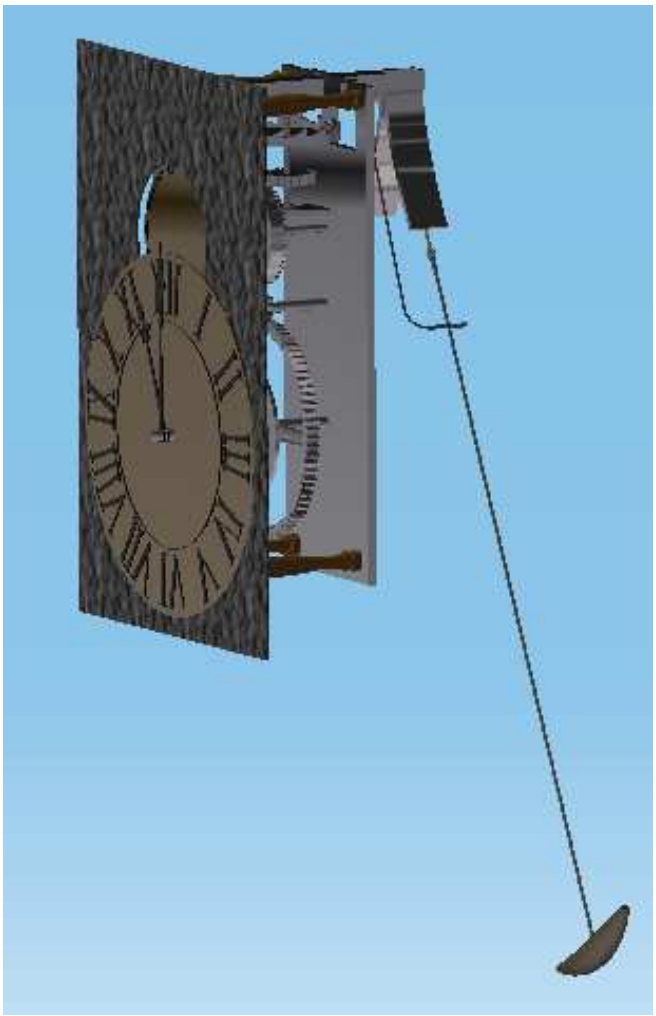


# RECREACION VIRTUAL EN CATIA V5 DEL PRIMER RELOJ DE PÉNDULO, DE CHRISTIAAN HUYGENS

FRANCISCO J. GONZÁLEZ CABANES

# INDICE

**1 INTRODUCCION ..... 3**
**2 HISTORIA DE LA HOROLOGÍA ..... 4**
**2.1 Cuadro Resumen de la evolución histórica de la horología ..... 23**
**3 CHRISTIAAN HUYGENS**
**3.1 Horologium Oscillatorium: ..... 29**
**El reloj de péndulo de Christiaan Huygens ..... 29**
**4 CATIA V5 ..... 35**
**5 PREDIMENSIONAMIENTO ..... 37**
**5.1 Tren de engranajes ..... 37**
5.1.1 Eleccion del perfil de los dientes ..... 40
**6 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS DIFERENTES PIEZAS ..... 42**
**6.1 Engranajes: Ruedas y piñones ..... 42**
**6.2 Ruedas especiales: ..... 46**
6.2.1 Rueda H ..... 46
6.2.2 Rueda I ..... 48
6.2.3 Rueda K: Crown Wheel ..... 49
**6.3 Ejes ..... 50**
6.3.1 Eje 1 ..... 50
6.3.2 Eje 2 ..... 51
6.3.3 Eje 3 ..... 52
6.3.4 Eje 4 ..... 52
6.3.5 Eje 5 ..... 52
6.3.6 Eje LM con paletas ..... 53
**6.4 Agujas. Subconjunto Eje 1 – Eje 4 ..... 58**
**6.5 Láminas AA y BB ..... 60**
**6.6 Subensamblaje esferas ..... 62**
6.6.1 Disco Segundero ..... 64
**6.7 GNOMONS ..... 65**
6.7.1 Gnomon R ..... 65
6.7.2 Gnomon epsilon ..... 65
6.7.3 Gnomon NQ ..... 66
6.7.4 Gnomon P ..... 66
**6.8 LÁMINAS CICLOIDALES (T) ..... 67**
**6.9 SUBCONJUNTO PÉNDULO ..... 69**
**6.10 Varilla S ..... 75**
**6.11 Elementos Auxiliares ..... 76**
**7 ENSAMBLAJE: ASSEMBLY ..... 78**

**8 ANIMACIÓN: DMU KINEMATICS ..... 86**
**8.1 Simulación del movimiento del péndulo ..... 87**
**8.2 Simulación del Reloj completo ..... 95**
**9 PLANOS: DRAFTING ..... 99**
**10 FOTOREALISMO: PHOTO ESTUDIO & REAL TIME RENDERING ..... 101**
**11 RESUMEN Y CONCLUSIONES ..... 114**
**12 BIBLIOGRAFÍA ..... 115**

# 1 INTRODUCCION

El Proyecto que se redacta consiste en el diseño y animación con CATIA V5 de un mecanismo clásico, del que se dispone de poca información al respecto.

Me gustaría resaltar que el proyecto, además de lo que ha sido la fase de diseño y recreación virtual, previamente ha constado de una fase de documentación histórica y en lo que a horología respecta. Por ello, quizá los 3 primeros apartados de la memoria puedan parecer demasiado extensos, pero con ello solo he pretendido que quede reflejado en el documento el trabajo realizado.

Tras esta fase de documentación, y siempre con el consentimiento y por acuerdo con mi tutor, D. Miguel Bermejo Herrero, nos hemos decantado por el Primer Reloj de Péndulo, de Christiaan Huygens, de 1657-1658, además de por el interés histórico que despierta y por el importante avance que supuso, al ser el primer medidor fiable del tiempo, por el uso que hace de las propiedades de la cicloide para conseguir dicha precisión.

También reseñar que no se ha explicado exhaustivamente el proceso de diseño de las piezas a excepción de las más importantes o las que tengan algún interés en particular, pues el propósito de este Proyecto no es enseñar a manejar el programa si no lo expuesto anteriormente.

# 2 HISTORIA DE LA HOROLOGÍA

Vamos a empezar el presente Proyecto realizando un desarrollo cronológico en la medida de lo posible, de la evolución de la horología a lo largo de la historia, y decimos en la medida de lo posible, porque en la antigüedad, cuando las comunicaciones eran deficientes y también por factores políticos y económicos, se llevaban desarrollos tecnológicos separados, incluso paralelos en algunos casos, sin compartir el conocimiento.

En los tiempos antiguos no se tenía otra medida de tiempo que la salida, el cenit y la caída del sol (mañana, mediodía y noche). Pronto se descubrió una medida de tiempo más exacta, se observó, en objetos en posición vertical, que sus sombras se alargaban constantemente o se acortaban y que al mediodía eran más cortas. Se midió la longitud de la sombra del objeto vertical, se la dividió en un número de partes iguales (por ejemplo, pies) y según la longitud de la sombra se midió la duración del día. Los griegos tomaron esta división de los babilonios.

Rápidamente se advirtió que la sombra de un árbol a diferentes horas del día no sólo varía su longitud sino que también su posición , y estas diferentes posiciones de la sombra (o su recorrido del amanecer al ocaso sobre una superficie) dió por resultado la invención de los **relojes de sol**, o en realidad, relojes de sombra, que se llamaba gnomon. Los obeliscos y pirámides fueron los primeros relojes de sol de los babilonios, egipcios, fenicios, etc. A las horas se las esculpía en piedra, la que era recorrida por la sombra del objeto vertical. Pronto a los relojes de sol se los construía más completamente, de tal manera que también podían indicar las estaciones del año, por disminución o aumento de las 12 horas del día.

Roma construyó a los 500 años de su fundación (753 a.C.) un reloj de sol propiamente dicho. Con el tiempo hubo varios en sus muros, y en las ciudades más pequeñas de Italia; después también en las casas de campo de los nobles. Desde el restablecimiento de las ciencias, los científicos e investigadores se dedicaron mucho a mejorar los relojes de sol, como es el caso de Alemania en el siglo X y XI o en el siglo XVI, Oroncio Fineus, Peter Apianus, Albrecht Durero, desarrollan relojes de sol complejos con muchos círculos concéntricos con las horas planetarias, el número de meses del año, el número de días del mes, los signos del zodíaco, etc.

El **Reloj de agua**. Los pueblos asiáticos ya los tenían en tiempos antiguos: Caldeos, egipcios, chinos. El agua escurría de una urna o cubeta por medio de gotas o en otra forma regular ( por esto el instrumento se llama clepsydra = ladrona de agua), el nivel del agua mostraba la hora del día en el recipiente; las horas se leían por un lado. Platón fue el primero que introdujo el reloj de agua en Grecia. Roma obtuvo el primero en el año 157 a. JC., gracias a P.C. Escipión Nasica. Julio César también lo encontró en Inglaterra cuando transportaba allá sus armadas. Se descubrió pronto que el agua que escurría no era proporcional con el tiempo, porque el agua se escurría más lentamente a medida que más bajaba su nivel.

**Fig. Clepsydra más antigua que se conoce.1500 a.C.Egipto**

Los **relojes de agua astronómicos** se inventaron poco después, en lo que en el cuadrante redondo no sólo se marcaban las horas, sino también los signos del zodíaco y la recta del eclipse. Aún después de la invención del reloj con engranajes se efectuaron muchas mejorías y juegos con los relojes de agua. Galileo, Varignon y Bernoulli estudiaron la forma que debía tener el recipiente para que el agua descendiera regularmente en un tiempo dado. En la primera mitad del siglo XVI, Martinelli (italiano) los mejoró mucho, les cambió de aspecto con adornos arquitectónicos, en especial en los relojes para torres o iglesias. Uno de éstos, por ejemplo, se encuentra en la gran plaza de Venecia: unos moros y los tres Reyes Magos tocaban las horas y saludaban a la Virgen María. En todas las ciudades chinas se encuentran torres, todavía hoy, en las que un reloj de agua da la hora.

J. Stabius inventó el **reloj lunar** en el siglo XVI, en el que las sombras de la luz de la luna dividían las horas nocturnas. Los **relojes de estrellas o astronómicos**

también se inventaron en aquella época, el padre Kircher al igual que Sarrazini los desarrollaron.

Los **relojes de arena** llevan un desarrollo paralelo a los de agua desde sus inicios, hasta el punto que en ellos fueron empleadas las mismas mejoras . En el siglo XVI los relojes de arena de Augsburgo, con soportes, indicaban los minutos. Se trató de instalar el reloj de arena de tal manera que fuese también usado para medidas astronómicas y para la navegación en el mar.

Con el invento de **los relojes con engranajes** disminuyó mucho el uso de los relojes de sol, a los que, de todas maneras, se les mejoró aún más hasta el siglo XVIII. El inventor de los primeros relojes de engranajes es desconocido, pero si se sabe que estaban asociados a la vida eclesial y monacal. Las primeras huellas de relojes de engranajes propiamente dichos, con pesos secos, se remontan al siglo XI. Antes, los relojes se los colocaba en iglesias y monasterios. Los religiosos los cuidaban, los ajustaban y regulaban de día y noche, y así tuvieron ocasión de investigarlos. Los relojes fueron usados por los monjes como despertadores; tocaban a horas determinadas, si antes habían sido programados para ello. Los relojes de campana se fabricaron posteriormente.

En el siglo XIII y XIV estos relojes fueron más conocidos. Algunas torres de iglesias en Italia ya tenían relojes con engranajes, además de campanario.. El arte de la relojería era un oficio libre: cerrajeros, armeros y artesanos tenían derecho de dedicarse a fabricar relojes grandes o pequeños.

Hasta el siglo XV los relojes eran muy costosos, de defectuosa técnica y poco numerosos, sí un reloj se descomponía no había nadie en las cercanías que pudiese arreglarlo y tampoco había tanto comercio o concurrencia como para que los productos hubieran podido ser enviados a lugares lejanos para ser reparados por un hábil artesano. En 1400 la catedral de Sevilla tuvo su primer reloj. En la segunda mitad del siglo XV algunas personas privadas también llegaron a poseer relojes: el famoso astrónomo Walther fue una de las primeras personas privadas que tuvo un reloj con engranaje en su casa, lo usó en 1484 para sus estudios astronómicos, así la astronomía se auxilió de estos medidores de tiempo (los relojes de engranajes de balancín) hasta la mitad del siglo XVIII, aunque sin embargo, dejaban mucho que

desear. Poco a poco fueron de uso público, y no sólo privilegio de monjes, príncipes y adinerados.

Hasta el siglo XVI preocupa poco conocer más exactitudes que las estrictamente fisiológicas; para ello basta y sobra con el instinto, la luz y la sombra. Los relojes mecánicos ostentan una sola aguja, y lo mismo da una hora más o menos. Sin embargo, aportan una serie de datos que actualmente nos parecen superfluos e ingenuos, pero que en el contexto de la época eran bastante más importantes que una seguridad temporal. Así, el mostrador zodiacal resultaba decisivo para elegir los momentos fastos o nefastos; el de fases lunares, para deambular en noches sin faroles; el calendario, para situarse, y un largo etcétera de informaciones útiles para la época.

Este idílico estado de cosas se turba con la absoluta necesidad de las naciones marítimas por calcular la exacta posición de sus naves en la mar océana, para lo que es indispensable contar con un reloj preciso e indiferente al oleaje. Es lo que se conoce como ***el problema de la longitud*** ,

Durante los siglos XVII y XVIII, este fue uno de los más grandes problemas planteados a los científicos, el de determinar la longitud en el mar. De la solución de este problema dependía la vida de los marineros y la economía de las naciones europeas, basada, en gran medida, en las relaciones económicas con regiones muy alejadas. La importancia de este problema era tal que se convirtió en objeto de investigación de marinos, astrónomos, matemáticos y sabios en general, y para su solución se organizaron juntas oficiales e incluso las monarquías europeas convocaron concursos dotados con extraordinarios premios en los que participaron los más grandes científicos del momento. La resolución tarda en lograrse y por su importancia le dedicaremos un subapartado más adelante. Es con este panorama cuando se produce el definitivo desarrollo y expansión de **los relojes de engranaje**.

Hasta el siglo XVI, el mecanismo de estos relojes era inexplicable para la mayoría de los sabios. Solamente en el siglo XVII varios de ellos tuvieron la idea de estudiar su mecanismo y formular los principios del mismo. Las más pequeñas fallas del engrane (un engrane equivocado de los dientes con el huso), la falta o no de humedad, el calor o el frío, el aire con menor o mayor presión, etc., afectaban de tal manera al balancín, que las mediciones eran bastante irregulares. Todos los relojes

necesitaban en ese entonces mucho espacio y eran muy incómodos de ser tenidos en las habitaciones.

Los relojes con engranajes se movían con un peso seco. Varias ruedas dentadas, grandes o pequeñas, se articulaban con sus dientes de tal manera, que cuando una rueda giraba por el peso del impulso, todas las demás también giraban, unas más velozmente que otras, la primera rueda la más cercana al motor (en principio un peso, después un resorte y más tarde un motor) giraba con menor velocidad, mientras que la última rueda gira con gran rapidez. Por otra parte, el impulso de la pesa, y el movimiento que producía, terminaban demasiado pronto, si no existía una resistencia mayor que la sola fricción de las ruedas, a fin de que se regulase la velocidad. El funcionamiento regular y acompasado del artilugio estará impuesto por un mecanismo de distribución (escape, prensa de huso, échappement en francés o scapement en inglés) y un regulador (foliot, volante, balancín o péndulo),la tarea más difícil para el inventor ya que no podía inspirarse en ningún instrumento existente, era algo completamente nuevo, por lo que a lo largo de los años fueron surgiendo y evolucionando diversos tipos de escape.

Los **Relojes de balancín** son un caso particular de los anteriores: la última rueda, la que gira con más velocidad, debía tener un freno para que no suspendiera totalmente el movimiento, para que no se *escapara* continuamente y en poco tiempo la energía potencial aportada por las pesas o el resorte más adelante. Estos frenos o resistencias tenían que encontrarse en el regulador o en el antes llamado balancín. Constaba de un tubo de hierro al que se le unía un eje o un cilindro delgado, en el que se fijaba una sustancia elástica con un ángulo determinado, sobre el cual se articulaban los dientes de la última rueda, rueda de avance o de escape. El eje estaba colocado de tal manera con respecto a esta rueda, que el balancín se movía en una posición horizontal y la rueda giraba por el impulso alternamente sobre la sustancia elástica del eje. Éste es posiblemente el primer mecanismo de escape, conocido como *Verge scapement* o *escape tipo Verge (verge = borde) con balancín, de* inventor desconocido. Con un freno como éste, que impulsaba y regresaba nuevamente a su posición de origen, el engranaje se movía con poca velocidad; la pesa sólo cedía siguiendo un tiempo rítmico, y tenía al final que ser elevada de nuevo. El engranaje estaba instalado de tal manera, que la rueda daba una revolución cada 12 ó 24 horas.

En la prolongación del perno había un indicador que también giraba cada 12 ó 24 horas una vuelta y así indicaba las horas del día.

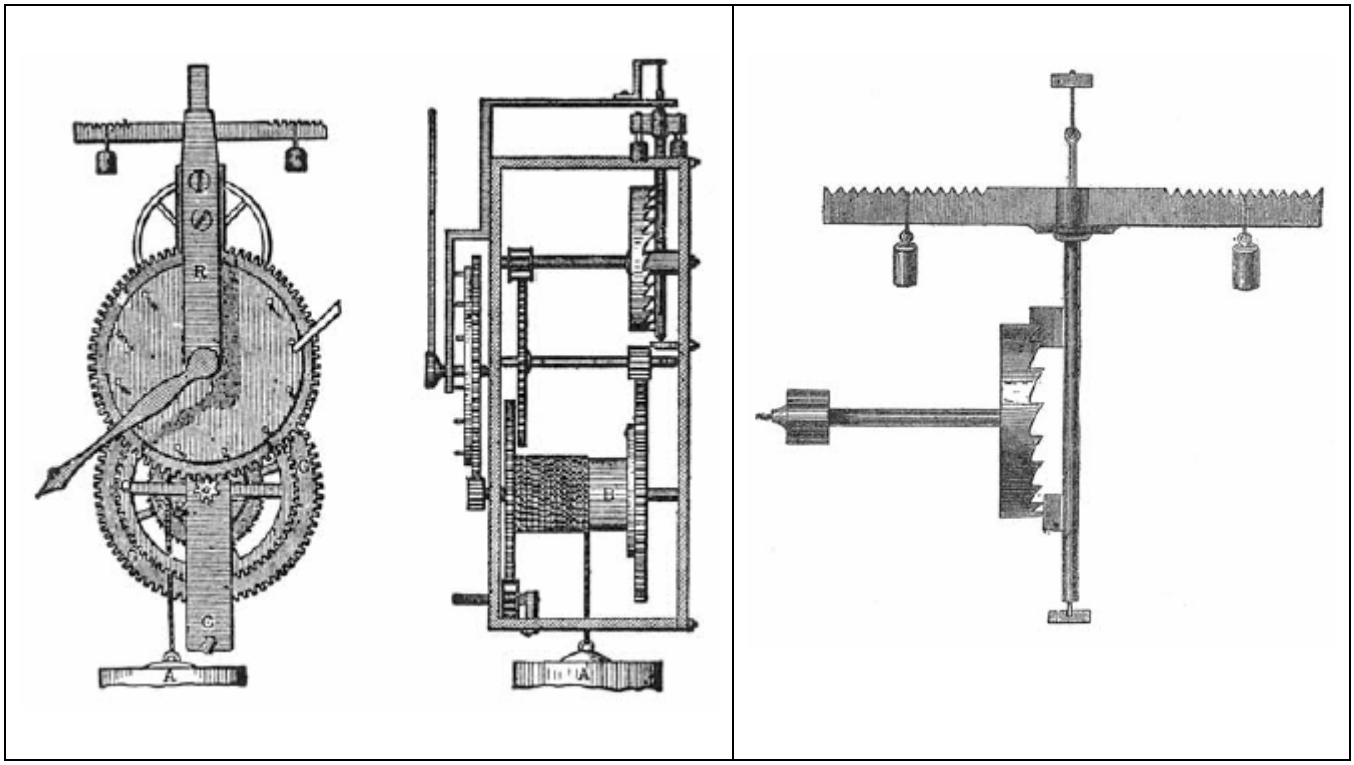


**Fig. Reloj de engranajes con Escape Verge y balancín (a la derecha).**

**Reloj de bolsillo o de saco**. Para hacer funcionar estas pequeñas ruedas no se podía utilizar una pesa. El mecanismo dependía de un **resorte** de acero enrollado de forma espiral, que estaba unido con el engranaje por un barrilete, y lo impulsaba. Los primeros relojes de bolsillo sólo indicaban las horas; todavía no indicaban segundos y minutos; y la mayoría sólo funcionaba durante 12 horas, debiéndoseles dar cuerda; los que indicaron segundos y minutos aparecieron más tarde con C. Huygens. El nuremburgués Peter Hole posiblemente construyó el primer reloj de bolsillo en 1500, llamados Huevos de Nuremberg . El primer reloj de bolsillo se llevó a Inglaterra en 1577.

Los relojes de bolsillo eran en aquella época muy raros y muy valiosos. En Inglaterra el valor de un reloj de bolsillo era de más de 54 libras esterlinas. Poco

después del invento de esta máquina se apreció mucho poseer relojes muy pequeños por ejemplo en botones, cadenas, etc. Esta preferencia duró hasta el siglo XVII.

Entonces los **grandes relojes con balancines** funcionaban irregularmente y en los **relojes a resortes**, la fuerza del resorte disminuía cuando el reloj se iba a parar: la marcha del reloj también disminuía por esto considerablemente; la irregularidad en la marcha de estos relojes era mucho más notoria que en el caso de los de pesas. Para los relojes de bolsillo se inventó el *caracol*, que se unía al resorte, para que corrigiera el impulso irregular del mismo.

Mientras el problema de la longitud tarda en resolverse y los relojes aún no alcanzan la precisión que se iba requiriendo, Galileo intuye el isocronismo del péndulo y Huygens aplica sus beneficios al regulador, como veremos más detalladamente.

En estos momentos de incesante investigación por motivos políticos y económicos la emigración de uno de estos sabios artesanos podía desequilibrar la delicada balanza tecnológica de un país, es por ello que la mayoría trabajaban para las monarquías u otras instituciones regentes. La guerra de los Treinta Años fue en éste aspecto, asi como en otros muchos, la causa de un profundo desequilibrio europeo en la primera mitad del siglo XVII así como lo fue, al final, la revocación del Edicto de Nantes, Huygens por ejemplo, no pudo volver a Francia tras este hecho.

***Christian Huyghens*** fue, como se acaba de comentar, el primero en usar el péndulo como regulador para grandes relojes, en 1657,en vez del balancín o foliot (vendría a ser también una escape del tipo Verge), lo que los dotaba de gran precisión. Los relojes empezaban a ser fiables medidores del tiempo. Algunos años más tarde “descubrió” los cronómetros de bolsillo con resorte espiral para regular la marcha.

La idea la tuvo realmente **Galileo,** a finales del siglo XVI, al observar a simple vista el balanceo de una lámpara en la catedral de Pisa, y parecerle el periodo aproximadamente constante. Además descubrió que al alargar el péndulo sus movimientos eran más lentos, y al acortarlo más veloces. Más tarde lo usó como medida de tiempo para los estudios astronómicos que realizaba, pero, como los movimientos del péndulo colgado libremente sin ningún impulso terminaban por pararse con el tiempo, sólo servía para medir cortos espacios de tiempo. Lo usaron de

todos modos diversos matemáticos y astrónomos. Murió antes de concluir lo que pudo ser el primer intento de reloj de engranajes regulado por un péndulo, aunque no se está completamente seguro, lo que si es seguro es que fue el primer medidor de tiempo regulado por un péndulo. Posteriormente se hicieron relojes de péndulo a partir del mecanismo que construyó Galileo, como se aprecia en la figura.

***Fig. Legado de Galileo y posterior conversión en reloj de péndulo***

***Huygens*** lo consiguió, adjuntó un engranaje, articulándolo con el huso de un reloj de pesas normal, de tal manera que cuando la rueda de avance engranaba con las sustancias elásticas del huso, el péndulo era impulsado hacia un lado, y, después, hacia el contrario, y a consecuencia de la inercia obtenía en cada movimiento nuevo impulso.

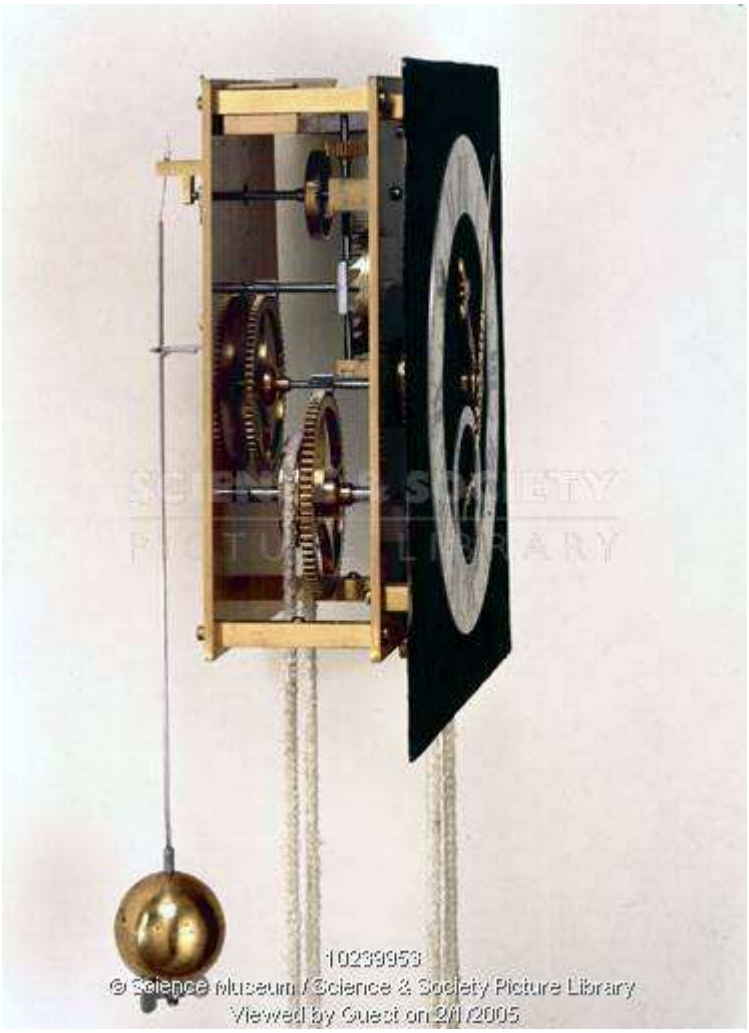



**Fig. Reloj de péndulo de Christiaan Huygens**

El primer reloj de péndulo lo diseño Huygens en Holanda, el 16 de junio de 1657. Lo describió posteriormente con algunas correcciones en su obra **Horologium Oscillatorium** (París, 1673), donde Huygens demuestra algunas y enuncia otras tantas propiedades de la cicloide, entre ellas la tautocronía de dicha curva, propiedad que utilizó para conseguir la isocronía del movimiento del péndulo; también dió una longitud determinada al péndulo para producir un determinado número de movimientos. Así por ejemplo, observó que el péndulo que marcara segundos debía medir 3 pies parisinos y 8 1/2 líneas (aproximadamente 99.42 cm). Cada movimiento era cumplido entonces con ayuda del engranaje en un segundo; en el horario se indicaban las horas, los minutos y segundos. Todo esto se explica con más detalle más adelante.

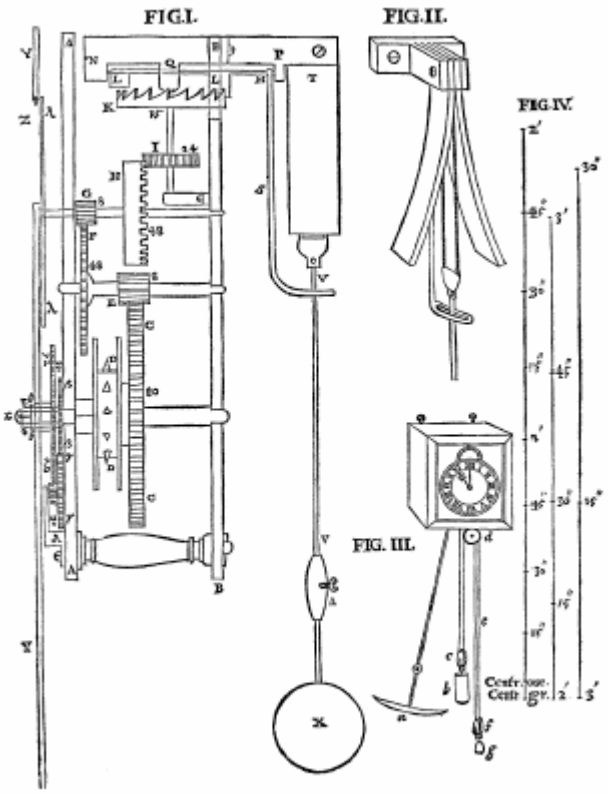



**Fig. Reloj de péndulo de Christiaan Huygens isócrono**

El Reloj de Péndulo de Huygens fue materializado por el relojero, también de la Haya, Salomón Coster, quien patentó el diseño con el consentimiento de su inventor.

Al adjuntar Huygens el péndulo a los relojes grandes, en su primer modelo, observó que los movimientos curvos de gran extensión que recorría, no siempre tenían la misma duración, no eran isócronos, a diferencia de los movimientos sobre chapas cicloides, además el balancín no impulsaba del todo correctamente, lo que le llevo a idear el modelo con chapas cicloidales.. Poco después del invento de Huygens se descubrió que péndulos de una longitud determinada no producían los mismos movimientos curvos en diferentes lugares. Y que, por la forma esferoide de la tierra, se movían más lentamente en el ecuador y en los polos con más velocidad. Era necesaria una cierta corrección en cada lugar y Bernoulli fue quien lo consiguió. Huygens enseñó a encontrar el centro del movimiento del péndulo por medio de ecuaciones. Los artesanos fijaron su atención especialmente en el perfeccionamiento del mecanismo del trinquete, lo que es la rueda de avance de trinquete (rueda

corona,K) y el cilindro de trinquete (eje LM). F. Berthoud tuvo el mérito de enseñar a construir matemáticamente, en la segunda mitad del siglo XVIII, los dientes de las ruedas del trinquete, y gracias a ésto alcanzaron gran exactitud.

Los relojes posteriores usaron el *escape de Áncora* o *Anchor escapemnet*, como se muestra en la figura. Este escape introduce una importante mejora, y es que permite que el ángulo de oscilación sea mucho menor que con el escape Verge, lo cual aumenta la precisión. Se cree que lo inventó Hooke, en 1657, aunque es una fecha poco contrastada, sí se sabe que fue inventado poco después que el reloj de péndulo, posiblemente en el mismo año.

