



UNIVERSIDAD

DE VALLADOLID

E.I. INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Análisis y simulación mecánica de mecanismos
de escape en relojería**

Autor:

D. Rubén de Juan Hernández

Tutor:

D. Antonio Tristán Vega

TÍTULO: Análisis y simulación mecánica de mecanismos de escape en relojería

AUTOR: D. Rubén de Juan Hernández

TUTOR: D. Antonio Tristán Vega

DEPARTAMENTO: Ingeniería Mecánica

TRIBUNAL

PRESIDENTE:

VOCAL:

SECRETARIO

SUPLENTE

SUPLENTE

FECHA:

CALIFICACIÓN:

Resumen de TFG

El estudio de investigación realizado y descrito en este Trabajo Fin de Grado, consiste en realizar el estudio teórico de los principios físicos que rigen el funcionamiento del mecanismo de escape de un reloj mecánico.

Este mecanismo es el responsable de la temporización en sí, es decir, de asegurar que la energía mecánica almacenada en el reloj (cuerda, sistema de pesas, etc.) se libere de forma controlada a un ritmo constante.

Posteriormente se simulará con el software *Working Model 2D* varios mecanismos de este tipo para verificar empíricamente el funcionamiento descrito y modelar su dependencia respecto de diversos parámetros, como puede ser la energía residual acumulada en el reloj.

Palabras clave

Working Model 2D, mecanismo de escape, análisis mecánico, relojería, energía residual, escape áncora suiza, escape saltamontes, escape áncora.

Abstract

The research developed and described in this project is the theoretical analysis of the main physics actions that control the escapement mechanism of a mechanical watch.

This mechanism is the one that take control over the temporization, it takes care that the mechanical energy stored in the watch (spring, weight system, etc.) is used steadily at a constant rate.

Afterwards some mechanisms of this kind will be simulate via computer using the software *Working Model 2D* to check empirically the described way of working and model its dependency with some parameters, like the residual energy stored in the watch.

Keywords

Working Model 2D, escapement mechanism, mechanical analysis, watchmaking, residual energy, swiss anchor, grasshopper escapement, anchor escapement.

Agradecimientos

Quiero aprovechar este espacio para agradecer a todas aquellas personas que me han ayudado y apoyado a lo largo de mi vida.

Me gustaría agradecerse especialmente a mis padres Alfonso y Consuelo, quienes han sido mi principal apoyo, todo el esfuerzo que han hecho para que yo haya llegado hasta aquí, así como el ánimo que me han dado siempre. También quiero destacar mi hermana

Laura por su buen carácter conmigo. He de agradecer también a todos mis compañeros durante la carrera porque sin su ayuda habría sido mucho más difícil mi paso por la Universidad. Finalmente, me gustaría dar las gracias al tutor que he tenido durante este Trabajo Fin de Grado Antonio, por haberme dado la oportunidad de llevar a cabo esta tarea y por toda la ayuda y consejos que me han dado durante la realización de todo este trabajo.

ÍNDICE

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación	1
1.2	Contexto	1
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo General	3
1.3.2	Objetivos Específicos	4
1.4	Fases y Métodos	4
1.4.1	Fase de Investigación	4
1.4.2	Fase de Diseño	5
1.4.3	Fase de Implementación.....	5
1.4.4	Fase de Simulación.....	6
1.4.5	Fase de Realización de los Informes	7
1.5	Estructura de la Memoria del PFG	7
2	Desarrollo teórico.....	9
2.1	Introducción	9
2.2	Desarrollo matemático y explicación.....	9
2.3	Conclusiones	14
3	Entorno y Herramientas de Trabajo.....	16
3.1	Introducción	16
3.2	Simulador mecánico <i>Working Model 2D</i>	16
3.2.1	Introducción a la interfaz en <i>Working Model 2D</i>	16
3.2.2	Introducción de sólidos y sus características.....	17
3.2.3	Puntos de unión entre cuerpos.....	18
3.2.4	Interacciones entre sólidos	18
3.2.5	Barra de herramientas.....	19

3.2.6	Ventanas de propiedades	20
3.3	Conclusiones.....	21
4	Simulación y análisis de los datos obtenidos	23
4.1	Introducción.....	23
4.2	Mecanismo de péndulo	23
4.2.1	Obtención de datos del mecanismo de péndulo.....	23
4.2.2	Simulación del mecanismo de péndulo	25
4.2.3	Análisis del mecanismo de péndulo	26
4.3	Mecanismo ancora suiza.....	28
4.3.1	Obtención de datos del mecanismo ancora suiza	28
4.3.2	Simulación del mecanismo ancora suiza	33
4.3.3	Análisis del mecanismo ancora suiza	35
4.4	Mecanismo saltamontes.....	37
4.4.1	Obtención de datos del mecanismo saltamontes	37
4.4.2	Simulación del mecanismo saltamontes	39
4.4.3	Análisis del mecanismo saltamontes	40
4.5	Mecanismo de gravedad	42
4.5.1	Obtención de datos del mecanismo de gravedad.....	42
4.5.2	Simulación del mecanismo de gravedad.....	43
4.5.3	Análisis del mecanismo de gravedad.....	45
4.6	Conclusiones.....	47
5	Conclusiones y Líneas Futuras	49
5.1	Conclusiones.....	49
5.2	Líneas Futuras.....	50
6	Bibliografía	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Interacciones que interfieren en un mecanismo de escape.	10
Figura 2.2. Entrada impulso.	11
Figura 2.3. Entrada escalón.	12
Figura 2.4. Gráficas comportamiento del periodo.....	13
Figura 3.1. Ejemplo de la interfaz vacía	17
Figura 3.2. Principales ventanas de propiedades.	20
Figura 4.1. Esquema de un reloj de péndulo	24
Figura 4.2. Simulación realizada para el escape de péndulo	26
Figura 4.3. Periodo oscilación péndulo para 15 Nmm.....	27
Figura 4.4. Periodo oscilación péndulo para 5 Nmm.....	27
Figura 4.5. Esquema de un reloj con escape de ancora suiza.....	29
Figura 4.6. Base de datos sobre nuestro reloj	31
Figura 4.7. Datos sobre el eje de balance.....	32
Figura 4.8. Simulación realizada para el escape de ancora suiza.....	35
Figura 4.9. Periodo oscilación volante para 0,35 Nmm	36
Figura 4.10. Periodo oscilación péndulo para 0,07 Nmm.	36
Figura 4.11. Esquema de un escape saltamontes.	38
Figura 4.12. Simulación realizada para el escape saltamontes..	40
Figura 4.13. Periodo oscilación péndulo para 40 Nmm.....	41
Figura 4.14. Periodo oscilación péndulo para 20 Nmm	41
Figura 4.15. Esquema de un escape de gravedad.....	43
Figura 4.16. Simulación realizada para el escape de gravedad.....	45
Figura 4.17. Periodo oscilación péndulo para 0,8 Nmm.....	46
Figura 4.18. Periodo oscilación péndulo para 0,3 Nmm.....	46

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. Ecuación diferencial masa amortiguador.....	11
Ecuación 2.2. Respuesta al impulso en frecuencia.....	11
Ecuación 2.3. Respuesta al impulso en tiempo.....	12
Ecuación 2.4. Respuesta al escalón.....	12
Ecuación 2.5. Respuesta a un pulso.....	12
Ecuación 2.6. Limite de un pulso hacia el impulso.....	13
Ecuación 2.7. Suma de respuestas.....	13
Ecuación 4.1. Cálculo de la constante de elasticidad de un resorte helicoidal sometido un esfuerzo de torsión.....	31
Ecuación 4.2. Cálculo de la constante de elasticidad de un resorte unido a una masa con una Inercia, I , que gira con una frecuencia, f	32

1

Introducción

1.1 Motivación

En este Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo una investigación de cómo afecta la energía residual en diferentes tipos de mecanismos de escape al periodo y como algunos mecanismos son más sensibles a este fenómeno que otros.

Para ello se va a realizar varias simulaciones de diferentes mecanismos de escape cambiando el aporte de energía al mismo y examinando como varía el periodo. Y comparar si este comportamiento es similar que cabría esperar según la indica la teoría y según se comportan los relojes reales. Para conseguir la información necesaria de los mecanismos de escape se va a analizar y descomponer un reloj mecánico de cuerda adquirido para la realización de este trabajo, como consultar varios libros y páginas web que contienen información tanto sobre la estructura general y específica de estos mecanismos y sobre datos mecánicos de los diferentes componentes que los forman.

1.2 Contexto

En este apartado se va a aportar información variada de los mecanismos de escape y de los relojes centrándose en información relevante para el campo de estudio en el que se va centrar este trabajo.

El mecanismo de escape es la parte del reloj que se encarga de que no se libere en un instante toda la energía acumulada en el mismo, esta energía mecánica se suele almacenar mediante diferentes métodos entre los que cabe destacar carios: pesas unidas mediante una cuerda a un engranaje y mientras esta se desenrolla al caer va liberando energía al mismo, o un muelle torsional comprimido que va liberando energía según

vuelve a su posición natural. Como se puede observar estos mecanismos si no se les limita liberarían toda su energía mecánica rápidamente lo que no permite tener un control sobre el tiempo.

Dentro de este tipo de mecanismos hay varios tipos en función del tamaño disponible, el peso del reloj y el principio físico que limita el movimiento del mismo. Estos mecanismos han ido evolucionando a lo largo del tiempo consiguiendo mayores precisiones, limitación del mantenimiento, mayor facilidad de ajuste y mayor estabilidad. Algunos de estos mecanismos son los siguientes:

- El primer escape mecánico conocido es el de rueda catalina consiste en una varilla con un volante de inercia y 2 paletas que limitan el movimiento de una rueda dentada, es un escape con poco rendimiento y de baja precisión aunque no requería un gran mantenimiento, fue usado tanto en relojes de pulsera como en sus versiones de pared, fue usado desde el siglo 14 hasta mediados del 19.
- El principal mecanismo de escape usado hoy en día en relojes de pulsera y otros portátiles es el de ancla suiza, este consiste en un volante de inercia con un muelle de torsión en su eje que se encarga de mantener el periodo del reloj un balancín que es el que transmite mediante impulsos la energía al volante y limita el movimiento de la rueda de escape que está conectada mediante engranajes a la fuente de energía de reloj, en este tipo un muelle. Fue inventado en el siglo 18 y desde entonces ha sufrido evoluciones principalmente para disminuir el rozamiento y evitar la lubricación, para ello cambian las paletas del balancín por materiales más duros.
- Otro mecanismo también muy usado en relojes fijos es el escape de péndulo que consiste en un péndulo que controla el periodo del reloj unido a un ancla que mediante unas paletas similar al de ancla suiza entran en contacto con los engranajes impidiendo temporalmente su movimiento. Una modificación de este tipo son los *deadbeat escapement* cuyo cambio principal es que no producen retroceso en el mecanismo al ser las paletas concéntricas al unto de giro limitando así el rozamiento y aumentando así la precisión.

- Un mecanismo que vamos a analizar es el escape saltamontes llamado así su forma. Este escape se basa en equilibrio de momento de los componentes que limitan el giro, ya que estas piezas se apoyan en el engranaje limitando su movimiento hasta que a partir de cierto punto las masas situadas al final de los mismos supera al rozamiento y se despegan del engranaje permitiendo su libre movimiento periódicamente. Debido a la tendencia que tenían las paletas a alejarse del engranaje provocando problemas como la rápida aceleración del reloj estos modelos nunca fueron ampliamente usados.
- Por último analizaremos el escape de gravedad que consiste en una masa que mediante un movimiento de balanceo aleja periódicamente del engranaje las paletas que limitan su movimiento. Su uso es principalmente en relojes de torre. Su versión más usada es *Double three legged gravity escapement*, este modelo es el que se encarga del control del Big Ben de Londres.

