

Diseño y Fabricación de un reloj de madera

Iñigo Latasa, Tiruña, S.L., Orcoyen (ES)

1) Introducción:

Mi vida laboral está estrechamente relacionada con el mundo del engranaje, tanto el cálculo y diseño como su fabricación. Mi relación con la madera viene porque en mis años de universitario trabajé en una carpintería. Por lo que para mí, el diseñar y fabricar un reloj de engranajes de madera era un proyecto que unía dos de mis aficiones.

En mi último proyecto diseñé y fabriqué una fresadora de CNC para trabajar la madera. Una de mis primeras pruebas fue fabricar una pareja de engranajes. Le mandé unas fotos a Daniela, comercial de la empresa KissSoft donde desarrollan y comercializan el programa de cálculo de engranajes que empleo en la empresa en la que trabajo. Le expliqué mi intención de diseñar y fabricar mi primer reloj de engranajes y me pidió que lo documentara con texto y fotos para poderlo publicar. Conclusión: El mundo al revés. Un español explicando a los suizos cómo fabricar un reloj. Con toda mi humildad, comencemos.

2) Trenes de engranajes:

Un engranaje es un mecanismo que, a través de una pareja de ruedas dentadas, transmite par de un eje a otro.

Un reloj es un dispositivo para medir el tiempo. Para empezar, tenemos un péndulo el cual, con su movimiento periódico, nos sirve como punto de partida para medir el tiempo. A través de un tren primario de engranajes, debemos convertir dicho periodo en una aguja que realice un giro completo en una hora y un tren secundario de engranajes debe convertir ese giro por hora en otra aguja que gire una vez cada doce horas.

La ecuación que determina el periodo de un péndulo es la siguiente:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l}{g}} \Rightarrow l = g \cdot \left(\frac{T}{2 \cdot \pi} \right)^2$$

Dependiendo del periodo que se elija, el tren primario deberá hacer una reducción u otra. En mi caso, decido emplear un péndulo de periodo 2 segundos. De esta manera, pasará un segundo entre el sonido del Tic y del Toc característico que genera el áncora al chocar con los dientes del escape. Para dicho periodo, necesitamos que la longitud del brazo del péndulo sea alrededor de 994 mm. El amarre de la masa al brazo hay que hacerlo con un sistema que permita bajar o subir un poco la masa para ajustar en caso de que se atrase o se adelante.

La función de la pareja formada por el escape y el áncora es regular el ciclo de avance de los engranes en función del periodo del péndulo. El escape puede diseñarse con el número de dientes que se desee. Yo lo voy a fabricar con 30 dientes. De esta forma, el eje del escape girará una vuelta por minuto. Ese giro por minuto, a través del tren primario de engranajes, debemos convertirlo en un giro por hora. Es decir, hacer una reducción 1/60. En el diseño de los engranajes me impuse dos premisas: La primera era fabricar

todos los engranajes con perfil de Evolvente. La segunda era no fabricar ningún engranaje con menos de 17 dientes.

Mi elección para el tren primario ha sido realizar la reducción en 3 etapas de la siguiente manera:

Primera etapa: 20/75

Segunda etapa: 20/80

Tercera etapa: 20/80

Para comprobar que cumple el requisito que necesitamos, el producto de los conductores dividido entre el producto de los conducidos debe resultar ser 1/60:

$$\frac{20 \times 20 \times 20}{75 \times 80 \times 80} = \frac{1}{60}$$

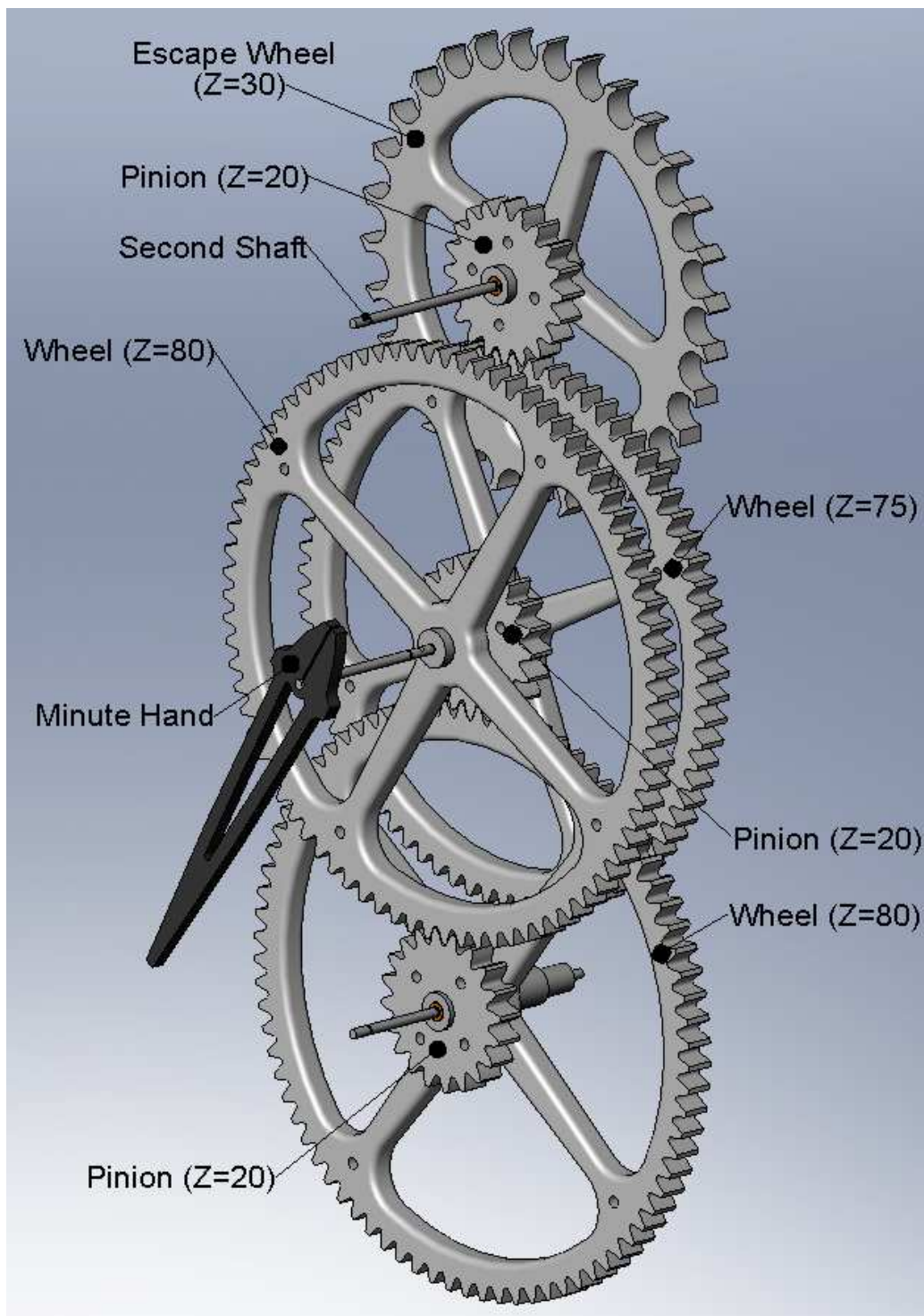
El tren secundario debe convertir un giro por hora en un giro cada doce horas. Es decir, 1/12. Yo he realizado esta reducción en dos etapas con igual distancia entre centros. Esta condición viene impuesta por el requisito de que el eje minuterero y el eje horario sean concéntricos. Así:

Primera etapa: 20/80

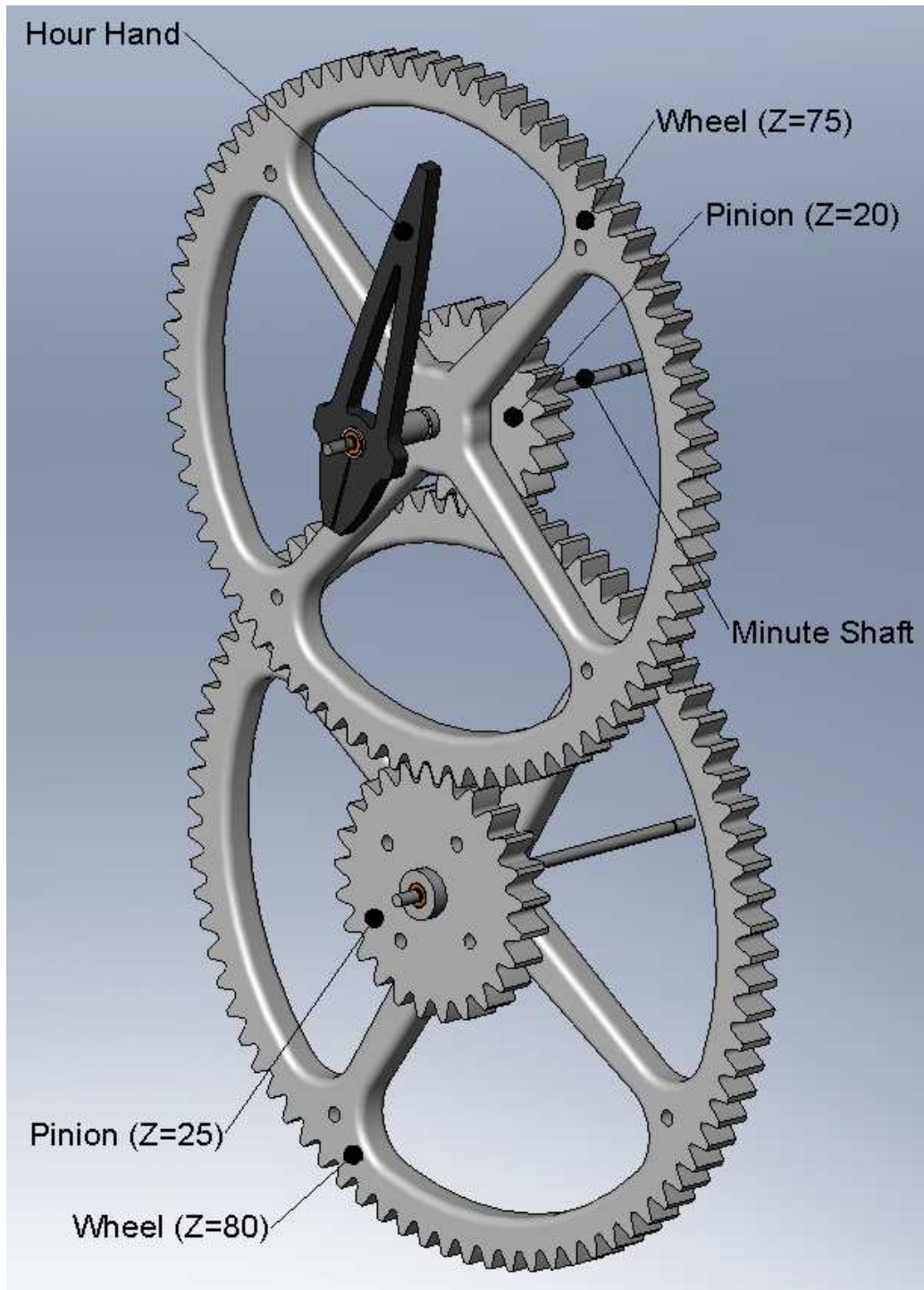
Segunda etapa: 25/75

Comprobamos que cumple el requisito de reducción: $\frac{20 \times 25}{80 \times 75} = \frac{1}{12}$

Esquema de la primera etapa:

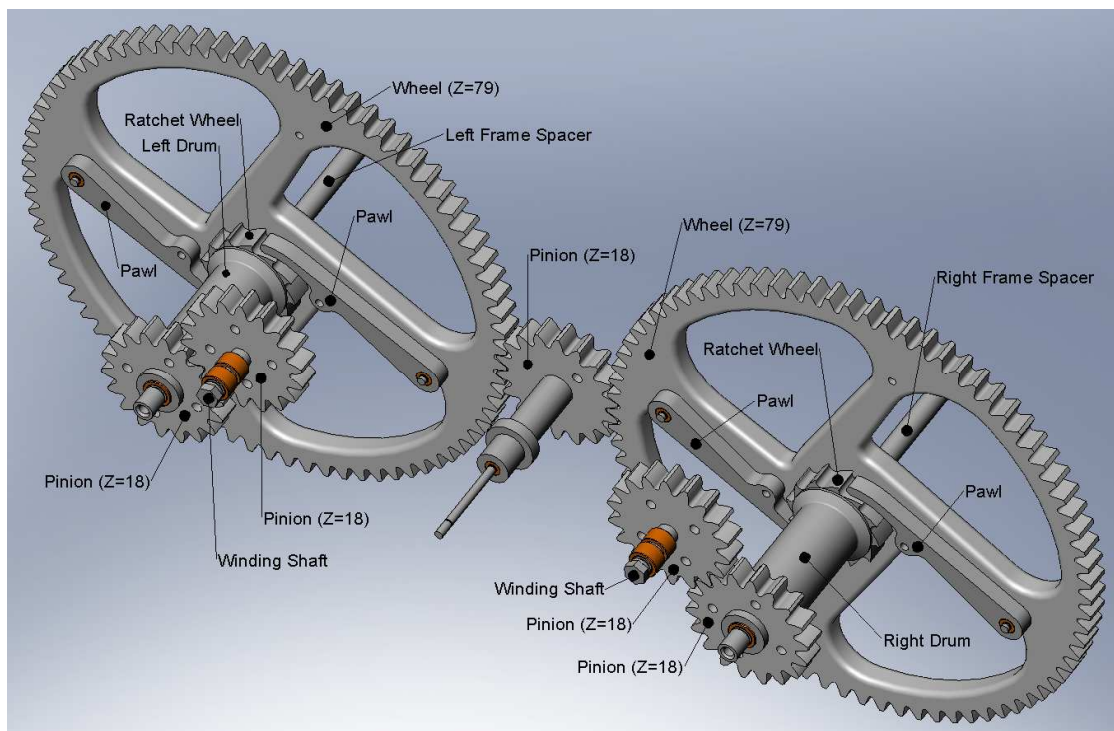


Esquema de la segunda etapa:



3) Movimiento perpetuo:

Por efecto de la fricción, el péndulo hay que aportarle energía para que no termine parándose. Esta energía se la vamos a aportar colocando masa colgando de una cuerda enrollada en un eje que engrane con el tren primario. Esta masa dará par al tren primario que a través del escape-áncora, transmitirá un pequeño impulso en cada oscilación del péndulo. En mi diseño, he colocado dos masas, una a cada lado del reloj, que engranan con el eje minuterero. Las cuerdas de donde suspenden las masas, van enrolladas a unos tambores que no acoplan directamente con el tren primario. Entre medio, debe haber un trinquete que transmita el par en el sentido normal de marcha pero que se desacople en el sentido contrario. Esto es necesario ya que las masas, una vez finalizada su carrera útil descendente, deberán ser elevadas de nuevo haciendo girar el tambor en sentido contrario y así volver a enrollar la cuerda alrededor del tambor. Mi trinquete se basa en dos uñetas cuyos extremos tocan con una rueda con dientes asimétricos. En un sentido las uñetas patinan sobre la rueda y gira el tambor independiente del resto del tren primario. En el sentido contrario, las uñetas se clavan en los dientes asimétricos y el tambor gira solidario con el resto del tren y así transmitir el par.



4) Teoría y Diseño de los engranajes:

Ya tenemos los engranajes que necesitamos y sus números de dientes. Ahora hay que dimensionarlos. Para ello definiremos el Módulo de los engranajes. El módulo es un valor que nosotros lo elegimos y nos condicionará completamente la dimensión del reloj. Si se escoge un Módulo muy grande, el reloj quedará excesivamente grande pero si se elige un módulo muy pequeño, será difícil de fabricar. En mi caso, la elección del Módulo es 3 mm.

El diámetro primitivo es el diámetro de referencia en un engranaje y equivale al número de dientes multiplicado por el Módulo. En una pareja de engranajes, los diámetro primitivos coincidirán en un punto y su relación es la misma que la relación de transmisión. La distancia entre centros de dos engranajes es la suma de sus diámetros primitivos dividido entre dos. Por tomar un ejemplo en mi reloj, la distancia entre centros de la pareja de engranajes de 80 y 20 dientes sería 150 mm.

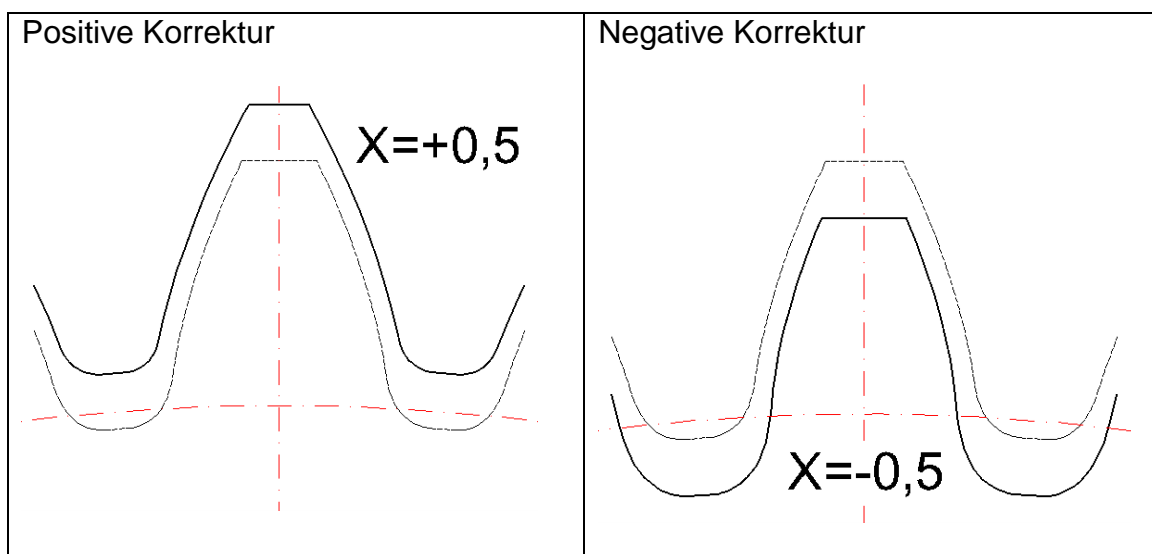
El diámetro exterior de un engranaje es igual al diámetro primitivo más dos veces el módulo. Así que mi rueda de 80 dientes, debería tener un diámetro exterior de 246 mm. y el piñón de 20 dientes debería tener un diámetro exterior de 66 mm. Digo “debería” porque he jugado con un par de factores para mejorar el engrane.