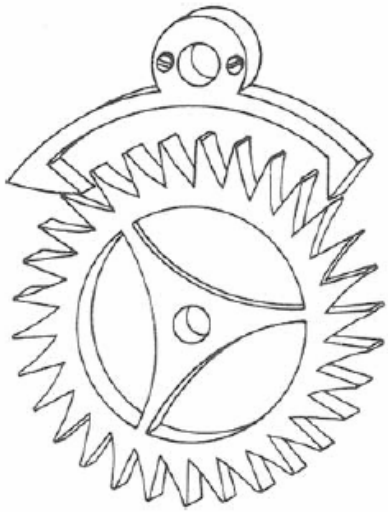


**Fig. Escape de Áncora**

Para los movimientos del **reloj de bolsillo**, se tuvo que encontrar un regulador que pudiese corregir los impulsos irregulares; a mediados del siglo XVII se trabajó mucho para encontrarlo. En 1660 Robert Hooke descubrió su ley de la elasticidad y aplicó un resorte a la rueda balance o de escape de un reloj con escape del tipo Verge, aunque, realmente ya se habían empleado resortes en relojes, dicho resorte sustituía a las pesas en su función impulsora y con muy escasa precisión (Nuremberg). Esta idea, la de aplicar un resorte al escape, fue desarrollada por Huygens y a él se atribuye el invento del primer cronómetro de bolsillo (cronómetro por la precisión que alcanza, llegando a marcar segundos).

Huyghens mandó confeccionar en 1674, su primer reloj de bolsillo con resorte espiral, con el famoso relojero Turet de París.

Los relojeros trabajaron denodadamente en relojes de gran tamaño. El relojero ínglés Mudge inventó el trinquete libre., etc. En el último tercio del siglo XVIII se fabricó el trinquete a partir de mediciones teóricas, gracias a Lagrange y Callet. Varios matemáticos conocidos a fines del siglo XVII se ocuparon de otras piezas del reloj, y pudieron definirlas teóricamente. Tomando en cuenta la profundidad, largo y la redondez de los dientes el danés Römer descubrió que la forma epicicloide es la mejor para las ruedas. Más tarde Euler y Camus lo estudiaron y corroboraron.

Se había observado que la fricción del aire afectaba a las piezas en movimiento, especialmente el péndulo y el balancín, y podía modificar la marcha del reloj. Huygens. trató de disminuir dicha fricción, reduciendo lo más posible la superficie sobre la que accionaba. También se observó que los cambios de temperatura influían mucho en el péndulo y en el resorte espiral, ya que el calor expandía las piezas más sensibles y las detenía, mientras que el frío disminuía su tamaño y las aceleraba. Picard fue el primero que observó en 1669 que los relojes de péndulos funcionaban más lentamente en verano que en el invierno, y que ésto provenía de los cambios de temperatura. Estas inexactitudes tenían importancia en los cálculos astronómicos.

**George Graham** fue el primero que trató de mejorar el péndulo de tal manera, que los cambios de temperatura no produjeran efecto alguno. Lo trató primero utilizando madera. Después llegó, con suerte, a la idea de suprimir el efecto del calor y el frío en los péndulos aleando diferentes metales de distinto grado de expansión o contracción, neutralizarlos entre sí, logrando que se compensen para dejar inalterado el movimiento. El primer péndulo de compensación de este tipo constaba de un tubo de hierro que contenía una cierta cantidad de mercurio. En 1740 hizo otro péndulo de 5 barras de hierro y cuatro de mercurio. Fue llamado péndulo de parrilla. (Pendule à baquelle). Antes de 1738 Graham, Cassini, Short y Ellicot habían tenido ideas de dichos tipos de péndulos. Más tarde se mejoraron en gran medida.

**El problema de la longitud**.

Durante el siglo XVI se desarrolla y perfecciona la denominada "navegación astronómica". La dependencia comercial que iba adquiriendo Europa de sus colonias

en Asia y América hacían de la navegación oceánica no sólo un bello arte, sino una tecnología imprescindible para las grandes potencias marítimas. Cuando se navegaba por el Mediterráneo, en el que es difícil pasar mucho tiempo sin avistar puntos reconocibles de la costa, cualquier marino experimentado no encontraba problema alguno en arribar su nave a buen puerto. Pero las cosas cambiaban al surcar el océano, donde son muy escasas las señales fijas, y la mayoría de ellas sólo pueden ser percibidas por el observador experimentado que ya ha estado allí anteriormente. El vacío y la homogeneidad del mar, la abrumadora monotonía de la superficie de los océanos, hizo que los marineros buscasen instintivamente orientación en el cielo, en el sol, la luna y las estrellas es por ello que la astronomía se convirtiese en auxiliar del marinero, y que la era de los grandes descubrimientos geográficos (Enrique el Navegante, Colón, Elcano) anunciara la era de una nueva astronomía (Copérnico, Kepler, Galileo).

De entre los cuatro elementos clásicos necesarios para el pilotaje de un barco (latitud, longitud , rumbo y distancia), sólo la primera, sin embargo, podía determinarse recurriendo a los astros. Ya en el primer tercio del quinientos se habían propuesto dos procedimientos para obtener la longitud, uno de ellos el empleo de relojes, el otro dependiente de la posición de la Luna. Pero la relojería de la época estaba lejos de poder suministrar máquinas suficientemente exactas y la predicción del complejo movimiento lunar con la puntualidad requerida era algo que por entonces se hallaba fuera del alcance de los astrónomos. De modo que, en el siglo XVI, la cuestión quedó en suspenso, pero no olvidada.

Veamos brevemente, como usar un reloj preciso para medir la longitud, en un fragmento de texto extraído del "Atlas de astronomía", de Joachim Herrmann:

"*Todos los lugares de la Tierra experimentan, a causa de la rotación del planeta, un día de veinticuatro horas por cada vuelta completa de 360º. La Tierra, a medida que gira, hace que sea mediodía en diferentes lugares sucesivamente. Cuando en Estambul es mediodía, en Londres, hacia el oeste, aun faltan dos horas para que el sol alcance la culminación. Podemos afirmar entonces, que Londres se encuentra a treinta grados de longitud, o a dos horas al oeste de Estambul, lo que hace que estos grados de longitud sean a la vez una medida de tiempo y de espacio. Si se pone en hora un reloj lo suficientemente preciso en Londres y se lleva a Estambul, se podrá saber cuán*

*lejos se ha viajado hacia el este comparando la hora del reloj que se ha llevado con la hora local de Estambul, y también se podrá saber a qué distancia, hacia el éste, está Estambul con respecto a Londres*".

Hasta el siglo XVIII, pues, se mantiene el problema, sigue sin exixtir un reloj que se pudiese llevar en un barco y que fuese lo suficientemente preciso, luego el marinero que deseara orientarse entonces tenía que ser un excelente matemático y astrónomo. El modo aceptado de calcular la longitud en el mar era mediante observaciones de la Luna, que requerían instrumentos afinados y cálculos sutiles. Una pequeña equivocación de sólo cinco minutos de arco al observar la Luna se traducía en un error de unos dos grados y medio de longitud, que en el océano podían ser unos 250 kilómetros, más que suficiente para que un barco naufragara en unos traicioneros bancos de arena. Los fatales errores de cálculo podían se producidos por un instrumento rudimentario, por un error en las tablas náuticas o por el mismo balanceo del barco.

Las soluciones fallidas más conocidas:

***-. Galileo y los satélites de Júpiter.***

Galileo recibió información de un premio de cien mil florines que los Estados Generales de la Provincias Unidas de los Países Bajos habían convocado con objeto de resolver el urgente problema de la longitud. El sabio italiano indicó en 1610 a los Estados Generales que la longitud podía ser determinada en el mar mediante la observación de los cuatro satélites de Júpiter que él había descubierto aquel mismo año.

Este método demostró con el tiempo su utilidad para la topografía, pero nunca fue eficaz para el mar. Galileo recomendó finalmente la creación de un reloj exacto para el mar. Después de descubrir que el péndulo era un sencillo mecanismo natural para medir el tiempo, Galileo pensó que tal vez podría proporcionar un reloj marino exacto. Sólo cuando se encontraba en el retiro forzoso de sus diez últimos años de vida, Galileo exploró esta posibilidad, y la ceguera le impidió entonces acabar el reloj que estaba diseñando.

***-. El reloj marino de huygens***

Los holandeses, que para aquella época tenían avanzadas hacia el Este, en las costas de Asia, sentían más que nunca la necesidad de definir mejor la longitud y de contar con un reloj marino. Christiaan Huygens lo intentó una y otra vez desde los veintisiete años, cuando concibió su primer reloj de péndulo, pero pronto se dio cuenta, orientado por Hooke, que un péndulo no podía medir el tiempo con precisión en un barco que se balanceaba en las olas y que el mecanismo que habría de regir el funcionamiento de un reloj marino tenía que ser independiente de la fuerza de la gravedad. Nunca lo logró del todo.

---- o ----

Ansiosos de una solución por la humillación sufrida por la marina británica en el hundimiento de una flota de barcos en 1707, en unas rocas de las islas Scilly, en la costa sudoeste de Inglaterra, en 1714, el Parlamento de Inglaterra aprobó una ley para proporcionar una pública recompensa a aquella persona o personas que solucionaran *el Problema de la Longitud en el Mar*. Crearon un consejo de la Longitud, que incluía navegantes y sabios, y otorgaba sumas de hasta dos mil libras para apoyar experimentos prometedores y estableció un premio que estipulaba que en un viaje de ida y vuelta a un puerto americano se concederían 10.000 libras al que obtuviese una precisión de un grado, 15.000 si lo era de sólo dos tercios y 20.000 si se conseguía de sólo medio grado.

Era, sin duda, una invitación a los excéntricos. Una de las propuestas fue la de situar por todo el mundo barcos hundidos en emplazamientos conocidos, y enviar señales desde ellos. Se propuso también que se publicara una tabla de mareas universal, para que luego un marinero pudiese, utilizando un barómetro portátil, determinar su posición según el esperado crecimiento y descenso de la marea en aquel lugar. Otro sugirió que se usaran faros para transmitir las necesarias señales de tiempo sobre las nubes. Muchos afirmaron que tenían técnicas que no se atrevían a revelar públicamente por temor a que otro obtuviese el premio. Los manicomios se vieron invadidos de internos que trataban de resolver el problema de la Longitud.

La solución del problema de la longitud.

Parece ser que el arquitecto italiano Brunelleschi fabricó un reloj impulsado por un resorte alrededor del año 1410. Sin embargo, fue Robert Hook (1635-1703) quien conjeturó en 1658, cuando sólo tenía veintitrés años, que el regulador de un reloj marino podía basarse en el uso de resortes en lugar de la gravedad, para conseguir que un cuerpo vibre en cualquier postura. Esta intuición crucial haría posible la creación de un reloj marino.

Los honores de crear un reloj marino lo suficientemente preciso para ganar el premio convocado por el Consejo de la Longitud inglés, correspondieron a John Harrison (1693-1776), hijo de un carpintero de Yorkshire. En 1728, Harrison presentó los planos de un cronómetro marino controlado por un resorte al famoso fabricante de instrumentos londinense George Graham, consiguiendo ayuda económica de éste para emprender su construcción.

El reloj fue probado en un viaje a Lisboa, en 1736, con resultados bastante aceptables. El premio inglés, sin embargo, estipulaba que las pruebas debían efectuarse en el trayecto de ida y vuelta a las indias occidentales. Harrison construye sus cronómetros números dos y tres, el último de los cuales fue ensayado en un viaje de Portsmouth a Jamaica, a bordo del Deptford, a finales de 1761. Los resultados son buenos, pues el error cometido tras los 81 días de prueba es menor de un tercio de grado. No obstante, el Consejo de la Longitud se resiste a concederle el premio, exigiendo un nuevo viaje de prueba y la exposición, ante un comité de expertos, de los principios de su reloj. El viaje se efectuaría en 1764, a la isla de Barbados, a bordo del Tartar, también con buenos resultados y al año siguiente, Harrison explicó la construcción de su reloj. Pero todavía se le exigió una nueva prueba de su marcha en el Observatorio de Greenwich, a cargo del astrónomo Nevil Maskelyne. Las discrepancias entre el relojero y el astrónomo sobre el procedimiento a seguir para controlar la marcha del reloj retrasarán la entrega del premio hasta 1773.

Estos sólo fueron los primeros pasos de la cronometría de longitudes; era todavía preciso dar el salto desde la construcción de estos primeros y costosos relojes a una producción más masiva, algo que se produciría con rapidez, sobre todo en Inglaterra, aunque los marineros siguieron empleando durante unos cuantos años más el método lunar, lleno de engorrosos cálculos matemáticos, que había mejorado su

precisión, en parte por la disposición de mejores tablas, y en parte por la mejora de los instrumentos de medida.

**La horologia en España**

En la historia de la horología en España a partir del siglo XVI, que es cuando los relojes empiezan a tener rigor científico, destaca el Lombardo Juanelo Turriano, relojero, matemático e ingeniero, que vino a España a instancias de Carlos I. Destacó entre otras muchas cosas por los relojes planetarios, que permitían conocer el lugar de los cuerpos celestes, instrumento que para su fabricación y diseño precisaban a la vez, de mucha sabiduría y gran ingenio.

El obrador de Turriano en Yuste, durante el retiro del Emperador, puede considerarse como el primero de los Talleres Reales.

Felipe II, con ese su bendito afán de orden y constancia, encarga a Juanelo escribir varios libros sobre ingenios y máquinas, pues éste pasó a su servicio como parte importante de la herencia Imperial. Dedicó la última parte de su vida a construir los famosos artificios de Toledo que elevaban el agua del Tajo al Alcázar. Allí murió en 1585.

Es Felipe III quien primero se lanza en la «carrera tecnológica», ofreciendo un cuantioso premio de 6.000 ducados de renta perpetua, 2.000 más de renta vitalicia y otros 1.000 de ayuda de costa para quien fuese capaz de fabricar el reloj que sirviera para determinar la longitud en la mar, vital para una nación oceánica como la nuestra.

En el reinado de Felipe IV son varios los nombramiento de relojero de Cámara, junto con su esposa, Mariana de Austria, fueron grandes coleccionistas, en especial ella, que no se separaba de sus queridos relojes ni en los lienzos de los retratos oficiales.

En el siglo XVII la colección Real se acrecentó con la adquisición de piezas de gran interés que la testamentería de Carlos II nos describe, algunas de ellas importadas de París, Inglaterra, Alemania y Nápoles.

El advenimiento de la nueva dinastía coincide con el siglo de las luces, tras el minuto, conquistado por el péndulo, se persigue afanosamente el segundo a través de escapes cada vez más libres, la reducción de roces y compensaciones térmicas. Es la gran era de la ciencia relojera, de la técnica arropada por las artes llamadas aplicadas. Del esplendor, la opulencia, calidad y belleza. El buen gusto aliado al «saber vivir», al disfrute de la elegancia en los interiores, finalmente a medida del hombre. Pero el factor básico se debe al sistema gremial, que supedita hasta la Revolución Francesa toda actividad artesana.

Es tal su severidad de criterio y exigencia, que garantiza un nivel de calidad realmente incomprensible hoy en día. Por ejemplo, «La Compañía Inglesa de Relojeros», fundada en 1631 por el Rey Carlos I, se reservaba el derecho a perseguir y destruir por la fuerza aquellas piezas de nivel insuficiente, para proteger al público de personas «que construyan, vendan, compren, transporten o importen, cualquier reloj, cuadrante solar, despertador, caja o estuche de mala o insuficiente calidad...».

Al reloj se le exige ya que sea bueno, bonito y divertido; que el repiqueteo de las horas sea una armonía; las grandes sonerías, un recital; los organillos, una orquesta, y que los autómatas se agiten, bailen, trinen o actúen.

En España, el siglo XVIII comienza con la llegada a la Corte de Felipe V, nieto del Rey de Francia Luís XIV y primer Monarca de la dinastía de Borbón. Con su llegada se produce un florecimiento de las artes decorativas e industriales, así se crea la Real Fábrica de Tapices, perdurable hasta nuestros días, y la Escuela-Fábrica de Relojería de San Bernardino, bajo la dirección del relojero francés Bourgois. Ambas escuelas fueron lugar de aprendizaje de los más renombrados relojeros de la segunda mitad del siglo XVIII y principios del XIX.

Por voluntad Real vinieron grandes artífices extranjeros, que, junto a los españoles, prestaron su servicio en la Corte. Destacamos entre ellos: Thomas Hatton, que vino de Londres al servicio de Felipe V, Fernando van Ceulen, de procedencia holandesa y de una familia de gran tradición relojera (Jannes van Ceulen ya estuvo asociado con el famoso Huygens, en La Haya, en 1660), fue Relojero de Cámara en 1740.

Durante el reinado de Fernando VI, y debido a su preocupación e interés por el fomento de la Relojería en España, así como por la manutención de la colección Real, se envían a Suiza, Francia e Inglaterra a varios artífices españoles para que estudien con los mejores maestros.

En 1759 comienza el reinado de Carlos III, el Monarca que impulsó al reformismo nacido del espíritu de la Ilustración e introdujo las ciencias aplicadas y experimentales en nuestro país.

En 1788, Carlos III aprueba la creación de la Real Fábrica de Relojería, dirigida por el presbítero Vicente Sion y con Abrabam Matthey como maestro principal.

Carlos IV fue un gran coleccionista de relojes, con una afición poco corriente. Cuando dejó España en 1808, se ocupó personalmente de su traslado. Poseía millares de pequeño tamaño y centenares de sobremesa. No es de extrañar que François Louis Godon, que estaba a su servicio, fuera comisionado en París con objeto de adquirir las mejores piezas del mercado francés.

Al iniciar su reinado Fernando VII en 1814, aceptó la usual plantilla de cuatro Relojeros de Cámara: Félix Bausac, Camilo Fernández Perea, Francisco Ribera y Manuel de Rivas.

Recorrido el siglo XIX, por lo menos hasta su ecuador, la tecnología relojera alcanza su más alta cúspide a costa de cierta frialdad, que será en adelante irreversible algidez. Al fugaz segundo se le arrancan fracciones inimaginables y las tolerancias se reducen a límites insospechados. Cada rueda es una joya; cada piñón, cada tornillo, una filigrana. Nunca tantos debieron tanto a tan poco, pues a la vuelta de la esquina se halla el reloj al alcance de todos.

La historia del reloj es anacrónica del ingenio humano. El reloj mecánico es el mecanismo puro, la máquina excelsa. Todos los ingenios y artilugios que hicieron realidad la automatización, derivan de este primitivo mecanismo.

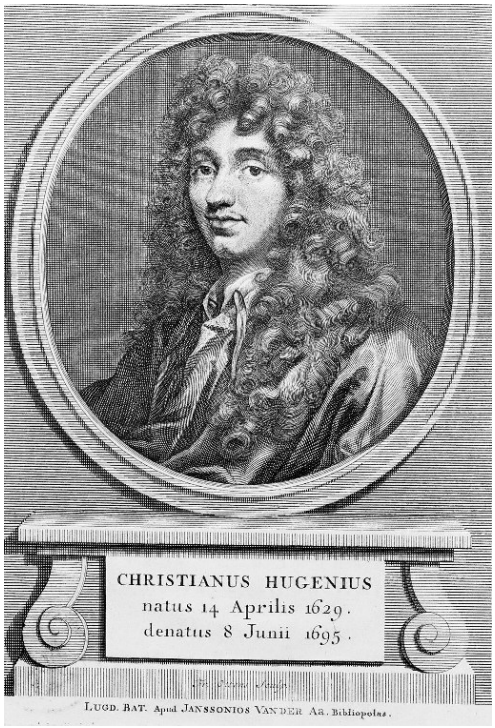
## *2.1 Cuadro Resumen de la evolución histórica de la horología*

| | **Hitos a destacar** |
|---|---|
| **Tiempos antiguos** | Se usa para medir el tiempo:<br>• Amanecer, cenit y caída del sol<br>• Relojes de Sol o Gnomons<br>• Relojes de arena.<br>• Caldeos, egipcios y chinos ya usan relojes de agua, también se inventan los relojes de agua astronómicos. |
| **s. X y XI** | • Se mejoran los relojes de sol, sobretodo en Alemania<br>• Primeras relojes de engranajes (monasterios) |
| **s. XII, XIII y XIV** | • s. XIII y XIV, la relojería se convierte en oficio libre y los relojes de engranajes salen de los monasterios.<br>• s. XIV, los monjes ya usan los relojes de engranajes como despertadores.<br>• 1410, Brunelleschi fabrica el primer reloj impulsado por un resorte, aunque con escaso éxito. |
| **s. XVI** | • 1500, Meter Hole (Nuremberg) construye el primer reloj de bolsillo (impulsado por resorte). Solo marca horas.<br>• Se siguen desarrollando los relojes de sol, de agua y de arena, llegando a ser muy complejos .<br>• Comienza el interés por la exactitud en la medida del tiempo, motivado por avances estratégicos → se plantea *El Problema de la Longitud*<br>• Como consecuencia de lo anterior: Se inventa el reloj lunar y los de estrellas o astronómicos.<br>• A finales de siglo, Galileo intuye el isocronismo del péndulo. |
| **s. XVII** | • Los sabios se dedican a estudiar los relojes de engranajes.<br>• en 1657 Huygens aplica el péndulo como regulador al reloj de engranajes.<br>• 1657 aprox., Hooke inventa el Escape de Áncora.<br>• 1660, Hooke descubre la Ley de la Elasticidad.<br>• 1674,Hooke-Huygens, primer cronómetro de bolsillo con resorte en el escape.<br>• Múltiples intentos por resolver *El problema de la Longitud* |

| | **Hitos a destacar** |
|---|---|
| **s. XVIII** | • Aunque en desuso, se mejoró aún más el reloj de sol.<br>• Relojeros y matemáticos de dedican al perfeccionamiento de los grandes relojes: perfiles de dientes, péndulo de compensación de Graham.<br>• 1773, John Harrison resuelve oficialmente *el Problema de la Longitud* |
| **s. XIX** | La tecnología relojera llega a lo más alto a costa de cierta frialdad. Se alcanza una precisión inimaginable años atrás |

Se ha resaltado el siglo XVII en el cuadro, porque es en él cuando se produce el punto de inflexión hacia la horología de precisión, aunque sea el próximo siglo cuando se resuelva el problema de la longitud.

# 3 CHRISTIAAN HUYGENS




Christiaan Huygens es uno de los personajes centrales de la Revolución Científica del siglo XVII, junto a Francis Bacon, René Descartes, Galileo Galilei e Isaac Newton. Físico, matemático y astrónomo holandés, nació en La Haya el 14 de Abril de 1629, en el seno de una familia del más alto rango político en la naciente república de la Holanda Unida: su abuelo, secretario de Guillermo de Orange, y su padre, Constantijn, delicado poeta y encumbrado diplomático. René Descartes, amigo personal de su padre, vaticinó desde muy temprano la excelencia del joven Christiaan en matemática, y el Mínimo Marin Mersenne anunció que habría de sobrepasar al mismo Arquímedes, figura tutelar de las ciencias exactas en la época.

Su padre educó personalmente a Christiaan para la carrera diplomática al servicio de la Casa de Orange. Sin embargo, a la muerte de Guillermo II de Orange se inició un período de 22 años sin “Stadhouder” (estatúder, jefe o magistrado superior de la antigua república de los Países Bajos) en el que la influencia política de la familia Huygens declinó. Christiaan abandonó así de antemano la carrera diplomática para la que había sido entrenado. De manera simultánea —tal vez por influencia de Descartes y Mersenne— su padre hizo que su “joven Arquímedes” estudiara matemática con Stampioen y con Frans Van Shooten, el traductor latino de La Géométrie de Descartes. Christiaan se dedicó entonces de lleno a estudiar óptica, mecánica y matemática.

Su visita a París en 1655 marcó un cambio radical en su vida, como en la de muchos otros científicos de su tiempo. Dos años después inventa el primer reloj de péndulo, observa por vez primera las fases del anillo de Saturno y descubre el primero de sus satélites. Entonces su fama crece y, tras dos viajes a París en 1660 y 1663, es nombrado Fellow of the Royal Society of London. Francia lo invita entonces a organizar la Académie Royale des Sciences de Paris, para pasar a formar parte del

proyecto ambicioso que Colbert lleva a cabo con decisión e inteligencia a partir de 1666. Huygens pasa a integrarse así en la vida francesa. Reside en la Bibliothèque Royale en el palacio del Louvre, y recibe el sueldo más elevado que Luís XIV otorgó a sus científicos.

Inspirado en Francis Bacon, Huygens desarrolla un programa de investigación en el que la matemática, la mecánica y la técnica se combinan con cuestiones más generales y filosóficas acerca de la naturaleza y la materia, así proyecta por un lado, el estudio del vacío en la bomba neumática, perfeccionando la creada por Von Guericke, la determinación del peso del aire, las propiedades de la “fuerza” de la pólvora y del vapor condensado y, por el otro, escribe sobre la causa de la gravedad y plantea la primera teoría ondulatoria moderna de la luz.

Las contribuciones de Huygens a la Astronomía son muchas y muy importantes tanto a nivel técnico como de investigación. A los 25 años empieza a pulir lentes, ayudado por su hermano y acabó perfeccionando el ocular del telescopio de Kepler .

En la primavera de 1655 Huygens descubre Titán, el mayor y más brillante satélite de Saturno, un satélite muy especial pues es el segundo más grande del Sistema Solar y el único satélite que posee atmósfera como fuera descubierto en 1944. Saturno posee un gran número de satélites que hoy totalizan 30 y Huygens con su telescopio pudo fácilmente haber descubierto varios satélites más, pero una idea preconcebida se lo impidió: pensó que el número de satélites en el sistema solar no podía superar al número de planetas. Así, con Titán, el sexto satélite, se completaba el número.

Sin embargo, sus estudios sobre Saturno sí le permitieron desentrañar la verdadera naturaleza del cuerpo triple del planeta. Observaciones de Saturno hechas por Huygens en el invierno de 1655/1656 le permitieron explicarlo como un planeta rodeado por un anillo que lo circunda en su plano ecuatorial, de gran extensión radial pero muy delgado y que no toca al planeta en ninguna parte.

En el año de 1656, descubrió la nebulosa de Orión, una de las nebulosas gaseosas más brillantes que se pueden contemplar en el cielo. Este fue un descubrimiento muy importante pues sólo se conocía otra nebulosa, la nebulosa de Andrómeda.

Con su refractor Huygens también estudió el planeta Marte, descubriendo manchas oscuras sobre el disco del planeta, que le permitieron comprobar que el período de rotación no se aparta demasiado de 24 horas. También detectó los casquetes polares marcianos.

En 1656 inventó, patentado en 1657 por Salomón Coster, el reloj de péndulo, tras agregar un péndulo a un reloj impulsado por pesas, de modo que el reloj mantiene en movimiento al péndulo y éste regula la marcha de aquel. En 1673 publicó su obra “Horologium Oscillatorium”, en la que presenta importantes aspectos de la teoría del péndulo. Presenta la fórmula del péndulo:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

la cual constituye un método práctico para medir la aceleración de la gravedad y sus variaciones con la altura y la latitud. Construyó luego un cronómetro portátil, basado en la doble suspensión del péndulo entre chapas cicloidales, destinado a facilitar a los marinos la determinación de la longitud geográfica en el mar, pero no tuvo éxito.

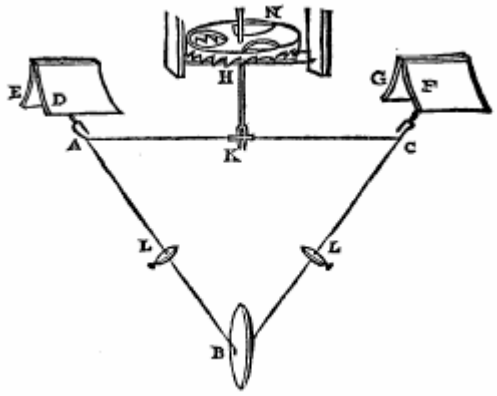



**Fig. Péndulo del cronómetro marino de Huygens**

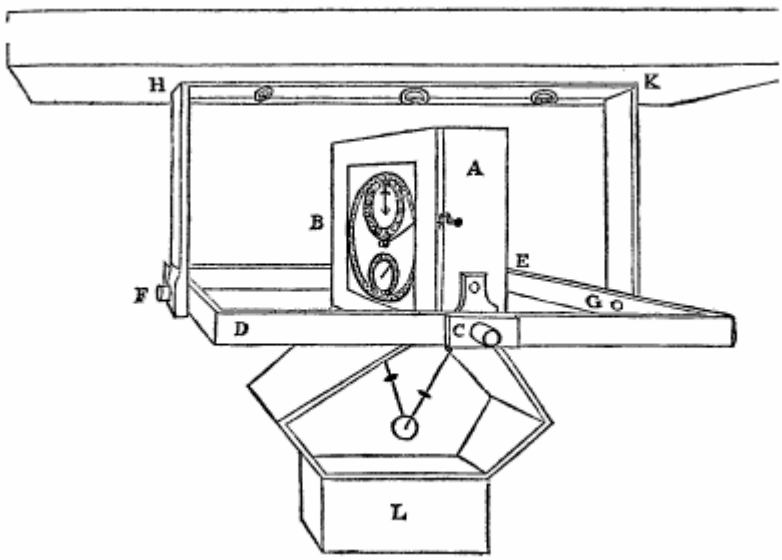



**Fig. Cronómetro marino de Huygens**

Es considerado por muchos el inventor del escape con resorte espiral, en 1674, en seria competencia con Hooke, creando el primer reloj-cronómetro de bolsillo en esta fecha.

A pesar del estallido de la guerra entre Holanda y Francia en 1672, y a despecho de su condición religiosa —Huygens era un calvinista en medio de la Francia del Mars Christianissimus—, permanece en París y en 1673 le dedica a Luís XIV su obra principal, Horologium Oscillatorium, en la que se plantean los principios de la mecánica racional.

En 1681 regresa a Holanda debido a su frágil salud y en 1683 muere su protector en Francia, Colbert, con lo que la Académie entró en un período de estancamiento. La revocación del Edicto de Nantes en 1685 lo hace desistir de regresar a París, pues se desata una persecución religiosa en contra de los protestantes.

Vive sus últimos años en su patria con ingresos de su familia y muere en su ciudad natal el 5 de Junio de 1695. Se ignora la naturaleza del padecimiento que acompañó a Huygens toda su vida, pero se sabe que se manifestaba en forma de una profunda depresión y angustia.

Los manuscritos de sus obras y cartas están en las bibliotecas de las universidades de Leiden y Amsterdam. En vida publicó “Horologium” (La Haya, 1659); “Systema Saturnium, sive de Causis mirandorum Saturni phaenomenon” (La Haya, 1659); el mencionado “Horologium oscillatorium” (París, 1673); “Astroscopia compendiaria” (La Haya, 1684) y el famoso libro de óptica “Traité de la Lumière” (escrito en Francia y publicado en La Haya, 1690).

Muchos de sus manuscritos fueron dados a conocer con la edición de Burchard de Volder de sus “Opuscula postuma” (Leiden, 1703). La Société Hollandaise des Sciences inició la edición de las “Oeuvres Complètes” de Christiaan Huygens en 1888 pero, por avatares de las dos guerras europeas, sólo pudo completarse en 1950. En ella participaron los mejores especialistas en historia de la ciencia europea.

## *3.1 Horologium Oscillatorium:*

## ***El reloj de péndulo de Christiaan Huygens***

El “Horologium Oscillatorium” o “The Pendulum Clock” en su traducción al inglés, como se ha comentado ya varias veces, es la obra cumbre de Christiaan Huygens, en la que describe el primer reloj de péndulo isócrono y estudias las propiedades de la cicloide y las curvas en general. Está compuesto de 5 partes:

I. Una descripción del Reloj de Péndulo

II. La caída libre de cuerpos y su movimiento sobre la cicloide.

III. La Evolvente y dimensiones de líneas curvas.

IV. El Centro de Oscilación.

V. Otra construcción del reloj en la cual el movimiento del péndulo es circular y también enuncia algunos Teoremas sobre la Fuerza Centrífuga.