Dentro del campo de la relojería otros conocimientos a resaltar son los parámetros que definen la calidad. Uno de estos es el número de joyas que incluye, cabe destacar que no se están hablando de ornamentos sino de partes del mecanismo que se encargan de limitar el rozamiento aumentando la precisión y la estabilidad del reloj al disminuir la pérdida de energía. Suelen estar situados en puntos de alta fricción como pueden ser los extremos del balancín y los cojinetes de las diferentes partes rodantes, estas piezas suelen variar desde 7 joyas hasta 27 dependiendo de la calidad.

Otro parámetro a tener en cuenta es el número de oscilaciones que tiene el volante de inercia por hora, ya que cuanto más sean más precisión permiten, además de que para oscilaciones por hora bajas aparecen problemas de bloqueo, actualmente suelen variar entre las 18000 y 28800 oscilaciones por hora.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo principal de este proyecto es el análisis de diferentes mecanismos de escape de relojes para conocer cómo afecta el aporte de energía al periodo y analizar esta

variación respecto a lo esperado teóricamente, centrándonos cuando esta energía va disminuyendo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Con la realización de este proyecto se han cubierto los siguientes objetivos específicos:

1. Análisis de diferentes mecanismos de escape en relación a sus diferentes comportamientos cuando la energía aportada varía.
2. Simulación de dichos mecanismos que nos permita observar dicho cambio y considerar los principales factores que afectan a este fenómeno.
3. Comparar esta variación del periodo con la esperada teóricamente y analizar las diferencias.

1.4 Fases y Métodos

La metodología a seguir para el desarrollo de los objetivos del Trabajo Fin de Grado ha consistido fundamentalmente de las siguientes fases:

1.4.1 Fase de Investigación

Esta fase tiene la doble finalidad de adquirir familiaridad con los diferentes mecanismos de escape, entender su funcionamiento y limitaciones, además de adquirir conocimientos generales sobre el campo de la relojería.

De este modo, se pretende empezar con una iniciación al campo de la relojería conociendo las diferentes partes de los que constan los mecanismos, entender su disposición y funcionalidad además de su desarrollo histórico, para ello se realizaron las siguientes actividades:

- Estudio de diferentes páginas web de divulgación general que contengan información sobre dicho campo.
- Análisis y comprensión de los diferentes mecanismos de escape para entender sus movimientos y las diferentes interacciones entre sus partes.

- Estudio del entorno de simulación *Working Model 2D* para obtener conocimientos más profundos que los adquiridos durante la carrera y análisis de diferentes mecanismos suministrados por el tutor.

Por otro lado, en esta fase de investigación también se realizó un desmontaje de un reloj de cuerda para obtener información sobre los mecanismos que los forman y facilitar la simulación.

1.4.2 Fase de Diseño

En esta fase del proyecto se partirá de los conocimientos adquiridos en el simulador y la composición de los diferentes mecanismos y mediante estos se analizarán para intentar esquematizar de la mejor forma posible para adaptarnos a las limitaciones del programa que usaremos, entre ellas cabe destacar que para introducir la forma de los diferentes componentes que requieran un gran control de la geometría se usará un programa que permita reconocer las coordenadas de los puntos que se le indiquen y exportarlas a un documento de texto que posteriormente será introducido en nuestro simulador.

También debido a las limitaciones de este programa se despreciará de la elasticidad de los diferentes componentes convirtiendo todos los cuerpos en inelásticos debido a que si no se realiza esta acción el programa en vez de analizar todos los choques de los componentes trabajará como si los cuerpos no entraran en contacto entre sí.

1.4.3 Fase de Implementación

En esta fase se implementará los diferentes mecanismos a analizar en el programa de simulación, sin tener en cuenta los datos reales de sus propiedades físicas (masas, inercias, etc.). Centrándose en la viabilidad de implementar los mecanismos:

- Diseño e implementación del mecanismo de escape de péndulo, comprobando que la forma de la ancla sea la necesaria tal que permita la detención del movimiento del engranaje. Además de centrarnos en que sea posible encontrar una relación par aplicado-inercia del péndulo que no se descontrola el mecanismo.

- Diseño e implementación de un mecanismo de escape de ancora suiza. Centrándose en la forma de los diferentes componentes, a destacar la rueda de escape y las paletas del balancín que permitan el choque intermitente, el pivote del volante de inercia y el extremo del balancín para limitar lo más posible el efecto de interferencia. Tras todo esto encontrar una relación par aplicado, inercia del volante y constante del muelle que permita su funcionamiento.
- Diseño e implementación del mecanismo de escape saltamontes. Comprobando que la forma de los brazos permita el contacto en la rueda de escape y que se produzca un efecto de balancín a partir de cierto punto que permita la continuación del movimiento.
- Diseño e implementación del mecanismo de escape de gravedad. Centrándose en realizar correctamente la simetría del mismo y que tanto las distancias como las formas concuerden para limitar el movimiento de forma discontinua.

1.4.4 Fase de Simulación

En esta fase del proyecto se procederá a la realización de las simulaciones de todos los mecanismos implementados anteriormente introducción los datos hallados en la fase de investigación y un análisis de los resultados obtenidos:

- Simulación del mecanismo de péndulo, para varios valores del par aplicado y analizar cómo varía el periodo según va disminuyendo este, para ello se creará una gráfica que analice la posición del péndulo por unidad de tiempo y se verá como varía el periodo en varias situaciones.
- Simulación del mecanismo de ancora suiza, para varios valores del par aplicado y analizar cómo varía el periodo según va disminuyendo este, para ello se creará una gráfica que analice la posición del pivote del volante de inercia por unidad de

tiempo y se verá como varía el periodo en varias situaciones y se comprobará si esta variación es inferior como cabía esperar a las demás.

- Simulación del mecanismo de saltamontes, para varios valores del par aplicado y analizar cómo varía el periodo según va disminuyendo este, para ello se creará una gráfica que analice la posición del contrapeso por unidad de tiempo y se verá como varía el periodo en varias situaciones, además de analizar la antisimetría y el difícil equilibrio que tienen estos mecanismos.
- Simulación del mecanismo de gravedad, para varios valores del par aplicado y analizar como varía el periodo según va disminuyendo este, para ello se creará una gráfica que analice la posición del péndulo por unidad de tiempo y se verá como varía el periodo en varias situaciones.

1.4.5 Fase de Realización de los Informes

En esta fase se procedió a realizar los informes necesarios del Trabajo Fin de Grado, en este caso solo la realización de la memoria del Trabajo Fin de Grado.

1.5 Estructura de la Memoria del PFG

En el Capítulo 2 se desarrolla un estudio teórico de como se explica el comportamiento que se va a analizar en posteriores capítulos y se hace unas predicciones de cómo se esperan que sean los resultados obtenidos.

El Capítulo 3 se explica cómo funciona la herramienta central en la que está basado este trabajo. Se explican las principales características y funcionalidades que tiene el programa así como se señalan sus defectos y se justifica su uso.

En el Capítulo 4 se desarrolla tanto la toma de datos para las simulaciones como estas y se analizan los resultados, se organiza por cada mecanismo específicamente. Por último se explican los resultados obtenidos y se comparan con lo esperado.

En el Capítulo 5 se detallan las conclusiones obtenidas en este trabajo y se señalan posibles mejoras y adicciones para una futura continuación de este trabajo, señalando las partes que sería de mayor interés desarrollar en mayor profundidad.

El Capítulo 6 se indica toda la bibliografía usada para la realización de este trabajo incluyendo desde libros hasta páginas web y manuales.

2

Desarrollo teórico

2.1 Introducción

En este capítulo se realiza una exposición de la teoría relevante para este Trabajo Fin de Grado. Se empezará con una explicación del comportamiento esperado seguido de un análisis del mecanismo mediante la suposición de un comportamiento lineal, para terminar explicando el comportamiento esperado y como debería verse afectado en función de la cantidad de energía aportada al mecanismo. Este desarrollo está centrado para el mecanismo de escape de ancla suiza pero se puede aplicar de forma similar.

Para ello será necesario un análisis en frecuencia mediante transformadas de Laplace y composición de funciones. Obteniendo así que el periodo se compondrá de una serie de senos y cosenos siendo este comportamiento distinto al ideal en el que el periodo debería ser constante y no variar en función de la entrada aplicada.

2.2 Desarrollo matemático y explicación

Lo primero que se va a realizar es la suposición de que la fricción bajo la que trabajan estos mecanismos es despreciable la hora de realizar este desarrollo matemático dado que no afectará a nuestra conclusión, si no que lo que provocarán será un aumento en la complejidad matemática del análisis sin añadir una información relevante para este caso.

Este análisis no describe el comportamiento de todo el escape si no que describe el comportamiento de la parte que se encarga puramente de mantener el periodo, ya sea un conjunto volante de inercia-resorte torsional o un péndulo.

El comportamiento esperado de los impulsos que recibía el sistema se presenta en la siguiente gráfica. Está compuesto por 3 términos:

- El primero consiste en un impulso representando la velocidad inicial con la que se aproxima el mecanismo al punto donde tendrán lugar las interacciones del mecanismo con el exterior.
- A continuación le prosigue un pérdida de energía esta consiste en la que desplaza el mecanismo para liberar el escape d esu posición de bloqueo permitien el movimiento del reoj de nuevo, esta interaccion se describe como un contacto puntual descrito matemáticamente como un impulso o un pulso de recorrido despreciable, una pérdida repentina de cantidad de movimiento.
- Por último está la recuperación de energía de parte de la cuerda para restablecer la energía del sistema, la anchura de esta parte proviene principalmente de que debido a que este contacto no es lo suficientemente puntual como para considerarlo un impulso. Esta anchura depende principalmete de la energía residual dado que cuanto menor sea la intensidad de este mayor será necesaria su interacion en el tiempo para poder aportar la energía necesaria.

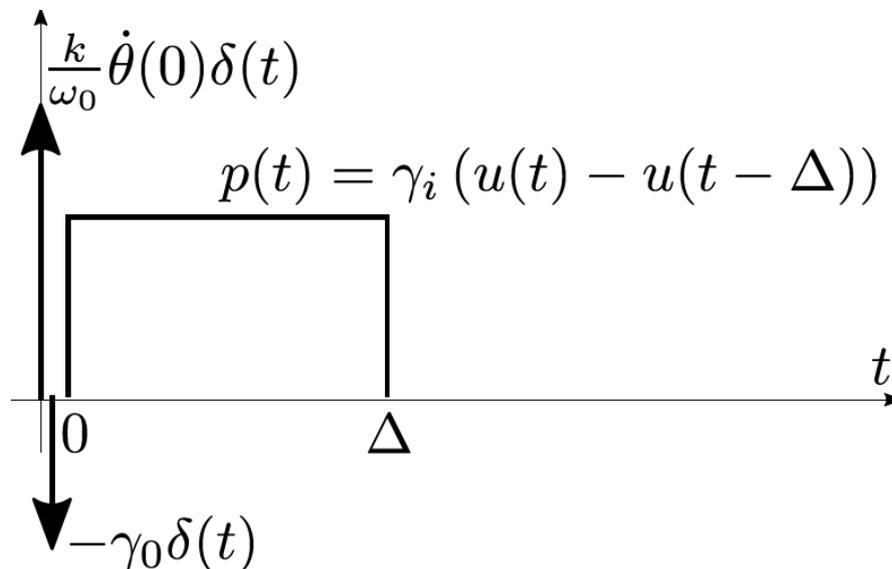


Figura 2.1. Interacciones que interfieren en un mecanismo de escape

Todo este conjunto de interacciones vienen provocados en parte por la pérdida de energía principalmente por 2 motivos: la fricción, que ya hemos estimado ser despreciable y la energía necesaria en la liberación del trinquete.