En este tipo de relojes, es importante reducir todo lo posible la fricción. Un punto donde se puede reducir la fricción es en el punto de giro del péndulo. El péndulo pivota con una mínima fricción si punto de giro consiste en una cuña que oscila apoyada sobre un hueco en forma de V. En los trenes de engranajes también podemos reducir fricciones todo lo posible. Por eso empleamos perfil de evolvente y no permitimos que haya piñones con menos de 17 dientes, en los que tendríamos zonas del flanco trabajando que no son evolventes.

También se puede jugar con dos factores relacionados entre sí: El desplazamiento de perfil o corrección de perfil (X) y los deslizamientos específicos. Empezaré a explicar el segundo factor.

Tan sólo cuando el engrane se produce en los diámetros primitivos, el contacto entre flancos es rodadura pura. Conforme el punto de contacto se aleja del punto de los diámetros primitivos, hay menor rodadura y hay más deslizamiento. El deslizamiento es máximo al inicio y al final del engrane de dos dientes conjugados; uno de la rueda con uno del piñón. O lo que es lo mismo, el deslizamiento es máximo en el fondo y en la cabeza de los dientes.

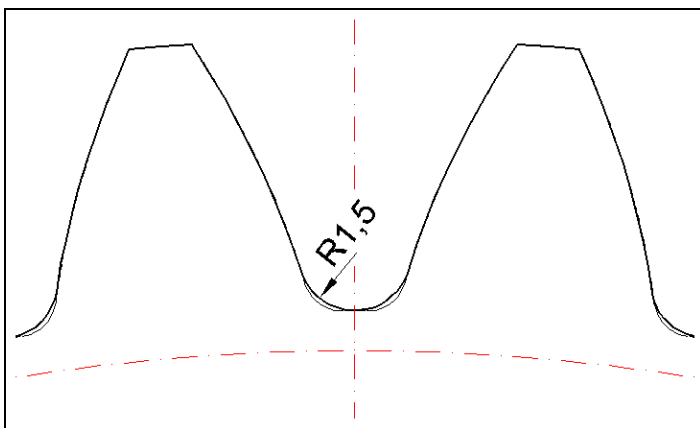
El otro factor que he mencionado, La corrección de perfil o X es un factor que, aplicado en valor positivo a un engranaje, hace que empleemos una zona de la evolvente más alejada del centro del engranaje que si no aplicáramos dicho factor X . Por otro lado, aplicar un valor negativo de X a un engranaje, hace que empleemos una zona de la evolvente más cercana al centro del engranaje.



Aplicar los factores adecuados de X tanto a la rueda como al piñón nos ayudan a disminuir los deslizamientos producidos en las puntas y en los fondos de los dientes.

Las ecuaciones demuestran que dando una corrección positiva al piñón y el mismo valor de corrección con signo negativo, no variamos la distancia entre centros de la pareja de engranajes y mejoran los deslizamientos específicos. Es decir, reducimos fricción en el engrane. También las ecuaciones demuestran que incrementando la distancia entre centros sin tener que cambiar ni el número de dientes ni el módulo y con los valores adecuados de correcciones tanto para la rueda como para el piñón, aún reducimos más los deslizamientos específicos. He aplicado esta metodología en todas las parejas de engranes que tengo en el reloj. La pareja del ejemplo de 80 y 20 dientes, finalmente quedan con una distancia entre centros de 153 mm. Con una X a la corona de +0,6 y una X al piñón de +0,47.

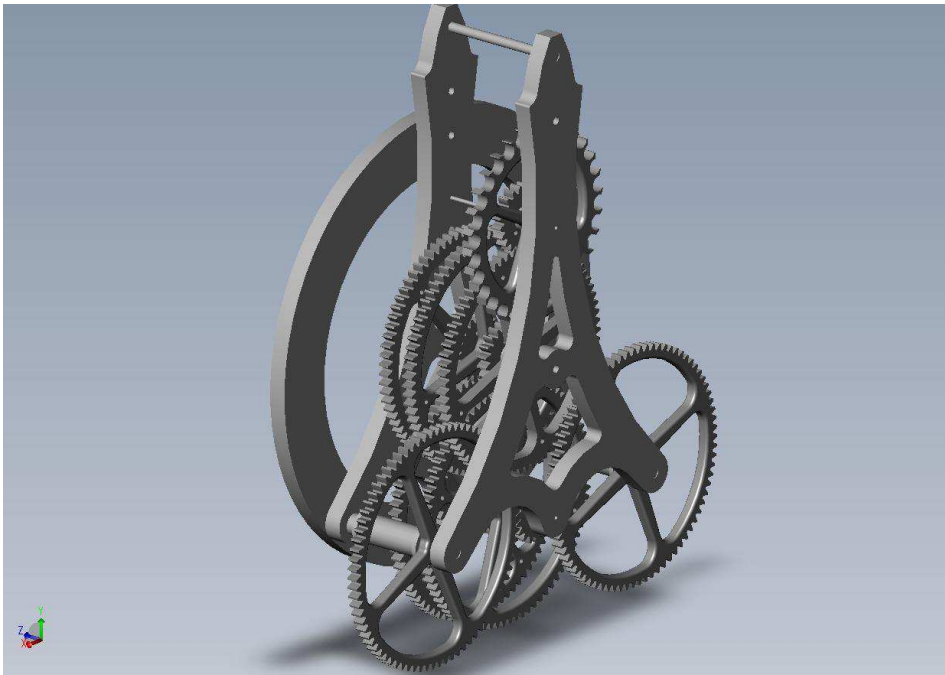
Para poder cortar mis engranajes sobre una fresadora con herramienta rotativa, debo hacer un último ajuste antes de dibujarlos. El empalme entre el flanco del diente y el radio de fondo, se hace con un radio tangente a ambos. Normalmente se emplea un radio 0,3 ó 0,38 veces el módulo pero a mi me interesa emplear el radio mayor posible así que voy a una geometría de fondo de diente denominada "full-fillet". Lo que se hace es empalmar un flanco y el contiguo con un único radio de fondo. Equivale más o menos a 0,5 veces el módulo. En mi caso, como hago los engranajes de módulo 3 mm. Se me genera un radio de fondo de 1,5 mm.



Es decir, debo cortar mis engranajes con una herramienta de diámetro 3 mm. También es necesario definir una holgura de funcionamiento para que los engranajes giren sin griparse por errores geométricos. Yo voy a aplicar una holgura de funcionamiento de 0,5 mm. Valor que reparto a partes iguales entre ruedas y piñones.

