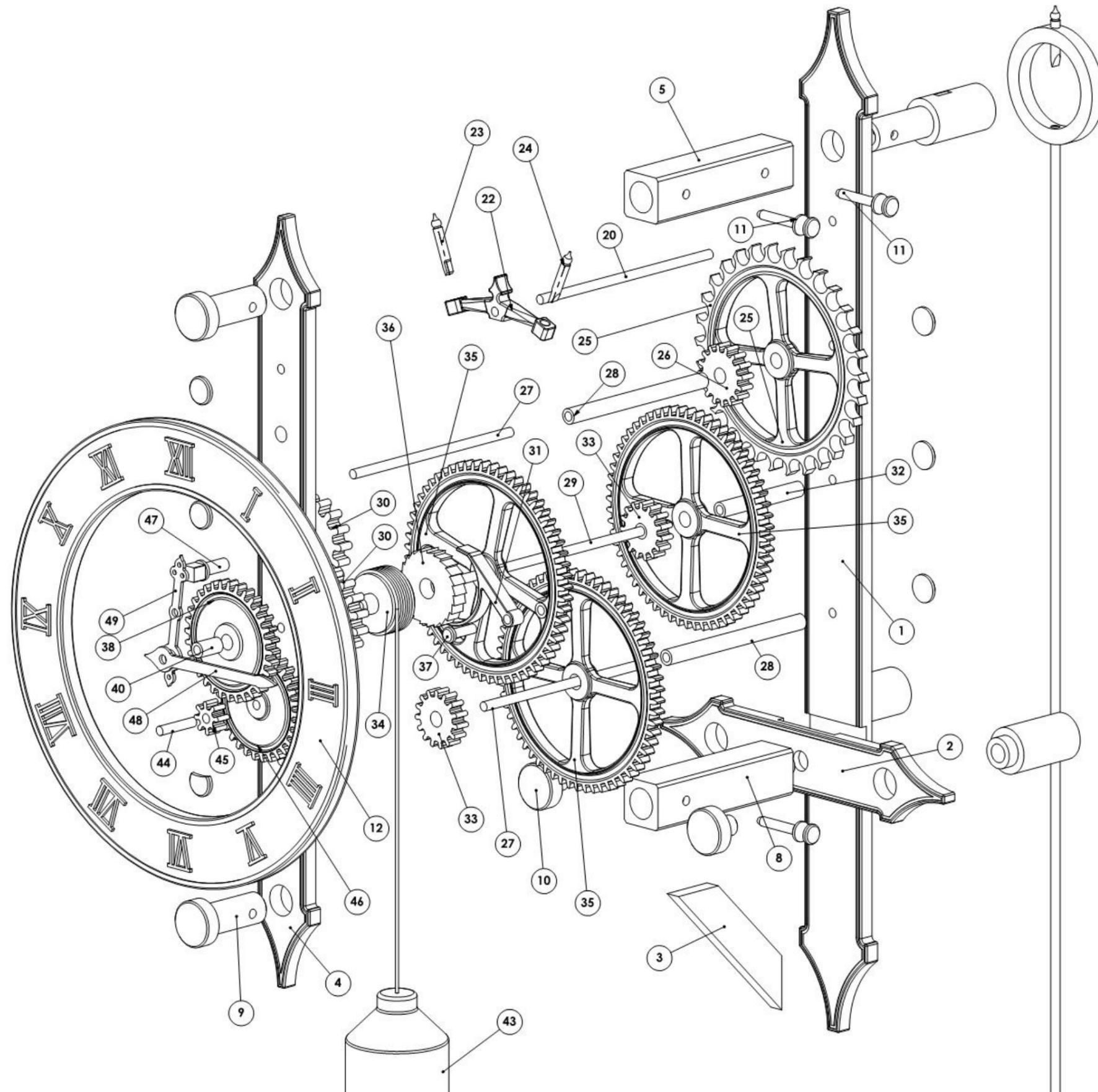
Valladolid, Julio de 2014.

ANEXO I: Planos.

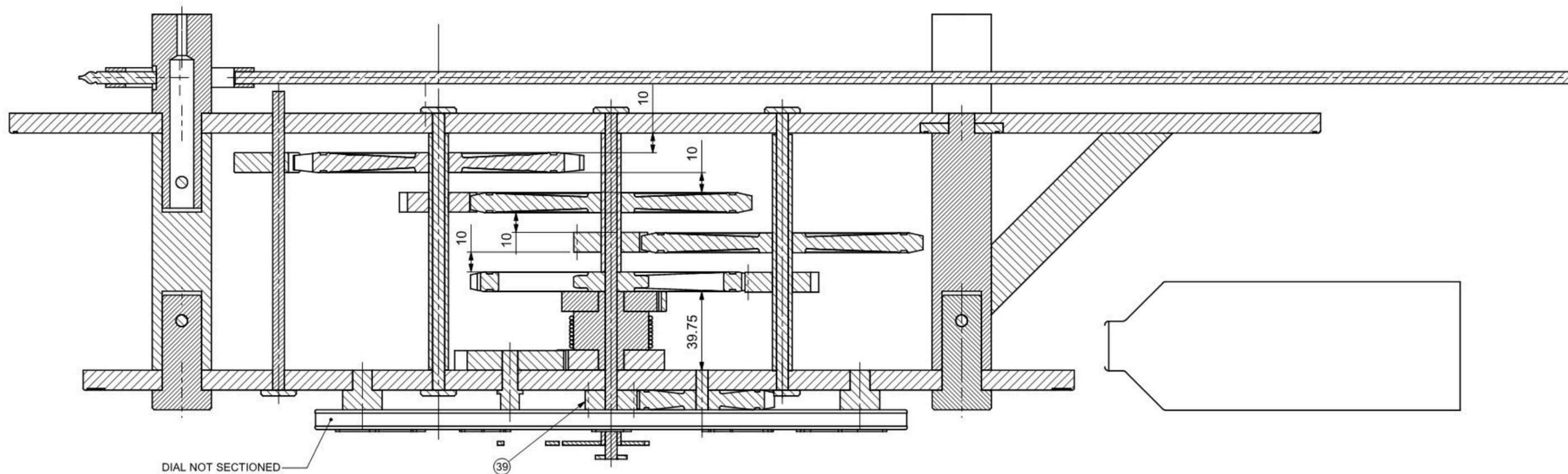


SHT 1 OF 10 SHTS	LAW WOODEN CLOCK 1	GENERAL ASSEMBLY	
NTS	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000	Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk

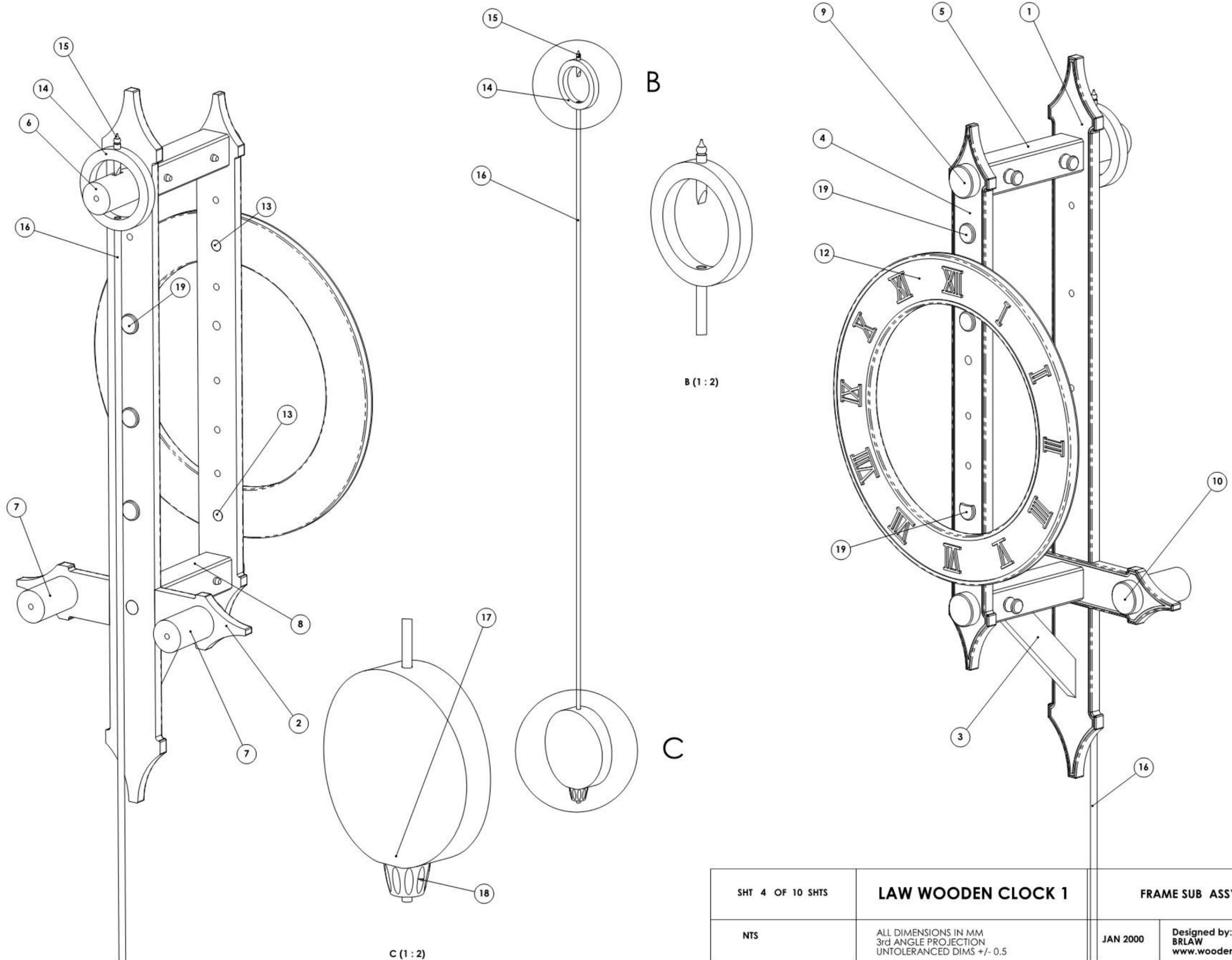
ITEM NO.	QTY.	PART NO.	DESCRIPTION
1	1		back
2	1		cross
3	1		Angled brace
4	1		front
5	1		squarespacer top
6	1		Pendulum hanger
7	2		Wall spacer
8	1		squarespacer bottom
9	2		Front pin
10	2		cover pin
11	3		Securing pin
12	1		Clock dial
13	2		Dial spacer
14	1		Pendulum head
15	1		Pendulum pivot
16	1		Pendulum rod
17	1		Pendulum bob
18	1		Pendulum nut
19	6		Shaft cover
20	1		Shaft151
21	1		yoke
22	1		escape
23	1		Pallet2
24	1		Pallet1
25	1		Timing
26	1		16teeth
27	2		Shaft140
28	2		Sleeve119
29	1		Shaft175
30	2		15teeth 1.5
31	1		Pawl
32	1		Sleeve70
33	2		15teeth
34	1		drum
35	3		60teeth
36	1		Ratchet
37	1		Pawl pin
38	1		32teeth
39	1		10teeth
40	1		sleeve18
41	8		ropering
42	1		rope
43	1		Weight
44	1		shaft30
45	1		8teeth
46	1		30teeth
47	1		Key shaft
48	1		Minute hand
49	1		Hour hand



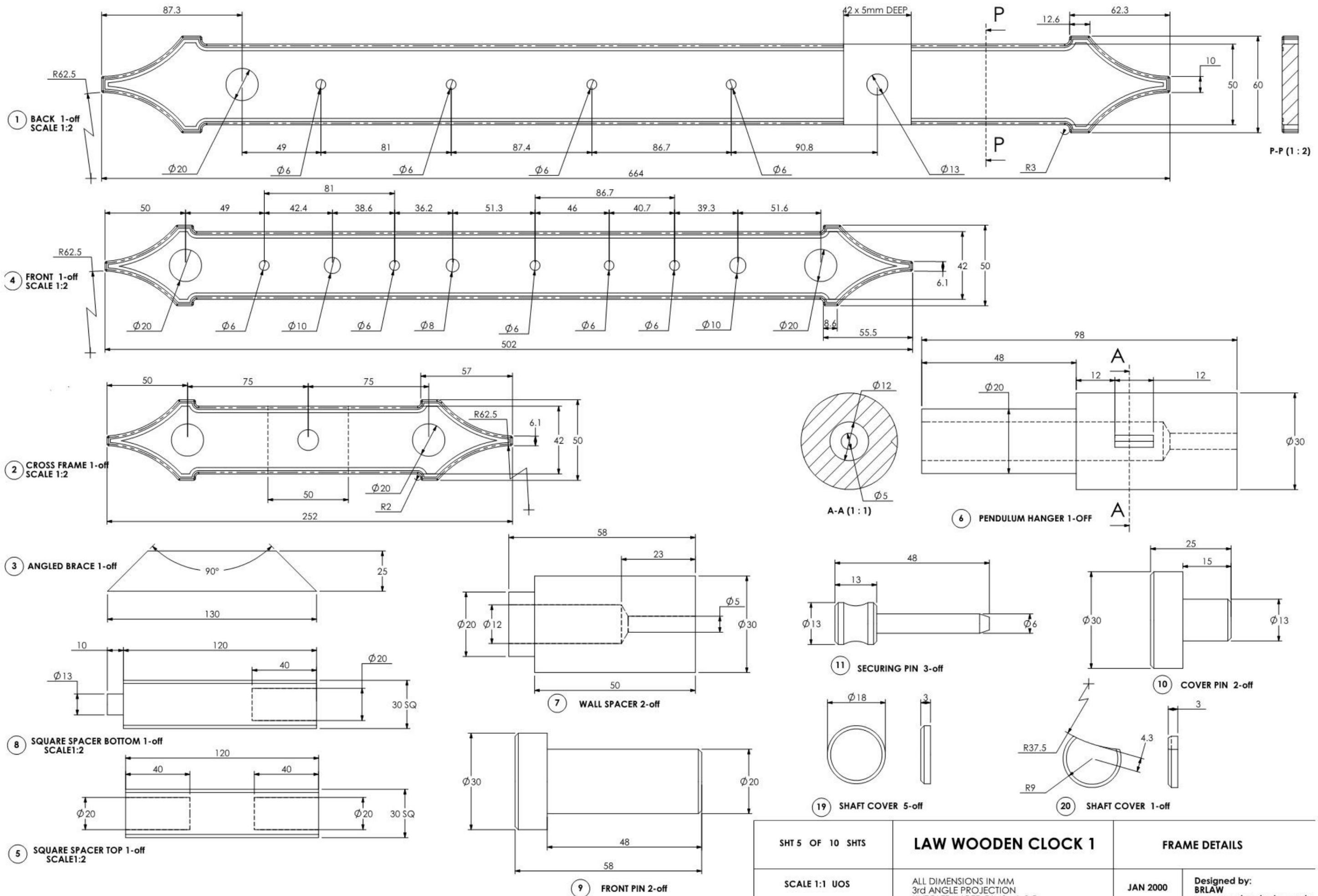
SHT 2 OF 10 SHTS	LAW WOODEN CLOCK 1	EXPLODED VIEW	
NTS	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000	Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk



SHT 3 OF 10 SHTS	LAW WOODEN CLOCK 1	CENTRELINE CROSS SECTION	
NTS	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000	Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk



SHT 4 OF 10 SHTS	LAW WOODEN CLOCK 1	FRAME SUB ASSY	
NTS	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000	Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk



SHT 5 OF 10 SHTS

LAW WOODEN CLOCK 1

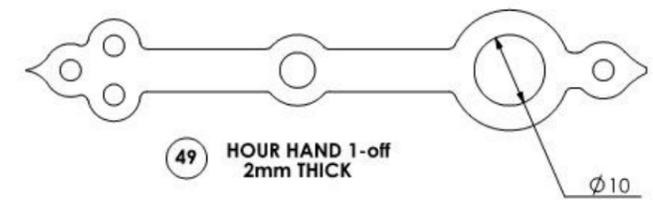
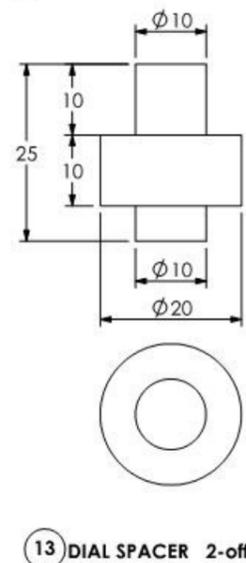
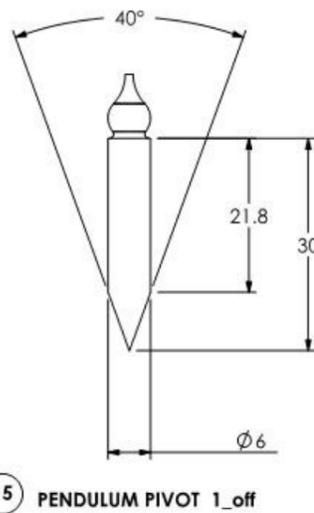
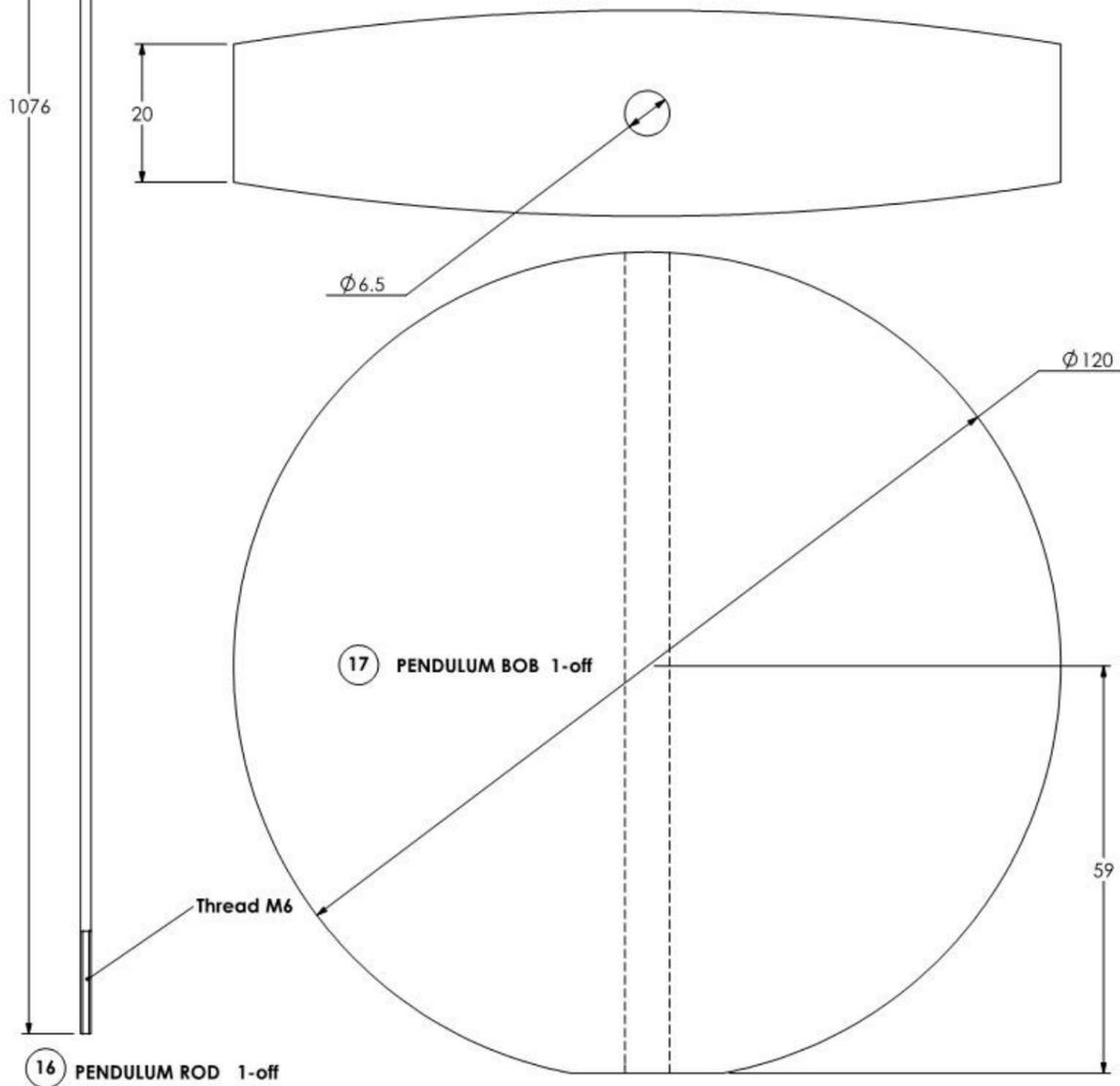
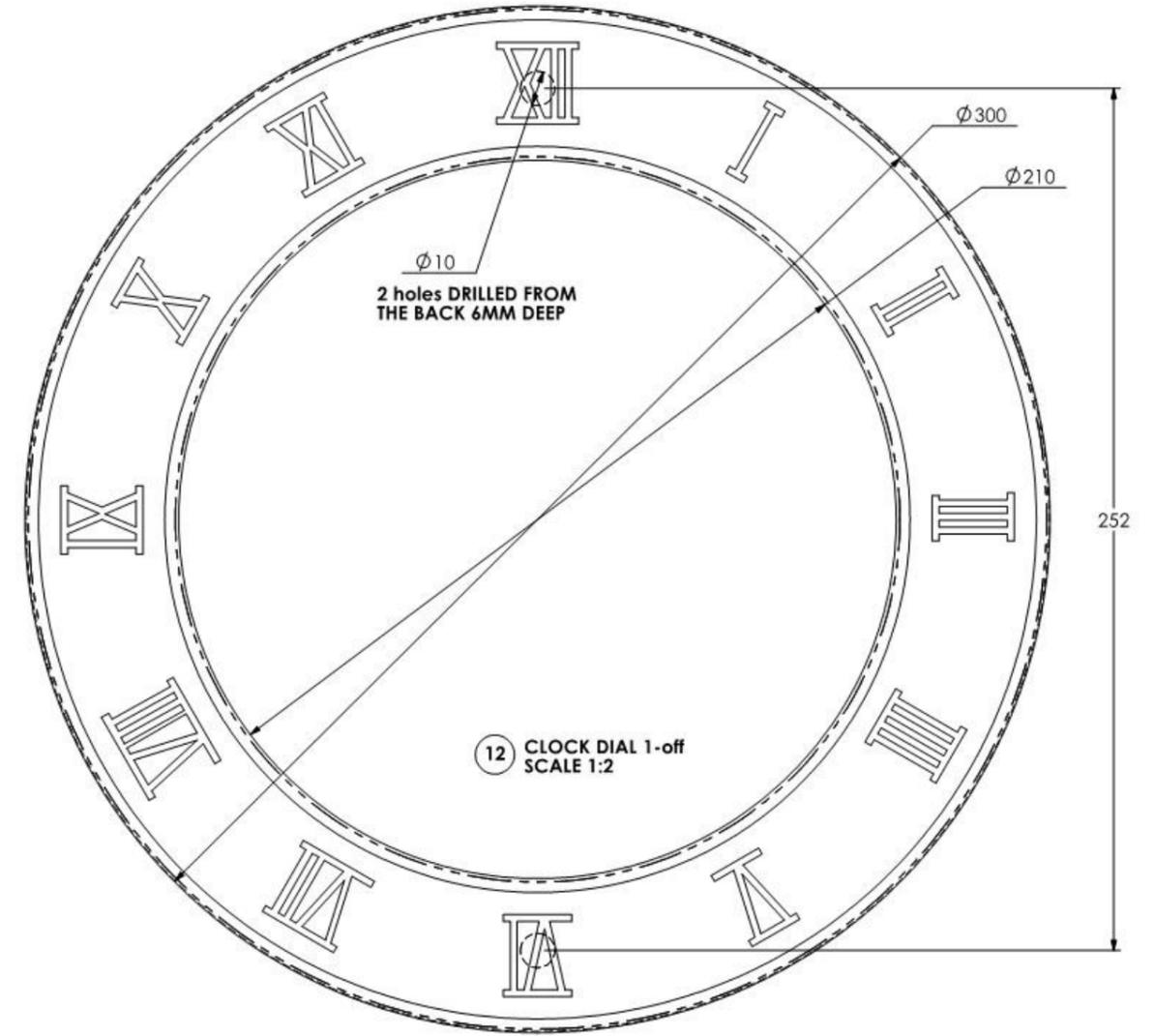
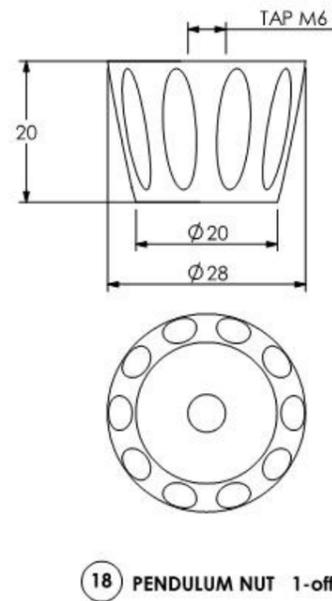
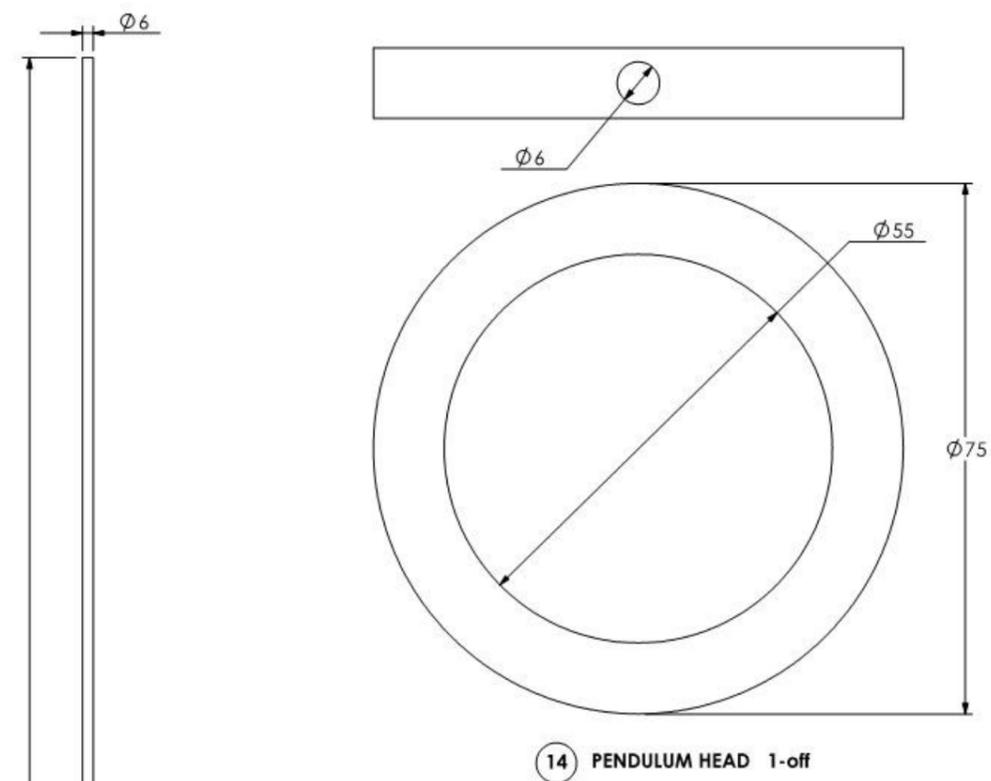
FRAME DETAILS