Veamos de que tratan las tres primeras partes, que son las que al presente Proyecto conciernen.

En la 1ª Parte, describe el funcionamiento de el Reloj de Péndulo Isócrono. En resumen, el péndulo está unido a un mecanismo de escape, el cual , con su

movimiento alternativo, bloquea y libera la rueda de escape o rueda corona (crown wheel), con este mecanismo se regula el movimiento que el tren de engranajes transmiten a las agujas del reloj y se frena el escape de la energía potencial que transmiten las pesas al tren y a su vez, en este proceso de regulación interna, la rueda de escape transmite en su alternativo golpeo, cierta cantidad de energía al péndulo para compensar las pérdidas debidas a la fricción, así el péndulo continua oscilando continuamente hasta que las pesas cesen en su caída, con lo que bastaría volverlas a situar en su posición inicial para “darle cuerda” al reloj .

Me gustaría resaltar, que este primer capítulo en el que se trata sobre el reloj que se pretende diseñar en este proyecto, consta de 17 páginas, de las cuales, sólo menos de una y media están dedicadas expresamente al reloj en concreto, en las que se habla de las piezas en general que componen el reloj, del número de dientes que tiene cada engranaje, de la velocidad a la que se debe mover cada eje pero nada de la forma y dimensión de cada pieza, con esto quiero resaltar que el dimensionamiento de cada pieza es absolutamente personal y que el diseño ha tratado de ajustarse en la medida de lo posible a el único dibujo que aparece del conjunto en el libro, que es el que a continuación se presenta:

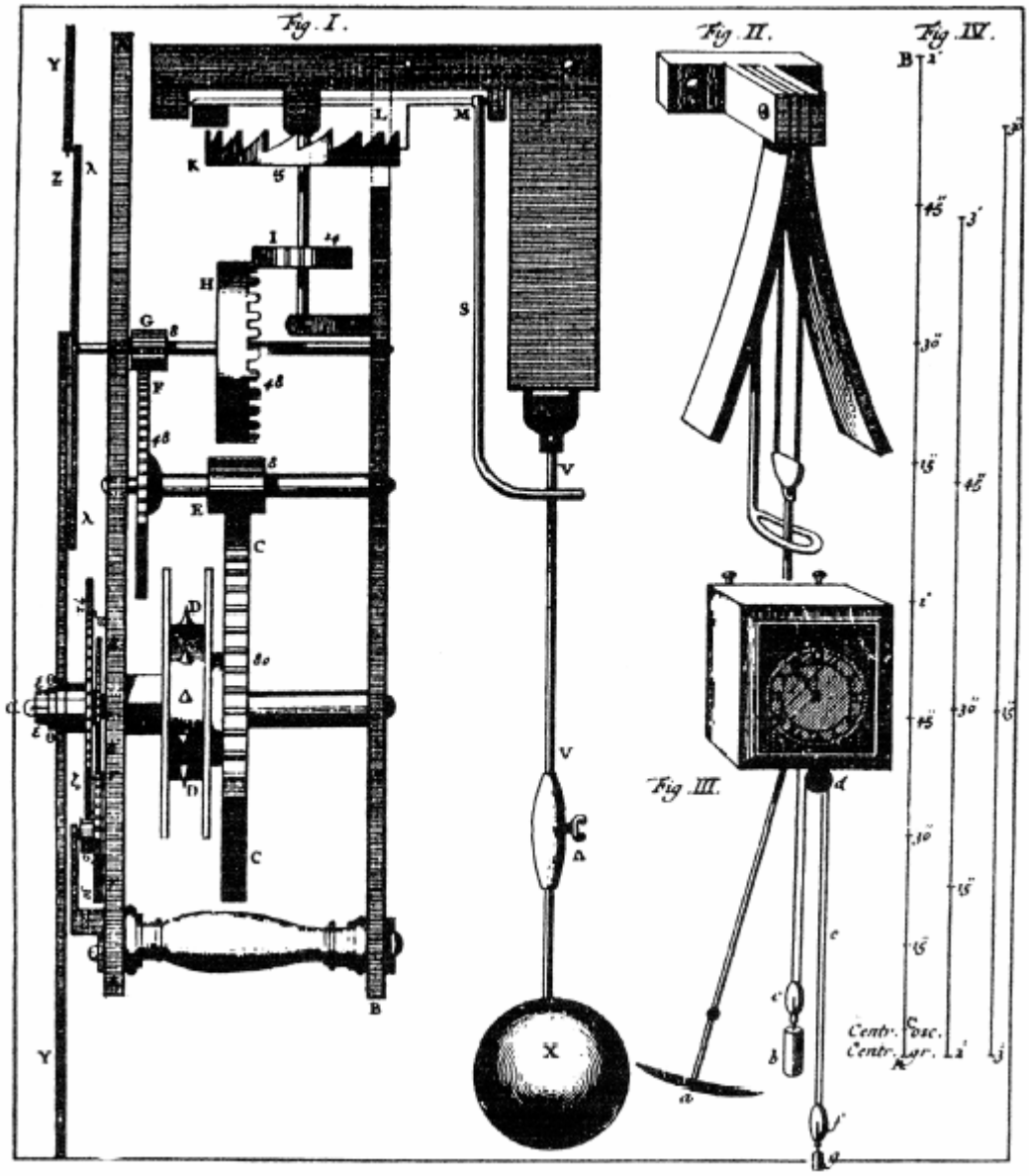



**Fig. Reloj de Péndulo Isócrono de C. Huygens. Grabado extraído del Horologium Oscillatorium**

También resaltar que el libro original se escribió en latín, y en el no aparece el esquema anterior exactamente, sino el que se presenta más adelante, que no tiene aspecto de grabado. Existe una traducción al inglés de la obra, pero escasea. En Sevilla no hay ejemplares de la traducción al inglés ni en la Biblioteca Municipal, ni en las Universitarias, y de la versión original en latín, sólo hay un ejemplar, en la biblioteca de la Facultad de Filosofía.

Vamos a traducir la parte del libro que explica el funcionamiento del reloj:

# *DESCRIPICIÓN DEL RELOJ DE PÉNDULO*

*"AA y BB son dos láminas cuyas esquinas se mantienen unidad por 4 pequeñas columnas. Los ejes de las ruedas principales están insertados en estas láminas , por ambas caras.*

*La primera rueda es la C, tiene 80 dientes y en su eje está también insertada una rueda más pequeña con picos de hierro para poder sostener una cuerda que está atada a las pesas. Así, la rueda C gira por la fuerza de las pesas, haciendo girar al piñón E, que tiene 8 dientes, junto con la rueda F que está fijada al mismo eje y tiene 48 dientes. Esta última mueve otro piñón, el G, y a la rueda H, cuyos números de dientes son los mismos que la anterior rueda y piñón. Los dientes de la rueda H mueven al piñón I junto con la rueda K, situados en un mismo eje perpendicular al anterior. El piñón tiene 24 dientes y la rueda 15, los cuales tienen forma de diente de sierra. Sobre el centro de la rueda K, está situado un eje horizontal, el LM, que tiene paletas y cuyos extremos están sostenidos por los gnomons NQ y P, los cuales están fijados a la lámina BB. Resaltar que en el gnomon NQ, la parte Q se extiende hacia abajo, tiene un agujero pasante a través del cual pasa el eje LM, y junto con el gnomon inferior R, sostiene el eje anteriormente mencionado, común a la rueda K y al piñón I*

*En la lámina BB hay un gran agujero por el cual se extiende el eje LM con la paleta correspondiente, el cual es insertado en el gnomon P en un punto, así el movimiento es mucho más libre que si fuera sostenido primero en BB y otra vez al atravesarla. Debe ser extendido lo suficiente para que la varilla S se pueda fijar a él y ésta pueda girar. Este movimiento es recíproco, primero en una dirección y luego en la otra, porque los dientes de la rueda K alternativamente golpean las paletas LL, como se puede apreciar.*

*La varilla S, cuya parte inferior está doblada, tiene un agujero pasante que rodea a la vara de acero del péndulo, a la cual el cuerpo conductor X está fijado. Esta vara está suspendida desde arriba por una doble cuerda entre 2 finas láminas, de la cuales solo T es visible en el dibujo. Se ha dibujado una figura adyacente [Fig. 1.II] en la cual se muestra la forma y curvatura de cada lámina y la forma de suspender el péndulo"*

En el resto de las 17 páginas se habla, entre otras cosas, de las dimensiones que debe tener el péndulo para que marque segundos, para lo que Huygens se

inventó lo que la llamó “hour foot”. Así el péndulo debía tener 3 “pies horarios”, que teniendo en cuenta que estaban en una relación de 881/864 con los pies parisinos, y que un pié parisino era aproximadamente 32.5 cm., se tiene que el péndulo debía medir unos 99,42 cm., como se dijo anteriormente. También se habla del sistema de pesas que impulsan el reloj, de las chapas cicloidales, de cómo trazar una cicloide , de cómo ajustar el reloj en función de las condiciones atmosféricas y los meses inclusos días del año, mostrando una tabla de lo que atrasaría el reloj cada día, y también plantea su propuesta de reloj marino para medir longitudes y solucionar el problema técnico que más inquietaba a los gobiernos de la época.

Los fundamentos teóricos para conseguir la isocronía del péndulo los enuncia y demuestra en la 2ª y 3ª parte, asi que aprovechemos para recordar dos de estas propiedades:

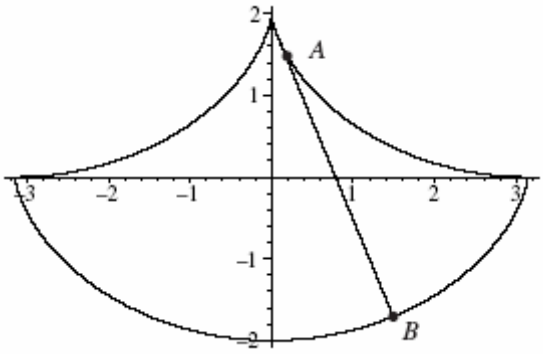
- Tautocronía de la cicloide: si un punto se desplaza a lo largo de la curva invertida, en caída libre, llegará al punto mínimo de la cicloide en un tiempo que no depende del punto desde el que comenzó a caer.

- Isocronía: movimientos isócronos son aquellos que se producen en tiempos iguales

En la 2ª Parte, entre otras cosas, Huygens cuenta como descubrió el tautocronismo de la cicloide cuando buscaba la expresión para el periodo límite de un péndulo simple:

Al adjuntar el péndulo a los relojes grandes, en su primer modelo, observó que los movimientos curvos de gran extensión que recorría, no siempre tenían la misma duración, no eran isócronos, y comprobó que para oscilaciones muy pequeñas el péndulo simple estaba muy próximo al isocronismo, y en su búsqueda, halló que el valor para este ángulo límite era extremadamente pequeño. Encontró que movimientos curvos de corto recorrido constituyen momentos de una cicloide, y posteriormente demostró la tautocronía de la cicloide, lo que implicaba el movimiento isócrono del péndulo, por tanto, para pequeñas oscilaciones

En la 3ª Parte, se dedica a estudiar la evolvente de diferentes curvas, encontrando otra de las sorprendentes propiedades de la cicloide: la evoluta de una cicloide es la misma cicloide desplazada con respecto a la primera (ver figura):




Evoluta (curva base)

Evolvente

**Fig. Evoluta de una cicloide**

Además la suma de la longitud del segmento de normal desde la curva hasta el punto de tangencia con la evoluta mas el arco de evoluta que va desde dicho punto de tangencia hasta su vértice, es constante e igual a 4R.

Huygens aprovechó todas estas propiedades para conseguir la isocronía del péndulo de la siguiente forma: obligó al péndulo a moverse tangente a dos chapas cicloidales, con lo que el extremo describe esa misma cicloide (véanse las dos figuras anteriores) y por tanto una trayectoria tautocrona, lo que se traduce en un movimiento isócrono del mismo, consiguiendo que el péndulo tenga un periodo constante e independiente de la amplitud.

Otra de las propiedades de la cicloide, no usadas en este ingenio, pero que merece ser la pena mencionada, aunque sea brevemente, es la de ser braquistócrona, es decir, la curva de descenso más rápido: si un punto se desplaza en caída libre desde un punto más alto, A, hasta otro más bajo, B, la curva por la que se llega antes al punto B, es la Cicloide.

Este descubrimiento lo planteó también en el siglo XVII Johann Bernouilli, pero la solución al problema la encontraron Newton y Huygens.

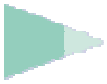
# 4 CATIA V5

Después de haber explicado el funcionamiento del Reloj de Péndulo Isócrono y de las propiedades de la cicloide que Christiaan Huygens aprovechó para conseguir dicha isocronía, pasamos a lo que es el grueso de este proyecto, al diseño mecánico y animación de dicho artilugio, para lo que hemos empleado la herramienta más puntera a tal efecto, CATIA V5, en su revisión número 11.

CATIA V5 es un paquete integrado de CAD/CAM y CAE (Diseño, Fabricación e Ingeniería Asistida por Ordenador) compuesto de numerosos *Módulos* o espacios de trabajo los cuales constan de *Workbenches,* que vendrían a ser programas especializados, que a su vez se componen de diferentes *Paletas* o *Barras de Herramientas.*

No es el propósito de este proyecto el mostrar el funcionamiento de dicha aplicación, pero si haremos un especial hincapié, en el momento de aplicarlos, en los aspectos que creamos que merece la pena resaltar porque no se encuentren en la escasa documentación disponible sobre este programa.

Explicamos brevemente los modulos empledos y para qué:



**Mechanical Design**

Dentro de este espacio de trabajo usaremos las siguientes *Workbenches:*

Parte Design, para diseñar las piezas, auxiliándonos de:

Sketcher, para crear bocetos en 2D, a los que posteriormente damos volumen en el Part Design o en el Generative Shape Design

Assembly Design, donde generamos el ensamblaje

Drafting, para la generación de planos

**Shape Design & Styling**

Donde usaremos:

Generative Shape Design, para la creación de superficies Complejas

**Infraestructura**

Real Time Rendering

Photo Studio

Ambos usados para producir foto realismo, generando escenarios y fotos muy parecidas a las realidad.

**Product Synthesis**

DMU Kinematics Simulator, para generar la recreación virtual del Mecanismo, grabar vídeos…

DMU Navigator, para volar a través del mecanismo y grabar videos de estos vuelos

# 5 PREDIMENSIONAMIENTO

Como se ha explicado previamente, la única información que se dispone del reloj es el único dibujo que aparece en el Horologium Oscillatorium, a parte de la explicación de su funcionamiento que se hace en el mismo, y en cuanto a dimensiones lo único que se detalla en el mismo es el número de dientes de cada engranaje y por otro lado, las dimensiones que debe tener el péndulo para que marque segundos.

En cuanto a dimensionamiento, podemos considerar el reloj en 2 partes bien diferenciadas, lo que sería el tren de engranajes, y lo que sería el péndulo, con las chapas cicloidales y la sujeción (Gnomon P), cuyo dimensionamiento si queda explicado detalladamente en el libro.

## 5.1 Tren de engranajes

- Podemos diferenciar el tren de engranajes del resto porque la relación de velocidades de cada par de ejes que engranan están directamente relacionadas con la relación de los diámetros de las ruedas que engranan y esta a su vez con la relación del número de dientes. Por lo tanto, las distintas velocidades de giro de cada eje, que es lo que realmente nos interesa, porque serán las velocidades de las agujas de nuestro reloj, dependen de la relación del número de dientes y no del tamaño. Veamos esto más detenidamente:

*p = paso*

$$p = \frac{\pi \cdot d}{z}$$

*m = módulo*

$$m = \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z}$$

*d = diámetro primitivo*

*z = número de dientes*

Por otro lado, teniendo en cuenta el principio fundamental de que la transmisión se hace sin deslizamiento, en el punto de contacto se cumplirá:

$$v_1 = v_2 \Rightarrow \omega_1 \cdot d_1 = \omega_2 \cdot d_2$$

y como ruedas que engranan deben tener el mismo módulo (o paso):

$$\omega_1 \cdot z_1 = \omega_2 \cdot z_2 \Rightarrow \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1} = i \equiv relación\ de\ transmisión$$

Entonces observando las expresiones anteriores vemos que, para obtener las relaciones de velocidades que nos interesen, basta con usar engranajes cuyo número de dientes estén en la misma relación (inversa), y el tamaño de estos engranajes estará determinado por el módulo de los mismos, teniendo en cuenta que ruedas que engranan tiene el mismo módulo, pero lo importante, y lo que tenemos que resaltar, es que las relaciones de velocidades no dependen del tamaño.

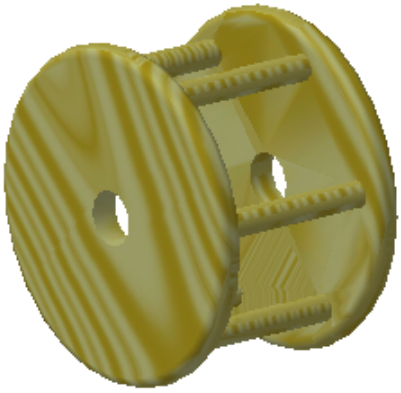
Por otro lado, estéticamente no es adecuado ensamblar un tren de engranajes de, por ejemplo, 1 metro por 1 metro con un péndulo de 1 metro aproximadamente, como es nuestro caso. Por tanto, a priori y groseramente, se ha decidido que el tren de engranajes en su conjunto mida verticalmente un tercio o a lo sumo la mitad de la longitud del péndulo, por tanto suponiendo que el dibujo esté aproximadamente, al menos, proporcionado (suposición que apreciando el resultado final del diseño, resultó ser correcta), estimamos que el diámetro primitivo de la rueda de mayor tamaño, la C, que es de 80 dientes, será de unos 200mm, con lo que tenemos que:

$$m = \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z} = \frac{200\,mm}{80} = 2.5 \Rightarrow 3$$

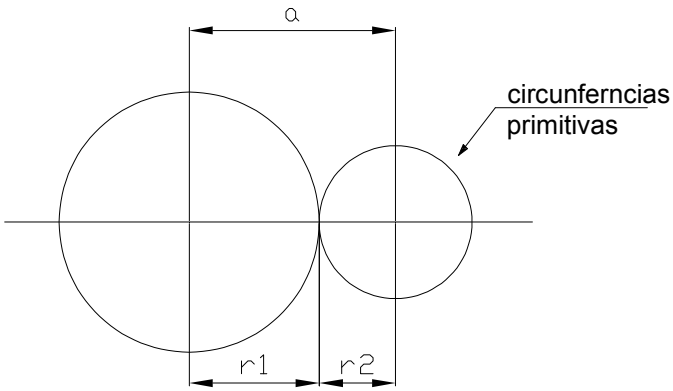
Tomamos pues en principio un módulo para los engranajes de 3, que después variará en algunos casos cuando se realice el dimensionamiento fino y diseño de las distintas piezas.

- Del *ángulo de presión* hablaremos directamente en el dimensionamiento, de momento sólo diremos que ruedas que engranan tienen el mismo ángulo de presión que la misión de los engranajes (ruedas y piñones) de relojes de tamaño pequeño y medio no es otra que transmitir movimiento de un eje a otro a diferente velocidad y no la transmisión de esfuerzos.

- Para el *espesor de los engranajes,* o lo que sería la *longitud del diente*, podría ser cualquiera, con tal que el material resista las cargas y sea capaz de transmitirlas, y como se ha acaba de mencionar, los engranajes no transmiten grandes cargas. Observando el grabado del Horologium Oscillatorium, se aprecia que en cada par de engranajes, el piñón tiene como mínimo, el doble de espesor que la rueda, esto posiblemente es debido a que en la época, los piñones de muy pocos números de dientes estaban formados por dos circulos enfrentados y unidos por barras, que hacían la funcion de dientes, y para alojar a los dientes de la rueda, estos piñones eran mucho mas gruesos; podían ser incluso de madera, por esto quizá Huygens, aunque no usó este tipo de piñon, lo dimensionó como uno de ellos.



- Determinados más finamente los tamaños de los engranajes, como se detalla en el punto 6 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO, la *distancia entre ejes* será la semisuma de los diámetros primitivos:




$$a = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

- Otra decisión tomada y que se ha conseguido mantener hasta el final, es que las láminas AA y BB estén separadas una distancia de 150 mm, siguiendo el criterio citado anteriormente.

El resto de piezas se puede decir que no tienen un predimensionado propiamente dicho, al menos, analítico, porque una vez que se tienen diseñados los diversos engranajes y ruedas especiales, y tengamos pues la distancia entre ejes, se ha procedido diseñando directamente en 3D, en el módulo **Assembly Design,**

### *5.1.1 Eleccion del perfil de los dientes*

La forma de los dientes de un engranaje debe ser tal que el movimiento uniforme de uno de ellos en un par, transmita otro movimiento uniforme al otro, y además debe producirse también una transmisión del movimiento de manera continua. Estas condiciones son cumplidas por varias curvas, como la cicloide, epicicloide, hipocicloide y la evolvente del círculo.

Las tres primeras son, en teoría. las más exactas y se conducen mejor en lo referente a frotamiento y desgaste de los dientes, por ello en la horología moderna, desde bien entrado el siglo XIX, cuando se empezaron a conseguir precisiones de fracciones de segundo, se usa perfil epicicloidal para el perfil de las ruedas (se llama así en horología al engranaje de mayor número de dientes) e hipocicloidal para el perfil de los piñones (igualmente, el engranaje de menor número de dientes).

Pero en la práctica, esta ventaja citada desaparece cuando la distancia entre centros no es mantenida rigurosamente. Adoptando la curva evolvente desaparece este grave inconveniente y el funcionamiento es siempre perfecto aun cuando la distancia entre ejes varíe entre ciertos límites.

Otra de las ventajas de los engranajes con perfil de evolvente es que se pueden trazar con arcos de circunferencia, prescindiendo de su trazado teórico a mano alzada y del consecuente error que ello produce.

Es por todo ello por lo que nos hemos decidido a usar el **trazado de evolvente del perfil de los dientes**, y los resultados con CATIA han sido buenos, no produciéndose contactos ni penetraciones entre los distintos engranajes. Además, la elección es la correcta si queremos hacer un diseño lo mas parecido posible al de la época, pues como se ha reseñado el despege tecnológico y de precisión se produce a partir de bien entrado el siglo XIX, hasta entonces, los engranajes eran de fundición.

# 6 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LAS DIFERENTES PIEZAS

Procedemos al diseño de la piezas que componen el reloj, para lo cual, como ya se a explicado anteriormente, lo primero que diseñaremos serán los engranajes, porque ellos serán lo que determinarán el tamaño del reloj, al estar la distancia entre ejes directamente relacionada con el diámetro primitivo de los mismos.

## 6.1 Engranajes: Ruedas y piñones

Recordando que nos hemos decantado por el perfil de evolvente para los dientes de los engranajes, como hemos explicado en el predimensionamiento, hemos elegido una serie de procedimientos simplificados para su trazado, que sustituyen la curva evolvente del diente por arcos de circunferencia que difieren muy poco del perfil teórico de la curva.

De estos métodos empleados, el básico y en los que el resto se basan es el del **Odontógrafo Grant** . Resaltamos que este método es aproximado pero que satisface completamente los requerimientos de este proyecto y que con él se obtienen resultados satisfactorios, produciendose una transmisión de movimiento continua y sin “choque” ni penetración entre las distintas piezas ( con la excepción de las ruedas H e I, como se explicará posteriormente).

Este trazado sólo se emplea cuando el ángulo de presión es igual a 14.5º o 15º, los valores normalizados comunes. A este respecto hemos de explicar que se para engranajes con número de dientes menor de 25, si mantenemos el ángulo de presión en el valor anterior, resultan dientes debilitados en su raíz, acentuándose el problema cuando el número de dientes se reduce. Este defecto puede hacer inservibles los engranajes con número de dientes reducidos para la transmisión de cargas, pero como ya hemos explicado varias veces, éste no es nuestro caso, los esfuerzos a transmitir son bajos y lo que prima es la transmisión del movimiento de manera uniforme, es por lo que el ángulo de presión elegido para el diseño de nuestros engranajes ha sido 14.5 o 15º siempre que haya sido posible usando este método.

Para engranajes de menos de 10 dientes, los cuales se escapan a la tabla de Grant, se usa otra tabla parecida, que nos ofrece un intervalo del ángulo de presión para un número de dientes dado.

Y por último el 3$^{er}$ caso que se nos da es que el número de dientes de la rueda sea superior al máximo previsto en la tabla anterior para el ángulo de presión previsto.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente mencionado, y que además, ruedas que engranan deben tener el mismo módulo y ángulo de presión, los parámetros y dimensiones de las diferentes ruedas y piñones empleadas quedan reflejados en la siguiente tabla, expresadas todas las dimensiones en milímetros:

| | z | m | α | p | Dp | De | Db | Df | ha | hf | At |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **S** | 6 | 2 | 26 | 6,28 | 12,00 | 16,00 | 10,79 | 7,34 | 2,00 | 2,33 | 4,33 |
| **G y E** | 8 | 3 | 23 | 9,42 | 24,00 | 30,00 | 22,09 | 17,00 | 3,00 | 3,50 | 6,50 |
| **I** | 24 | 2,5 | 14,5 | 7,85 | 60,00 | 65,00 | 58,09 | 54,17 | 2,50 | 2,92 | 5,42 |
| **γ y β** | 30 | 2,6 | 14,5 | 8,17 | 78,00 | 83,20 | 75,52 | 71,94 | 2,60 | 3,03 | 5,63 |
| **F** | 48 | 3 | 23 | 9,42 | 144,00 | 150,00 | 132,55 | 137,00 | 3,00 | 3,50 | 6,50 |
| **ξ** | 72 | 2 | 26 | 6,28 | 144,00 | 148,00 | 129,43 | 139,34 | 2,00 | 2,33 | 4,33 |
| **C** | 80 | 3 | 23 | 9,42 | 240,00 | 246,00 | 220,92 | 233,00 | 3,00 | 3,50 | 6,50 |

(*) se ha llamado S al único piñón de 6 dientes

α = ángulo de presión en º

Dp = diámetro primitivo

De = diámetro exterior

Db = diámetro base

Df = diámetro de fondo

ha = altura de la cabeza del diente a la circunferencia primitiva

hf = altura de fondo, de la circunferencia primitiva a la

At = altura total del diente

Los engranajes del EJE 4, γ y S, y los 2 ultimos del EJE 1, β y ξ, se han tenido que diseñar con módulo 2.6 (no normalizado) porque engranan en ejes paralelos 2 a 2, dichos engranajes deben de cumplir una condicion más a parte de tener mismo módulo, la suma de sus diametros primitivos debe ser la misma, que será el doble de la distancia entre los ejes:

siendo "d" los diámetros primitivos y "m" los módulos

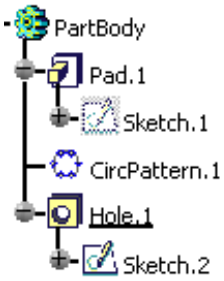
$$m_\gamma = m_\beta = \frac{d_\gamma}{z_\gamma} = \frac{d_\beta}{z_\beta}$$

$$m_\zeta = m_S = \frac{d_\zeta}{z_\zeta} = \frac{d_S}{z_S}$$

$$d_\gamma + d_\beta = d_\zeta + d_S$$

tenemos 3 ecuaciones y 4 inocognitas que son los diámetros primitivos, por lo que tenemos uno con el que dimensionar, he escogido $d_S = 12\ mm$ para obtener valores enteros de los módulos. Los valores para los módulos y diámetros primitivos obtenidos quedan reflejados en la tabla mostrada en la página anterior.

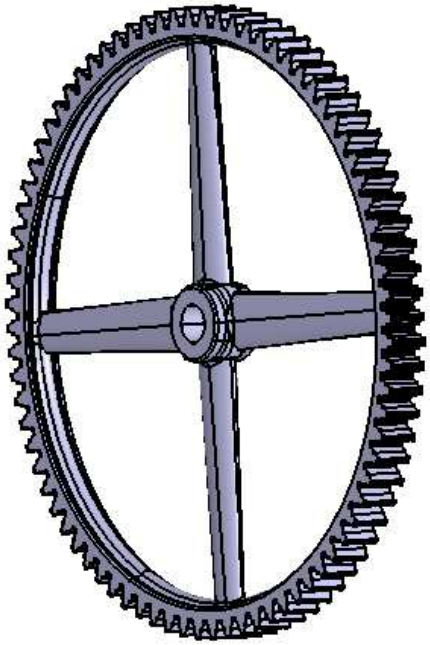
A excepción de los que se engloban dentro de 6.2 Ruedas especiales, el diseño del resto de engranajes es análogo, ateniéndose a los valores de la tabla anterior y todos siguen más o menos este patrón de diseño:

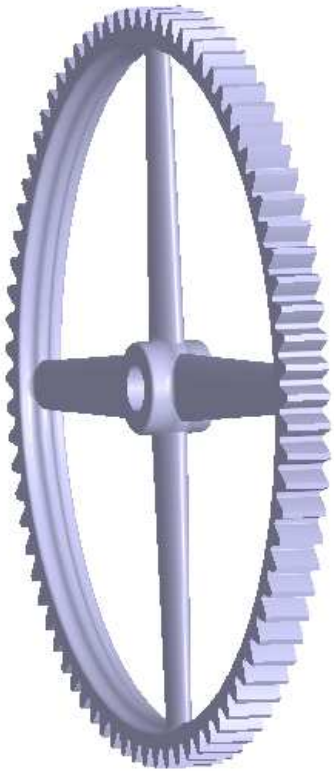



- Un boceto o “Sketch” en el que se traza el perfil de un diente,
- una extrusión o “Pad” de ese boceto,
- Una matriz circular o “Circular Pattern” de la extrusión anterior.
- Y un agujero o “Hole” para alojarse en el eje correspondiente.

Aunque pueda parecer que la rueda C, de 80 dientes es especial, el trazado se sus dientes no tiene nada de particular siguiendo totalmente el patrón anterior, pero al ser la rueda más grande, para aligerar el Eje1, que soporta las pesas y también por

estética pues introduce dinamismo al reloj en su movimiento, se ha diseñado como una rueda con brazos y nervio tanto en la llanta como en el cubo.





## *6.2 Ruedas especiales:*

Hemos considerado como tales a los engranajes que no responden a ninguna topología común.