Para analizar este mecanismo supondremos que es un sistema LTI, lo que indica varias propiedades sobre el mismo. La primera que la composición lineal de varias entradas tiene como salida la composición lineal de las salidas de cada entrada, la segunda propiedad es que la respuesta está desplazada en el tiempo tanto como lo está la entrada. Estas propiedades describen de forma bastante precisa el comportamiento de cualquier mecanismo siempre y cuando las interacciones de este no excedan los límites de los elementos.

Por tanto para analizar el mecanismo supondremos que se comporta como un sistema masa- muelle en el que ha sido despreciada la fricción. Por tanto una vez despejada la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\ddot{\theta} + \frac{K}{I_Z} \times \theta = \frac{\delta(t)}{I_Z} \quad \text{Ecuación 2.1.}$$

Donde K es la constante de elasticidad, I_Z es la inercia, θ es el Angulo y $\delta(t)$ es la entrada al sistema.

Para analizar esta ecuación diferencial se necesitaría una solución particular y la homogénea pero en este caso se va a proceder analizando su respuesta a una entrada impulso. Para ello apoyándonos de la transformada de Laplace sabiendo que la transformada de un impulso tiene valor unidad y despejando la función de transferencia obtenemos lo siguiente.

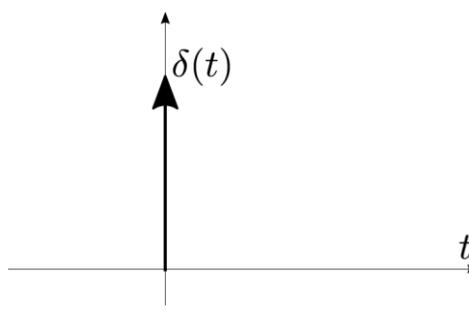


Figura 2.2. Entrada impulso

$$H(S) = \frac{1/I_Z}{S^2 \times K/I_Z} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Que mediante la transformada inversa de Laplace obtenemos lo siguiente.

$$h(t) = \frac{1}{K} \sin\left(\sqrt{\frac{K}{I_Z}} \times t\right) + u(t) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Tomando estos valores para t positivos y nulo para valores negativos.

Además también será necesaria la respuesta al escalón, para ello componiéndolo como una sucesión de impulsos mediante la integral de convolución obtenemos lo siguiente.

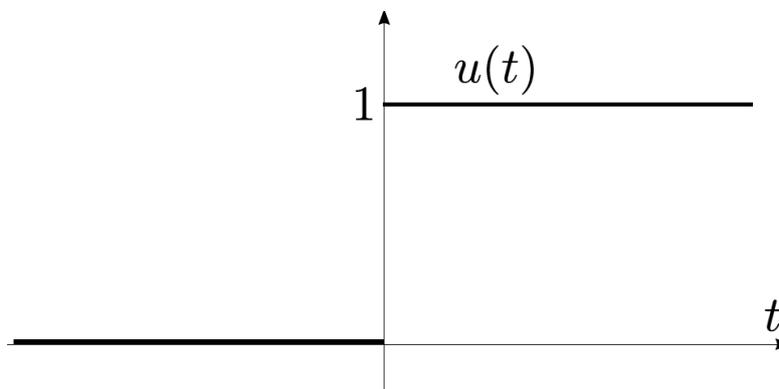


Figura 2.3. Entrada escalón

$$g(t) = \frac{\gamma_i}{K \times w_0} (1 - \cos(\sqrt{\frac{K}{I_Z}} \times t))$$

Ecuación 2.4

Con toda esta información podemos analizar el comportamiento ante un pulso de duración Δ , hallándolo mediante la composición de dos escalones. Por tanto la respuesta es a siguiente.

$$p(t) = \frac{\gamma_i}{K \times w_0} (\cos(w_0 \times (t - \Delta)) - \cos(w_0 \times t))$$

Ecuación 2.5

Si a continuación calculamos el límite para Δ cuando tiende a 0 haciendo además proporcional la altura del pulso a la inversa de Δ , dado que cuanto mayor sea la intensidad menos tiempo requiere para aplicar la misma energía se obtiene lo siguiente.

$$\lim_{\Delta \rightarrow \infty} f(t; \Delta) = \frac{\gamma_i}{K} \sin(w_0 \times t) + u(t) \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Resultado que parece obvio dado que al llevar al límite lo que obtenemos es un impulso y por tanto la respuesta debería ser la de tal entrada.

Por tanto la respuesta final del sistema va a ser la siguiente:

$$\left(\frac{K \times \theta}{w_0} - \gamma_0\right) \sin(w_0 \times t) \times u(t) + \frac{\gamma_i}{K \times w_0} (\cos(w_0 \times (t - \Delta)) - \cos(w_0 \times t)) \times u(t) \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Por tanto como ya se ha analizado el segundo término tiene a una respuesta de impulso, en ese caso idealizando la salida se obtiene que la amplitud de las oscilaciones depende de la energía residual, pero en cambio la frecuencia se mantiene invariante con esto.

En un caso realista hay una serie de funciones senos y cosenos combinada, pero esto analizado matemáticamente conlleva una gran complejidad por eso se va a analizar mediante un simulador mecánico en este Trabajo Fin de Grado.

En la siguiente figura consta de una serie de respuestas ideales y reales y se comprueba que efectivamente el cambio en frecuencia se observa mayoritariamente cuando la duración de las interacciones aumenta, cuando aumenta Δ .

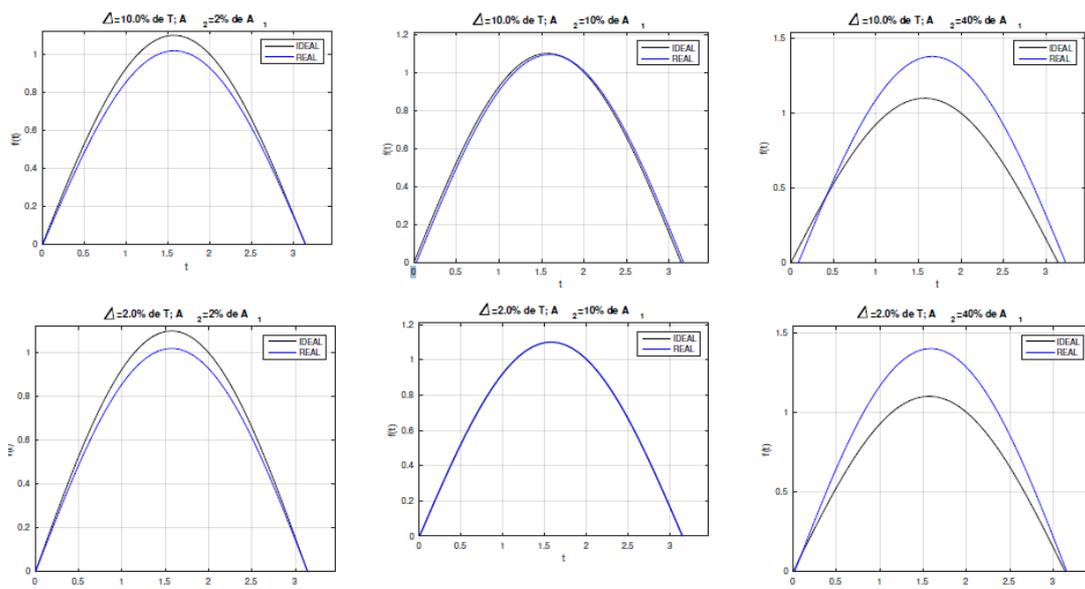


Figura 2.4. Gráficas comportamiento del periodo

Cabe destacar que de haber incluido el término de fricción los resultados no habrán cambiado simplemente aparecerían términos exponenciales dificultando el cálculo pero sin afectar a las conclusiones obtenidas.

2.3 Conclusiones

Tras realizar este análisis matemático lo que se observa principalmente es que para mantener un periodo constante en mecanismos sometidos a estos esfuerzos es imprescindible mantener el tamaño de los contactos lo más puntuales posible, dado que mediante esto podemos conseguir un comportamiento cercano al ideal y será posible conseguir que el periodo sea invariable obteniendo así en nuestro caso una medida acertada del tiempo.

Otra de las conclusiones obtenidas en este apartado es que la forma en la que se va a comportar el periodo cuando los tiempos de contacto aumentan es aleatoria en cierto punto, dado que en función del mecanismo puede ser que ciertas componentes predominen sobre provocando tanto que el periodo aumente como disminuya.

3

Entorno y Herramientas de Trabajo

3.1 Introducción

En este capítulo se describe el entorno de trabajo utilizado para simular los diferentes mecanismos que nos permite analizar y obtener información. Dado que se usará en profundidad este programa, se explicara concienzudamente las principales características del programa.

3.2 Simulador mecánico *Working Model 2D*

El entorno de trabajo *Working Model 2D* es un programa de asistencia mediante ordenador a la ingeniería centrándose especialmente en la dinámica de sólidos en 2,5 dimensiones. Permite la introducción de solidos permitiendo definir su geometría, las uniones entre estos, además de su unión con la bancada y posteriormente permite la simulación y la presentación de datos. A continuación se explican las diferentes características principales del programa.

3.2.1 Introducción a la interfaz en *Working Model 2D*

Para trabajar en *Working Model 2D* se utilizarán principalmente la barra de herramientas superior clásica de los programas de *Windows* y la barra lateral del programa para las tareas más sencillas. En el centro del programa tenemos el entorno de simulación y en la parte inferior el controlador del tiempo. Todo ello se puede observar a continuación.