SCALE 1:1 UOS

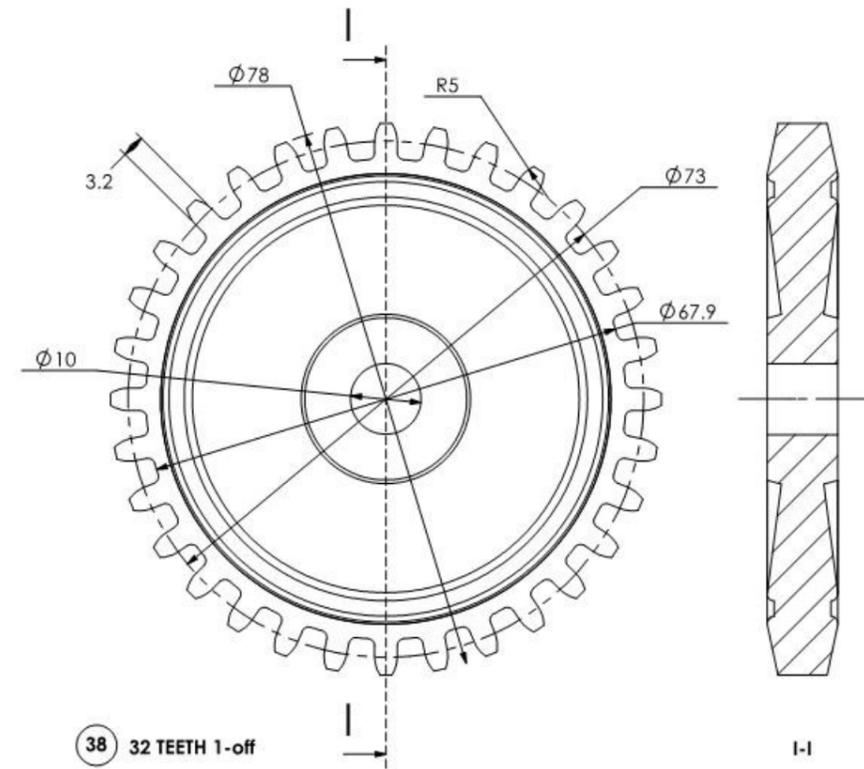
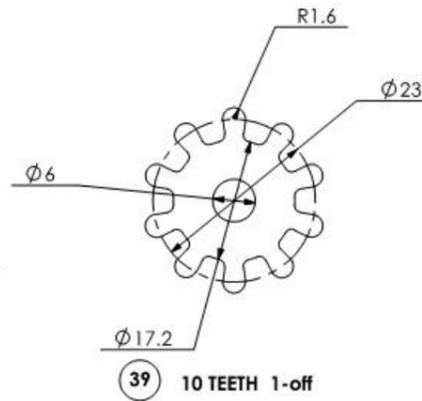
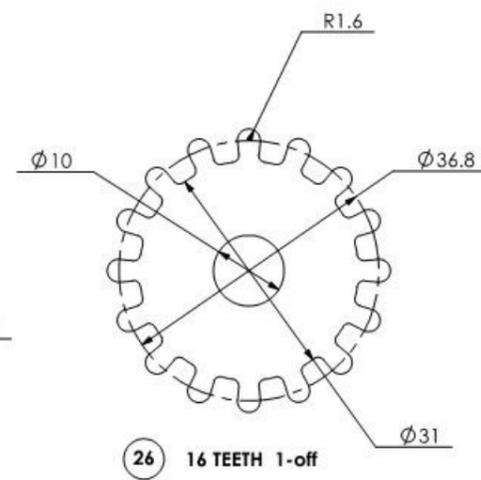
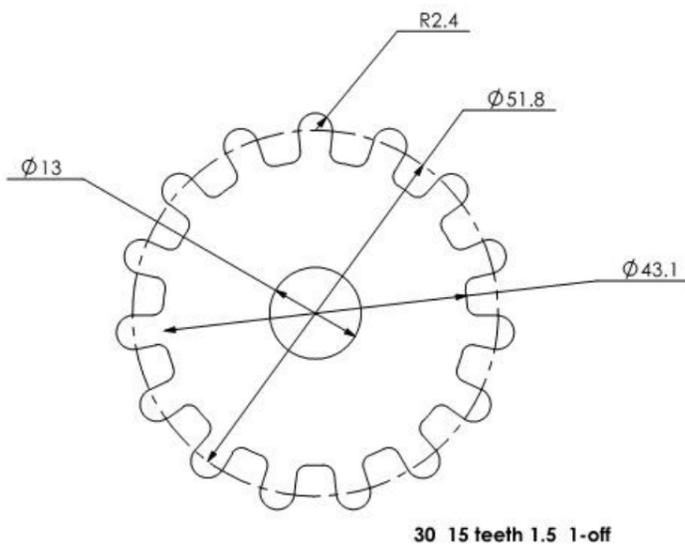
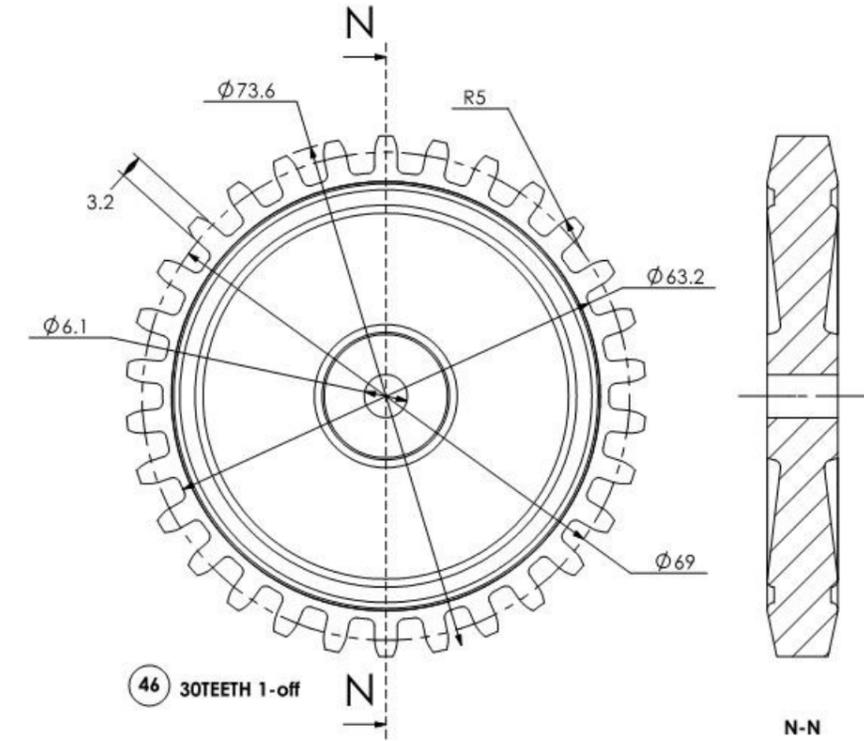
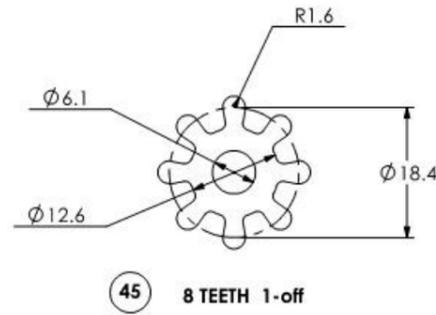