Se debe resaltar, que hoy en día, las ruedas H e I, que engranan entre si, formarían un par de engranajes cónicos, ya que los ejes de cada engranaje se cortan en un punto, y la prolongación de los dientes deberían cortarse en ese mismo punto. Es por esto por lo que estos 2 engranajes son los únicos que dan problemas de choque y penetración, y por ello, como se aprecia en el dibujo del Horologium Oscillatorium, Huygens los hacia engranar de forma que el contacto entre dientes fuera mínimo, como se aprecia en el extracto mostrado más abajo. Pese a ello se ha decidido mantener el criterio de hacer el diseño lo más fiel posible al que hizo el científico holandés, para obtener un plano lo más parecido posible al que aparece en el citado libro (véase aparado 9. PERFIL DEL RELOJ DISEÑADO:DRAFTING)

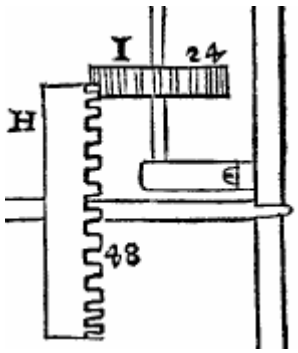



**Fig. Extracto del grabado**

### *6.2.1 Rueda H*

Finalmente, la rueda H ha sido diseñada realizando el engrane en un plano horizontal, según la circunferencia primitiva. Es decir, la circuneferencia mas exterior según el eje 3 sería la de fondo, pero esta circunferencia a su vez la situamos en una circunferencia horizintal, donde realizamos el trazado de los dientes. Es decir, la rueda

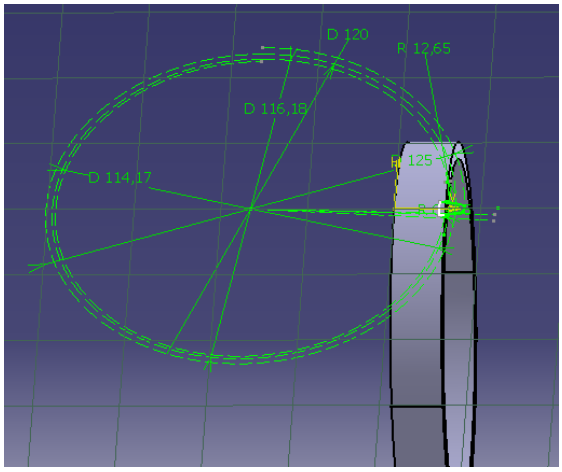
está diseñada como si trazaramos un engranaje recto, cortaramos los dientes por la circunferencia de fondo, y los pegáramos en el lateral.

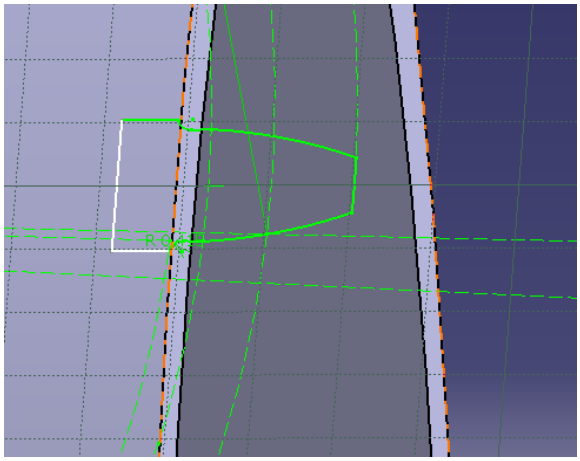
Los parámetros de la rueda H son los siguientes:

| | z | m | α | p | Dp | De | Db | Df | ha | hf | At |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **H** | 48 | 2,5 | 14,5 | 7,85 | 120,00 | 125,00 | 116,18 | 114,17 | 2,50 | 2,92 | 5,42 |

(*) milímetros y grados sexagesimales

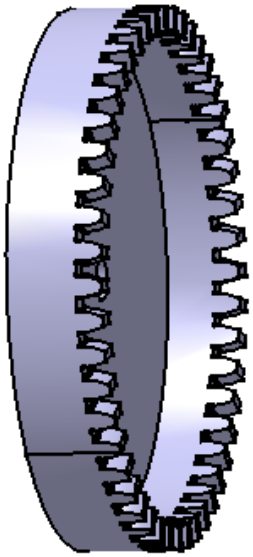
Veamos unas imágenes en lo que se aprecia lo anteriormente explicado:



Después extrusiono hacia el interior. Como el trazado de los dientes se ha realizado en un plano horizontal tangente exteriormente, en dicho plano es donde se producirá mas fiablemente el engrane.

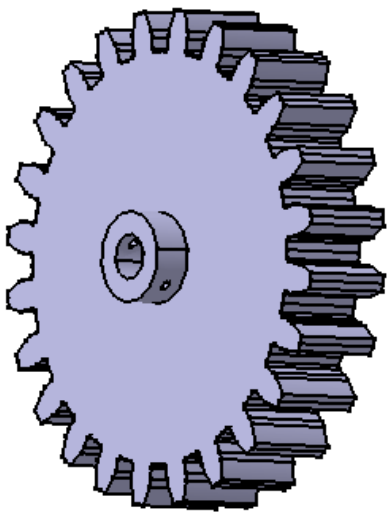
Y el resultado final es el siguiente:



Se ha tenido que diseñar esta rueda y su par, la I, con módulo 2.5 para que cupieran en el hueco que queda antes de la lámina BB. Se podían haber agrandado los ejes , pero para dejar con módulo 3 ambos engranajes, las láminas AA y BB se habrían separado demasiado.

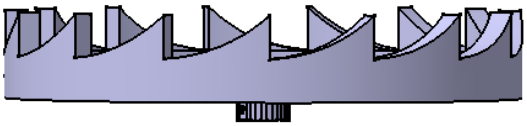
### *6.2.2 Rueda I*

El diseño de esta rueda realmente no tiene nada de especial, pues se ha realizado como el resto de engranajes rectos. Se ha incluido en este apartado de ruedas especiales por el hecho que se ha mencionado al principio. Sus parámetros de diseño se muestran en la tabla del apartado 6.1.



### *6.2.3 Rueda K: Crown Wheel*

Es la que se denomina “rueda corona”, rueda de balance o rueda de escape, y se ha diseñado con los dientes como los de una sierra, como comenta Huygens en su obra.



Además como se puede apreciar, en su parte inferior tiene una base cilíndrica, con un agujero pasante donde aloja un pasador para su fijación al eje.

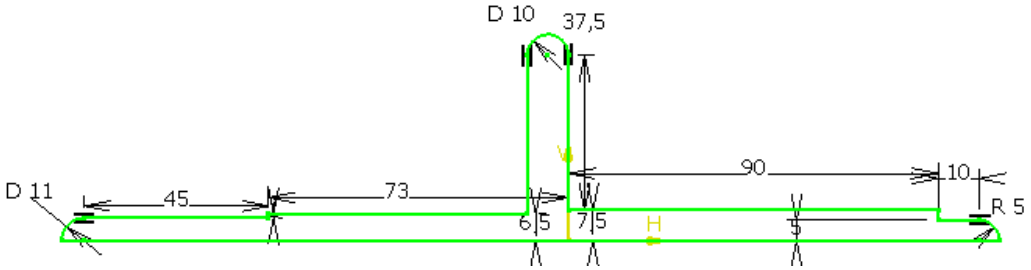
## 6.3 Ejes

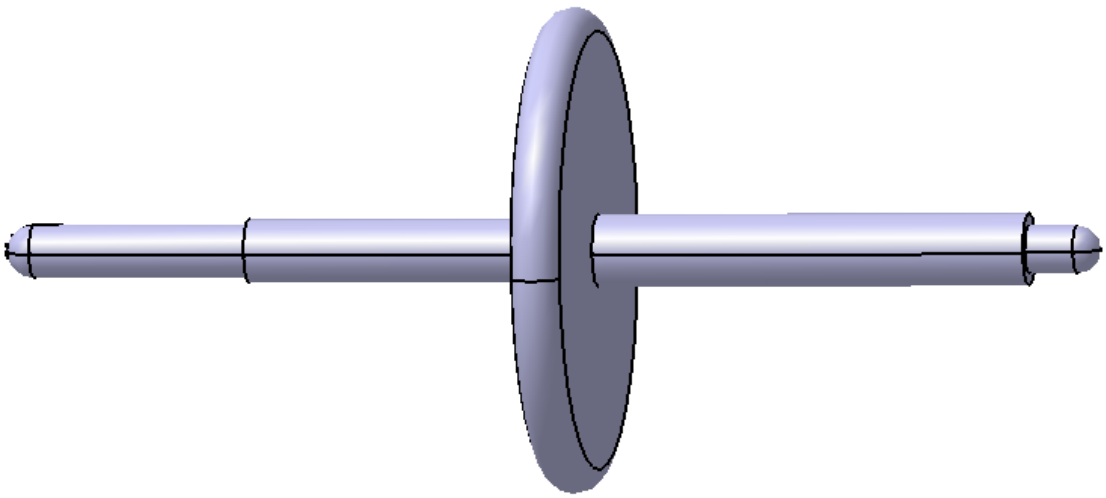
Estan provistos de escalones y topes de distinta forma según se puede apreciar en la información grafica, para alojar y limitar un posible movimiento longitudinal de las ruedas y piñones.

Vamos a insertar con cada imagen en 3D el boceto, a partir del cual, obtenemos cada eje, mediante una revolución ( comando “Shaft” en Part Design ). En tales boceto aparecen acotadas las dimensiones de los ejes.

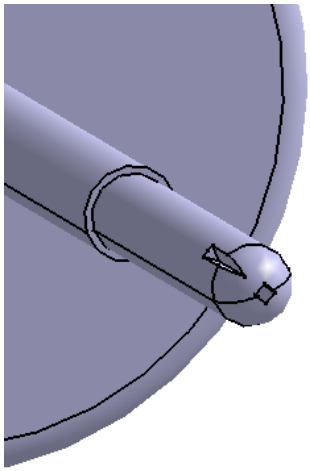
### 6.3.1 Eje 1

Llamamos Eje 1 al que lleva los engranajes C, β y ξ, además de la polea.



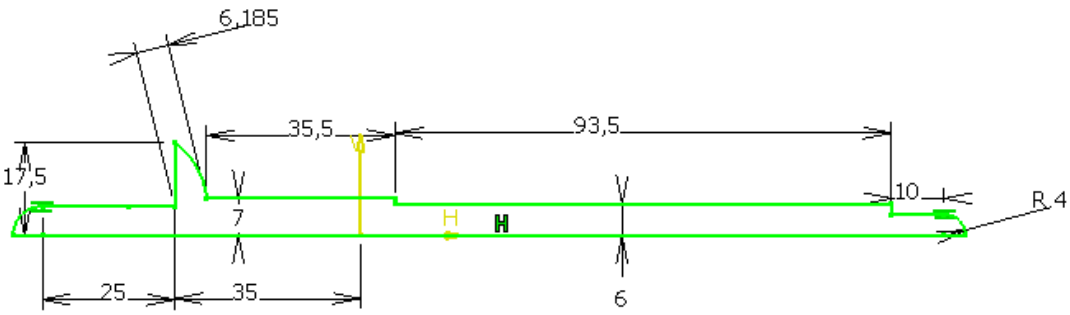



El motivo de la forma del extremo del eje 1 que se muestra en la siguiente imagen, se explican detalladamente en el apratado 6.4 “Agujas. Subconjunto Eje 1–Eje 4”. , pero a grodo modo las hendiduras son para alojar la aguja que marca las hora y un tapon que hace de tope para que no se salgan las agujas.



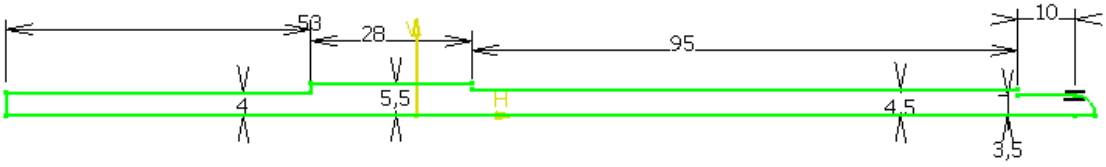
### *6.3.2 Eje 2*

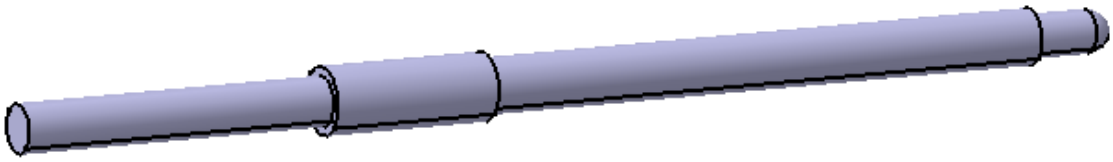
Es el que porta los engranajes E y F.



### 6.3.3 Eje 3

Es el que gira con la rueda H y el piñón G.



### 6.3.4 Eje 4

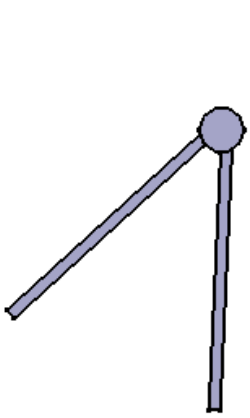
El eje 4 tiene un diámetro de 4 y una longitud de 30mm. Es la pieza mas sencilla al consistir en la simple extrusión de una circunferencia: un cilindro. Lleva a los engranajes γ y S.

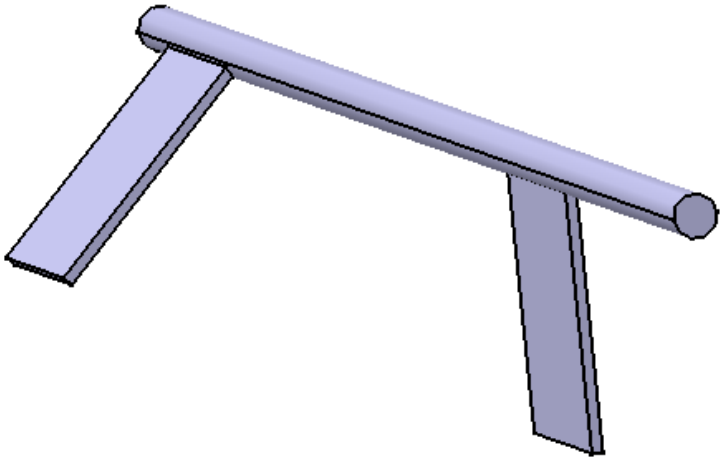
### 6.3.5 Eje 5

Igual que el eje anterior en cuanto a morfología, tiene 6mm de diámetro y 110 de longitud –su posición real es vertical- .Porta al piñón I y a la Rueda Corona.

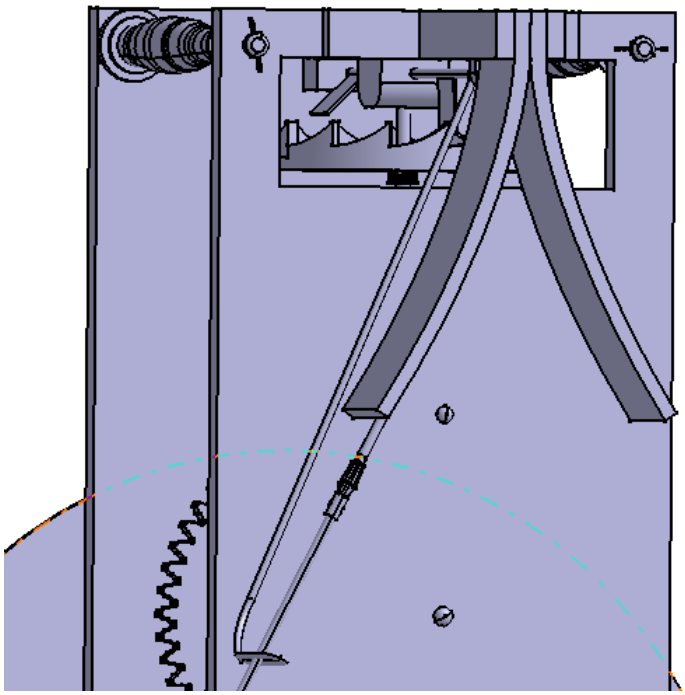
### *6.3.6 Eje LM con paletas*

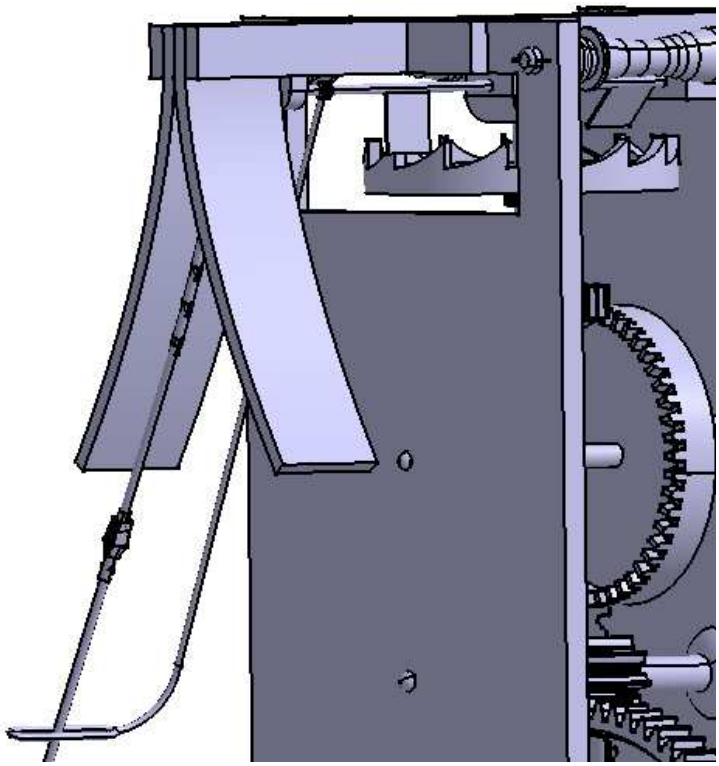
Pasemos al diseño de la que posiblemente sea la pieza mas importante junto con el péndulo del reloj, el eje LM con las paletas, o lo que sería el trinquete de un escape tipo Verge. Ya explicamos como las paletas en su movimiento alternativo transmitido desde el péndulo por la Varilla S, va frenando paulatina y regularmente el escape de la energía del sistema de pesas. Así a priori la pieza parece sencilla porque en su gometriá lo es, como se aprecia en la siguientes imágenes, al constar simplemente de un eje con 2 paletas.





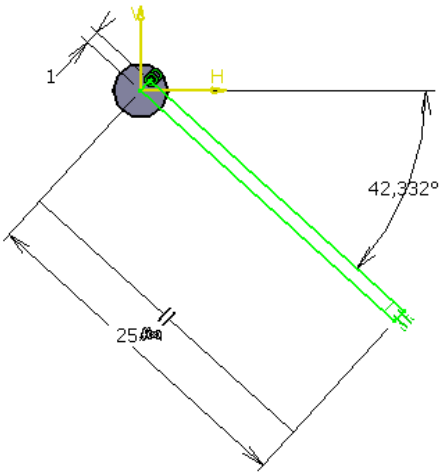
Lo complejo de esta pieza es el ángulo que deben formar esas paletas entre sí y la longitud de las mismas para que el funcionamiento sea el adecuado, no tropezando en la entrada y salida periódica entre los dientes de la rueda.K. El ángulo entre palas tiene que ser igual a la amplitud del movimiento periódico de la Varilla S, para que cuando la varilla alcanze cualquiera de los 2 puntos de máxima amplitud de su movimiento, la paleta correspondiente esté vertical y choque con alguno de los dientes de la Rueda K , como se trata de mostrar en las siguientes figuras y quedará bastante claro con las animaciones :

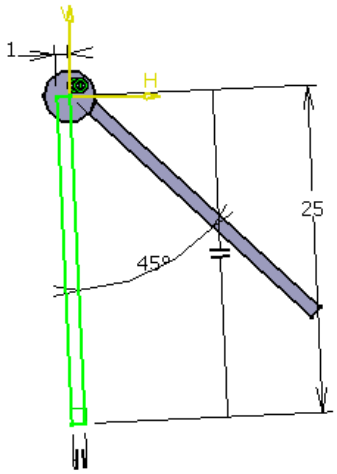




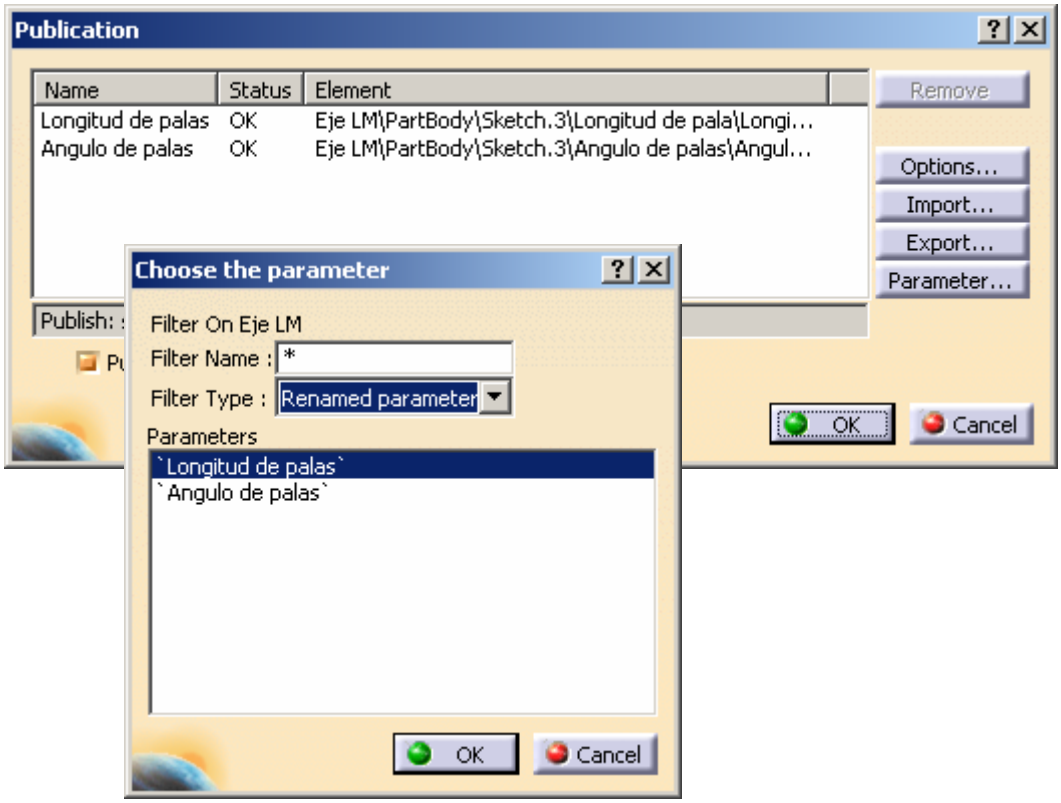
Por otro lado, si las paletas tienen más longitud de lo necesario, tardan más tiempo en salir de la zona de interferencia.

En principio, las palas se diseñaron con un ángulo de 45 grados, como se muestra en estos 2 bocetos:



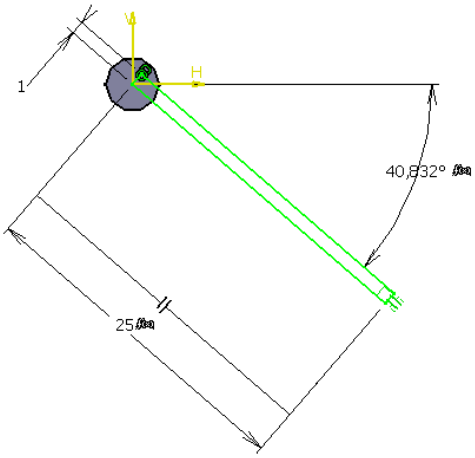



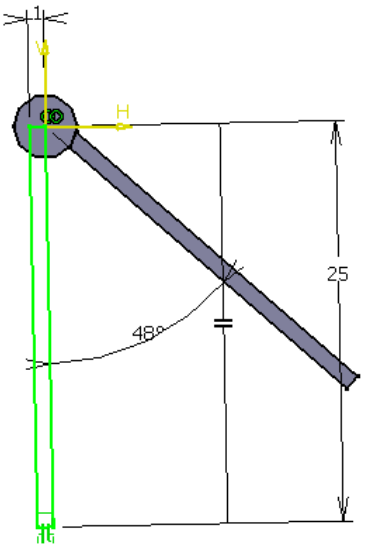

Pero como este parámetro se ha variado numerosas veces a lo largo del diseño, se decidió renomabrar el ángulo que forman las paletas como “Angulo de palas” y la longitud de las mismas como “Longitud de palas”, y hacer públicos dichos parámetros para que fueran accesibles en todo momento desde el Ensamblaje y desde el módulo cinemático. Para ello nos vamos a la Barra de menús seleccionamos Tools/Publication, y nos aparecerá la siguiente ventana, en principio en blanco:



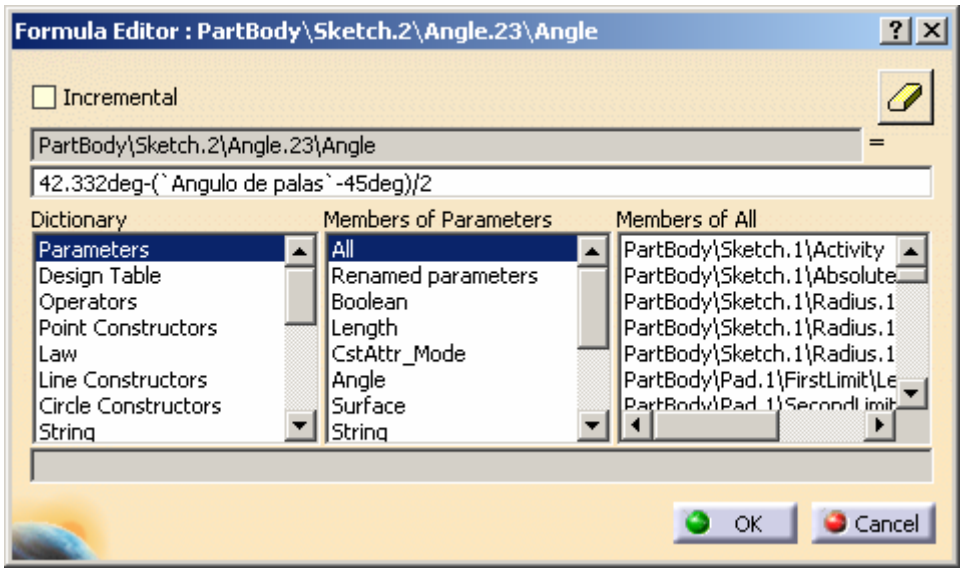
Donde seleccionando “Parameter” aparece la ventana que se muestra en cascada con la anterior. Filtramos el tipo de archivo a parámetros renombrados y aparecerán los anteriormente citados. El aspecto del árbol de la pieza pasa a ser el que se muestra quedando accesible como comentábamos los parámetros publicados:

Posteriormente se comprueba que la varilla se mueve con una amplitud de 48 grados, luego la posición final de las palas sería:

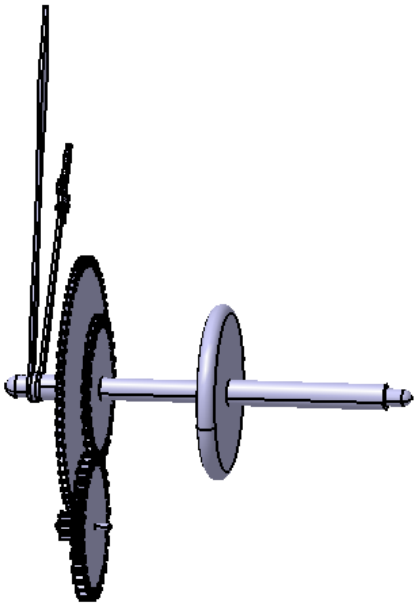


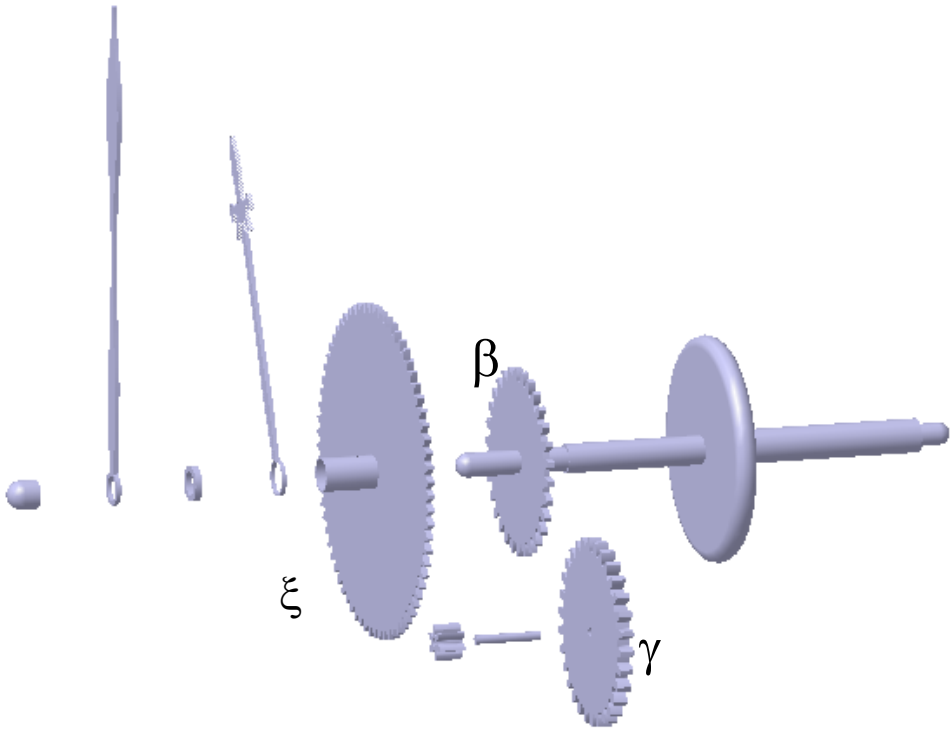

Como se observa se ha aplicado una fórmula al ángulo que fija la posición de la primera paleta, esto se explicará más adelante cuando lleguemos al apartadp 8. ANIMACIÓN, pero sirve para que al cambiar el ángulo de palas estas se desplacen respecto a la bisectriz del ángulo que forman ambas entre si en igual cantidad, y no una respecto a otra la cantidad total del cambio de ángulo, descentrándose las paletas a la hora de realizar las simulaciones.


Formula Editor : PartBody\Sketch.2\Angle.23\Angle
Incremental
PartBody\Sketch.2\Angle.23\Angle
=
42.332deg-(`Angulo de palas`-45deg)/2
Dictionary
Parameters
Design Table
Operators
Point Constructors
Law
Line Constructors
Circle Constructors
String
Members of Parameters
All
Renamed parameters
Boolean
Length
CstAttr_Mode
Angle
Surface
String
Members of All
PartBody\Sketch.1\Activity
PartBody\Sketch.1\Absolute
PartBody\Sketch.1\Radius.1
PartBody\Sketch.1\Radius.1
PartBody\Sketch.1\Radius.1
PartBody\Pad.1\FirstLimit\Le
OK
Cancel

## *6.4 Agujas. Subconjunto Eje 1 – Eje 4*

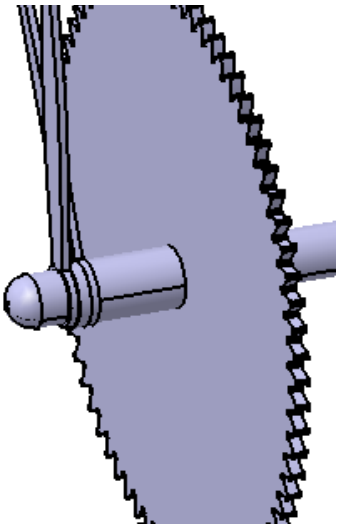


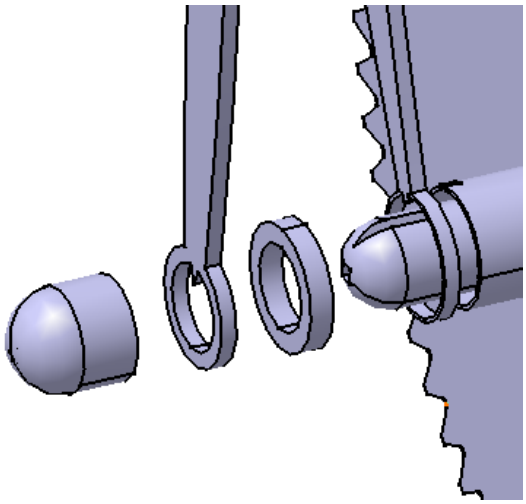
El subconjunto Eje 1-Eje 4 y agujas, está formado como se muestra por el minutero, la aguja de las horas, el eje 1, el 4 y los engranajes $\beta$,$\gamma$,$\xi$ y el único de 6 dientes, llamado S a título personal, el tapón y una arandela..