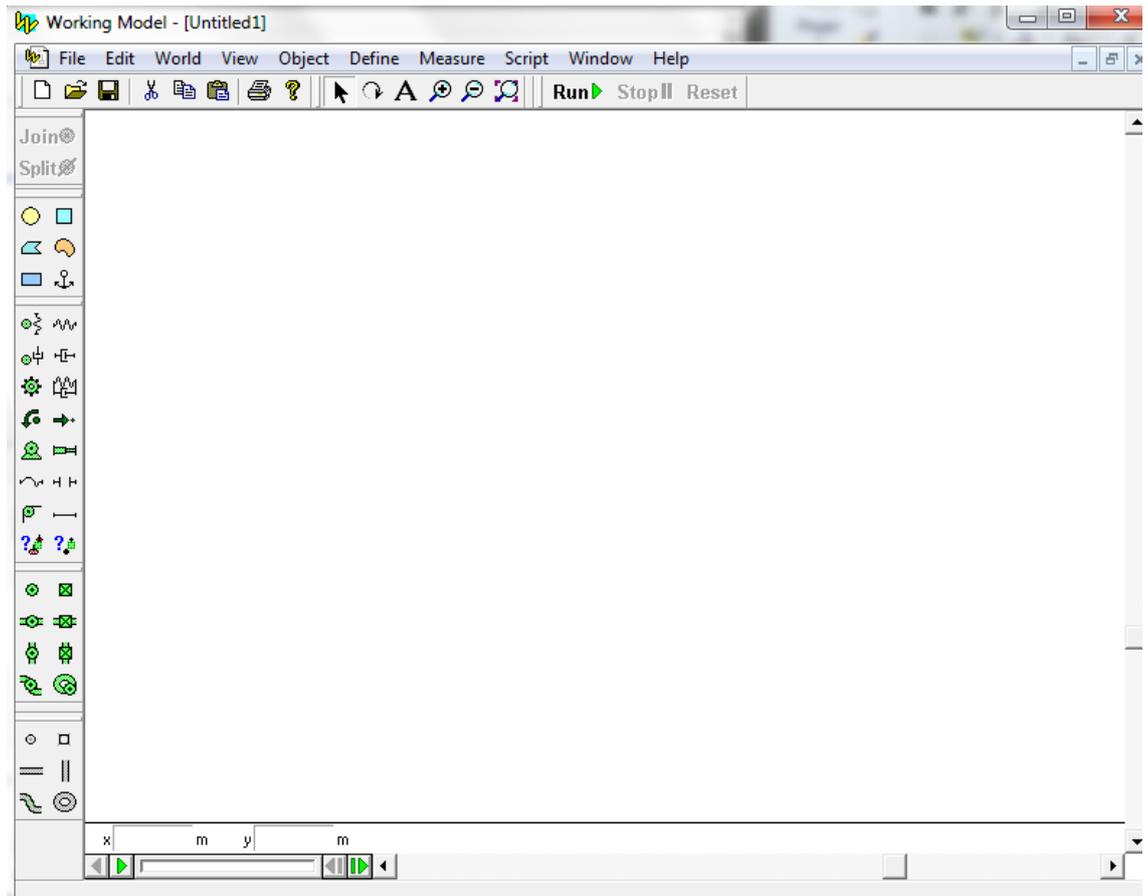


Figura 3.1. Ejemplo de la interfaz vacía.

Así pues, además de lo que está a la vista queda los diferentes menús de la barra de herramientas superior, siendo los dos primeros los clásicos de *Windows* y los siguientes específicos a este programa siendo la parte principal de la funcionalidad del programa.

A continuación se explican los diferentes menús y sus características.

3.2.2 Introducción de sólidos y sus características

Una de las partes más importantes a la hora de realizar una simulación es definir bien las características de los diferentes elementos a simular por ello se explicará cómo hacerlo correctamente.

Para introducirlos se utilizará el segundo conjunto de órdenes del panel lateral, siendo estas las siguientes en orden: Circulo, definiendo una esquina del cuadrado que la circunscribe y la opuesta, Cuadrado, definido de forma similar al anterior, Polígono recto, definido introduciendo sus diferentes aristas de forma consecutiva, Polígono curvo,

definiendo los puntos de giro y su radio y por último rectángulo definiendo esquinas opuestas.

Toda esta geometría se puede editar posteriormente arrastrando sus esquinas o mediante las diferentes ventanas que definen con más precisión sus características que serán mostradas más adelante.

3.2.3 Puntos de unión entre cuerpos

Para poder enlazar los cuerpos entre si y que puedan producirse más interacciones aparte de las debida al contacto es necesario definir puntos de los mismo para que posteriormente mediante estas uniones se transmitan diferentes fuerzas entre sí.

Para definir las se utilizan el cuarto y quinto conjunto de órdenes del panel lateral y para unirlos se usa el primero.

El cuarto y quinto conjunto son similares la principal diferencia es que en el último se definen los elementos a los que posteriormente se van a unir y el primero se define directamente su unión y no requiere de dos elementos para su unión, sino que se unen directamente al fondo. En estos conjuntos nos permiten crear puntos de unión que limitan tanto desplazamiento y giro o sólo desplazamiento además diferentes guías para unir los sólidos. Todas estas uniones se consideran ideales, que quiere decir que pueden transmitir cualquier cantidad de fuerza sin limitaciones.

Por último el primer conjunto de órdenes se encarga de unir y separar los diferentes elementos seleccionando previamente los puntos de unión de los mismos.

3.2.4 Interacciones entre sólidos

Para poder insertar diferentes interacciones entre sólidos o con el fondo se utiliza el tercer conjunto. En este están diferentes uniones como muelles o amortiguadores, engranajes, cuerdas y poleas. Además también incluyen diferentes actuadores sobre los cuerpos tales como motores o pistones, o incluso fuerzas o pares.

Estos elementos se encargan de añadir interacciones más complejas que simples uniones y contactos permitiendo el control de las diferentes fuerzas que impulsaran el mecanismo, mediante la inserción numérica de los diferentes valores que los definen además de su posición y orientación.

Los diferentes comandos que se incluyen son los siguientes en orden: Muelle rotacional y recto, Amortiguador rotacional y recto, Engranaje, Conjunto muelle amortiguador, Par, Fuerza, Motor, Pistón, Cuerda, Separador, Polea, Barra, Punto de unión genérico y Barra genérica.

3.2.5 Barra de herramientas

La barra de herramientas contiene gran cantidad de las instrucciones del programa. Cabe destacar los diferentes comandos inmediatamente inferior, además de los clásicos se incluyen varios como rotar objetos, introducir textos controlar el zoom y otros controles sobre el inicio pausa y reinicio de la simulación.

En la barra de herramientas se incluyen varias pestañas siendo las dos primeras son las comunes que te permiten abrir, guardar, deshacer, copiar y pegar y la última te permite acceder a la ayuda que viene incluida con el programa además de la licencia y otra información.

Por orden las otras pestañas son las siguientes: World, View, Object, Define, Measure, Script y Window. Sus principales funciones se describen a continuación.

La primera pestaña se encarga de definir parámetros que afectan a toda la simulación tales como el valor de la gravedad y el tipo de esta, la resistencia del aire, etc. También se encarga de definir parámetros de la simulación como la precisión de la misma, las condiciones para terminarla y diferentes propiedades del mismo.

La pestaña de View se encarga de la información mostrada en pantalla a resaltar características del espacio del trabajo así como opciones para mostrar el centro de masas, controlar las unidades y medidas y mostrar el grid y forzar a las posiciones al mismo.

La siguiente pestaña se encarga de definir uniones como ya lo hacia la barra lateral, además de esto también se encarga de controlar la profundidad de los diferentes objetos, controlar las colisiones entre diferentes sólidos y controlar la respuesta que recibe el usuario.

Las siguientes tres pestañas sirven para mostrar y controlar las simulaciones, incluyendo cosas como añadir deslizadores que cambien valores, mostrar vectores, crear

gráficas para mostrar valores y crear un script que controle los parámetros de la simulación.

La siguiente pestaña se encarga de abrir ventanas que controlan todos los datos geométricos, físicos y de apariencia de los diferentes componentes de la simulación. Estas se explicarán en detalle a continuación en el siguiente apartado.

Por último la pestaña *Help* se encarga de abrir la guía del programa y tiene un buscador para dicha guía.

3.2.6 Ventanas de propiedades

En este apartado se explica las diferentes ventanas que modifican todos los elementos de los que forman parte la simulación, eso incluye cuerpos de diferentes formas, gráficas, actuadores, uniones y los diferentes controladores.

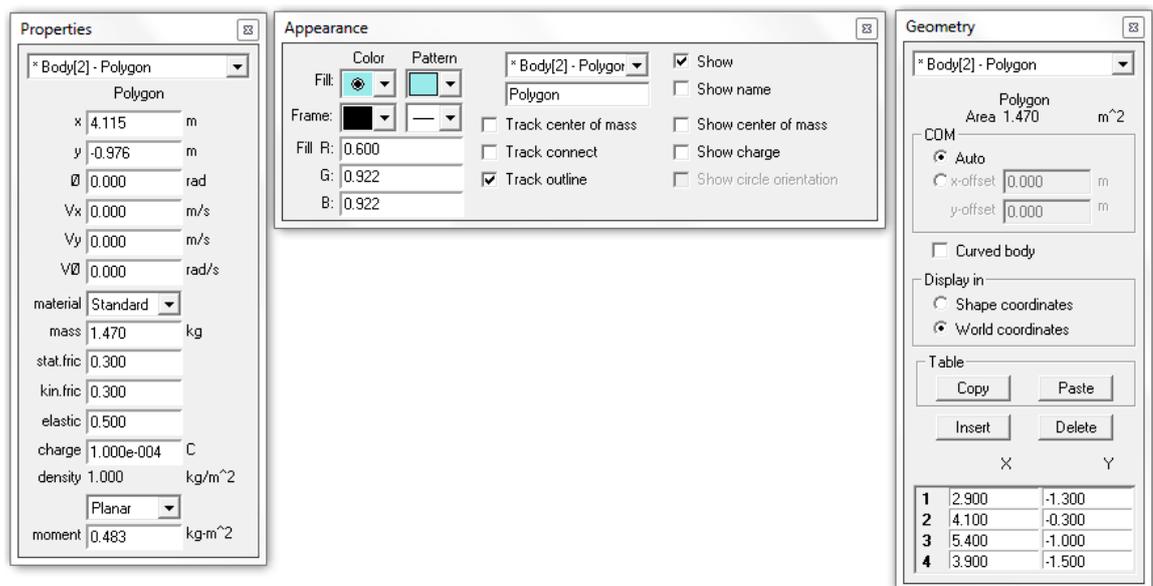


Figura 3.2.Principales ventanas de propiedades

La primera ventana es la de propiedades, se encarga de controlar los diferentes parámetros que definen el comportamiento de los diferentes elementos. El aspecto de la ventana varía en función del elemento seleccionado, por ejemplo el de la imagen es para un cuerpo, pero en el caso de un actuador esta no tendría sentido por lo tanto los campos que puedes alterar cambiaran a unos acordes al elemento seleccionado.

En el caso de un cuerpo controla su posición y orientación, sus velocidades además del tipo del material y varias propiedades físicas como masa, rozamientos, carga y momento. En el caso de un actuador te permite controlar la potencia que aplican. Estos valores te permiten definir totalmente las características de los diferentes elementos que forman parte de la simulación.

La siguiente ventana se encarga de controlar la apariencia de los elementos y parte de la información que se muestra en pantalla. Permite variar los colores y grosor de las líneas que lo forman además de modificar el nombre y mostrar el centro de gravedad, el nombre e incluso el elemento, además permite mostrar el recorrido de los elementos.

Por último la ventana de geometría se encarga de controlar la forma de los diferentes elementos y permite modificar, añadir o eliminar las coordenadas de los vértices además esta ventana al igual que las anteriores cambia en función del elemento seleccionado, por ejemplo en círculos te permite definir radio, en rectángulos permite cambiar la anchura y altura, siempre adaptándose a los diferentes elementos.

3.3 Conclusiones

El entorno de trabajo *Working Model 2D* es un simulador mecánicos que se mueven con el tiempo, basado diferentes elementos en 2,5 dimensiones, permitiendo un control total de las características mecánicas, además permite la asistencia de otros programas como Matlab para la inserción de la geometría al permitir copiar tablas de coordenadas permitiendo un gran control. Además cabe destacar que es un programa de interfaz sencilla y limpia que permite su uso sin requerir una gran preparación previa. Aun así este programa tiene la imitación de que la precisión de los cálculos que ejecuto puede variar entre ordenadores de 32 y 64 bits, otra de las limitaciones que tiene es que surgen problemas en cálculo con elasticidades distintas a las ideales por tanto produce unos cálculos con una aproximación suficientemente buena pero no exacta.

Teniendo todo esto en cuenta se ha seleccionado este programa para la resolución de este trabajo sobre todo por su sencillez y que los mecanismos a analizar se pueden simular sin requerir de la tercera dimensión pudiendo por ello ahorrar poder de computación.