Introduciendo todos estos parámetros en el programa de cálculo de engranajes KissSoft, éste dibuja la pareja de engranajes y dicho dibujo puedo exportarlo como DXF. Sobre un programa de CAD, a las ruedas les dibujo unos vaciados para eliminar peso y hacerlas más ligeras. Tanto a los piñones como a las ruedas, les hago 4 agujeros que me servirán para amarrar las piezas de contrachapado a la máquina fresadora y poder hacer todos los fresados en una

única atada. Con estos dibujos de CAD, ya tengo los engranajes preparados para cortarlos en la fresadora CNC.



5) Darle forma al reloj:

Una vez que tenemos el número de ejes necesarios y la distancia entre ellos, podemos colocarlos en el espacio como prefiramos, buscando la geometría o apariencia global que queremos obtener en nuestro reloj. En mi caso, la geometría del bastidor de forma esquemática es un triángulo con un vértice central arriba y dos vértices laterales en su parte inferior. En cada uno de los vértices va montada una varilla de diámetro 10 mm. que me hace de separador entre el bastidor trasero y el bastidor delantero. Los separadores los prolongo por su parte trasera para amarrarlos a la pared. He colocado el apoyo del péndulo en lo más alto del reloj sobre el separador superior. El tren de engranajes los coloco en el eje central del triángulo en vertical. El siguiente eje, en orden descendente es el eje del áncora. Este eje girará solidario al áncora y debe sobresalir por la parte trasera para, a través de una pieza que hace de brazo, transmita el impulso al péndulo en el brazo del péndulo. El siguiente eje es el del escape o eje segundero que además lleva solidario a él un piñón de 20 dientes. El siguiente eje es el eje minuterero y tiene montados una rueda de 75 dientes que engrana con el piñón de 20 dientes del Eje Segundero y lleva solidario a él un piñón de 20 dientes. Este tándem de rueda de 75 dientes y piñón de 20 dientes van montados sobre un casquillo que gira loco sobre el eje minuterero. Dicho piñón de 20 dientes del eje minuterero engrana con uno de 80 dientes que gira loco en tándem con otro piñón de 20 dientes sobre el eje inferior. Para finalizar la reducción desde el escape o eje segundero hasta el eje minuterero, el piñón de 20 dientes del eje inferior, engrana con una rueda de 80 dientes que desliza con algo de fricción sobre el eje minuterero para que se pueda ajustar la hora en el reloj.

Para obtener el giro en el eje de las horas, hay un piñón de 25 dientes solidario al eje minuterero que engrana con una rueda de 75 dientes que gira loca y en tándem con un piñón de 20 dientes sobre el eje inferior. Este piñón de 20 dientes engrana con uno de 80 dientes que va solidario al eje que marca las horas. El eje de las horas no es un eje como tal sino que es un tubo que gira sobre el eje de los minutos. El eje de los minutos atraviesa dicho tubo y se prolonga un poco más de tal forma que, la saeta de los minutos, está por delante de la saeta de las horas mirando el reloj de frente. Cuando giramos la saeta de los minutos para ajustar la hora del reloj, este tren secundario de engranajes hacen girar la saeta de las horas pero el tren primario de engranajes (el que va desde el escape hasta el eje minuterero) no gira ya que la rueda de 80 dientes del eje minuterero patina sobre dicho eje.

Las masas que me mantienen el movimiento del péndulo las coloco sobre los separadores de los bastidores que me quedan a cada lado de la parte inferior del bastidor. Cada masa cuelga de una cuerda arrollada sobre una pieza llamada carrete o tambor. Por medio de un trinquete, el carrete está conectado a una rueda de 79 dientes que transmite la energía de la masa al tren primario de engranajes. El carrete lleva solidario un piñón de 18 dientes que engrana con otro piñón de 18 dientes cuyo eje sobresale por la parte frontal del reloj y, con un hexágono en su extremo y empleando una simple llave de baso hexagonal, podemos dar cuerda al reloj.

Todos los tándem de piñón-rueda van montados sobre unos casquillos de madera dura en cuyo interior inserto casquillos de bronce autolubricados de diámetro interior 4 mm. Estos casquillos de madera alojan en un extremo un piñón y en el otro extremo una rueda. En entre uno y otro, una pestaña central en el casquillo hace una separación entre el piñón y la rueda de 6 mm. Los engranajes son de contrachapado de abedul finlandés de 12 mm. de espesor.

Para los ejes de los trenes de engranajes empleo varilla calibrada de acero inoxidable de diámetro 4 mm. Para los separadores empleo varilla calibrada de acero inoxidable de diámetro 10 mm. Para mantener axialmente la posición de cada tándem de engranajes, empleo Anillos de Seguridad según DIN 6799 que se montan sobre unas ranuras que realizo en los ejes.