Los engranajes $\beta$ y $\xi$ son coaxiales, el $\beta$ gira solidario con el eje 1 mientras que el $\xi$ gira deslizando sobre el anterior coaxialmente.

Veamos con mas detalle el sistema de cogida de las agujas:

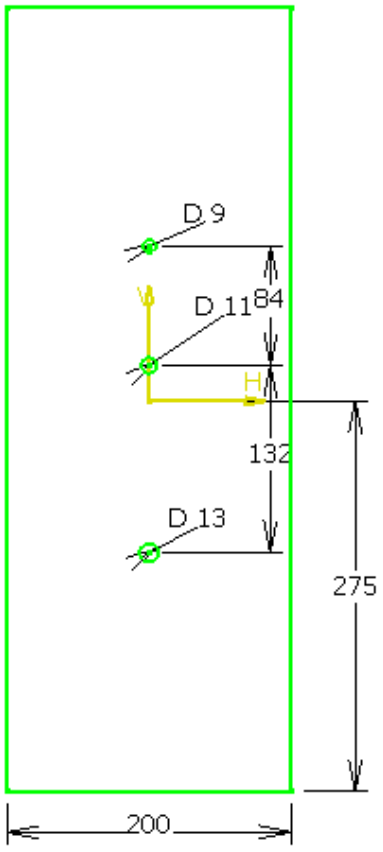


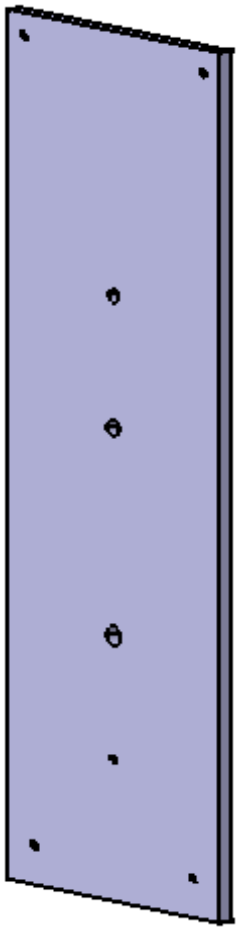


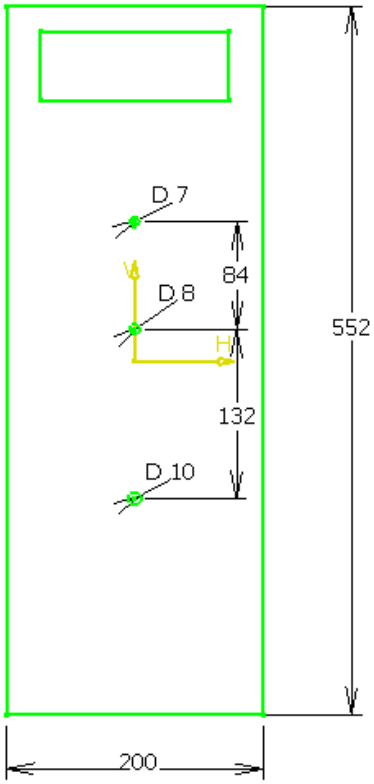
El eje 1 tiene una hendidura donde se aloja el minutero, que tiene un pico que hace las veces de chaveta, quedando así el movimiento del minutero ligado al del eje 1. La aguja de las horas se fija al engranaje que gira a 1 vuelta/12 horas de una forma análoga. Para que la aguja de las horas no se salga y quede descolgada, entre ambas agujas se sitúa una arandela o anillo suelto. Para que no se salga del eje el minutero, en la punta del eje va insertado a presión un tapón que desempeña dicha función.

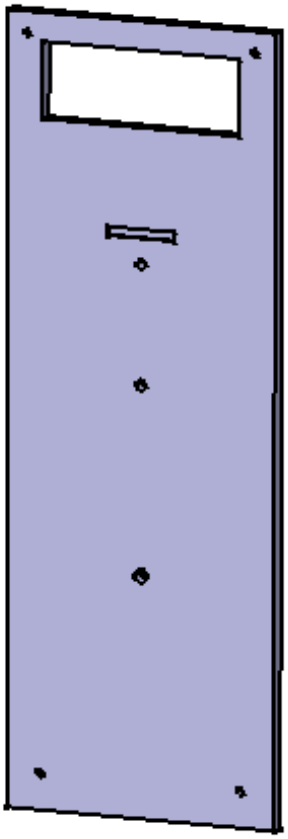
## *6.5 Láminas AA y BB*

Hacen la función de “chasis” del reloj. Se presentan cada lámina en 3D ademas de un boceto de cada una, con la distancias entre los agujeros que alojan a los ejes, pudiéndose comprobar que estas distancias son la semisuma de los diámetros primitivos de las ruedas dentadas que engranan entre cada eje.





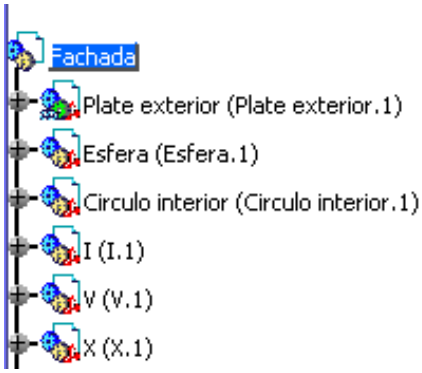



Se recuerda que ambas láminas están separadas 150 mm.

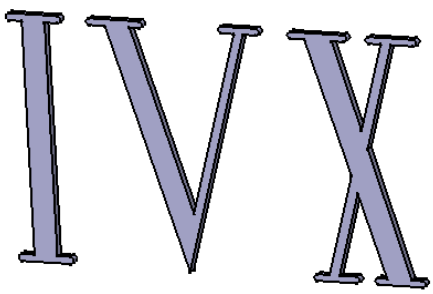
## *6.6 Subensamblaje esferas*

La esfera del reloj, ha sido diseñada como un ensamblaje a parte, lo que se llama un subensamblaje, que despues se introduce en el ensamblaje del reloj completo como si fuera una pieza más, y CATIA lo considera como un conjunto rígido.

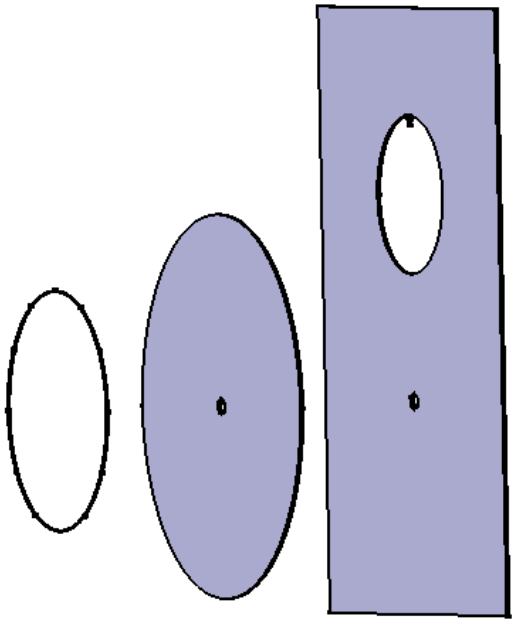
En esta captura del arbol de especificaciones se aprecian las piezas:




Por una lado se han diseñado lo que serían los números romanos, uno de casa tipo:

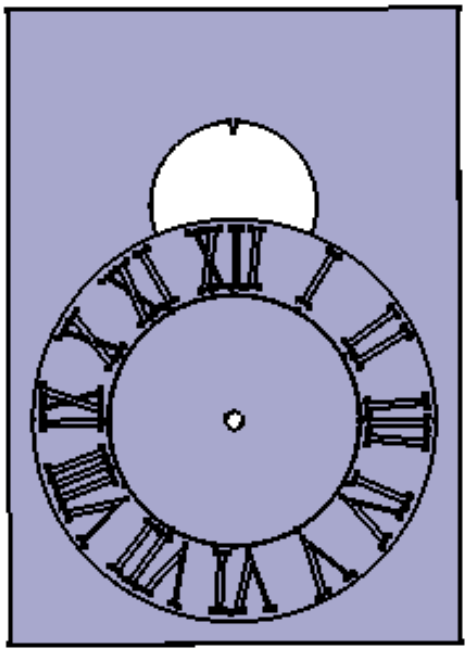



Además está compuesto de una esfera, que no es más que un disco, el círculo interior, que es una circunferencia graduada en 12 partes, y una lámina o Plate, con una abertura a través de la cual se verá el Disco Segundero.



Un detalle más cercano al círculo interior graduado.

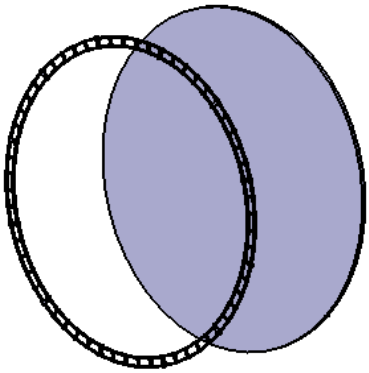
El resultado final es:

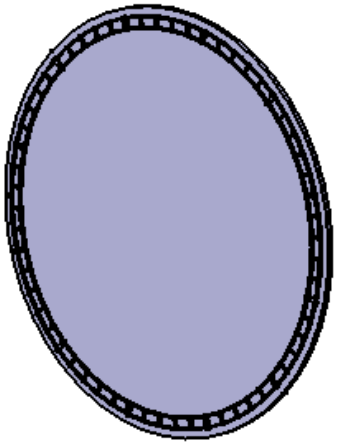


La Plate o Lámina Exterior tiene un agujero a traves del cual se podrá ver el Disco segundero.

### *6.6.1 Disco Segundero*

Como el caso anterior, se ha realizado también mediante un subensamblaje, de lo que sería el disco propiamente disco y de dos circunferencias concentricas praduadas según segundos, es decir, dividida en 60 partes.



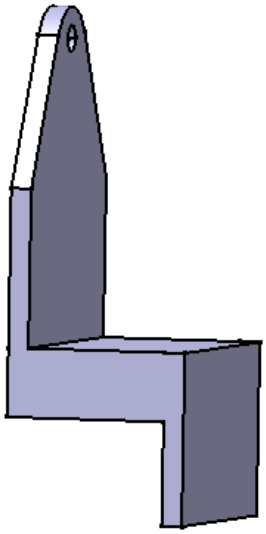


## 6.7 GNOMONS

Hemos decido usar este término porque es el que usa Huygens en el Horologium Oscillatorium. Él llama Gnomon a las piezas que alojan a los ejes.

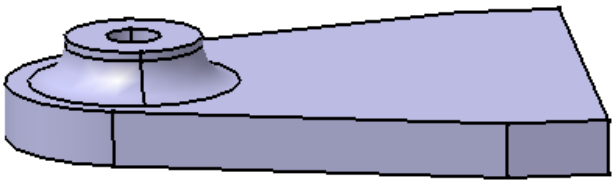
### 6.7.1 Gnomon R

Es el que sustenta al eje 4 junto con la Lámina AA.



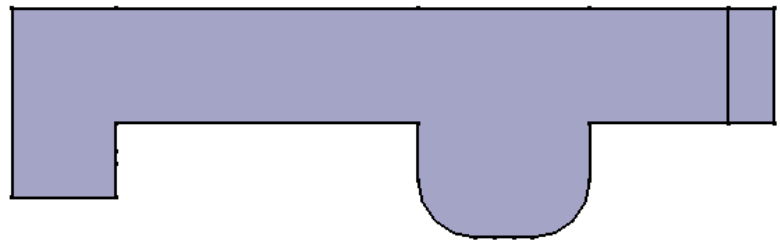
### 6.7.2 Gnomon epsilon

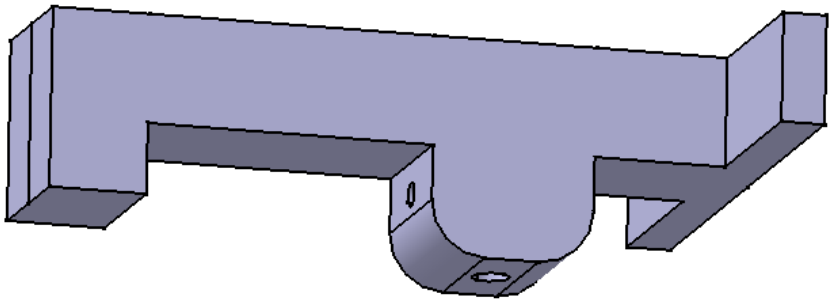
Hace lo propio con el eje 5 junto con el Gnomon NQ.



### *6.7.3 Gnomon NQ*

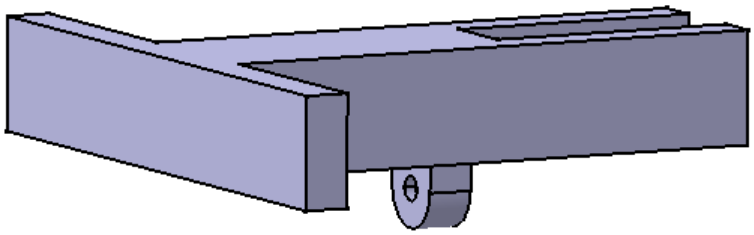
Aloja al Eje LM con paletas y al eje 5





### *6.7.4 Gnomon P*

También sustenta al eje LM.



## *6.8 LÁMINAS CICLOIDALES (T)*

Estas piezas son la clave del éxito de este reloj y las causantes de que sea considerado el primer reloj fiable de la historia, como ya se ha explicado previamente. Para trazar la cicloide vamos a ser absolutamente fieles al método que explica Christiaan Huygens en el tan citado libro, que no es más que aplicar la definición de esta curva: “es la curva que decribe un punto de una circunferencia que rueda sin deslizar sobre una recta”

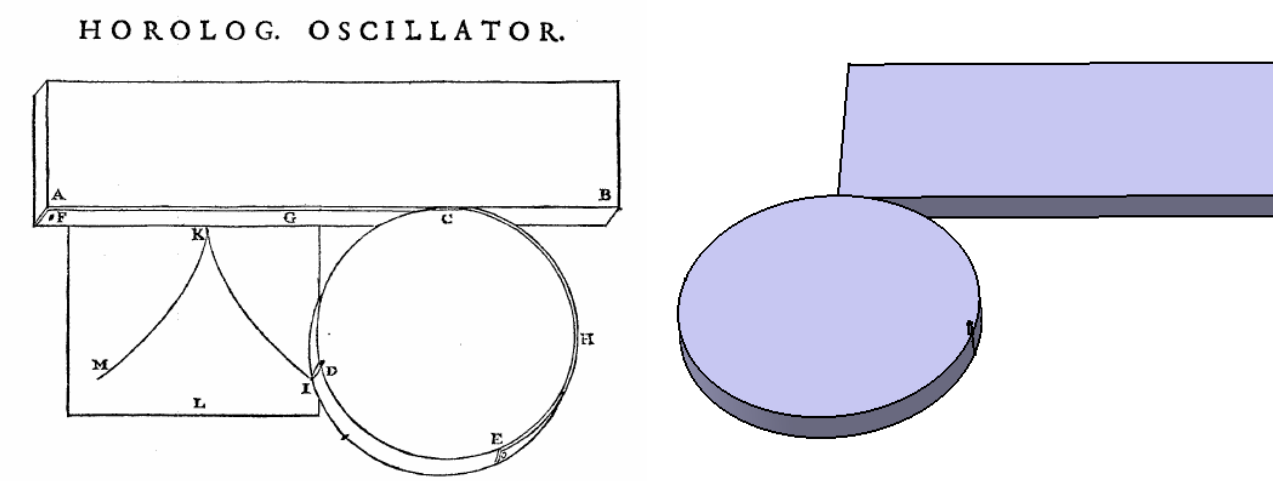
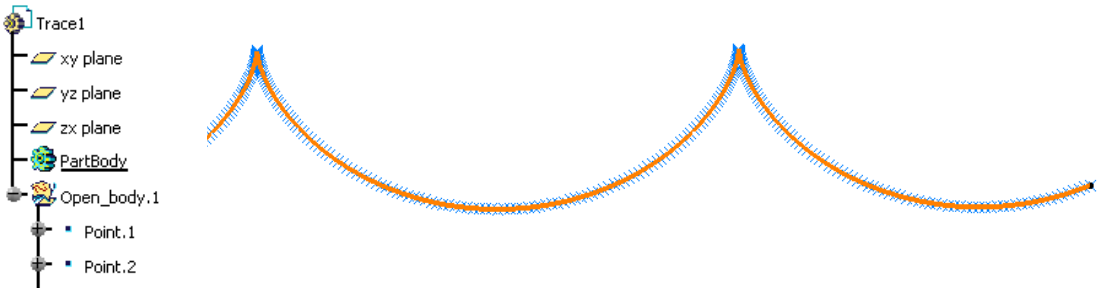



**Fig.Modelo para generar cicloide con CATIA**

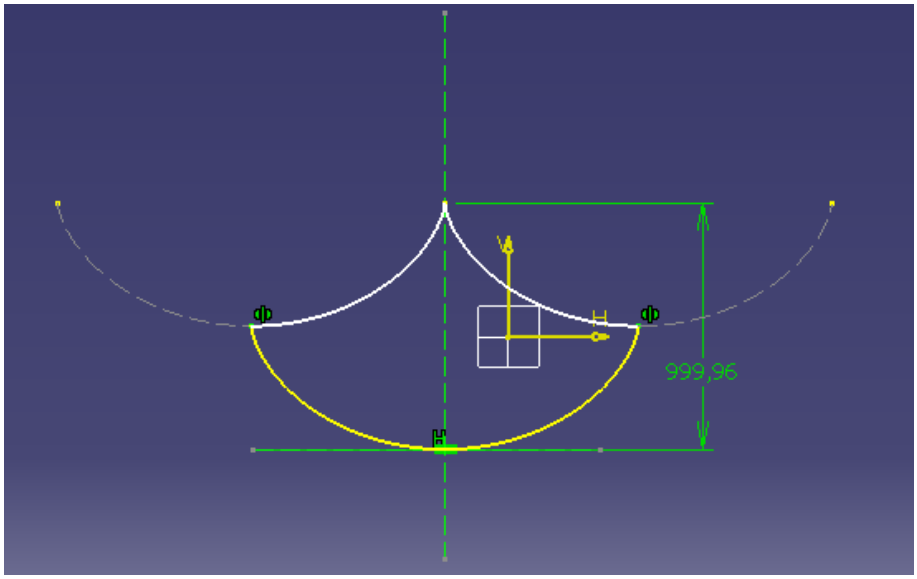
**Fig. del Horologium Oscillatorium**

Pues realizamos esto con un modelo como el de la figura de la derecha, con el comando “Trace”, de la barra

en el módulo DMU Kinematics Simulator , le decimos a CATIA que dibuje la trayectoria de un punto de la circunferencia previamente definido, y nos genera dicha curva en un archivo a parte (.CATPart), con el que podemos trabajar.

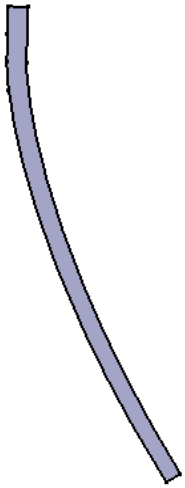


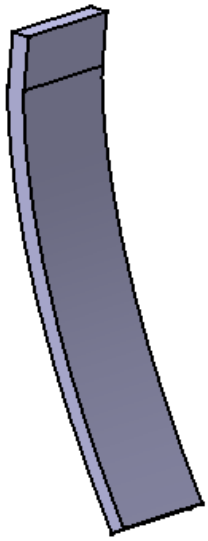

CATIA genera esta curva por una sucesión de puntos unidos por un spline. Como se vió, si la cirunferencia generadora tiene radio R, el eje de la cicloide es 2R, y por lo tanto el péndulo mediría 4R, así que si nuestro péndulo mide aproximadamente 1 metro, la circunferencia de nuestro modelo de CATIA para generar la cicloide ha de ser de 25 cm de radio, en tal caso se obtiene lo que a continuación de muestra que es practicamente perfecto.




Este es el mismo dibujo que se mostraba en el apartado de la memoria del presente proyecto, 3.1 Horologium Oscillatorium, pero realizado en CATIA, en el se aprecia como con una circunferencia de unos 50 cm de diámertro, generamos una cicloide, que si desplazamos de forman que las dos mitades se corten en un vertice, tenemos la forma necesaria para que un pédulo de 1 metro de longitud describa una ciclode, debido a las propiedades que ya comentamos en su momento.

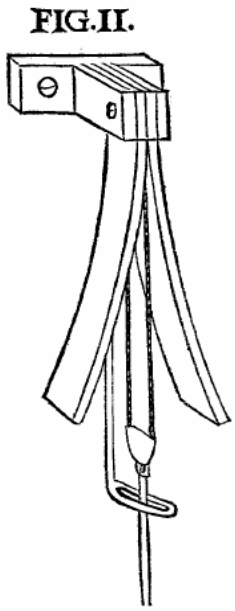
Una vez obtenida la curva , generar las chapas es fácil por extrusión de un boceto cerrado que creamos a partir de la cicloide generada. El resultado es el siguiente:



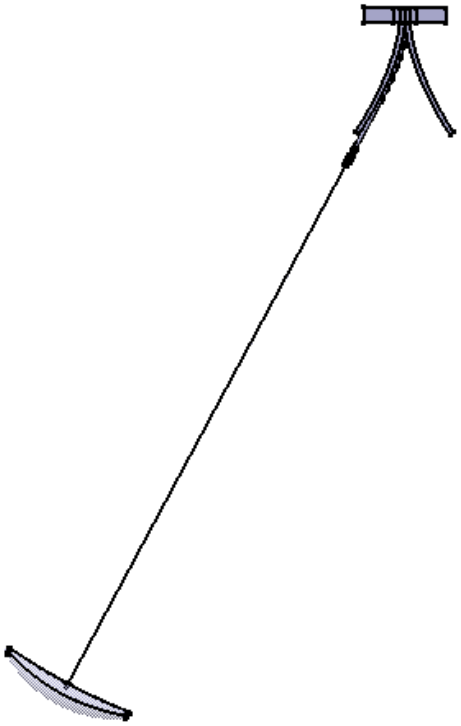


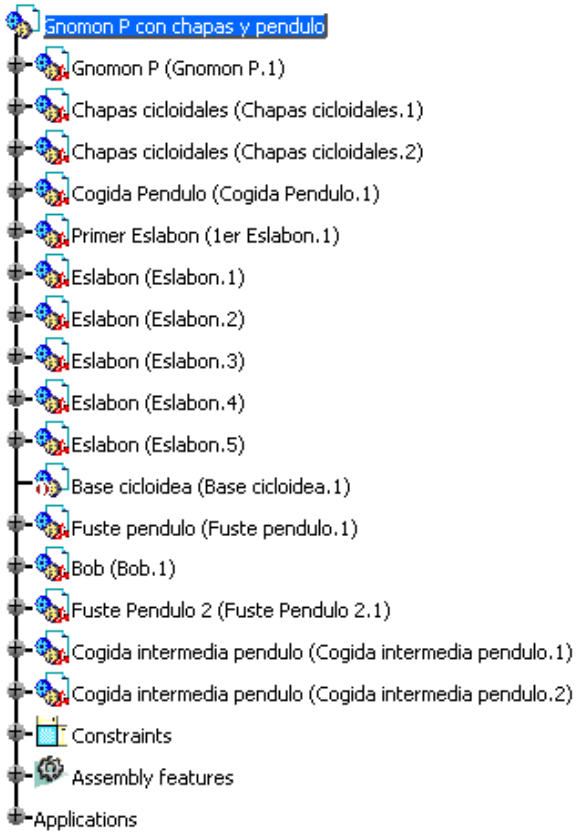
## *6.9 SUBCONJUNTO PÉNDULO*

Hemos visto que el péndulo estaba suspendido mediante 2 cuerdas entre las láminas cicloidales como se muestra en la figura. Debido a la imposibilidad que muestra CATIA de momento para el modelado de elementos flexibles tal y como la cuerda, modelamos el péndulo como una cadena simple, como se detalla en el apartado 8. ANIMACIÓN: DMU KINEMATICS, donde tambiém crearemos unas animaciones donde se aprecia que el comportamiento del modelo se asemeja mucho a la realidad.



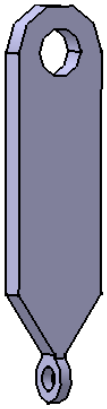
El conjunto del péndulo se representa en la siguiente imagen y en la captura del árbol de la geometría que se ha reliazado, donde se aprecian las diferentes piezas de este subconjunto:



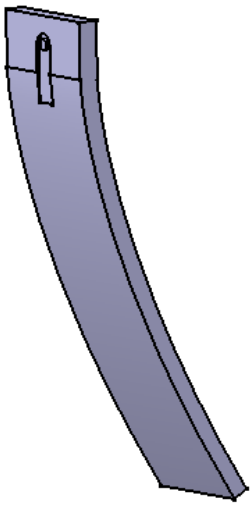


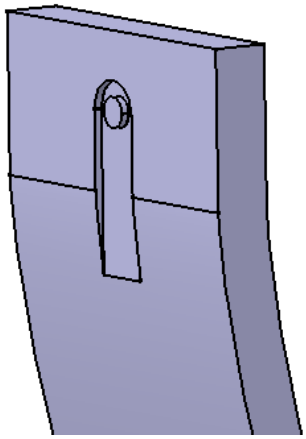

A parte del Gnomon y las chapas cicloidales, como se ve, tenemos:

**Cogida péndulo**



Se ha de señalar que para alojar la cogida del péndulo entre las chapas cicloidales, se le ha realizado a éstas un “Remove”, o sustracción de piezas, entre las propias chapas y la cogida. Posteriormente, a las chapas se las ha aislado de su pasado mediante “Isolate”. El aspecto que tienen tras ésta operación es el siguiente:

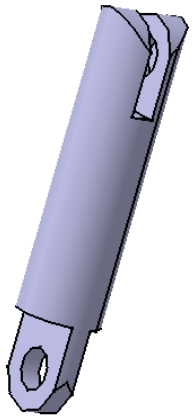
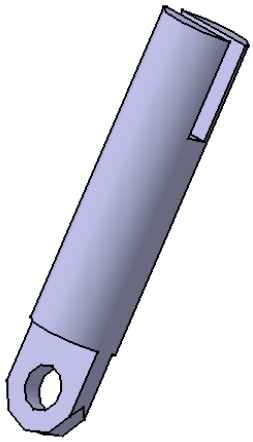




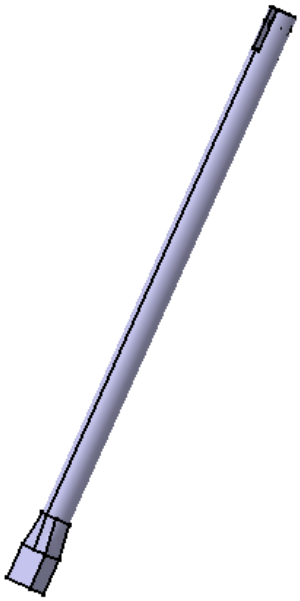
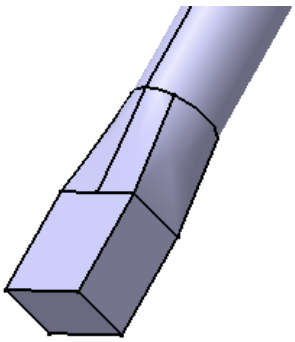
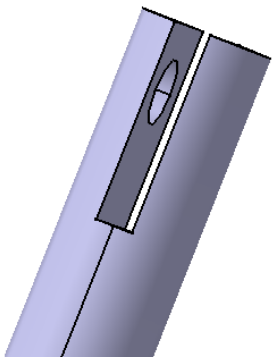
Se aprecia que se ha realizado la cavidad justa y necesaria para el alojamiento de la cogida entre las chapas. También hemos de señalar que puesto que una chapa es instancia o copia de la otra, girada, el “Remove” ha tenido que ser realizado situando la cogida centrada en una de las chapas, para que quedase igualmente centrada en la otra.

**Eslabones de la cadena**

Que realmente serían la cuerda, por lo que más adelante, al crear la animación, trataremos de darle ese aspecto. El primer eslabón es algo diferente, con el extremo superior redondeado, para que pueda girar bien sin tocar las chapas:

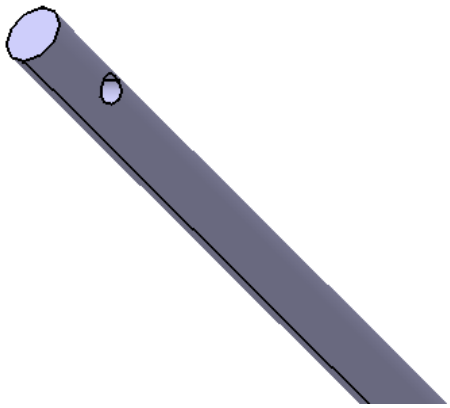
| Primer Eslabón | Resto de eslabones |
|---|---|
|  |  |

**Primer tramo del fuste del pendulo**, que también sería parte de la cuerda, seria el tramo que iría desde el último punto de tangencia, el de máxima oscilación del pendulo, hasta la cogida intermedia:

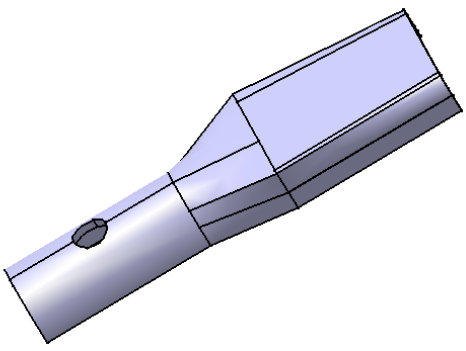
| Tramo completo | Extremo inferior | Extremo superior |
|---|---|---|
|  |  |  |

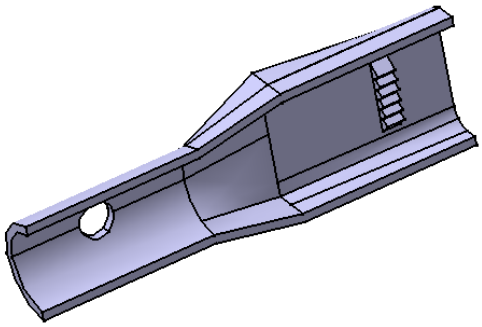
**Fuste péndulo**, que ya si sería de acero (V):

Se representa sólo la cogida, el resto es una prolongación del cilindro.