4

Simulación y análisis de los datos obtenidos

4.1 Introducción

En el presente capítulo de esta memoria del Proyecto Fin de grado, se presenta y detalla las labores realizadas para poder llegar a conclusiones de los diferentes mecanismos que se han analizados.

Este apartado está dividido en tres fases diferentes para cada mecanismo, la primera fase consiste en obtener información específica del mecanismo, la segunda consiste en realizar la simulación mediante el programa ya explicado y por último un análisis de la información obtenida durante el transcurso del Proyecto.

Todos los puntos se realizaran independientemente para mecanismo analizado indicando las peculiaridades específicas de cada uno.

4.2 Mecanismo de péndulo

4.2.1 Obtención de datos del mecanismo de péndulo

Lo más importante en todas las simulaciones es averiguar la composición del mismo y sus partes críticas para su funcionamiento para teniéndolo en cuenta realizar las simplificaciones que permitan una sencilla implementación sin perder calidad en la información que obtendremos posteriormente.

En el caso de un reloj de péndulo el mecanismo clásico es el que se enseña en la siguiente imagen, las partes principales son las siguientes:

4.2.2 Simulación del mecanismo de péndulo

Para la simulación del mecanismo lo primero será analizar que parte son prescindibles y cuales se pueden simplificar sin que provoquen un cambio en el comportamiento que queremos analizar. Las simplificaciones realizadas son las siguientes:

- La primera es cambiar el sistema de aporte de energía por un motor que nos permita un mejor control sobre el momento aplicado. Esto se hace por dos motivos principalmente tener un mayor control a la hora de simular y también la complejidad de simular ese mecanismo en un programa en dos dimensiones.
- Otro de los cambios es sustituir el tren de engranajes por dos ruedas que se encarguen de transmitir el par desde el motor a la aguja, permitiendo controlar el par al transmitirlo a la rueda de escape.
- Las agujas son un elemento totalmente prescindible sin embargo en este caso se han dejado debido a la sencillez del sistema para permitir una mejor observación visual del movimiento.

Por último cabe destacar la precisión necesaria tanto en la geometría de la rueda de escape como en el ancla específicamente en sus paletas, dado que el movimiento de oscilación de ancla debe impedir intermitentemente el movimiento rotacional de la rueda de escape. Una de las indicaciones que se pueden hacer es que si las palas del ancla tienen una superficie de contacto circular centrada en el punto de giro del ancla entonces evitamos completamente el movimiento de retroceso, sin embargo aunque esto es un beneficio para los relojes reales es una característica totalmente prescindible en nuestro análisis por tanto se ha decidido prescindir de ella.

Otra característica a tener en cuenta es la forma de los dientes de la rueda de escape que al no tener que encajar con ningún engranaje son muchos más largos y estrechos con la intención de facilitar la interacción entre el ancla y la rueda de escape, además cabe destacar la inclinación de los dientes ya que estos no son simétricos a su radio sino que se inclinan para facilitar la interacción también.

Tras tener en consideración todos estos aspectos se realiza la siguiente simulación y se incluye una gráfica que señala movimiento del péndulo para así poder observar la variación del periodo cuando ejecutemos el programa variando progresivamente el par aplicado por el actuador.

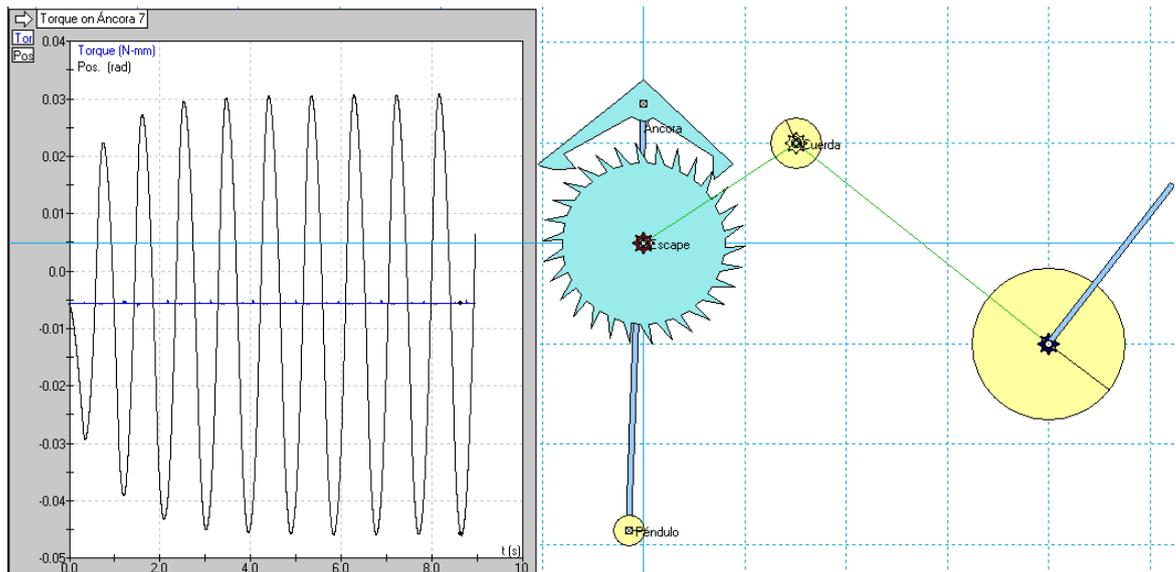


Figura 4.2. Simulación realizada para el escape de péndulo.

Para la realización de la simulación se ha tenido en cuenta que lo que se quiere analizar es como afecta la disminución de la energía aportada al periodo del mecanismo, por tanto se han realizado varias simulaciones y se va a comparar la media entre el par máximo y mínimo que permiten su funcionamiento con un par cercano al mínimo y así observar la variación claramente, en caso de que se produjera.

4.2.3 Análisis del mecanismo de péndulo

En nuestro caso contamos con un reloj de péndulo de tamaño pequeño con un péndulo de 425 mm y una masa de 70 g a la que le aplicaremos pares de 5 Nmm para simular la falta de cuerda y de 15 Nmm para un funcionamiento ideal, este reloj está diseñado para que en condiciones de un par adecuado produzca un periodo cada segundo. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

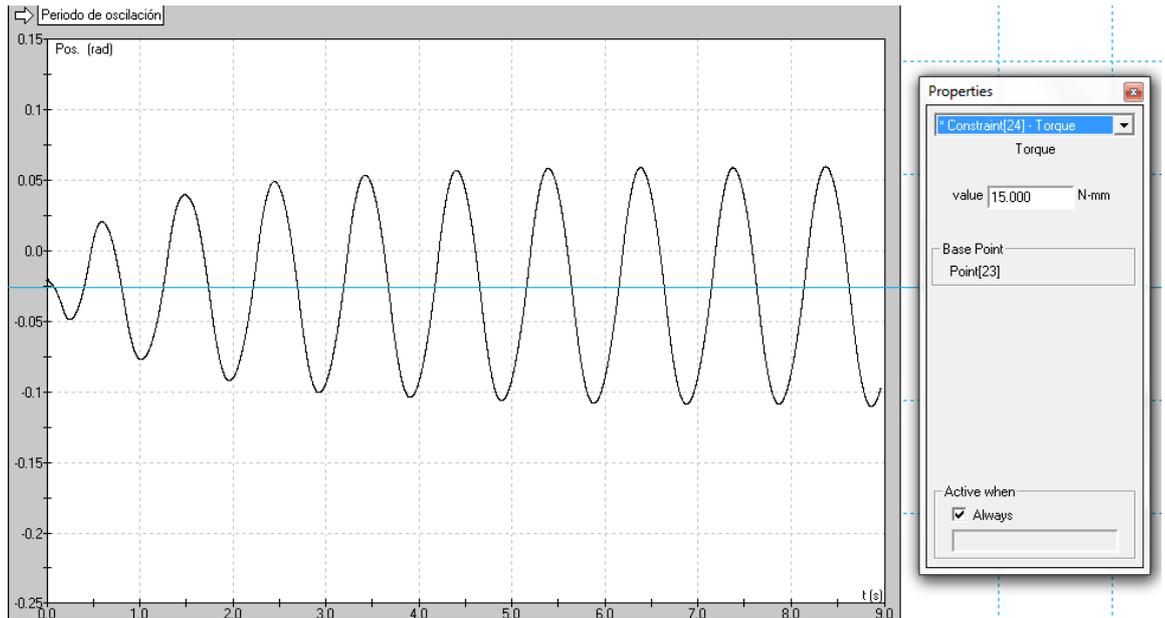


Figura 4.3. Periodo oscilación péndulo para 15 Nmm.

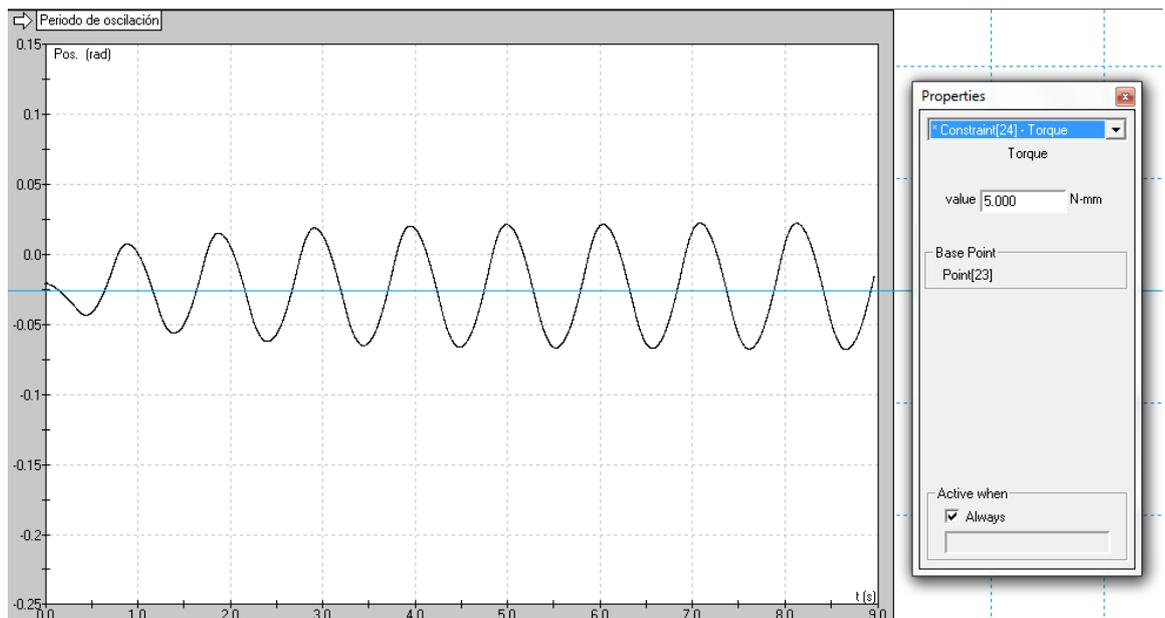


Figura 4.4. Periodo oscilación péndulo para 5 Nmm.

Como se puede observar a simple vista una vez alcanzado el estacionario en ambos casos e periodo se mantiene constante. Como era de esperar en el caso de un par suficiente el periodo se mantiene exactamente en 1 s, en cambio se observa que cuando el par va disminuyendo el periodo se va alargando progresivamente.