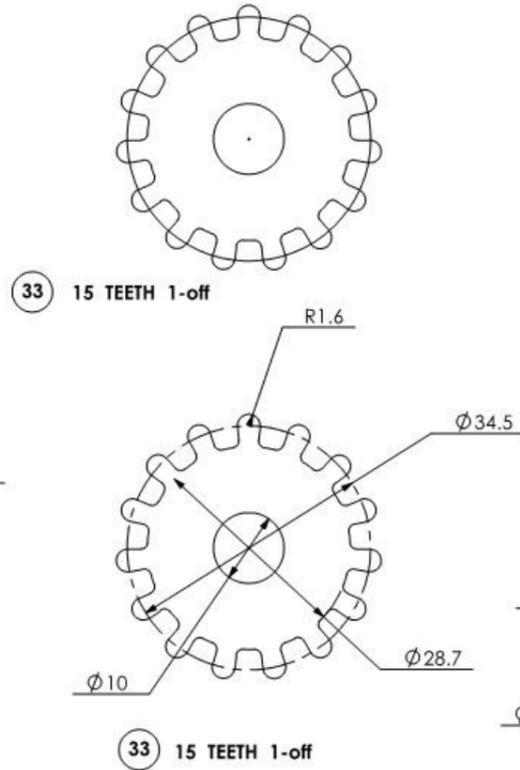
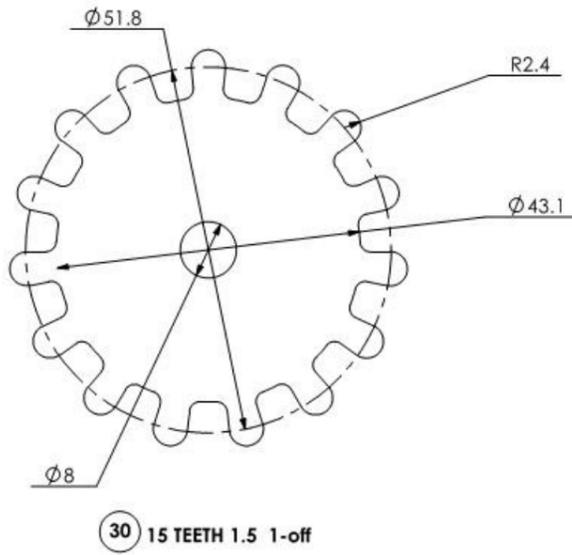
ALL DIMENSIONS IN MM
3rd ANGLE PROJECTION
UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5

JAN 2000

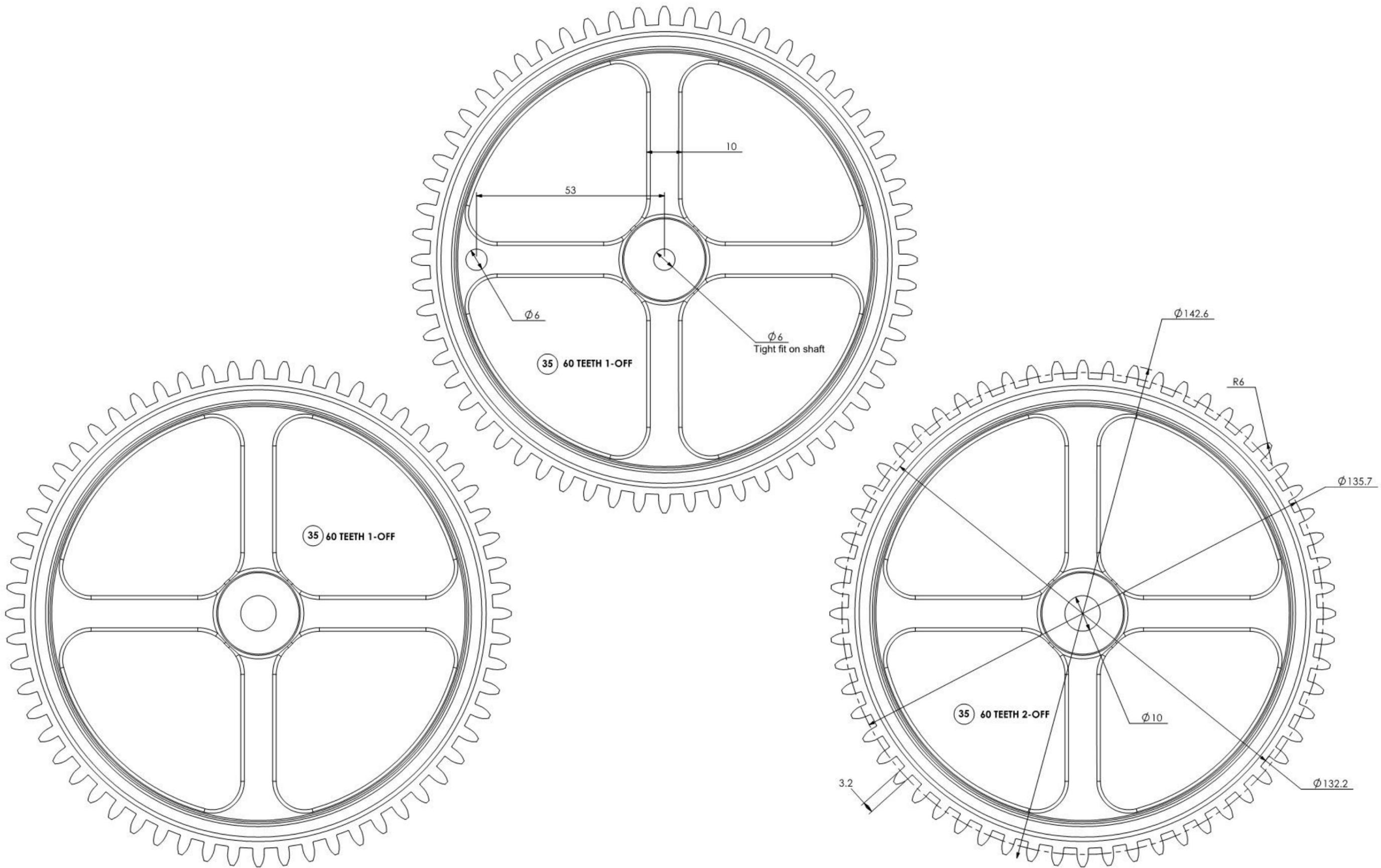
Designed by:
BRLAW
www.woodenclocks.co.uk