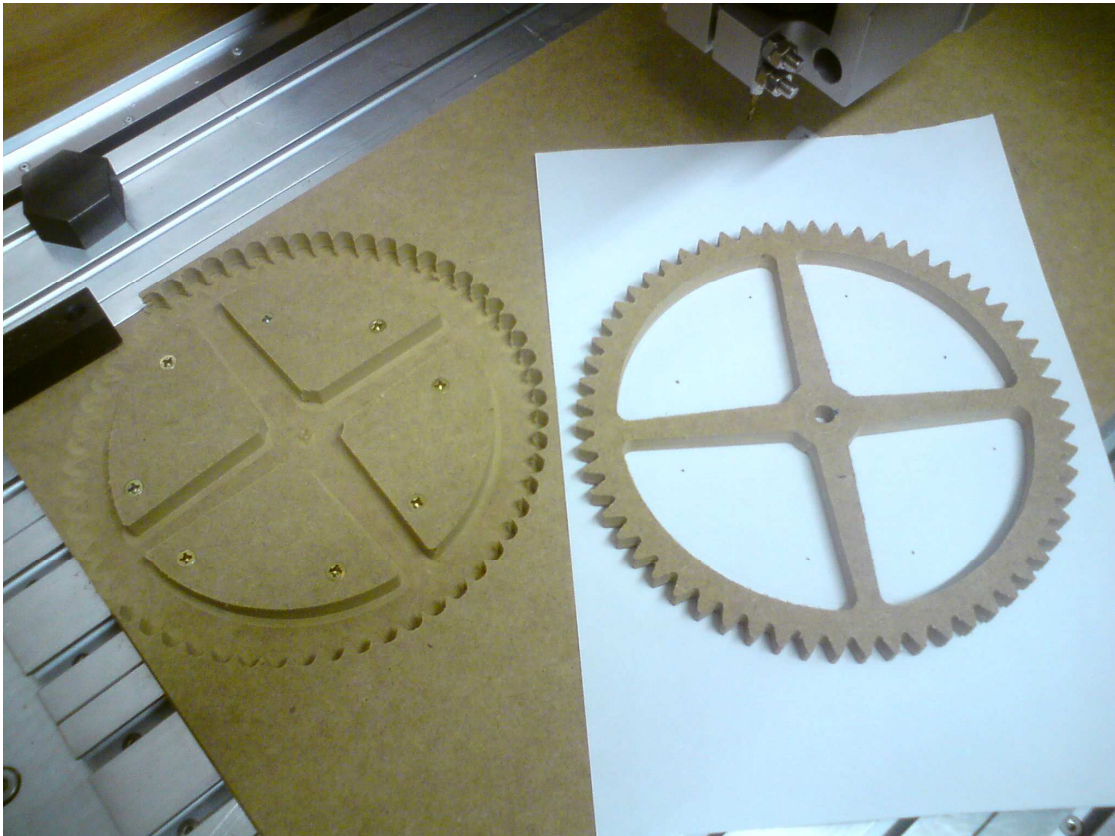
El péndulo pivota sobre una ranura que lleva el separador superior y sobre una cuña en forma de V que lleva el péndulo en su parte superior. Para hacer el brazo del péndulo se puede emplear tubo de aluminio pero tiene el inconveniente de tener un coeficiente alto de dilatación térmica. Esto quiere decir que con pequeñas variaciones de temperatura, va a variar su longitud por lo que adelantará o atrasará. También se puede emplear varilla redonda de madera. La madera apenas tiene coeficiente de dilatación térmica. En la parte inferior del péndulo y como masa colocaré una pieza de madera maciza con un diseño acorde a la temática del reloj. La masa del péndulo debe tener un sistema para que deslice respecto al brazo y se pueda bloquear en la posición que se desee. Recuerden que la longitud del péndulo nos determina el periodo del mismo por lo que deberemos poder variar su longitud para ajustarla en caso de que se adelante o se atrase. En caso de que se adelante, se deberá alargar su longitud y, en caso de que se atrase, se deberá acortar dicha longitud.

Este reloj va a ser para la empresa que desarrolla el programa de cálculo de engranajes KissSoft y es propio que la temática del reloj sea el engranaje. En la parte más alta del bastidor hay un diente de engranaje. También en la masa del péndulo he colocado dos dientes de engranajes uno

simétrico al otro. Las saetas son dientes de engranaje un poco alargados. También deseo es que se vean los engranajes lo más posible así que he redondeado la geometría del bastidor y le he hecho ventanas para poder ver a través de las mismas. Para finalizar, he colocado una esfera donde marco las horas con números romanos. Dicha esfera la fabrico empleando 4 sectores de 90° de dos maderas de distintos colores alternados para que se localicen rápidamente las 12, las 3, las 6 y las 9 horas.

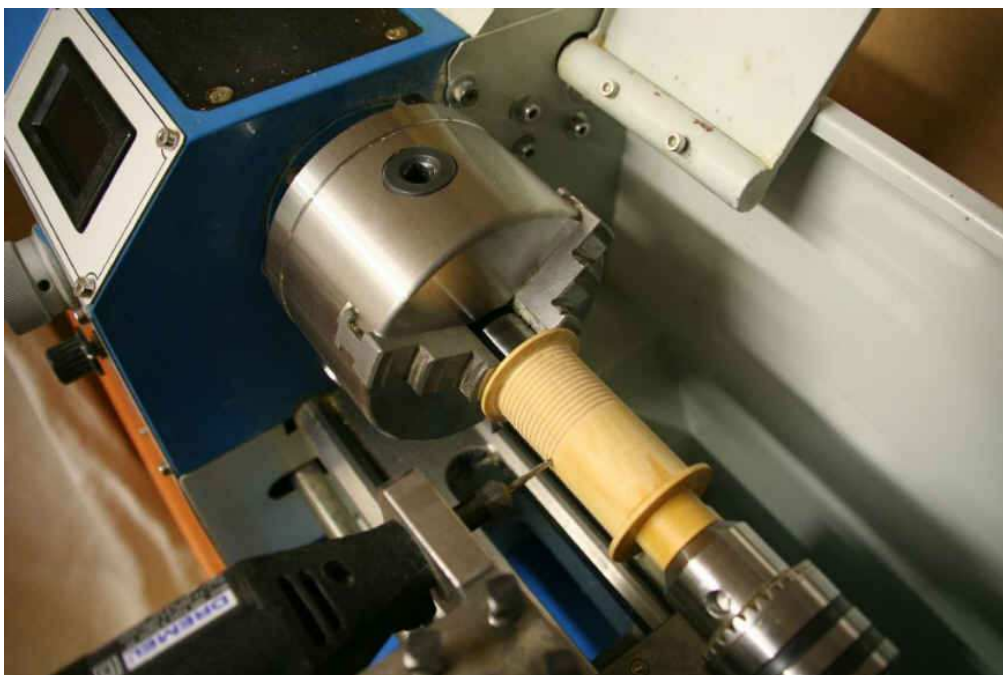
6) Fabricación del reloj:

Una vez que ya tenemos completo el diseño del reloj, es hora de adquirir los materiales necesarios y transformarlos en los distintos componentes empleando las herramientas de las que disponga cada uno. En este aspecto es importante destacar que no existe una única manera de hacer las cosas. Por ejemplo, normalmente se emplea una sierra de cinta para hacer el corte de engranajes y bastidores. Yo empleo una fresadora de CNC porque dispongo de ella.