En el caso simulado se observa que con un par muy cerca del mínimo para que el reloj detenga su funcionamiento, como se puede observar tanto en el tiempo que tarda

hacer la primera oscilación como en la escasa pendiente en el tramo final de esta, e par aumenta considerablemente. Tras realizar unas mediciones se observó que el valor del periodo alcanza valores alrededor 1,05 s, por lo tanto cuando el reloj indique que ha pasado una hora en realidad habrá pasado una hora y 3 minutos produciendo un retraso en el mismo de un 5%.

Por este motivo se recomienda darle cuerda a los relojes a menudo dado que este problema se minimiza considerablemente al tener un par adecuado.

4.3 Mecanismo ancora suiza

4.3.1 Obtención de datos del mecanismo ancora suiza

Para hallar información en este caso se optó por la compra de un reloj de pulsera mecánico y se procedió a su desmontaje para poder obtener un modelo más exacto del mismo a la hora de realizar la simulación, además de esto también hay que buscar descripciones visuales de los componentes ara conocer tanto sus componentes como funcionalidad.

En el caso de un reloj con escape de ancora suiza clásico es el que se enseña en la siguiente imagen, las partes principales son las siguientes:

- Por la parte superior entra el mecanismo de cuerda que no consiste en más que en un mecanismo que al girar trasmite este movimiento a un engranaje.
- El engranaje plateado superior pequeño se encarga de transmitir el giro de la cuerda al barrilete.
- El barrilete es el engranaje plateado más grande consta de un muelle en su interior que va liberando la energía almacenada en el por medio de darle cuerda.
- Inmediatamente en contacto con el barrilete esta la rueda que bloquea el mismo para permitir da cuerda al muelle.

- Apoyados en las joyas rosas está el tren de engranajes que se encarga de transmitir el par desde el barrilete hasta la rueda de escape y dar el giro de las diferentes agujas.
- A continuación está el mecanismo de escape que consta de la rueda de escape al final de la transmisión y su movimiento se ve interrumpido por el balancín. Por último dentro de este mecanismo tenemos el volante de inercia con su muelle torsional que juntos se encargan de marcar el ritmo del reloj.



Figura 4.5. Esquema de un reloj con escape de ancora suiza.

Como se puede observar en la imagen todas las piezas que sufrirán un gran movimiento están apoyadas en joyas para disminuir su rozamiento y desgaste.

Con toda esta información ya se describe todo el funcionamiento del reloj pero en este caso se va a optar por una mejor definición de los componentes del mismo por tanto se necesita conocer varios parámetros del mismo para una simulación más parecida a un mecanismo real. Para ello los datos principales a hallar son los siguientes:

- Constante elástica del muelle del barrilete, con ello y el número de vueltas que le quedan podemos conocer el par que estará aportando al mecanismo
- Momento de inercia del volante de inercia del mecanismo, esto junto con su frecuencia de oscilación nos permite conocer la constante del muelle unido al mismo.
- Relaciones de transmisión que van desde el barrilete hasta la rueda de escape con este valor se tendrá un conocimiento exacto del par aplicado al mecanismo y se podrá controlar perfectamente en función de la energía residual del barrilete.

Para hallar la constante elástica del muelle lo primero que necesitamos conocer es el modelo de escape del muelle en nuestro caso es ETA2480, buscando en una base de datos se obtiene la imagen de a continuación. Buscando entre toda la información disponible se halla lo resaltado para nuestro problema.

ETA 2480

Features
manual wind

Data
5.75 x 6.75", Dm= 13.05 x 15.15mm
Do= 13.05 x 15.6mm
H= 3.5mm
F= 0.6mm
T= 1.7mm
17/21 jewels
f= 18000 A/h
power reserve 42h

Balance staff U2525 / U3125
balance with/without screws

Stem W2580

Mainspring / battery
Zf1002, 1.40 x 6.5 x 0.07 x 210mm

Hands
1.20 x 0.60mm

[Comments about the data](#)

Fig. 1

Fig. 2

Figura 4.6. Base de datos sobre nuestro reloj.

Por tanto se averigua que el valor de la fuerza es de 0,07 pero se desconocen las unidades por tanto se usará la siguiente fórmula para conociendo las unidades de la geometría, en este caso milímetros averiguar el valor de la fuerza.

$$K = \frac{E \times d^4}{10,8 \times D \times N_a} \tag{Ecuación 4.1.}$$

Donde K es la constante del muelle, d es el diámetro del alambre, D es el diámetro medio y Na es el número de espiras activas. Teniendo en cuenta que ahí viene todo en unidades del sistema de medida inglés se comprueba que la constante del muelle tiene un valor de 0,07Nmm por vuelta

Para el cálculo del momento de inercia del volante se optó por desmontar el reloj adquirido y medir sus geometrías principales, además de esto en la figura anterior viene indicado el modelo del eje de balance por tanto buscando su geometrías también podemos hallar el valor exacto de su inercia, en este caso al no ser posible encontrar el modelo exacto se va a optar por un modelo similar.

Article: BS3851
Ronda no.: 1717
Movement: 4,25
Stock: 0
Movement: 4,25
Discount: Buy 3 and pay for 2
Brand: Moeris (Civitas)
Caliber:

Model:



A= 286
B= 146
J= 75
G= 37
K= 42

(Units: mm/100)

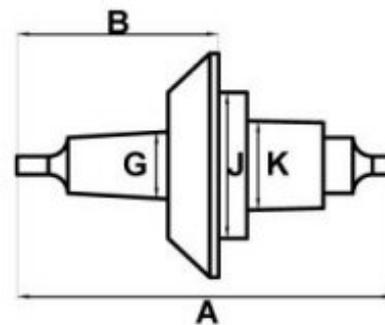


Figura 4.7. Datos sobre el eje de balance

Conociendo estos valores además de que la geometría del anillo exterior es de diámetro máximo 7,3 mm, tiene de anchura 0,4 mm y espesor de 0,54 mm. Juntado esto con que tiene 3 bandas en formas de pirámides isósceles que le unen al centro de bases 0,65 y 0,51 mm junto con un espesor de 0,27 mm. Calculando todas las inercias de estas geometrías tenemos lo siguiente:

- Inercia eje de balance: 1,35E-12
- Inercia anillo exterior: 2,15E-10
- Inercia bandas: 4,04E-10
- Inercia total: 6,20 E-10

Todas las unidades no indicadas en unidades del sistema internacional.

Por lo tanto sabiendo que tenemos una frecuencia de oscilación de 5 Hz, con la siguiente formula se halla la constante del muelle del volante de inercia.

$$K = (2\pi f)^2 \times I$$

Ecuación 4.2.

Donde K es la constante de elasticidad del resorte que se quiere hallar, I es la inercia de la masa a la que está unida y f es la frecuencia de oscilación de la masa. Haciendo las cuentas se obtiene que la constante de elasticidad tome un valor de $6,11E-7$, todas las unidades en el S.I.

Por último nos falta hallar la relación de transmisión entre el barrilete y la rueda de escape, para ello sabemos que esta relación de transmisión cuenta por los siguientes componentes: el barrilete, el engranaje del minuterero, un engranaje intermedio, un engranaje del segundero y por último la rueda de escape, siendo esta composición la más habitual.

Se sabe que la relación entre el segundero y la rueda de escape tiene que ser de 5:1 ya que cada uno tiene 5 oscilaciones por segundo, además la relación de transmisión entre el minuterero y el segundero a de ser por definición de 60:1 sin importar los escalones intermedios. Por lo tanto solo se necesita conocer la relación entre el barrilete y el minuterero, en nuestro caso tras ser desmontado y midiendo los diámetros de ambos obtenemos que esta relación es de 8:1, por tanto combinando todas estas transmisiones obtenemos que la relación entre el barrilete y la rueda de escape es de 2400:1 es decir que cada 2400 vueltas de la rueda de escape el barril gira una. Por tanto se produce a lo largo del tren de transmisión un aumento progresivo de la velocidad de los engranajes disminuyendo de la misma medida el valor del par aplicado en cada eje.

Además se ha supuesto que el número máximo de vueltas aplicables a la cuerda son 8. Pudiendo así estimar todos los valores y por tanto ya conocemos todos los datos que usaremos en nuestra simulación.

4.3.2 Simulación del mecanismo ancora suiza

Para la simulación del mecanismo será necesario analizar que partes son prescindibles y cuales se pueden simplificar sin que provoquen un cambio en el comportamiento que queremos analizar. Las simplificaciones realizadas son las siguientes:

- La primera es cambiar el sistema de aporte de energía por un motor que nos permita un mejor control sobre el momento aplicado. Esto se hace por

dos motivos principalmente tener un mayor control a la hora de simular y también la complejidad de simular ese mecanismo en un programa en dos dimensiones.

- Otro de los cambios es sustituir el tren de engranajes por una rueda que se encarguen de simular el barrilete con el motor unido a la rueda de escape por la relación de transmisión hallada en el apartado anterior.
- Las agujas son un elemento totalmente prescindible sin embargo en este caso se han dejado debido a la sencillez del sistema para permitir una mejor observación visual del movimiento.
- También se ha prescindido del mecanismo encargado de darle cuerda al reloj dado que en nuestro caso no es necesario.

Por último cabe destacar la precisión necesaria tanto en la geometría de la rueda de escape como en el ancla específicamente en sus paletas, dado que el movimiento de oscilación de ancla debe impedir intermitentemente el movimiento rotacional de la rueda de escape.

Otra característica a tener en cuenta es la forma de los dientes de la rueda de escape que al no tener que encajar con ningún engranaje son muchos más largos y estrechos con la intención de facilitar la interacción entre el ancla y la rueda de escape, además cabe destacar la inclinación de los dientes ya que estos no son simétricos a su radio sino que se inclinan para facilitar la interacción también.

Otra de las geometrías más delicadas es la del extremo del balancín que entra en contacto con el volante de inercia, ya que se tiene que procurar que este contacto sea lo más puntual posible, evitando interferencia y posibilitando la transmisión de energía entre ambos en ambos sentidos.

Tras tener en consideración todos estos aspectos se realiza la siguiente simulación y se incluye una gráfica que señala movimiento del péndulo para así poder observar la variación del periodo cuando ejecutemos el programa variando progresivamente el par aplicado por el actuador.

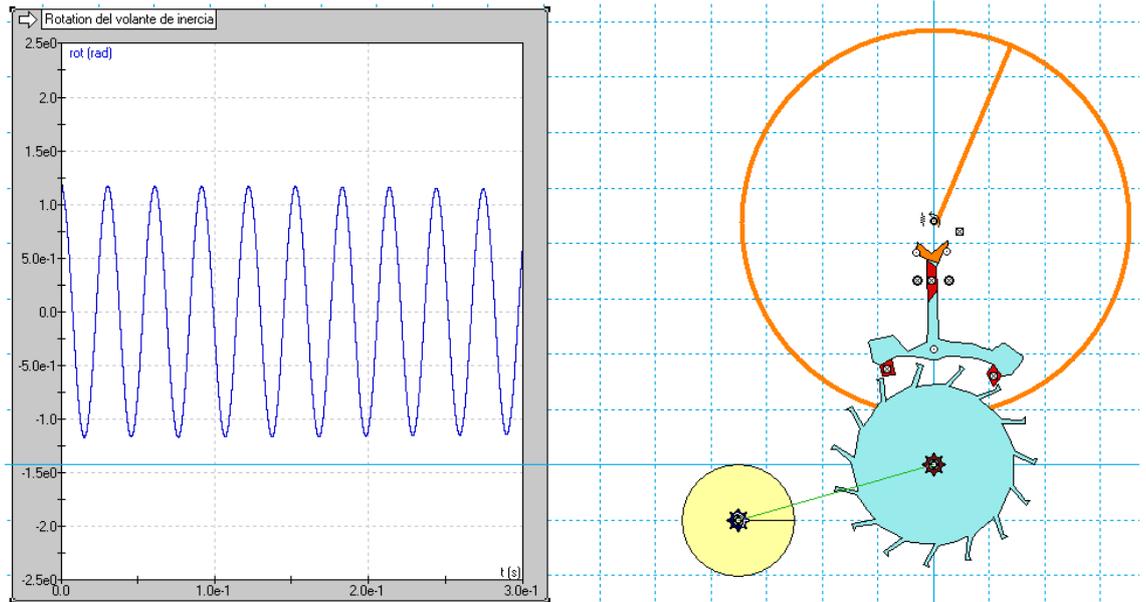


Figura 4.8. Simulación realizada para el escape de ancora suiza.