**Cogida intermedia**:

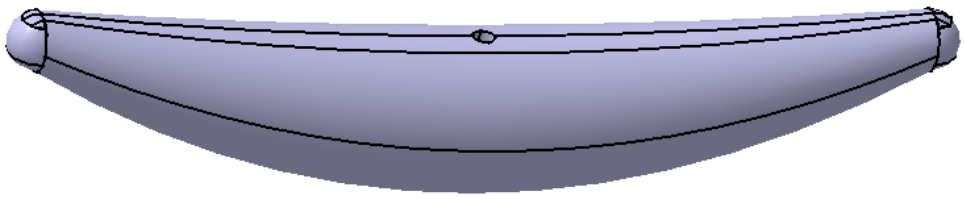




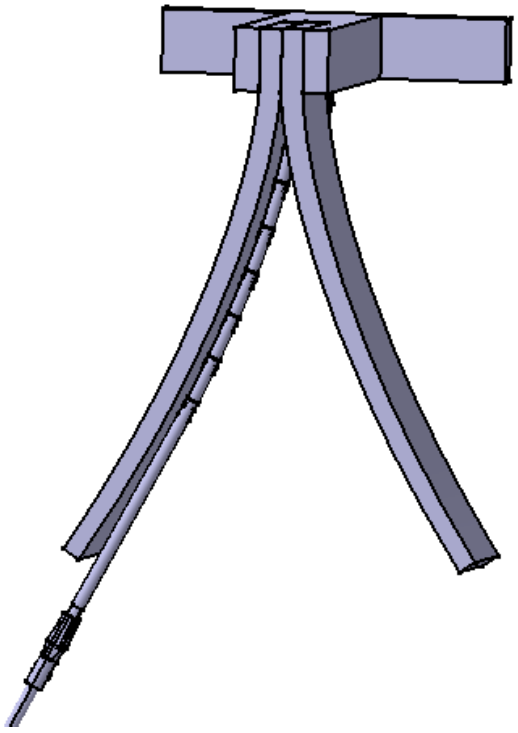
Es la que une el tramo de cuerda que se mueve entre las chapas cicloidales con el fuste de acero del péndulo. Como se aprecia, tiene unos dientes que agarran la cuerda cuando las 2 mitades se atornillan.

**Bob X**

Es el peso conductor del péndulo. Como explica Huygens en la obra, el diseño tiene esta forma por motivos aerodinámicos, lo describe como " un cilindro que se alarga en punta hacia sus extremos"

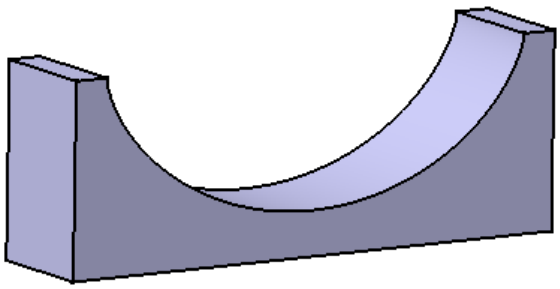


El conjunto del péndulo montado tendría este aspecto:



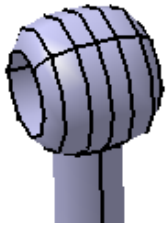
Nota:

Lo que se ha llamado "Base cicloidea" en el arbol, se utilizará mas adelante en el apartado 8. ANIMACIONES: DMU KINEMATICS , y es una pieza tridimensional con forma de cicloide como se muetra a continuación:



## *6.10 Varilla S*

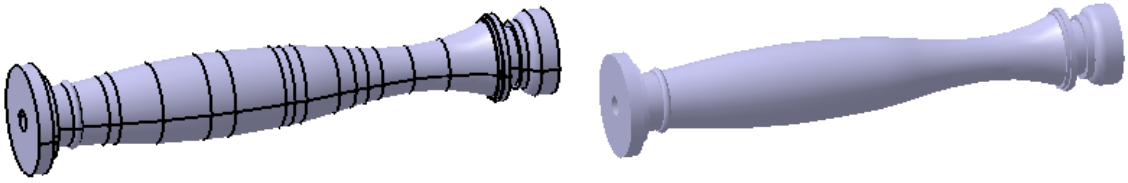
Es la pieza que conecta las 2 partes del mecanismo, transmitiendo el movimiento del péndulo al Eje LM:

| Cogida superior al eje LM | Pieza completa |
|---|---|
|  | |

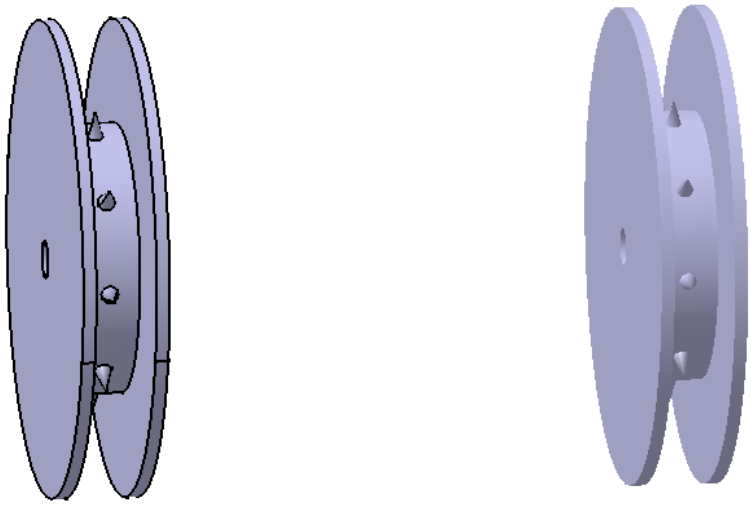
## *6.11 Elementos Auxiliares*

Varillas (pins), moleteados o muescas para fijar los egranajes a los ejes, tornillos, pernos, palometas, columnas y la polea

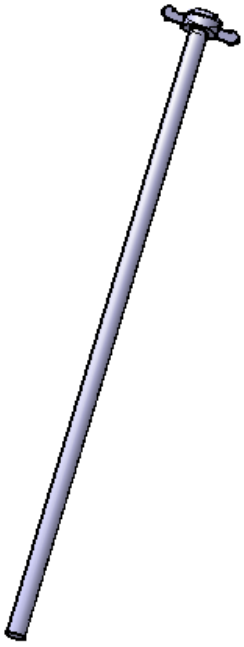
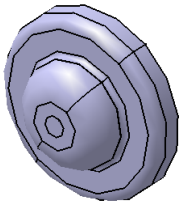
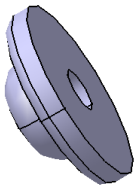
**Columnas:** Que mantienen separadas las láminas AA y BB 150 mm



**Polea** o rueda con picos:



Los **Pernos** y las **Hembras de los pernos**: los pernos atraviesan las columnas por su interior, y tienen en su extremo un pequeño tramo roscado, de 5 mm, donde va alojada la hembra:

| Pernos: | Hembras: |
| --- | --- |
|  |   |

También se han usado varias varillas y matrices de muescas para fijar los engranajes a sus ejes.

# 7 ENSAMBLAJE: ASSEMBLY

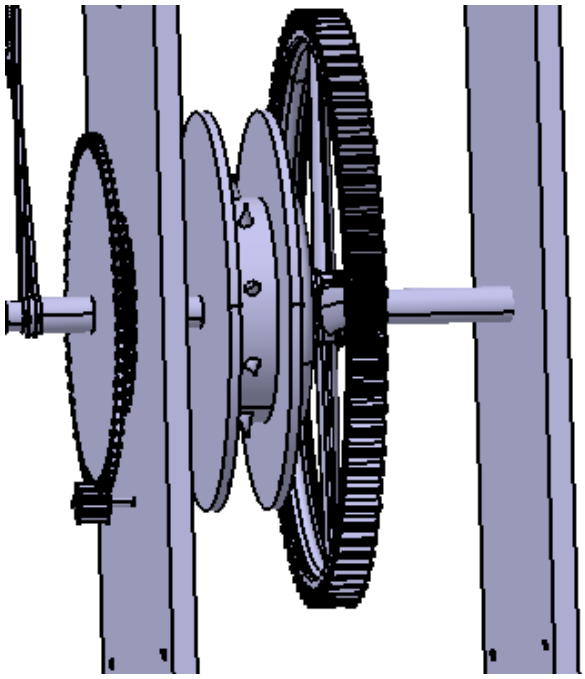
Como se comentó, en el módulo Assembly Design generamos el ensamblaje, es decir, situamos las piezas en su posición definitiva, proceso que se hace en dos pasos tras insertar las piezas, primero situándolas aproximadamente, y luego aplicándoles una seria de restricciones que las dejan en su posición definitiva en relación con el resto de piezas.

Mostramos el ensamblaje, al igual que todas las piezas mostradas hasta ahora, en modo constructivo, tal y como se obtienen directamente en CATIA, sin aplicarle ningún tipo de material.

Siempre hay que fijar una pieza del ensamblaje, aplicándole la restricción “Fixing Componet” . En nuestro caso la hemos aplicado a la lámina BB.

Como muestra ensamblaremos el eje 1, para lo que usando el manipulador de piezas , en la barra de herramientas “Move Toolbar”, situamos las piezas en un posición aproximada, pero no demasiado, pues no resulta práctico porque no permitiría la captura de restricciones posteriormente. Ahora lo que hacemos es aplicar las restricciones que relacionan la posición de las piezas. Para ello tendremos en cuenta que el eje es concéntrico con cualquiera de las 2 láminas, y el resto lo son a su vez con el eje, así que usaremos la restricción “Coincidence Constraint” , varias veces, al Eje 1 con una de las láminas, y a cada engranaje, polea y agujas, con el Eje 1, para hacer coincidir el eje de revolución que tienen en común.

Una vez que las tengamos ya situadas sobre el mismo eje, las situamos relativamente entre ellas aplicando la misma restricción anterior o una restricción de contacto “Contact Constraint”, para las caras que coincidan, o las situamos a una distancia con la restricción de paralelismo “Offset Constraint”. Por ejemplo aplicaríamos la restricción de contacto entre la polea y el tope que tiene el Eje 1, y de paralelismo entre la Rueda β y la lámina AA. El resultado que obtendríamos sería el siguiente:



El ensamblaje completo del reloj, lo hemos realizado por partes, es decir, haciendo pequeños ensamblajes que después se introducen en el ensamblaje de el conjunto completo, como si fueran una pieza más, es lo que se llama en CATIA Subensamblaje, y lo hemos realizado con las esfereas, el disco segundero y el péndulo.

A continuación presentamos lo que en CATIA se llama “Bill of Material”, y es una lista que configuramos a nuestro gusto. Se presenta en nuestro caso el nombre de la pieza (Part Number), la cantidad (Quantity) y el tipo (Type). Donde aparece Assembly como tipo, es que esa pieza es un Subensamblaje.

| **Bill of Material: RELOJ DE PENDULO** | | |
|---|---|---|
| **Quantity** | **Part Number** | **Type** |
| 1 | Lamina BB | Part |
| 1 | Eje 1 | Part |
| 1 | Rueda C | Part |
| 1 | Polea | Part |
| 1 | Eje 2 | Part |
| 1 | Eje 3 | Part |

| | | |
|---|---|---|
| 1 | Piñon E | Part |
| 1 | Piñon G | Part |
| 1 | Rueda H | Part |
| 1 | Rueda F | Part |
| 1 | Lamina AA | Part |
| 1 | Eje 4 | Part |
| 1 | Rueda Beta | Part |
| 1 | Rueda Gamma | Part |
| 1 | Piñon de 6 | Part |
| 1 | Rueda de 72 | Part |
| 1 | Horario | Part |
| 1 | Minutero | Part |
| 1 | Gnomon NQ | Part |
| 1 | Eje 5 | Part |
| 1 | Gnomon E | Part |
| 1 | Rueda I | Part |
| 1 | Crown wheel | Part |
| 1 | Eje LM | Part |
| 1 | ISO 2338 PIN 1.2x12 STEEL PARALLEL UNHARDENED | Part |
| 1 | Gnomon R | Part |
| 1 | Fachada | Assembly |
| 1 | tapon agujas | Part |
| 4 | Columnas | Part |
| 4 | Perno columnas | Part |
| 4 | hembra perno columnas | Part |
| 1 | Esfera segundero | Assembly |
| 1 | Gnomon P con chapas y pendulo | Assembly |
| 1 | Varilla transmisora pendulo | Part |

| | | |
|---|---|---|
| 1 | Taco | Part |

| Bill of Material: Fachada | | |
|---|---|---|
| **Quantity** | **Part Number** | **Type** |
| 1 | Plate exterior | Part |
| 1 | Esfera | Part |
| 1 | Circulo interior | Part |
| 17 | I | Part |
| 5 | V | Part |
| 4 | X | Part |

| Bill of Material: Esfera segundero | | |
|---|---|---|
| **Quantity** | **Part Number** | **Type** |
| 1 | Disco | Part |
| 1 | Anillo segundero | Part |

| Bill of Material: Gnomon P con chapas y pendulo | | |
|---|---|---|
| **Quantity** | **Part Number** | **Type** |
| 1 | Gnomon P | Part |
| 2 | Chapas cicloidales | Part |
| 1 | Cogida Pendulo | Part |
| 1 | Primer Eslabon | Part |
| 5 | Eslabon | Part |
| 1 | Fuste pendulo | Part |
| 1 | Bob | Part |
| 1 | Fuste Pendulo 2 | Part |
| 2 | Cogida intermedia pendulo | Part |

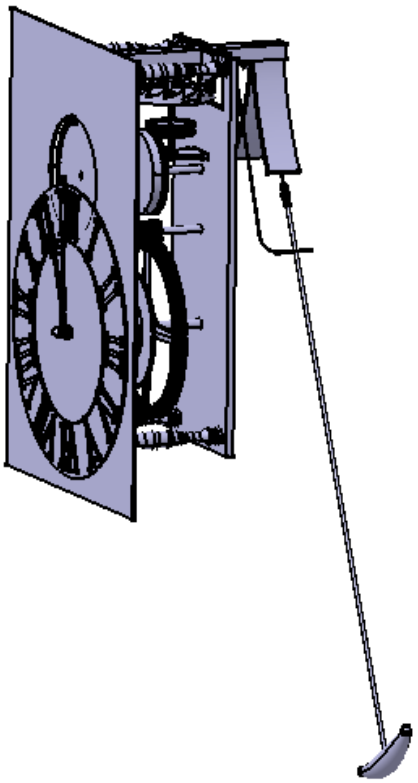
# Recapitulation of: RELOJ DE PENDULO

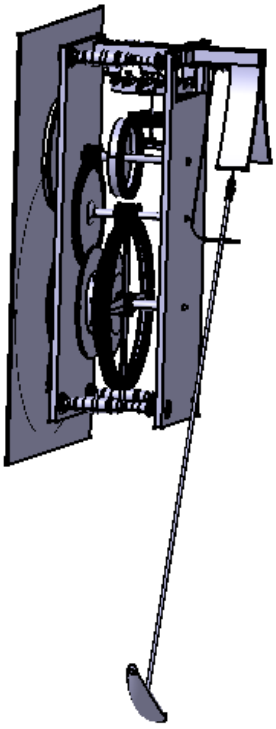
**Different parts: 49**
**Total parts: 87**

| | |
|---|---|
| 1 | Lamina BB |
| 1 | Eje 1 |
| 1 | Rueda C |
| 1 | Polea |
| 1 | Eje 2 |
| 1 | Eje 3 |
| 1 | Piñon E |
| 1 | Piñon G |
| 1 | Rueda H |
| 1 | Rueda F |
| 1 | Lamina AA |
| 1 | Eje 4 |
| 1 | Rueda Beta |
| 1 | Rueda Gamma |
| 1 | Piñon de 6 |
| 1 | Rueda de 72 |
| 1 | Horario |
| 1 | Minutero |
| 1 | Gnomon NQ |
| 1 | Eje 5 |
| 1 | Gnomon E |
| 1 | Rueda I |
| 1 | Crown wheel |
| 1 | Eje LM |
| 1 | ISO 2338 PIN 1.2x12 STEEL PARALLEL UNHARDENED |

| | |
|---|---|
| 1 | Gnomon R |
| 1 | Plate exterior |
| 1 | Esfera |
| 1 | Circulo interior |
| 17 | I |
| 5 | V |
| 4 | X |
| 1 | tapon agujas |
| 4 | Columnas |
| 4 | Perno columnas |
| 4 | hembra perno columnas |
| 1 | Disco |
| 1 | Anillo segundero |
| 1 | Gnomon P |
| 2 | Chapas cicloidales |
| 1 | Cogida Pendulo |
| 1 | Primer Eslabon |
| 5 | Eslabon |
| 1 | Fuste pendulo |
| 1 | Bob |
| 1 | Fuste Pendulo 2 |
| 2 | Cogida intermedia pendulo |
| 1 | Varilla transmisora pendulo |
| 1 | Taco |

El resultado final, tras introducir todas las piezas con sus respectivas restricciones es el que se muestra a continuación:





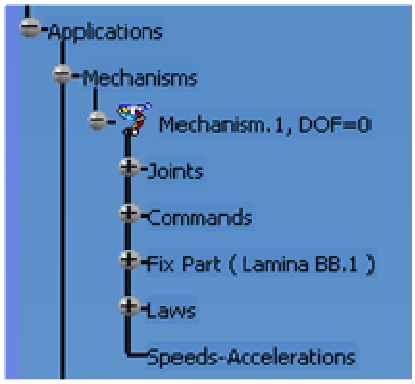
Ya en el apartado 10.FOTOREALISMO, creamos imágenes mucho más reales del mecanismo, hasta el momento, que se comentó al principio de este apartado, las piezas se muestran sin ningun retoque visual.

Se han generado dos videos llamados “Vuelo Ensamblaje1” y “Vuelo Ensamblaje2”, en los que se muestran vuelos alrededor y através del ensamblaje, realizados con DMU Navigator. En estos videos, para una mayor realismo, ya se han aplicado materiales a las piezas.

# 8 ANIMACIÓN: DMU KINEMATICS

Vamos a tratar en este apartado las diferentes animaciones que se han realizado en el presente proyecto usando el módulo DMU Kinematics.

Este es el aspecto que presenta en general *la rama del arbol* de un mecanismo:




Para relaizar la simulación de un mecanismo, es condición necesaria la existencia de una parte fija, luego lo más cómodo es definirla al principio. Despues pasamos a definir las uniones entre las distintas piezas, esto se puede hacer de varias formas:

- A partir de un ensamblaje, convirtiendo las restricciones del ensamblaje en uniones o “joints” con la herramienta “Converting Constraints into Joints” .

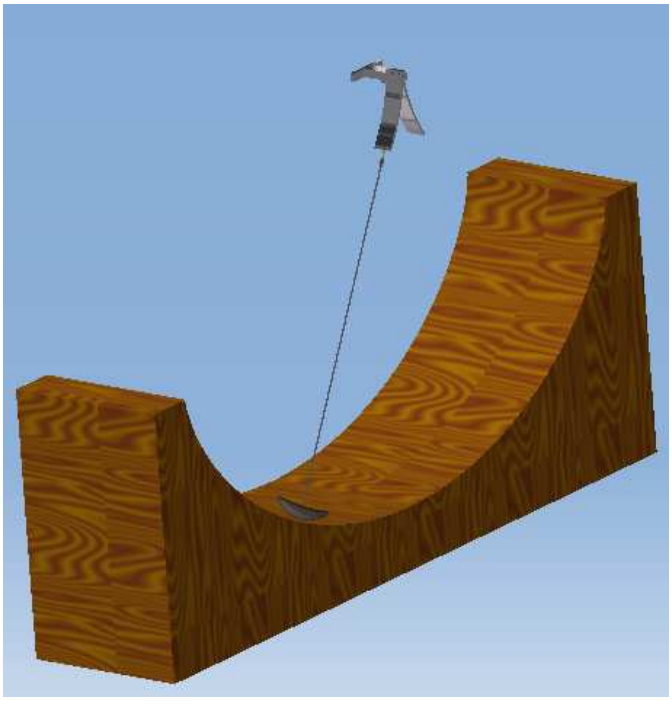
- Introduciendo las piezas, situándolas aproximadamente y creando las uniones una a una usando

## *8.1 Simulación del movimiento del péndulo*

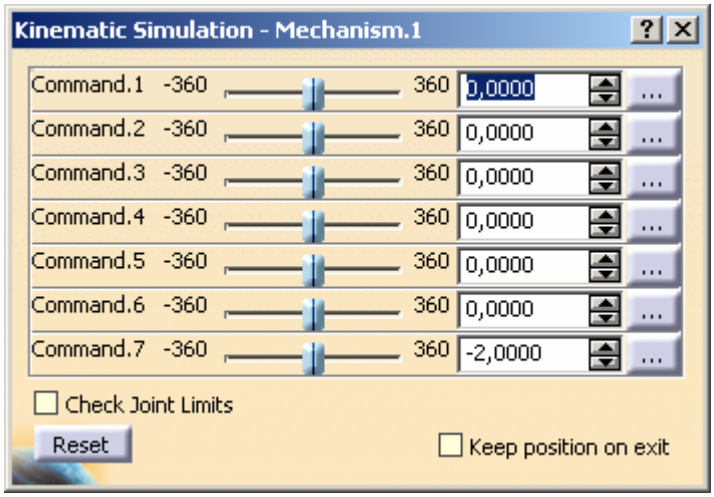
Para realizar la simulación del movimiento del péndulo con CATIA se nos presentan los siguientes problemas: la imposibilidad por un lado de modelar elementos flexibles, lo cual solucionamos modelando el péndulo como una especie de cadena de 7 eslabones, y despues, como hacer que dicha cadena se adapte a las chapas cicloidales en su movimiento periódico, pues CATIA tiene la posibilidad de detectar contactos, pero si tenemos activada esta opción, en el momento que lo hace detiene la simulación.

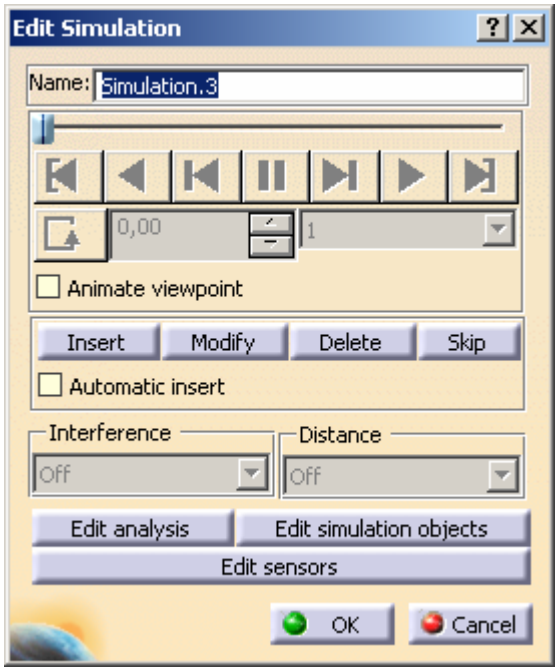
Teniendo en cuenta lo anterior, el péndulo ha sido simulado de las dos formas que perimite CATIA, por comandos, y através de funciones. La primera consiste en mover discretamente cada grado de libertad, a nuestra conveniencia, y la segunda, en imponer una función a cada grado de libertad conductor del mecanismo. Como hemos modelado el péndulo como una cadena, aunque se ha procurado que la apariencia sea la de una cuerda, en cada punto de union entre eslabones habrá un grado de libertad de giro, que serán los conductores del péndulo.

Se ha usado la **simulación por comandos** para demostrar, o más bien comprobar, una de las importantes propiedadades de la cicloide descubierta por Huygens, la que dice que " la evoluta de una cicloide es la propia cicloide desplazada" y también de paso, verificar la buena aproximación que supone el modelo realizado para el péndulo. El escenario sería el que se muestra a continuación, donde la cicloide de la base de madera y la de las chapas cicloidales es la misma pero desplazada:



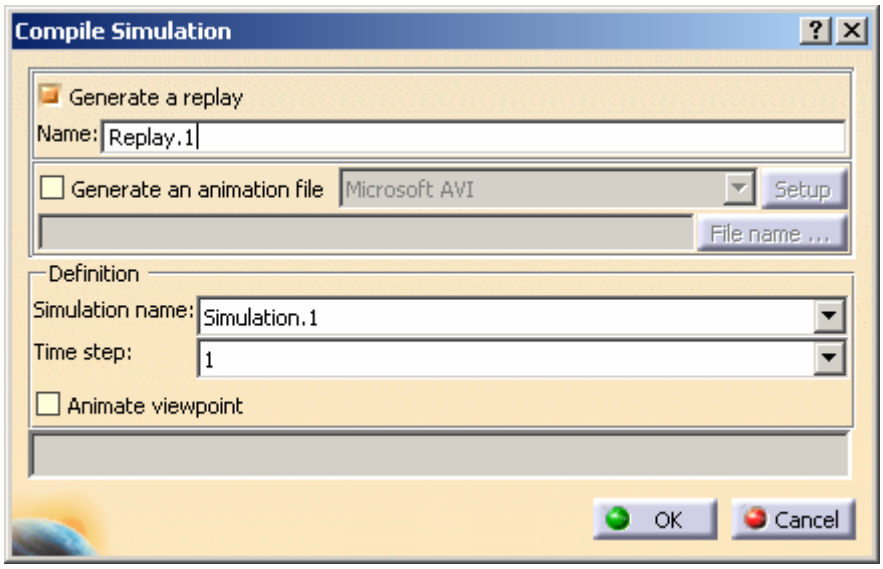
Para ello, edito con comandos la simulación de un solo periodo del movimiento, moviendo los grados de libertad uno a uno de la forma más parecida a lo que lo harían en la realidad, en la vantana " Kinematic Simulation". A la vez, en la ventana "Edit Simulation", vamos insertando sucesivamente fotogramas por cada movimiento de un grado de libertad que realizamos. Ambas ventanas se muestran simultáneamente en la pantalla de CATIA como se muestra a continuación.



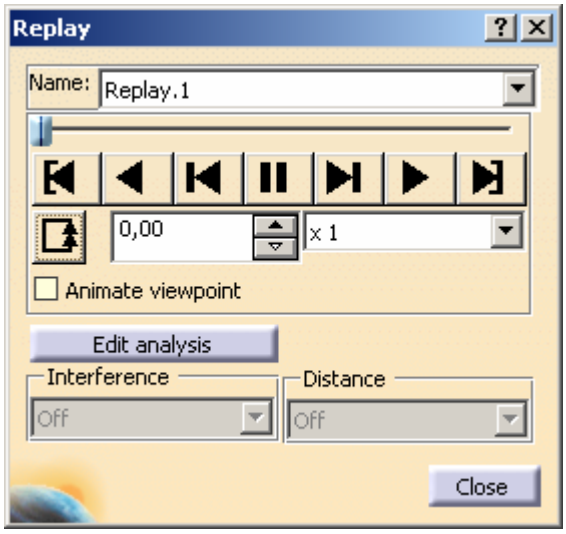



Movemos paulatinamente los comandos de forma que al llegar a las chapas nos adaptemos al máximo a ellas, procurando, en la medida de lo posible, la tangencia de los eslabones a la chapa correspondiente, de manera que el comportamiento se asemeje al máximo al de una cuerda tal y como se muestra en la figura siguiente:

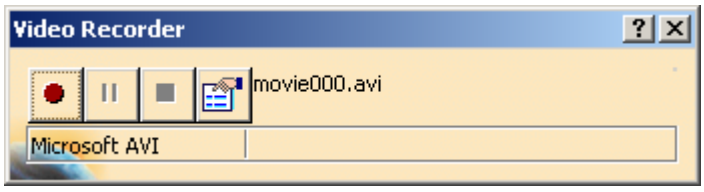
Después se compila la simulación, creando una *película* o “Replay” y así nos ahorramos que el ordenador la tenga que crear cada vez que la queramos ver, ralentizando mucho el movimiento:



Posteriormente se reproduce cíclicamente la “Replay” creada, para tener el movimiento periódico del péndulo, pues solo habíamos insertado un periodo del movimiento:

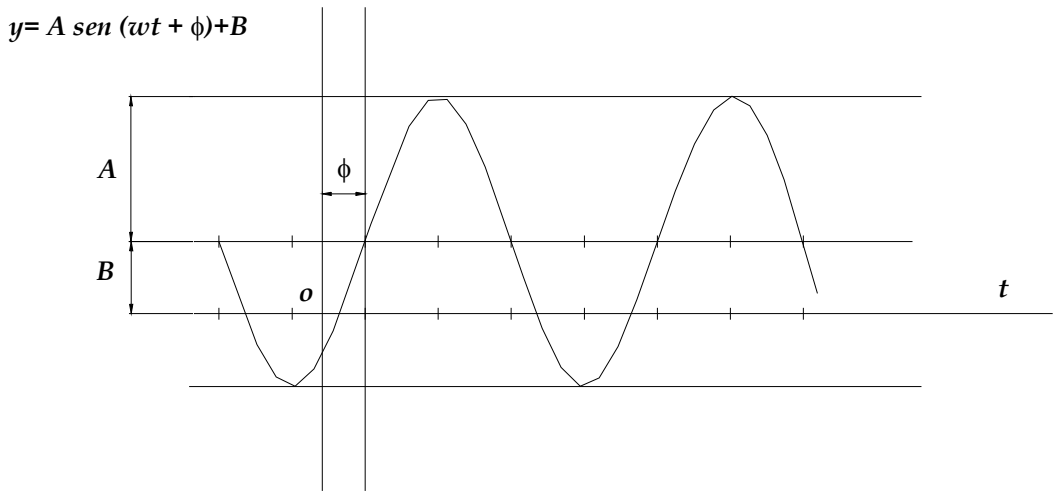



Y capturo en un video la película, accediendo desde la Barra de Menús a Tools/Image/Video:



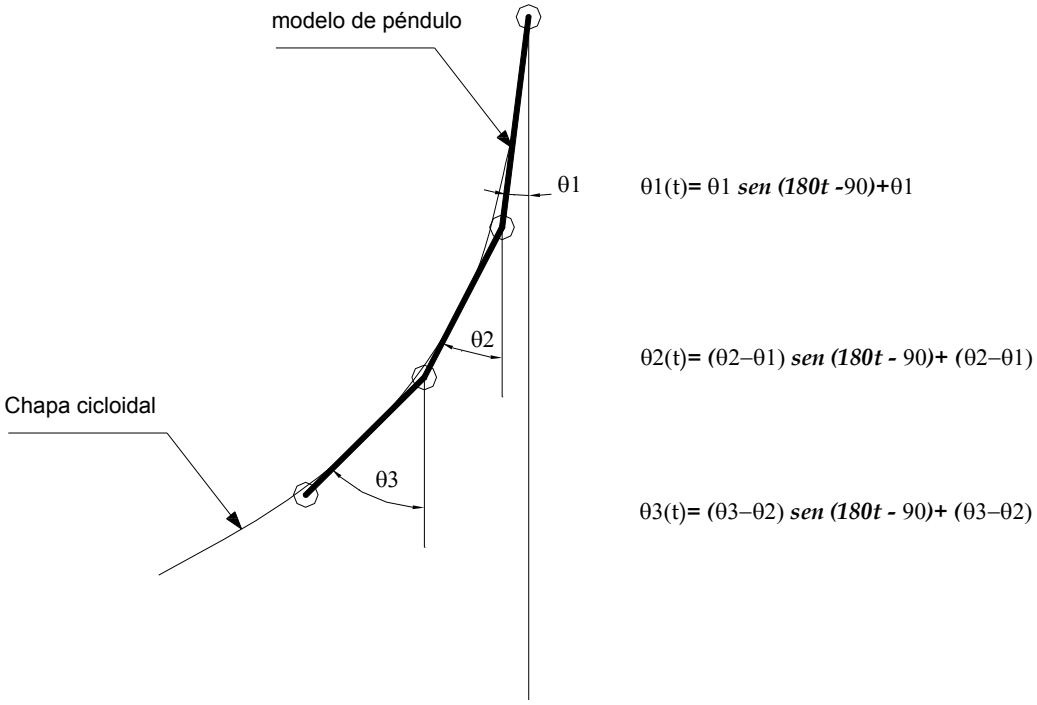

Generamos un video llamado “Péndulo” en el que se puede apreciar tanto que se cumple la propiedad enunciada por Huygens como que el modelo del péndulo realizado da muy buen resultado, aunque introduce un pequeño error, debido a que por la cogida que se tiene que usar para salir de entre las chapas cicloidales estamos despreciando una pequeña parte de la cicloide:

Para la animación del reloj completo, el péndulo se ha **simulado con funciones,** debido a la cantidad de piezas que se mueven a diferente velocidad cada una, y respecto a la demás, lo que hace practicamente imposible una sincronización discreta mediante comandos del mecanismo completo. Empezemos por recordar la función que describe el movimiento de un péndulo simple**:**




Para que el péndulo empiece a moverse en su punto de amplitud máxima $\phi$ = ± 90 º y como nuestro péndulo debe marcar segundos $\Rightarrow \omega = 180 \frac{^{o}}{\text{seg}}$

En nuestro caso, según hemos modelado, lo que tenemos es un péndulo compuesto, en el que cada eslabón describe un movimiento periódico simple respecto al eslabón anterior:




Como CATIA, cuando creamos un mecanismo, fija la refencia entre piezas como la posición que tienen en el momento de crear la unión (“join”), lo que hacemos es, antes de crear las uniones, en Assembly Design, situar las piezas tangentes a una de las chapas cicloidales, como se muestra en la figura de la izquierda, y entonces es cuando creamos las uniones entre los diferentes eslabones, siendo pues las funciones que simulan el movimiento de éstos como las que aparecen en la figura superior o como las que se muestran a continuación:

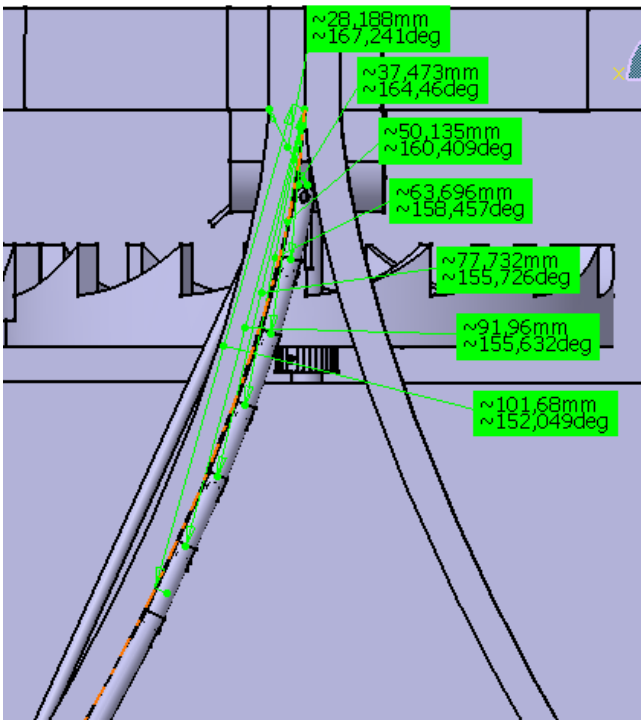
*parael primereslabon*:

$$\theta_1(t) = \theta_1\, sen(180t - 90) + \theta_1$$

*parael restodeeslabones*:

$$\theta_j(t) = (\theta_j - \theta_i)\, sen(180t - 90) + (\theta_j - \theta_i)$$

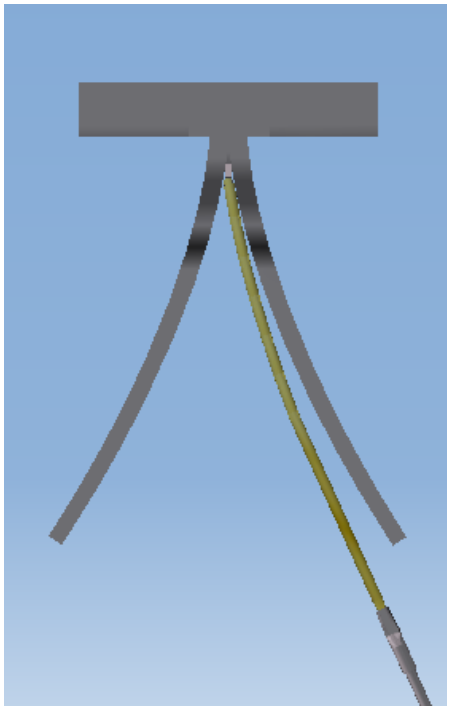
Para tenerlas totalmente definidas bastará con acotar los angulos que en la posición inicial, forman con la vertical los distintos eslabones :

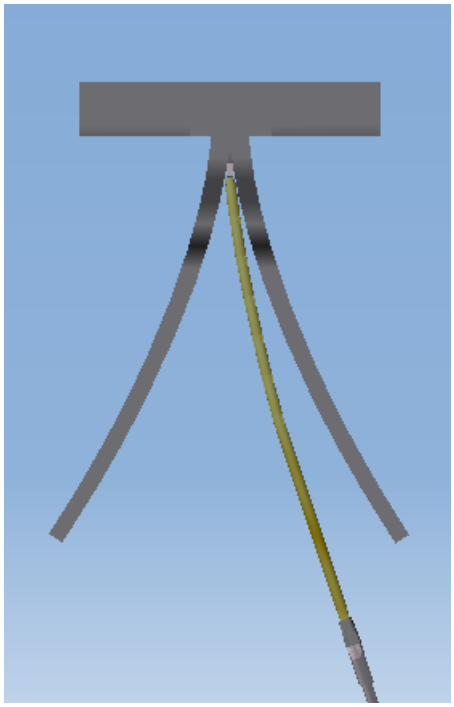


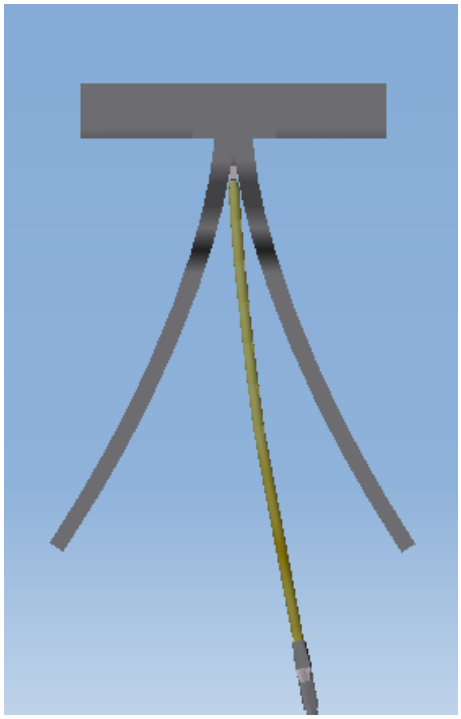

Así pues las leyes que describen el movimiento de los eslabones de la cuerda ficticia serán:

$$\theta_1(t) = (180 - 167.241)\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1 = 12.759\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1$$
$$\theta_2(t) = (167.241 - 164.46)\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1 = 2.781\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1$$
$$\theta_3(t) = (164.46 - 160.409)\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1 = 4.051\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1$$
$$\theta_4(t) = (160.409 - 158.457)\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1 = 1.952\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1$$
$$\theta_5(t) = (158.457 - 155.726)\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1 = 2.731\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1$$
$$\theta_6(t) = (155.726 - 155.632)\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1 = 0.094\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1$$
$$\theta_7(t) = (155.632 - 152.049)\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1 = 3.583\,\text{sen}\,(180t - 90) + \theta_1$$

El proceso que sigue es análogo al anterior, en la simulación con comandos: editamos una simulación, y después al editarla, podemos o crear una Replay, o generar un video (esto también se puede hacer en el caso anterior):







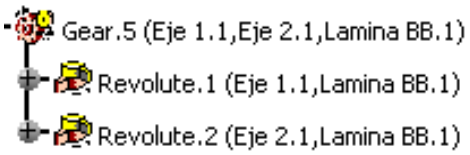
En las capturas mostradas de la animación se aprecia lo aproximado de este modelo, cómo la “cuerda” ya se va curvando antes de llegar a la chapa cicloidal, y justo en el momento de llegar ya tiene la forma de la chapa. Aunque la cadena no se mueve exactamente como una cuerda, el fuste del péndulo si lleva el movimiento necesario para regular las marcha del reloj.

## *8.2 Simulación del Reloj completo*

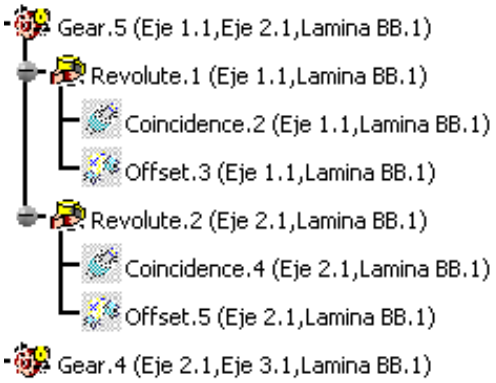
Pasamos a simular lo que sería el tren de engranajes regulado por el péndulo. En esta simulación no vamos a incluir la totalidad de las piezas, vamos a prescindir de las que dificulten la visuaización del macanismo y no desempeñen alguna función en lo que a movimiento repecta, como el Subensamblaje Esferas y algun gnomon. También para mejorar la visualización del movimineto de las agujas vamos a sustituir el Disco Segundero por una aguja corriente.

Para crear este mecanismo lo haremos de la segunda de las formas que comentábamos al principio, introduciendo todas las piezas que incluyamos en la simulación desde el principio, porque si introducimos el péndulo como un subensamblaje dentro del ensamblaje que sería el resto del reloj o lo que llamábamos “tren de engranajes”, CATIA en principio lo considera rígido, y si lo flexibilizamos, lo incorpora al árbol como un segundo mecanismo, que no se puede animar simultáneamente con el primero, que sería el tren de engranajes. Con los otros 2 subensamblajes no hay problema porque nos interesa que sean rígidos.

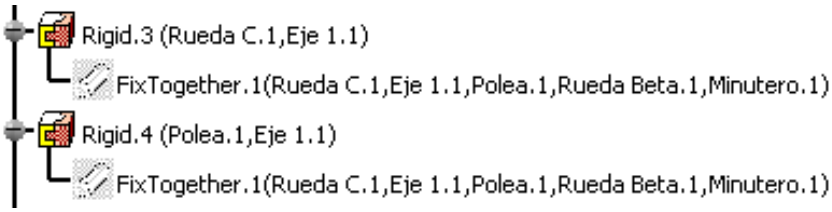
Por ejemplo se muestra un extracto del árbol donde aparece la unión del tipo “engranaje” o “gear” que se establece entre los ejes 1 y 2, que se compone a su vez de 2 “uniones de revolución” o “revolute joints”.




Si además desplegamos estas “uniones de revolución”, vemos como estas se componen de 2 restricciones o “Constraint” de las que usábamos en Assembly.




En este otro extracto del árbol , se muestran “uniones rígidas” o “Rigid Joints”, con las que conseguimos por ejemplo que los engranajes y la polea se muevan solidarios a los ejes.




Además de las ya vistas funciones para el péndulo, usamos las siguientes funciones de simulación de movimiento para el resto de grados de libertad conductores:

$$para\ el\ giro\ del\ Eje\,\mathbf{1}:\boldsymbol{\omega}=\frac{\mathbf{360^{o}}}{hora}$$

$$para\ el\ giro\ del\ Eje\,\mathbf{5}:\boldsymbol{\omega}=\frac{\mathbf{12^{o}}}{hora}$$

$$para\ el\ giro\ del\ eje\ LM\ :\boldsymbol{\omega}=\frac{Angulo\ de\ Palas}{\mathbf{2}}\cdot seno(\mathbf{180}t+\mathbf{90^{o}})-\mathbf{25.09^{o}}$$

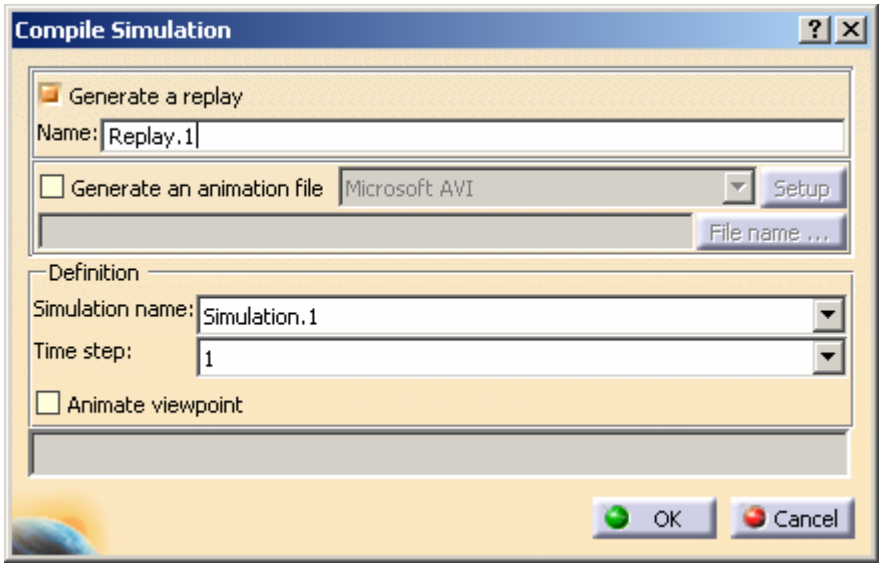
El eje 1, obviamente ha de moverse a esa velocidad pues da los minutos, y el minutero da una vuelta por hora. El eje 5 se mueve a esa velocidad simplemente deduciéndolo de las relaciones de transmisión entre ejes y se ha tenido que usar ese grado de libertad como conductor por la imposibilidad de definir una “Union de Engranajes” entre ejes perpendiculares. Por otro lado, recordar que en el apartado

6.3.6 Eje LM con paletas, vimos que el “Angulo de Palas” era igual a la amplitud del movimiento periódico de la varilla S.

Realmente se ha usado una fórmula más, que dice que el ángulo de la varilla S es igual a 0, esto es así porque en vez de usar una unión rígida con el Eje LM, hemos definido un “unión de revolución”, a la que le decimos que no hay giro.

Se ha generado un video llamado “Tiempo Real”, en el que se muestra una simulación del reloj en tiempo real, es decir, el periodo del movimiento del péndulo es de 2 segundos..

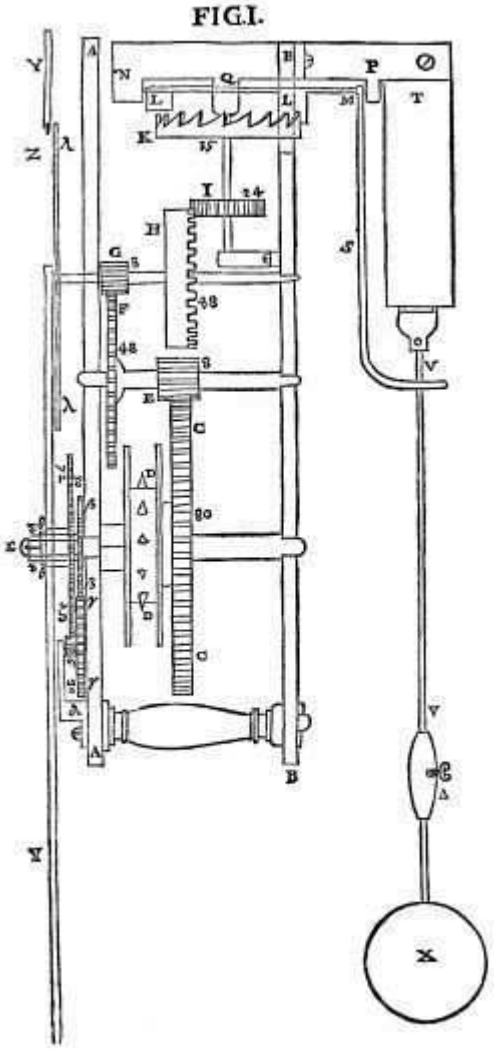
Para conseguir simulaciones en tiempo real lo que hacemos es capturar tantos “Steps” como segundos tenga la animación, porque CATIA inserta un “Step” cada segundo y después a la hora de compilar el video, disminuimos lo que CATIA llama “Time Step”:

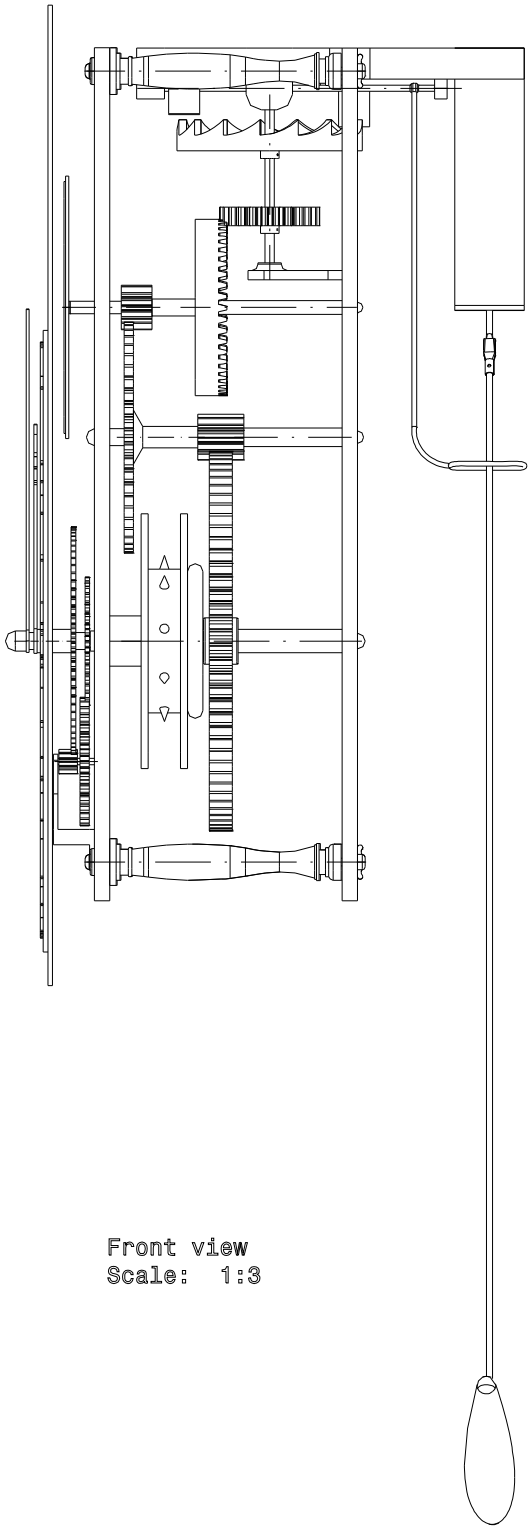


el inverso de ese número es el número de “Steps” de interpolación que CATIA introduce entre cada uno capturado al editar la simulación, y éstos no hacen más que mejorar la calidad del video, con el consecuente aumento de tamaño del archivo, sin aumentar la duración de la película.

# 9 PERFIL DEL RELOJ DISEÑADO: DRAFTING

Con el módulo generador de planos de CATIA V5, se ha generado una vista (Front View) del perfil del reloj. Presentamos primero el dibujo que aparece en la versión en latín del Horologium Oscillatorium, y posteriorente la vista obtenida a partir del diseño proyectado en el presente documento.





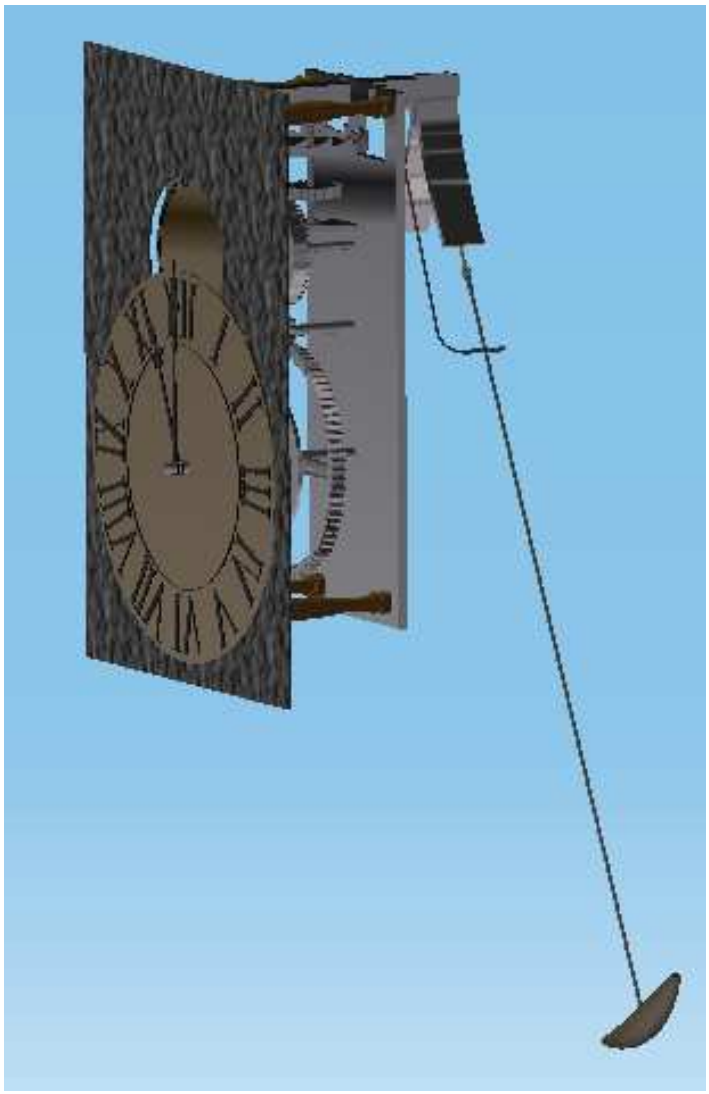
Front view
Scale: 1:3

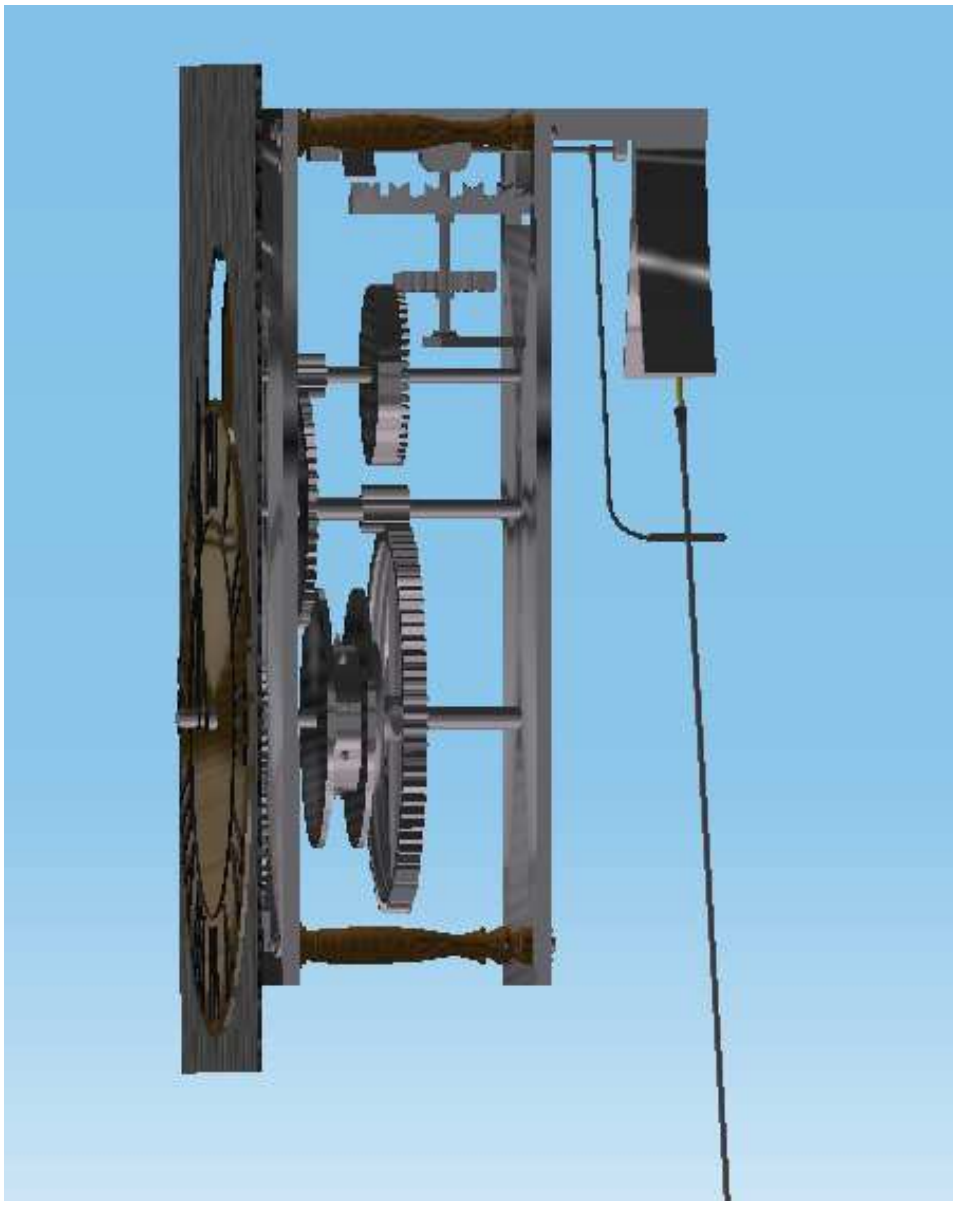
Como se aprecia se ha conseguido lo que desde un principio se pretendía y era la principal hipótesis de diseño: obtener un diseño proporcionado y lo mas parecido posible al modelo original.

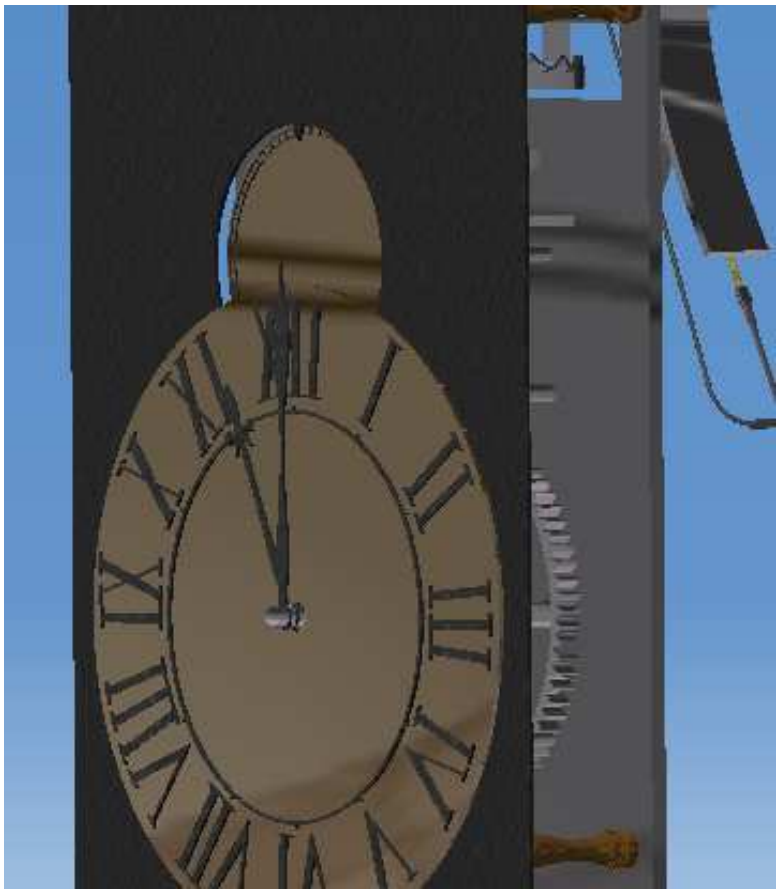
## *10 FOTOREALISMO: PHOTO ESTUDIO & REAL TIME RENDERING*

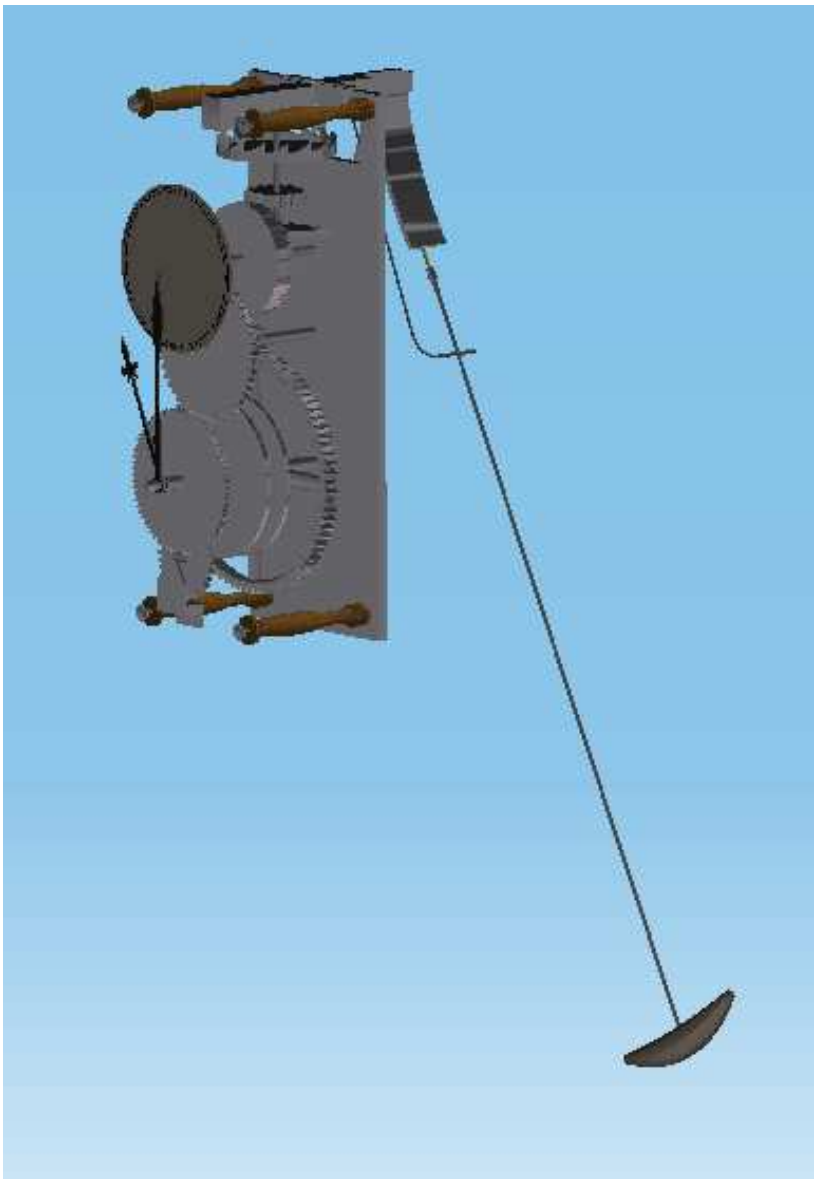
En este apartado generaremos imágenes fotorealistas del reloj con el módulo