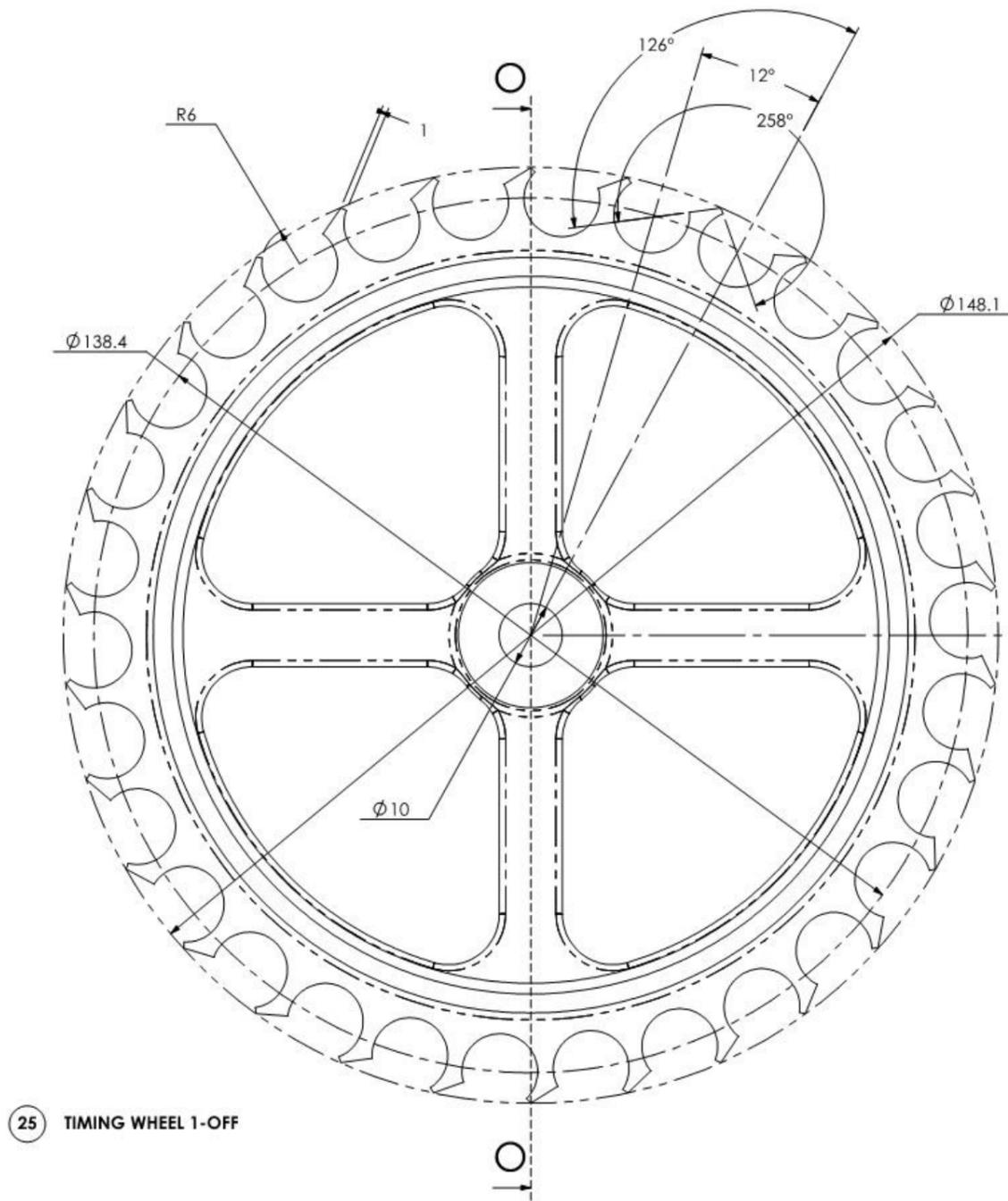
SHT 6 OF 10 SHTS	LAW WOODEN CLOCK 1	DIAL AND PENDULUM DETAILS	
SCALE 1:1 UOS	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000	Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk



SHT 7 OF 10 SHTS	LAW WOODEN CLOCK 1	GEARS	
SCALE 1:1	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000	Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk



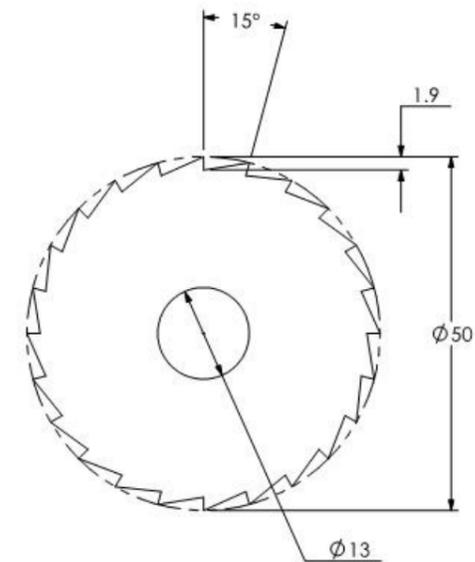
SHT 8 OF 10 SHTS	LAW WOODEN CLOCK 1	GEARS LARGE	
SCALE 1:1 UOS	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000	Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk



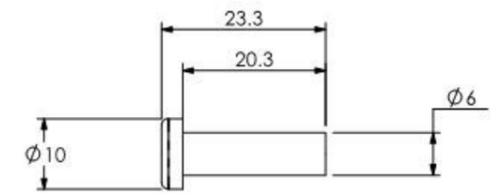
25 TIMING WHEEL 1-OFF



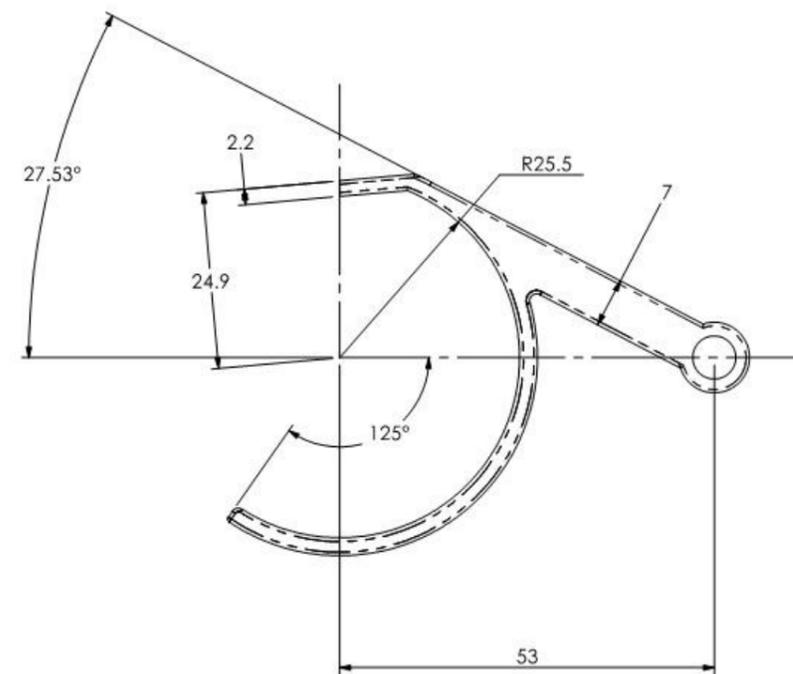
O-O (1:1)



36 RATCHET 1-OFF

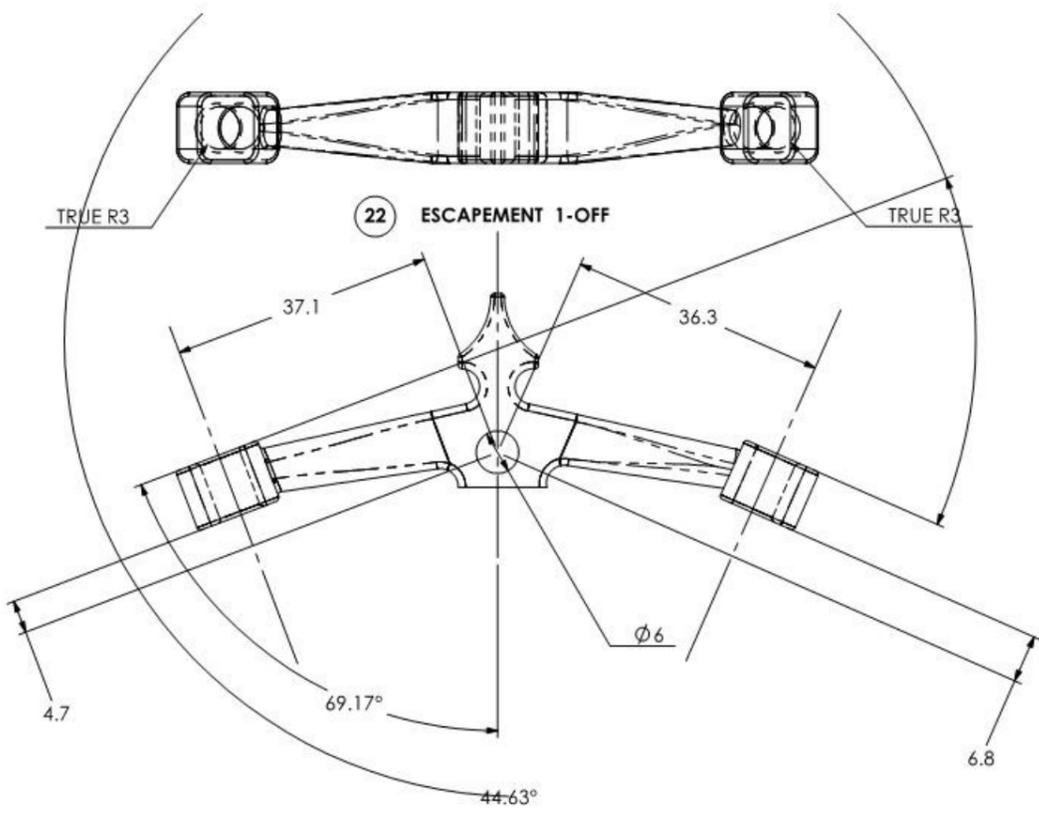


37 PAWL PIN 1-OFF

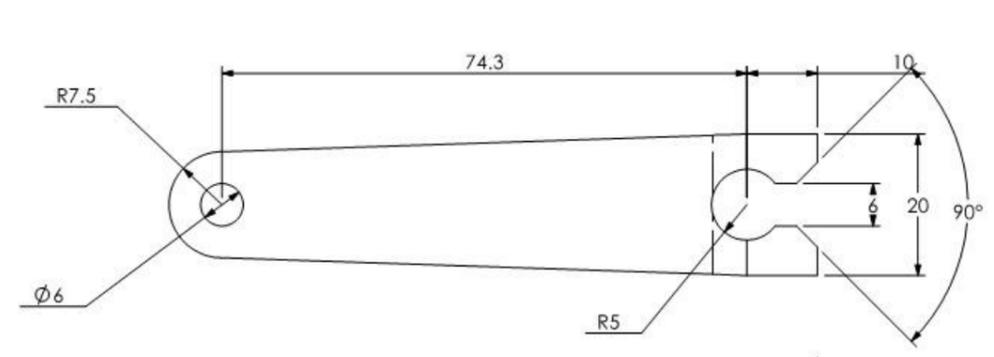


31 PAWL 1-OFF

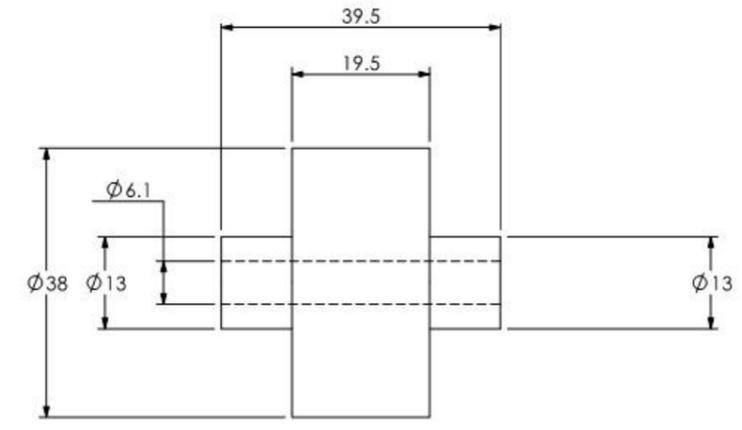
SHT 9 OF 10 SHTS	LAW WOODEN CLOCK 1	TIMING WHEEL AND RATCHET	
SCALE 1:1 UOS	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000	Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk



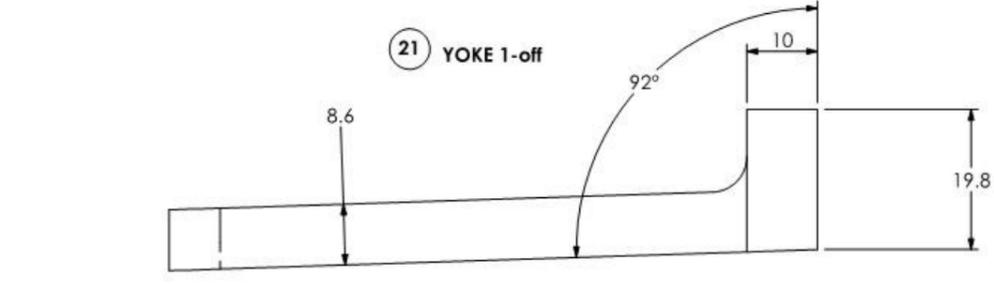
22 ESCAPEMENT 1-OFF



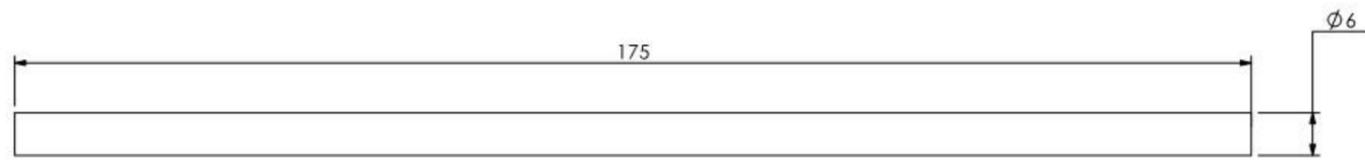
21 YOKE 1-off



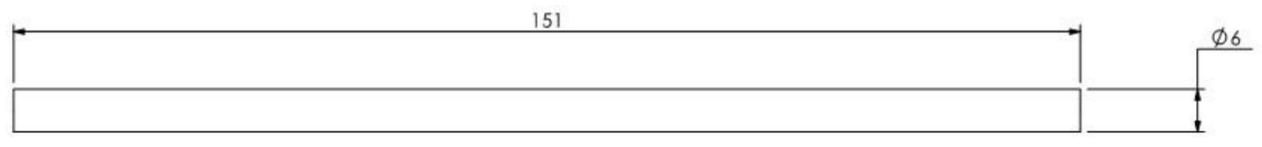
34 DRUM 1-OFF



20 SHAFT 151 1-OFF



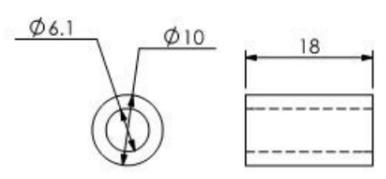
29 SHAFT 175 1-OFF



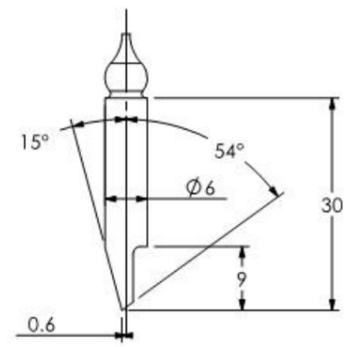
27 SHAFT 140 2-OFF



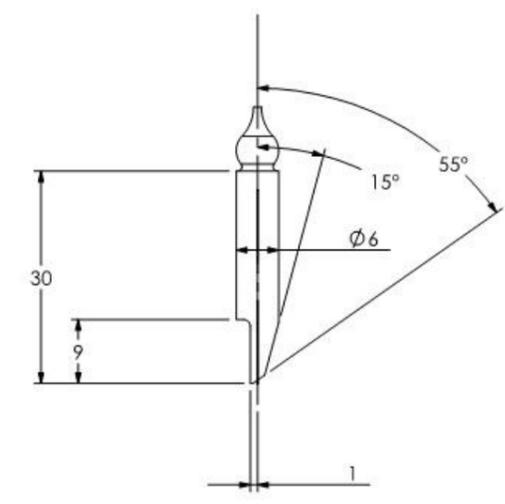
44 SHAFT 30 1-OFF



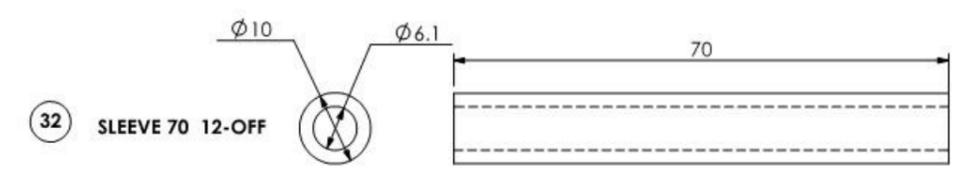
40 SLEEVE 18 1-OFF



23 PALLET 2 1-OFF



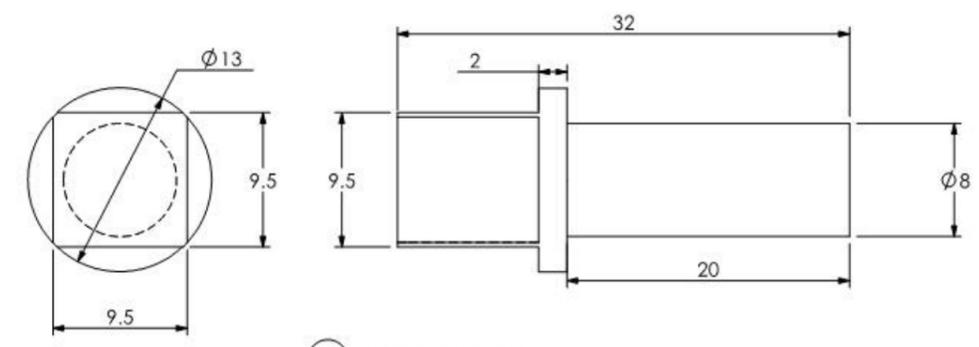
24 PALLET 1 1-OFF



32 SLEEVE 70 12-OFF



28 SLEEVE 119 2-OFF



47 KEY SHAFT 1-OFF

SHT 10 OF 10 SHTS	LAW WOODEN CLOCK 1	Shafts and sleeves	
SCALE 1:1 UOS	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000	Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk

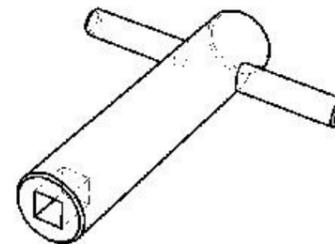
Woodenclock Clock I

Notes

1. Use close-grained timber such as Beech planed down to a thickness of 10 mm for all components unless otherwise stated.
2. All shafts for spindles should be made from 6 mm diameter bar.
3. Any suitable material can be used for the weight. The mass of the weight will need to be established by experiment, but a good starting point would be 6 lbs.
4. Details of the dial numerals are shown for guidance only, the actual form of the numerals is left to your own discretion. They can be applied by painting or as relief numerals cut from thin sheet.
5. The hands are again given for guidance only, although in this instance they are drawn to size so that you can copy these if you wish. They should in any event be cut from thin sheet.
6. Where the components are drawn to 1:1 scale you can attach the drawing to the timber using a low tack adhesive, and cut around the profiles. Great care should be taken with this approach when cutting the gear teeth because they need to be cut very accurately to avoid problems when assembling the clock
7. The frame is held together using 3 pins fitted through holes crossdrilled after assembly.
8. Care should be taken to adjust the pallets (23 & 24) relative to the timing wheel. They should operate to allow the timing wheel to move incrementally forward when swinging through a small arc of movement of the pendulum. (<10°).
9. The pitch of the gears is controlled by the drilling of the hole centres in the front and back frames. It may help to delay the drilling of these holes in the frames until after the gears are first cut and then finished to size. At this point it would help to mount them on two separate pieces of wood and test their free movement one to the other and measure the centre distance between them, so that the hole centres can be drilled at this dimension rather than the theoretical dimension on the drawing.
10. The winder used is not drawn on the plans but a simple 'T' bar with a square hole in the end to engage over the end of the square end of the shaft holding the winding gears.
11. The profiling of the larger gears is not necessary to the functioning of the clock, and can be carried out at the discretion of the clock builder.

Fits between components

Loose	Tight	Bond
1 & 20	11 & 5	1 & 19
1 & 7	11 & 8	1 & 2
1 & 29	12 & 13	1 & 3
16 & 17	20 & 21	1 & 8
27 & 28	20 & 22	14 & 15
29 & 32	22 & 23	14 & 16
	22 & 24	3 & 8
31 & 37	25 & 28	4 & 13
32 & 29	26 & 28	4 & 19
4 & 20	30 & 34	7 & 2
4 & 27	32 & 33	45 & 46
4 & 29	32 & 34	
4 & 44	32 & 35	
4 & 47	35 & 37	
45 & 4	38 & 40	
46 & 4	44 & 4	
	44 & 45	
	44 & 46	
	47 & 30	
	6 & 5	
	9 & 5	
	9 & 8	
	28 & 35	
	29 & 35	



Notes	LAW WOODEN CLOCK 1	
SCALE 1:1 UOS	ALL DIMENSIONS IN MM 3rd ANGLE PROJECTION UNTOLERANCED DIMS +/- 0.5	JAN 2000
		Designed by: BRLAW www.woodenclocks.co.uk