Para la realización de la simulación se ha tenido en cuenta que lo que se quiere analizar es como afecta la disminución de la energía aportada al periodo del mecanismo, por tanto se han realizado varias simulaciones y se va a comparar la media entre el par máximo y mínimo que permiten su funcionamiento con un par cercano al mínimo y así observar la variación claramente, en caso de que se produjera.

4.3.3 Análisis del mecanismo ancora suiza

En nuestro caso contamos con un reloj de pulsera de tamaño pequeño con una frecuencia de oscilación de 5 Hz con todas las medidas ya indicadas en el primer apartado. Por tanto vamos a analizar su periodo de oscilación tanto para 5 vueltas restantes de cuerda o lo que es lo mismo 0,35 Nmm y para 1 vuelta restante o lo que es lo mismo 0,07 Nmm. Este reloj debería producir en comportamiento ideal una oscilación cada 0,2 segundos. Los resultados obtenidos son los siguientes.

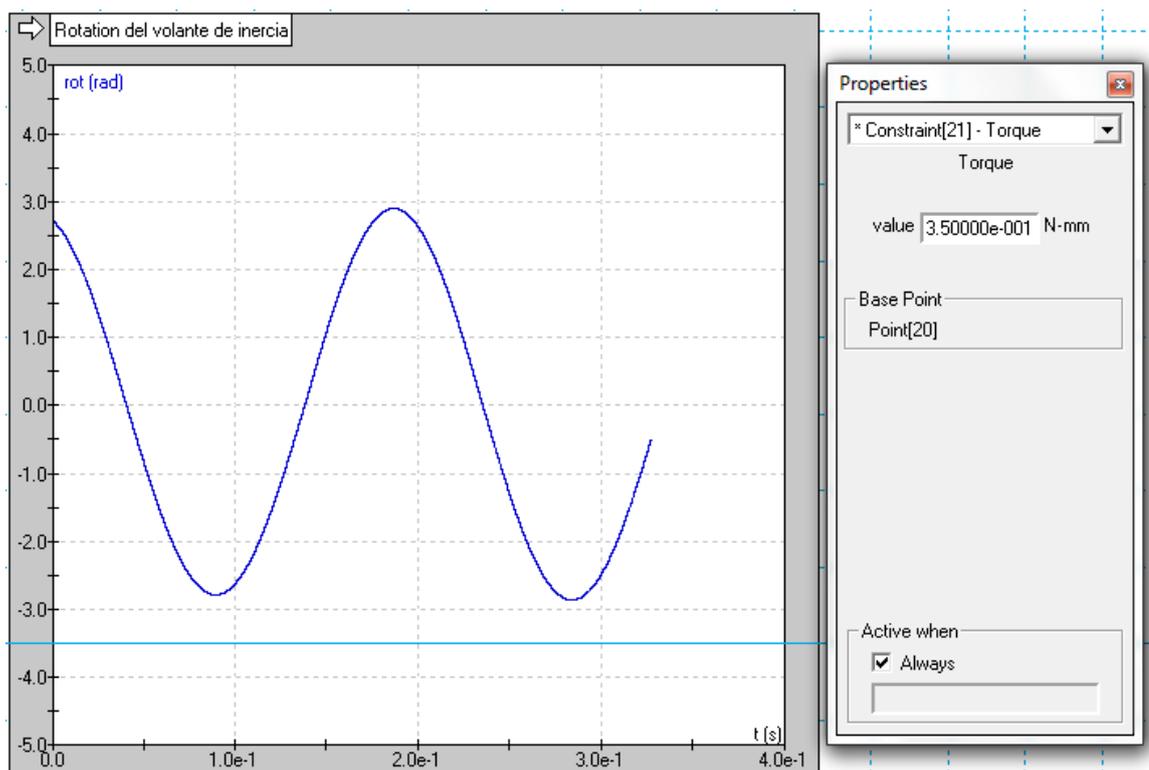


Figura 4.9. Periodo oscilación volante para 0,35 Nmm.

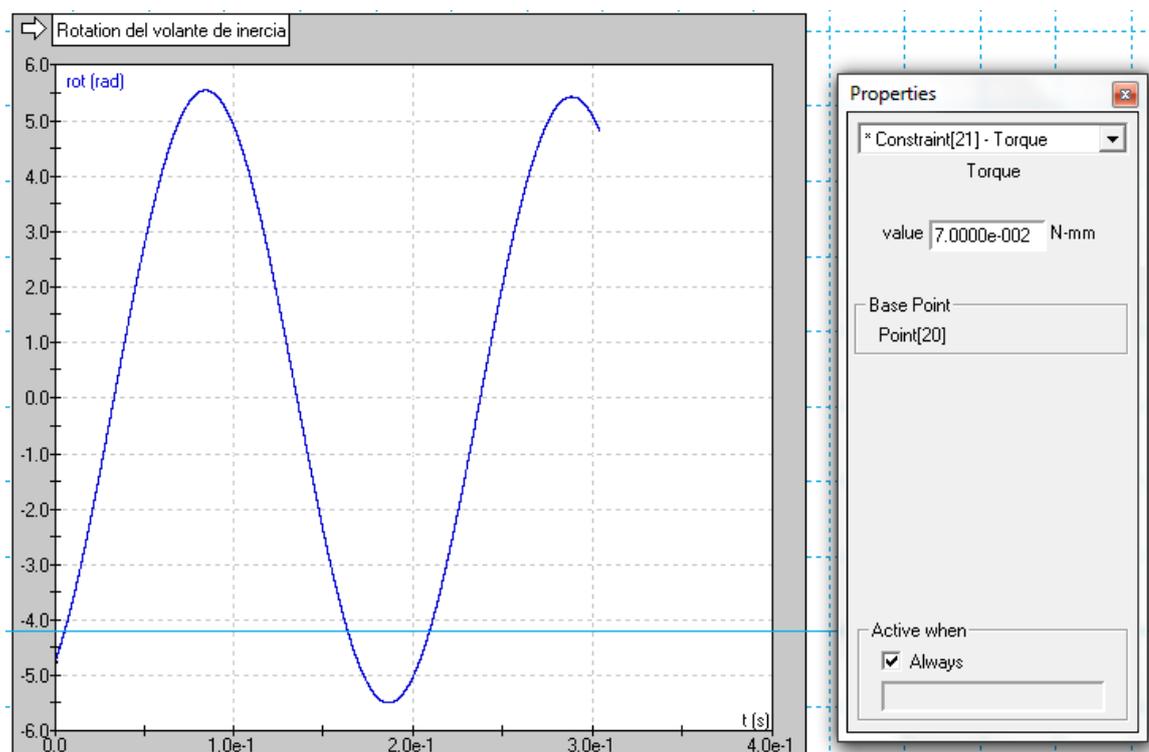


Figura 4.10. Periodo oscilación péndulo para 0,07 Nmm.

Por problemas de falta de capacidad solo se ha podido simular un periodo y medio, pero si se comprueban las crestas aparenta haber alcanzado un estacionario rápidamente al tener el mismo valor.

Tras observar a simple vista ambas graficas no se ha observado ninguna diferencia pero tras pasar la imagen por un zoom elevado y contar los pixeles de cada periodo se ha observado que en el caso de 5 vueltas el periodo es 0,2 s y en el de 1 vuelta es 0,202 incrementando ligeramente el periodo en un 1%, debido a este desfase cuando el reloj marque que ha pasado 1 hora en realidad habrá pasado 1 hora y 36 segundos.

Este mecanismo es el que debería ser de los más precisos con un menor porcentaje de error, de ser así cumpliría con lo esperado según la realidad.

4.4 Mecanismo saltamontes

4.4.1 Obtención de datos del mecanismo saltamontes

Al igual que en los mecanismos anteriores lo más crítico es averiguar la composición del mecanismo y sus partes críticas para su funcionamiento para teniéndolo en cuenta realizar las simplificaciones que permitan una sencilla implementación sin perder calidad en la información que obtendremos posteriormente.

Cabe destacar que existen varios tipos de escapes saltamontes y varían tanto en la posiciones de los puntos en los que hacen contacto como en el medio que usan para devolver a las paletas a su posición original variando principalmente entre un balance de masas como es nuestro caso o basados en la elongación de muelles tanto torsionales como rectos apoyados en puntos del ancla.

En el caso de un reloj con un escape saltamontes el mecanismo clásico es el que se enseña en la siguiente imagen, las partes principales son las siguientes:

- En la parte posterior a lo largo del reloj está el péndulo.
- En la parte superior central está el ancla con ambas paletas unidas a ellas y equilibradas mediante masas en sus extremos opuestos.
- Inmediatamente por debajo de los anteriores está la rueda de escape, con la forma de diente característica de estas ruedas para facilitar el contacto.

- Por la parte posterior tenemos el tren de engranajes encargado de transmitir la potencia.
- En el frente en la parte inferior están las agujas encargadas de montar el tiempo
- Por último hay que resaltar que en esta imagen no se aprecia la fuente de energía que lo mueve pudiendo esta variar desde pesas suspendidas mediante una cuerda hasta un motor eléctrico.



Figura 4.11. Esquema de un escape saltamontes.

4.4.2 Simulación del mecanismo saltamontes

Para la simulación del mecanismo lo primero será analizar que parte son prescindibles y cuales se pueden simplificar sin que provoquen un cambio en el comportamiento que queremos analizar. Las simplificaciones realizadas son las siguientes:

- La primera será suponer que el sistema de aporte de energía es un motor que nos permita un mejor control sobre el momento aplicado. Esto se hace por dos motivos principalmente tener un mayor control a la hora de simular y también la complejidad de simular otro mecanismo que no aportaría ningún beneficio.
- Otro de los cambios es sustituir el tren de engranajes por dos ruedas que se encarguen de transmitir el par desde el motor a la aguja, permitiendo controlar el par al transmitirlo a la rueda de escape.
- Las agujas son un elemento totalmente prescindible y por tanto no se han considerado para nuestra simulación.

Por último cabe destacar la precisión necesaria tanto en la geometría de la rueda de escape como en las paletas, tanto en sus masas, posiciones en el ancla y geometría, dado que el movimiento de oscilación debe impedir intermitentemente el movimiento de la rueda de escape. Una de las indicaciones que se pueden hacer es que este mecanismo es posible su regulación sin una parada total de la rueda de escape, siendo esto una gran diferencia con respecto a los mecanismos anteriores y esto se debe a las masas que a pesar de requerir una gran precisión permiten un balance continuo de las paletas incluso al estar en contacto con la rueda.