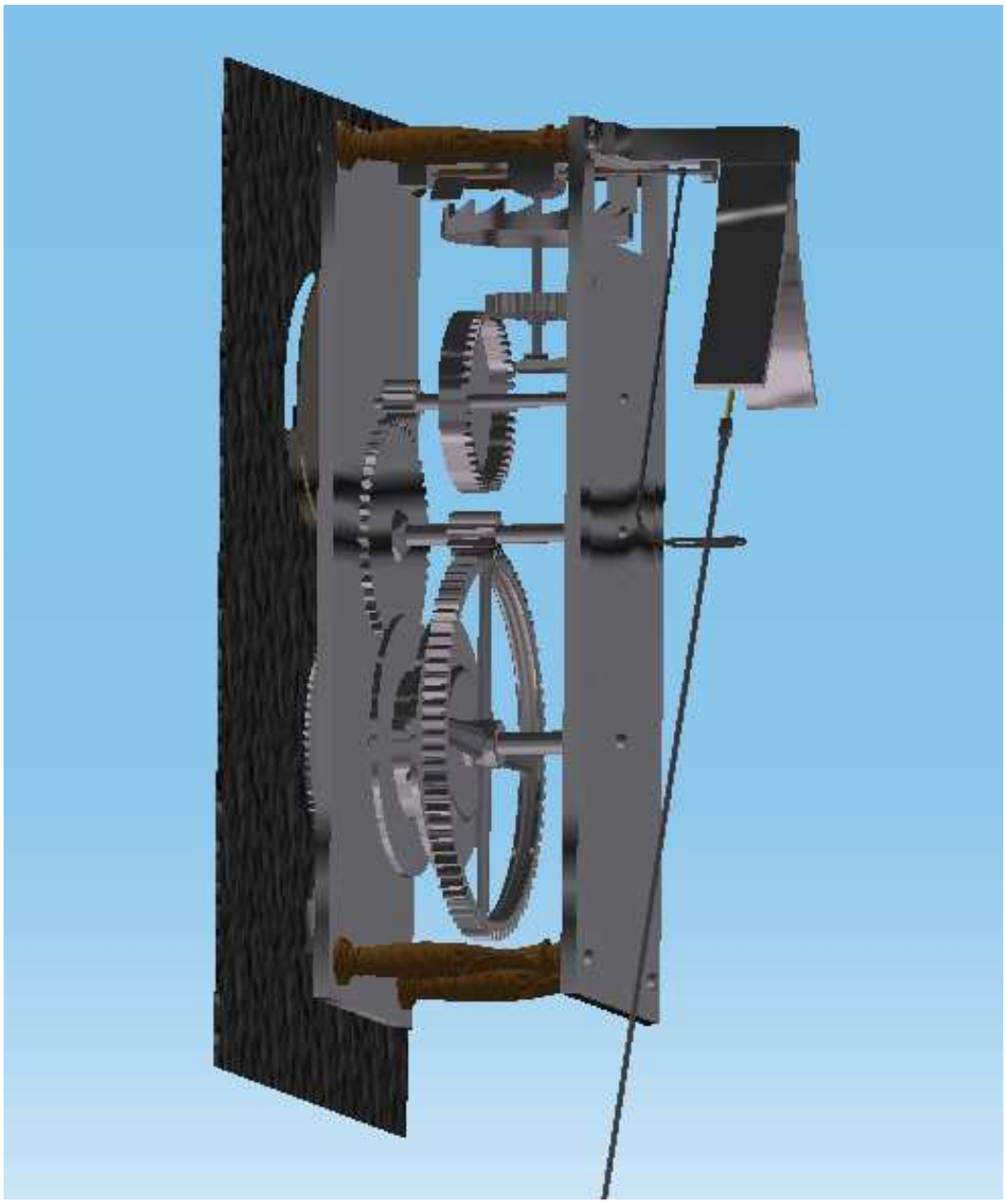
**Real Time Rendering.** Este módulo nos permite, de una manera simple, jugando con la luz, añadiendo material a las piezas y eligiendo un entorno (“Enviroment”) obtener imágenes de gran realismo como las que se muestran:

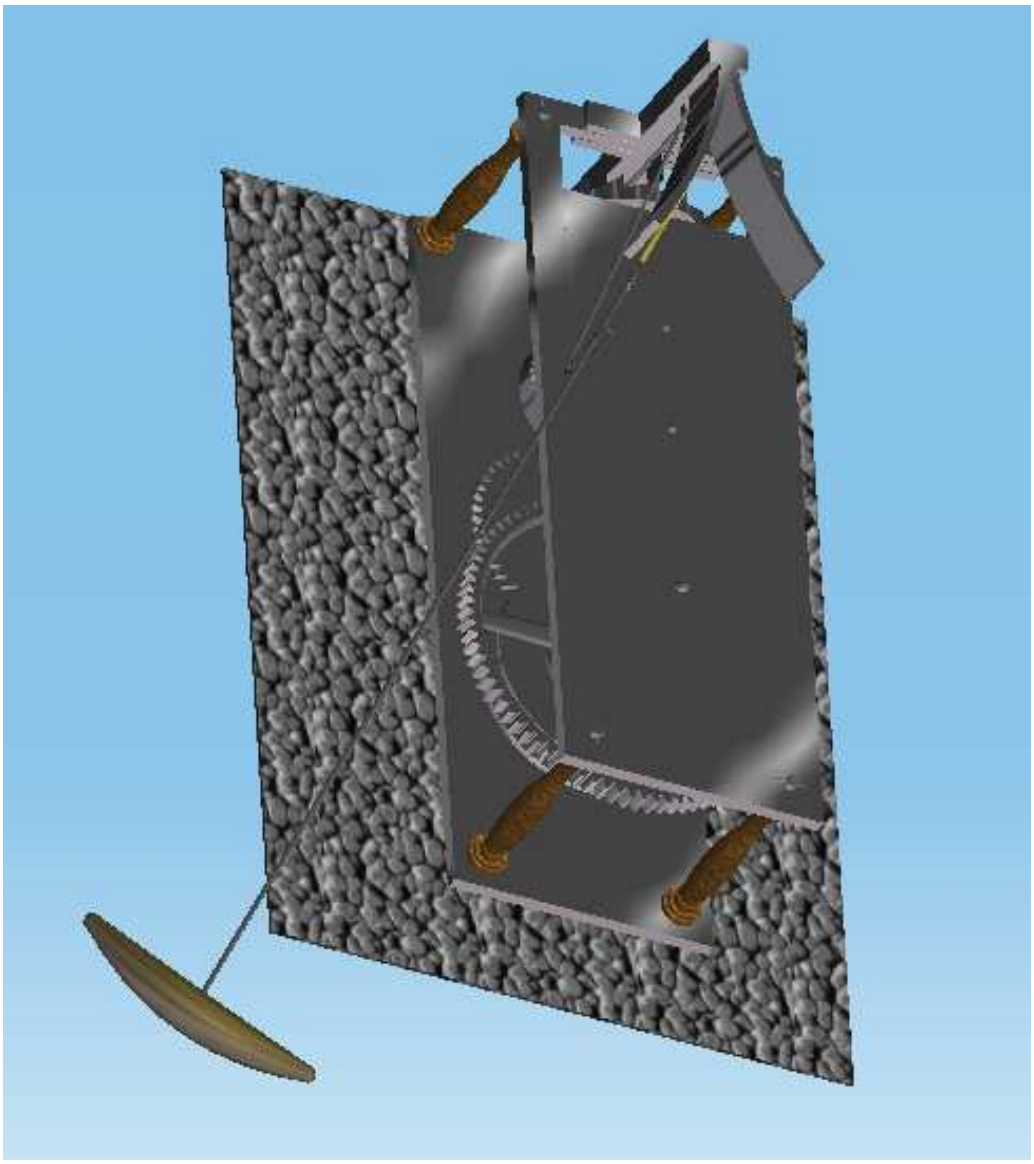


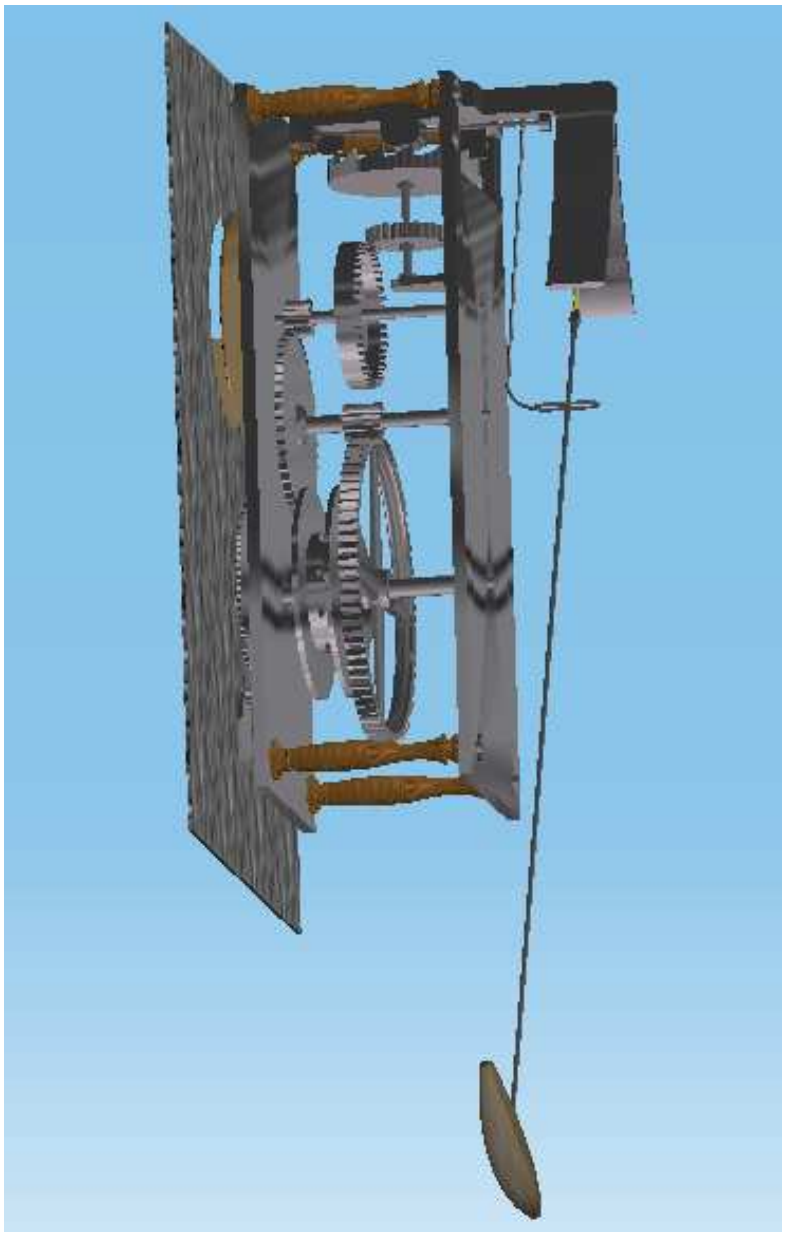


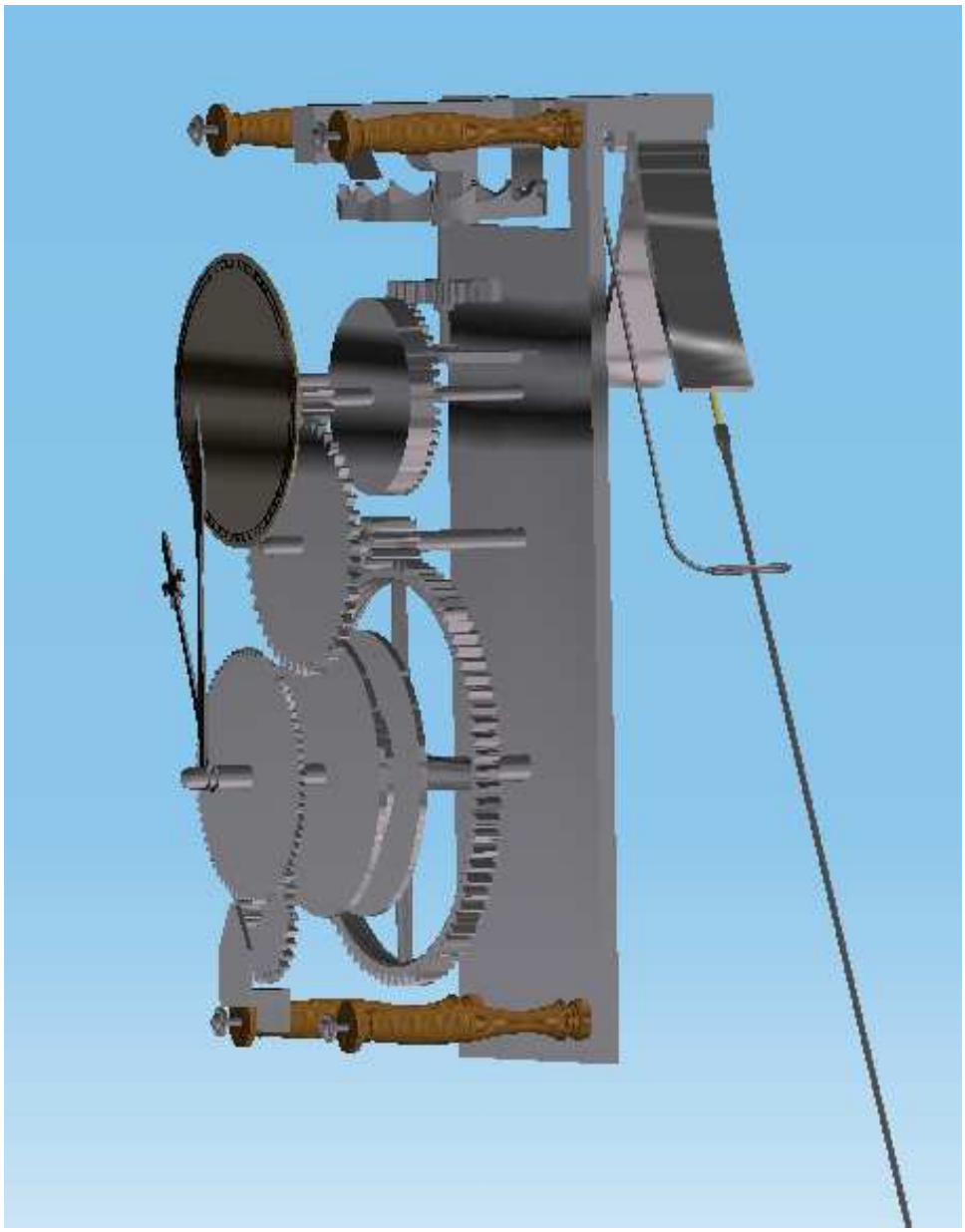


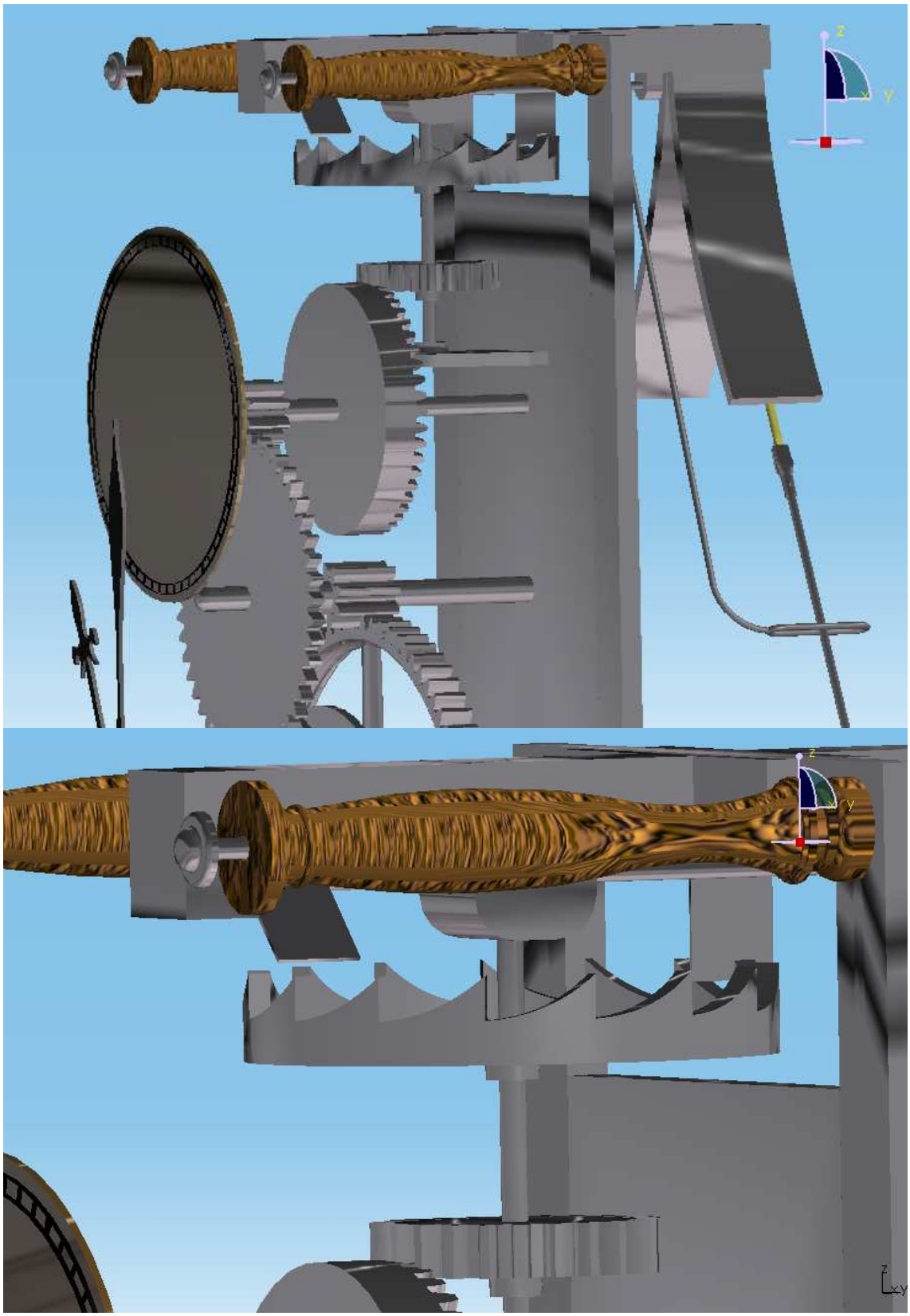


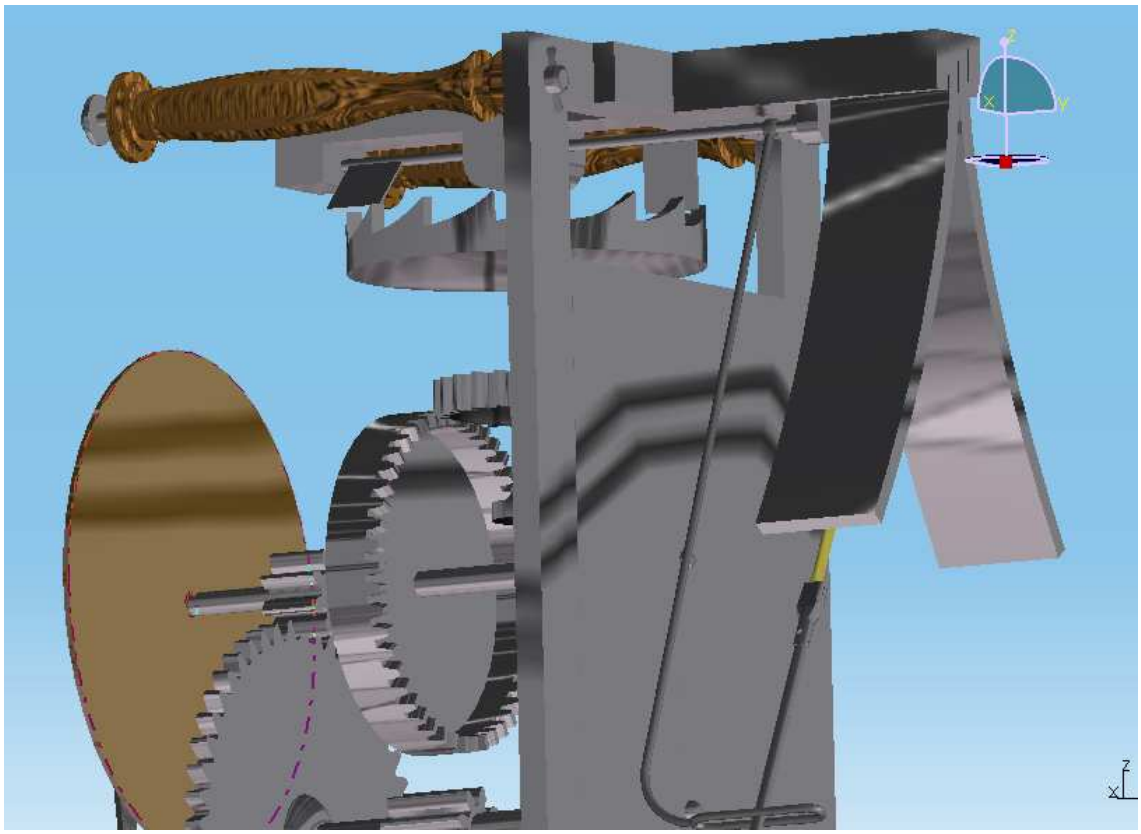


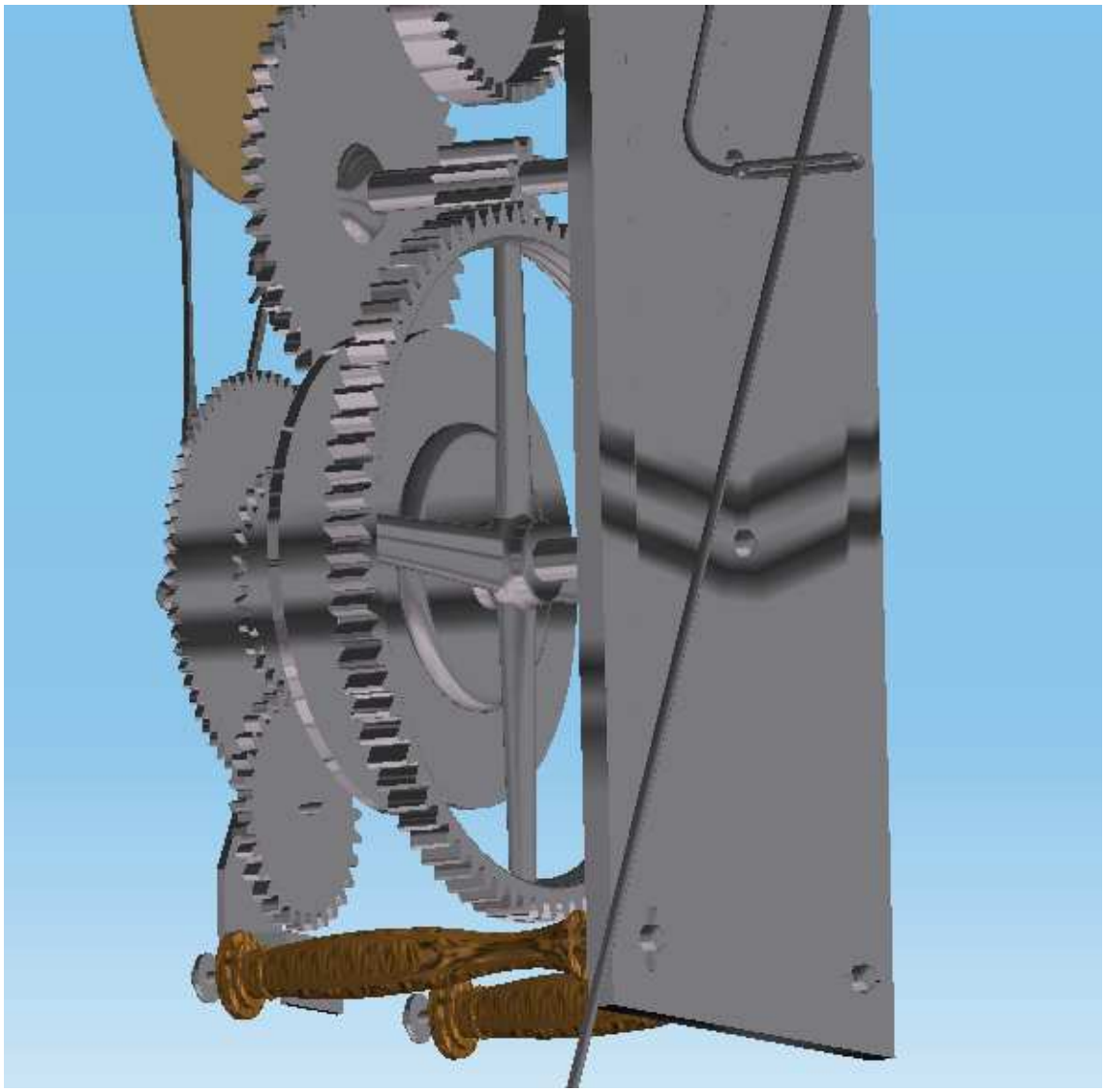


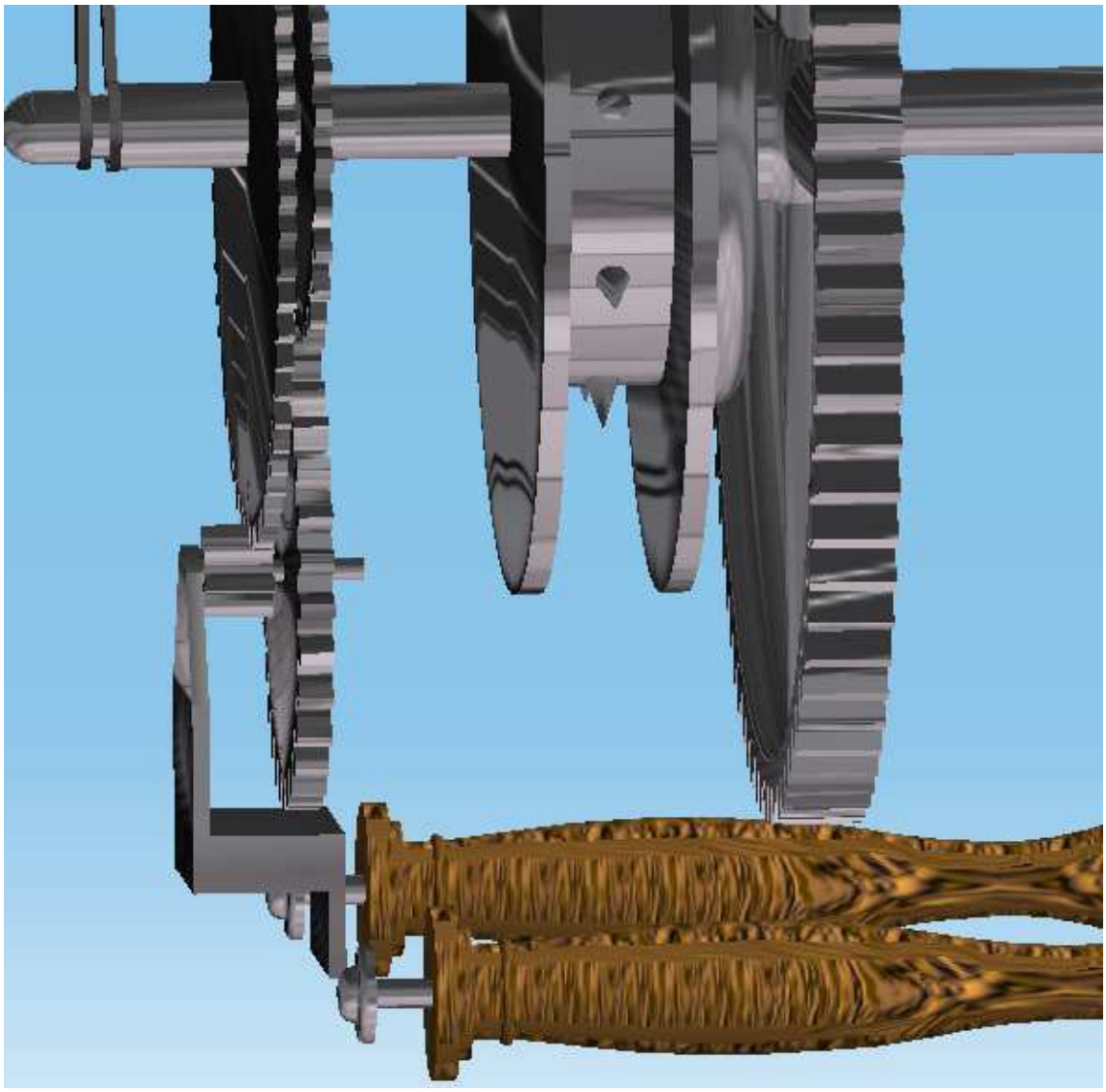












# 11 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Como se puede comprobar, los criterios de dimensionamiento han resultado acertados, habiéndose obtenido un Reloj proporcionado y bastante parecido al que Christiaan Huygens describe en su obra “Horologium Oscilatorium”. Volvemos a insistir también en la acertada decisión de trazar el perfil de los dientes de los engranajes por el método del Odontógrafo de Grant, que a pesar de ser aproximado ha cubierto perfectamente nuestras necesidades.

Puede resultar exagerado y poco estético el hecho de que la amplitud de oscilación del péndulo sea tan amplia, pero es consecuencia del tipo de mecanismo de escape que usaba este reloj, el más primitivo, como ya se ha comentado, pero es absolutamente necesaria una gran amplitud para su correcto funcionamiento. Puesto que el mismo año que Huygens inventó este reloj, Hooke inventó el áncora, Salomón Coster rápidamente lo incorporó al diseño pues solucionaba este problema permitiendo amplitudes mucho más pequeñas, con la consecuente mejora en la fiabilidad, llegando incluso, poco después, a prescindir de las chapas cicloidales, pues como Huygens demostró, movimientos de pequeña amplitud, constituyen momentos de una cicloide, y ésta, es tautócrona.

Hemos comprobado también la complicación que ha supuesto simular el péndulo por el pequeño tramo de cuerda que tiene y como la imposibilidad de CATIA de modelar elementos flexibles incluso nos ha impedido simular la fuerza impulsora del reloj: las pesas.

# 12 BIBLIOGRAFÍA


- ”Horologium Oscillatorium”, o “The Pendulum Clock or Geometrical Demostration Concerning de Motion of Pendula as Applied to Clocks”, Christiaan Huygens, 1673
- “WATCH & CLOCKMAKERS´ HANDBOOK. DICTIONARY AND GUIDE”, Antique Collectors´ Club, F. J. Britten
- "Grandes Astrónomos Anteriores a Newton", Espasa-Calpe, F. Arago, Buenos Aires, 1962.
- "Astronomía", Vergara, Barcelona, P. Moore, 1963.
- “Atlas de astronomía”, de Joachim Herrmann.
- “ENGRANAJES: Trazado Teórico y Práctico”, 1ª y 2ª Parte, de T. Carreras Soto. Ediciones Carrera Soto.
- “Elementos de Máquina, Engranajes y Poleas” , de Pacual Pezzano y Alberto Klein.
- Curso de Extensión Universitaria: “ II Curso de Diseño 3D con Catia V5”.
- Ayuda CATIA V5R9.
- www.abbeyclock.com
- www.sciencemuseum.org.uk