Los engranajes están fabricados con tablero contrachapado de Abedul finlandés de 12 mm. de espesor. Tras muchas pruebas en donde el principal problema era la rotura de aristas y esquinas, llegué a la calidad que deseaba. Es importante poner una pieza mártir por encima y otra por debajo del tablero de contrachapado. Atornillo todo el conjunto a la máquina, quedando el contrachapado en un Sándwich entre ambos tableros mártires de MDF. Hago un taladro de diámetro 3 mm. a 0,1 mm. de lo que será el fondo de diente. Si

no hago este taladro, la herramienta de 3mm. de diámetro y extralarga (longitud de corte 20 mm.) retiembla al llegar al fondo. Al retemblar, hace que visualmente no quede el hueco entre dientes del todo simétrico. El corte lo hago en varias fases: Primero hago 4 pasadas con 4,5 mm. cada una, a un avance de 300 mm./min. y velocidad de giro de la herramienta de 7000-8000 r.p.m. Este primer corte lo hago dejando unas creces de 0,1 mm. por superficie. El corte es en sentido horario si el corte es de exteriores, y antihorario si el corte es de interiores (por ej. las ventanas). El segundo corte que hago es un único corte con toda la profundidad de pasada, eliminando los 0,1 mm. de creces que he dejado anteriormente y con un avance de 200 mm./min. Finalmente, hago una pasada en vacío cambiando el sentido de trabajo, es decir, en sentido antihorario si el corte es de exteriores, y horario si el corte es de interiores. Esto deja un acabado mejor. Apenas es necesario lijar después de cortar así. El tiempo total de corte de una rueda es de unos 45 min. y el de un piñón de 15 min. No es muy rápido pero la calidad del acabado de dichos engranajes es muy buena. Para finalizar los engranajes, es necesario lijarlos y barnizarlos. Es muy importante no barnizar los flancos de los dientes para que estos deslicen lo mejor posible con su pareja. Yo he recubierto los flancos y fondos de los dientes con cinta adhesiva de carroceros y he barnizado con spray el resto del engranaje. Es aconsejable pulir un poco los flancos a mano o bien emplear discos de pulir con una fresadora manual pequeña (por ej., una Dremel).



Para seguir con la fresadora de CNC, realicé el bastidor delantero y el bastidor trasero. Los hice con madera de roble de 20 mm. de espesor para terminar en 16 mm. de espesor. Lo hice con una herramienta rotativa de diámetro 6 mm. Primero cortando los contornos en varias pasadas dejando creces de 0,2 mm. y finalmente en un único corte, eliminar esas creces de 0,2 mm. Como mi bastidor es bastante grande (550x380 mm.), la madera empleada tenía 200 mm. de ancho y empalmé dos piezas para obtener el ancho de 400 que necesitaba para mi bastidor. Es importante que, al reducir el

espesor de un tablero de madera, lo hagamos poco a poco y quitando un poco de un lado, otro poco del otro... así sucesivamente hasta obtener el espesor deseado. Una vez obtenidos los bastidores con sus cortes, taladros y espesor final, se deberá lijar y barnizar. Se debe proteger con algodón o papel aquellos taladros con diámetro importante para que no entre el barniz. Una vez barnizada la pieza, recomiendo repasar con broca y a mano los taladros de diámetro preciso para eliminar restos de barniz que haya podido entrar.

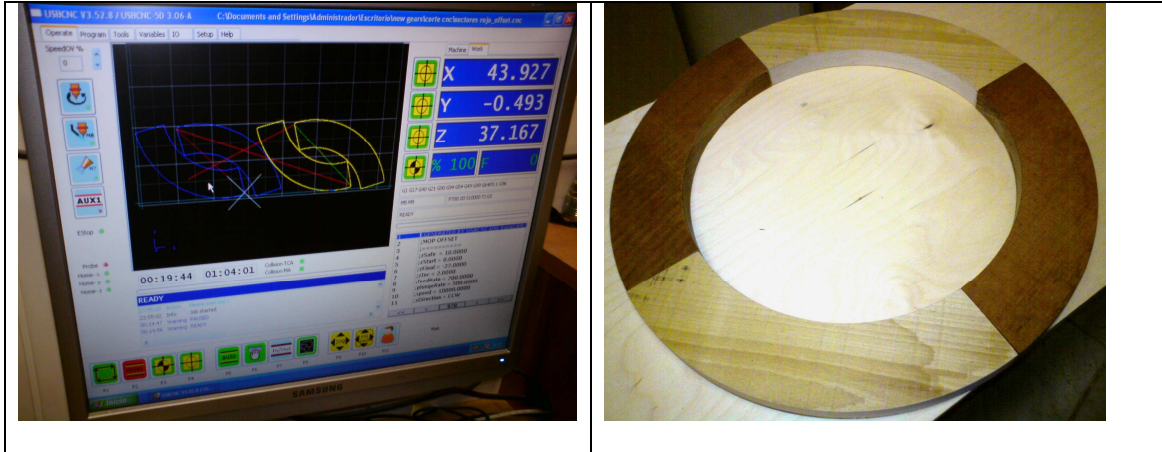
Los casquillos sobre los que monto en tándem los engranajes los hago con madera de Boj. Estas piezas las fabrico en un pequeño torno. No es un torno para madera. Es un torno para metal. Es importante hacer los diámetros y concentricidades con cierta precisión. El torno tiene una distancia entre plato y punto de 300 mm. y un diámetro máximo de volteo de 140 mm. Por comodidad, acoplé un calibre digital en el eje Z y así poder leer directamente la posición de la herramienta en una pantalla digital. Lo recomiendo enormemente. En principio creo que no hay ningún truco especial que dar respecto al torneado de piezas. Creo que aquí es donde menos problemas me encontré o, dicho de otra forma, donde menos piezas repetí. La única curiosidad que realicé en el torno es el hacer una hélice a los carretes donde se arroja la cuerda de las pesas. Lo explico brevemente: Quería hacer una ranura en forma de media caña en un diámetro de 30 mm. y en forma de hélice de paso 2 mm. Para hacer la hélice bien hay que hacerlo con herramienta motorizada. Lo que hice fue montar sobre el portaherramientas del torno un soporte para la Dremel. En la Dremel monté una herramienta rotativa de diámetro 2 mm. y acabada la punta en radio. En el tren de transmisión del avance del carro en Z, monté el tren para paso 2mm. Es decir, por una revolución de la pieza, el carro Z avanza 2 mm. Enciendo la Dremel y la coloco en el inicio donde quiero empezar la rosca y giro a mano el plato del torno. Al ir girando el plato del torno, va avanzando el carro Z y la herramienta de la Dremel va haciendo el surco en forma de media caña y con una hélice de paso 2 mm.

Casi todos estos casquillos de madera, llevan por cada extremo un casquillo de bronce autolubricados. Para montar dichos casquillos bien alineados, recomiendo emplear una varilla calibrada un poco larga como utillaje de montaje e ir metiendo ambos casquillos de ambos lados poco a poco. Como verificación final, sugiero dar impulso al casquillo de madera y ver que gire varias vueltas antes de detenerse.

Los ejes de inoxidable los hago también en el torno. Los corto en la sierra con creces y los refrento a su longitud final en el torno. Una vez refrentados, le hago las ranuras donde corresponda para colocar los retenes que me fijan la posición de los casquillos que portan los engranajes. Las ranuras las hago con unas herramientas caseras que me hago con cuadradillo de 10x10 mm. de acero rápido (HSS). Algunos de estos ejes, llevan taladros de diámetro 2 mm. pasantes. Estos taladros sirven para hacer solidarios una pieza que vaya montada sobre el eje a través de un pasador o varilla de diámetro 2 mm. Pegar madera con metal no sería muy efectivo y posiblemente acabara soltándose. Para hacer estos taladros, hice sobre un cubo metálico un agujero de 4,1 mm. y perpendicular a éste y en su centro, un agujero de diámetro 2,1mm. Este cubo me sirve de utillaje para hacer sobre los ejes de diámetro 4 mm. un agujero bien centrado de diámetro 2 mm. Para finalizar con los ejes, recomiendo pasarles una lija muy final en el mismo torno y así pulir su

superficie. De esta manera girará con mayor suavidad el casquillo de bronce. Yo he empleado lija de grano N° 1000. Hay que redondear bien todas las aristas para que el casquillo de bronce entre con facilidad.

Para hacer la esfera empleo dos maderas de distinto color. Una blanca y otra roja en sectores de 90° alternados. Junto las cuatro piezas de madera y repaso su espesor de 27 mm. a 23 mm. También freso su diámetro exterior y su diámetro interior. Se debe lijar y barnizar.



Los números de las horas los hago con chapa de inox de 1 mm. de espesor y cortados por láser. Están pegados con un pegamento epoxi de dos componentes. Respecto a los números debo indicar una curiosidad. Los números empleados son números romanos. Las 4, se marcan con cuatro palos cuando, su manera correcta debería ser IV. Muchos de los relojes que emplean números romanos llevan cuatro palos y quise enterarme porqué. Hay varias teorías al respecto. Una de ellas explica que en la edad media, un monarca ordenó cortar la cabeza de un relojero que había colocado cuatro palos en el 4. Lo sucedido debió contarse rápidamente entre los relojeros y en símbolo de protesta, decidieron a partir de entonces colocar cuatro palos para numerar el 4. Sea cierta o no esta historia, me gustó y decidí añadirme a la tradición relojera de indicar el 4 con cuatro palos.

Otra parte importante del reloj es el péndulo. En la parte superior del péndulo tengo una pieza de madera donde coloco una cuña en forma de V. El separador superior del reloj es una varilla de inox de diámetro 10 mm. que, en la zona donde apoya el péndulo, tiene fresado un hueco en forma de V de 90° entre caras. Sobre dicha V de 90° grados apoya la V del péndulo. De esta pieza de madera donde se asienta, nace el brazo que baja hasta la masa del péndulo. La masa del péndulo tiene fresado por su interior un chavetero. El extremo del brazo del péndulo termina en una pieza cuadrada de madera que puede deslizar por el chavetero de la masa. Añadiendo un tornillo que va desde el brazo hasta la masa, girándolo en un sentido o en otro, consigo que la masa suba o baje respecto al brazo. Es decir, varío la longitud del péndulo para ajustar su periodo.

Las dos masas que dan energía al reloj para que este no se pare, las he fabricado con plomo para que no sean de tamaño muy ostentoso. La barra de plomo de diámetro 50 mm. va en el interior de un tubo de aluminio y en sus extremos van dos tapas de madera. La masa no va directamente agarrada a la cuerda del carrete. La cuerda del carrete esta por su otro extremo fijada al

propio bastidor del reloj. La masa cuelga de la cuerda a través de una polea de tal forma que duplico la carrera de la cuerda y por ende, duplico el tiempo de funcionamiento del reloj antes de tener que volver al elevar las masas a su punto más alto.

Es difícil calcular previamente la masa exacta que se va a necesitar para superar todas las fricciones y pérdidas de energía y mantener el movimiento perpetuo del péndulo. Yo lo ajusté colocando un cubo en cada cuerda e ir añadiendo peso al cubo hasta que se compruebe que el péndulo no se detiene tras varios minutos en marcha. Un punto de partida pueden ser unos 3 Kgr. (6lb) en cada cubo. Una vez que se consiga ese movimiento perpetuo, se deben pesar ambos cubos y hacer las masas de la longitud necesaria para que en su interior alojen una masa de plomo equivalente a la masa del cubo.

Tal y como ya he explicado previamente, el tambor de donde cuelga la masa, debe ir equipado con un trinquete para que transmita el par en un sentido de giro pero en el sentido contrario, se desacople de tal forma que el tambor gire loco. El tambor debe girar loco cuando deseemos elevar la masa sin que se desajuste la hora. Mi diseño se basa en dos uñetas que van a parar a una rueda con dientes asimétricos los cuales permiten el giro en un sentido en el sentido contrario se clavan las uñetas y no gira la rueda. Para que este sistema sea eficaz, hay que garantizar que los extremos de las uñetas estén continuamente apoyados sobre los dientes de la rueda con dientes asimétricos. Esto lo consigo colocando a cada uñeta un pequeño muelle y que garantice dicho contacto entre uñeta y rueda dentada.

Para poder elevar la masa a su punto más alto en su carrera vertical, el tambor lleva por un extremo un piñón de 18 dientes. Este piñón engrana con otro de también 18 dientes. Este último piñón va solidario con un eje que por su extremo coloco un tornillo de M6 con cabeza hexagonal DIN 933. La masa se puede elevar empleando una simple llave manual de baso o, los más cómodos, pueden emplear un pequeño atornillador eléctrico con una llave de baso acoplada para así, hacer la labor más cómoda. En futuros diseños de relojes, quiero estudiar la posibilidad de añadir un sistema automático de elevación de masa cuando ésta llegue a su punto más bajo. Más o menos, este reloj, puede estar en marcha 32 horas entre carga y carga.