Otra característica a tener en cuenta es la forma de los dientes de la rueda de escape que al no tener que encajar con ningún engranaje son muchos más largos y estrechos con la intención de facilitar la interacción entre el ancla y la rueda de escape, además cabe destacar la inclinación de los dientes ya que estos no son simétricos a su radio sino que se inclinan para facilitar la interacción también.

Otro factor a tener en cuenta en este mecanismo son la forma de los extremos de las paletas, ya que estos deben frenar a la rueda de escape pero hasta una posición

específica y liberarla a partir de ese punto, todo este funcionamiento está regulado gracias a un equilibrio entre la geometría y la fuerza de rozamiento entre la paleta y el escape.

Tras tener en consideración todos estos aspectos se realiza la siguiente simulación y se incluye una gráfica que señala movimiento del péndulo para así poder observar la variación del periodo cuando ejecutemos el programa variando progresivamente el par aplicado por el actuador.

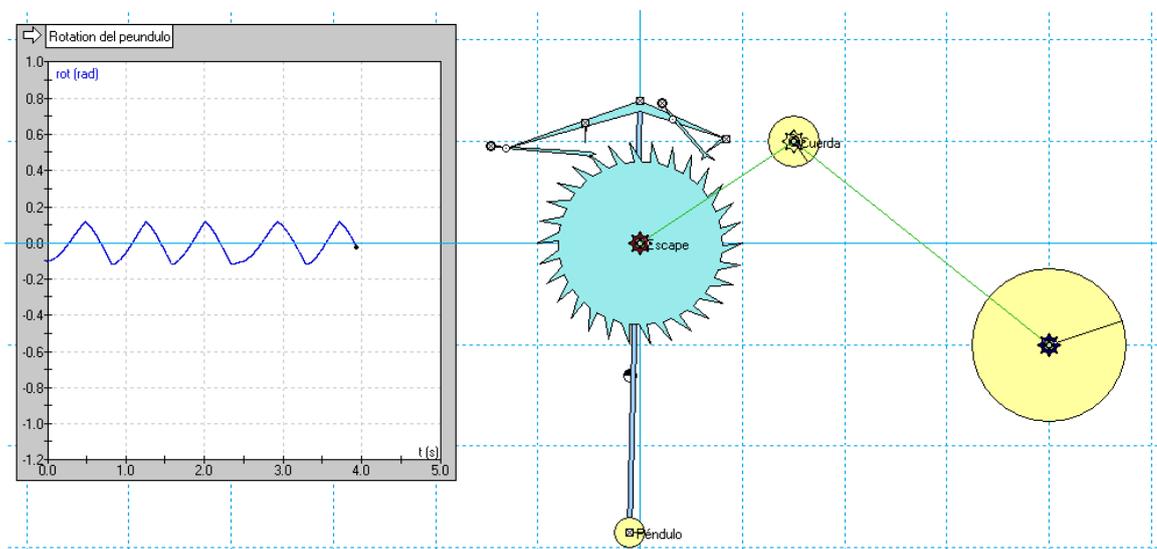


Figura 4.12. Simulación realizada para el escape saltamontes.

Para la realización de la simulación se ha tenido en cuenta que lo que se quiere analizar es como afecta la disminución de la energía aportada al periodo del mecanismo, por tanto se han realizado varias simulaciones y se va a comparar la media entre el par máximo y mínimo que permiten su funcionamiento con un par cercano al mínimo y así observar la variación claramente, en caso de que se produjera.

4.4.3 Análisis del mecanismo saltamontes

En nuestro caso contamos con un reloj de saltamontes de tamaño mediano con un péndulo de 425 mm y una masa de 200 g a la que le aplicaremos pares de 20 Nmm para simular la falta de cuerda y de 40 Nmm para un funcionamiento ideal, este reloj está

diseñado para que en condiciones de un par adecuado produzca un periodo cada segundo. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

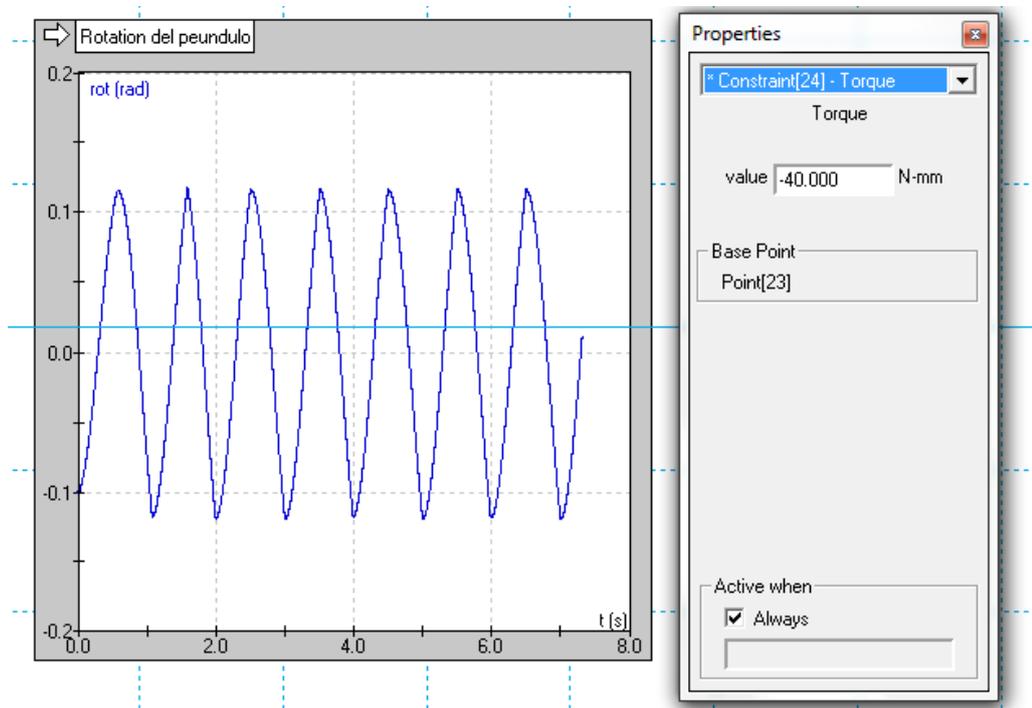


Figura 4.13. Periodo oscilación péndulo para 40 Nmm.

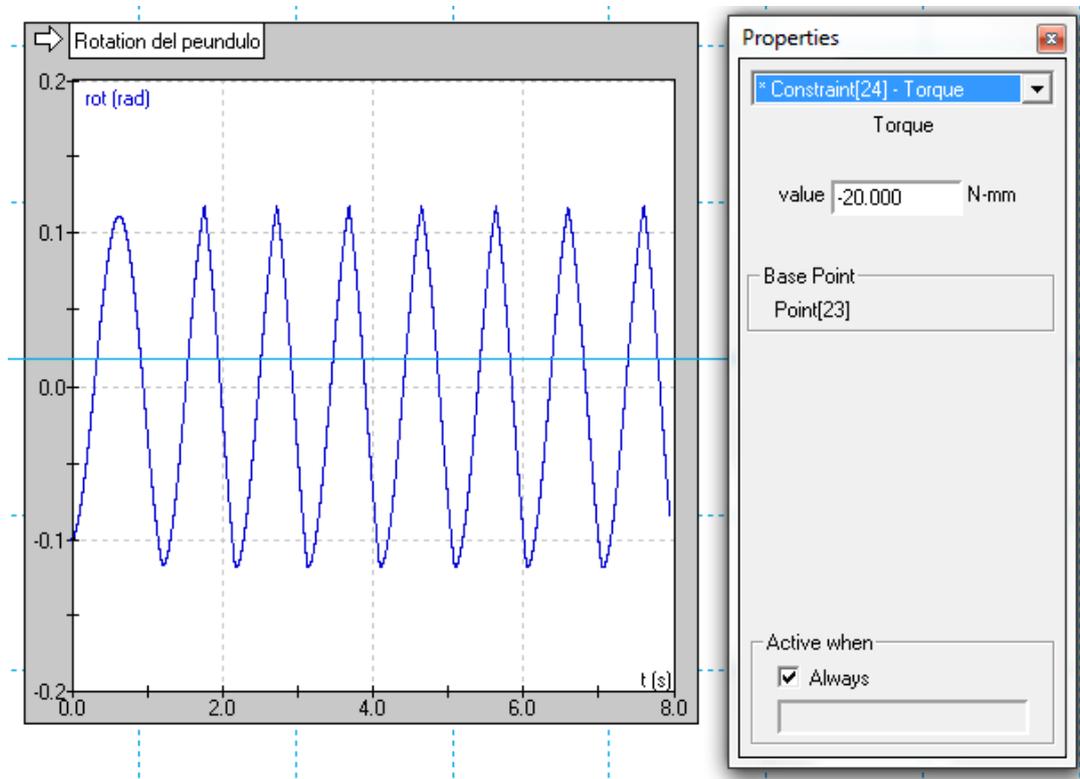


Figura 4.14. Periodo oscilación péndulo para 20 Nmm.

Como se puede observar a simple vista una vez alcanzado el estacionario en ambos casos el periodo se mantiene constante. Como era de esperar en el caso de un par suficiente el periodo se mantiene exactamente en 1 s, en cambio se observa que cuando el par va disminuyendo el periodo disminuye progresivamente.

En el caso simulado se observa que con un par muy cerca del mínimo para que el reloj detenga su funcionamiento, como se puede observar tanto en el tiempo que tarda hacer la primera oscilación como en la escasa variación de la pendiente en el final de la primera media oscilación. Tras realizar unas mediciones se observó que el valor del periodo alcanza valores alrededor 0,93 s, por lo tanto cuando el reloj indique que ha pasado una hora en realidad habrán pasado 56 minutos produciendo un adelanto en el mismo de un 7%.

Además de las observaciones relativas al periodo en este caso también se ha observado que el periodo no es simétrico exactamente y esto es debido a la asimetría de las paletas que afectan al péndulo. Otra característica observada es que estos relojes son muy difíciles de calibrar tanto en las masas contrapeso de las paletas como en el par aplicado debido a la extravagante forma del mecanismo.

Por todo para disminuir las inestabilidades requiere una mayor masa en el péndulo y por tanto un mayor par para moverlo que sus contrapartes, produciendo además mayores rozamiento y desgastes de las partes.

4.5 Mecanismo de gravedad

4.5.1 Obtención de datos del mecanismo de gravedad

Al igual que en los mecanismos anteriores lo más crítico es averiguar la composición del mecanismo y sus partes críticas para su funcionamiento para teniéndolo en cuenta realizar las simplificaciones que permitan una sencilla implementación sin perder calidad en la información que obtendremos posteriormente.

Cabe destacar que al igual que en el anterior hay muchas variaciones de este tipo de escapes centrándose este trabajo en el doble de tres piernas. Estos mecanismos varían mucho unos a otros tanto en el número de paletas como en la cantidad de conjunto de estas.

En el caso de un reloj con un escape de gravedad doble con tres piernas es el que se enseña en la siguiente imagen, las partes principales son las siguientes:

- En el extremo izquierdo está el sistema de energía en este caso una masa colgando que va desenroscándose según libera su energía.
- A continuación está el tren de engranajes que transmiten la energía tanto al escape en sí como a las agujas.
- En la derecha tenemos el escape, en su centro tenemos las paletas cuyo movimiento es el que está unido a los engranajes, a los lados las piezas que se encargan de transmitir energía al péndulo que se encuentra a lo largo del escape.
- En esta imagen también consta la corona y las agujas encargadas de mostrar el tiempo marcado por el reloj.

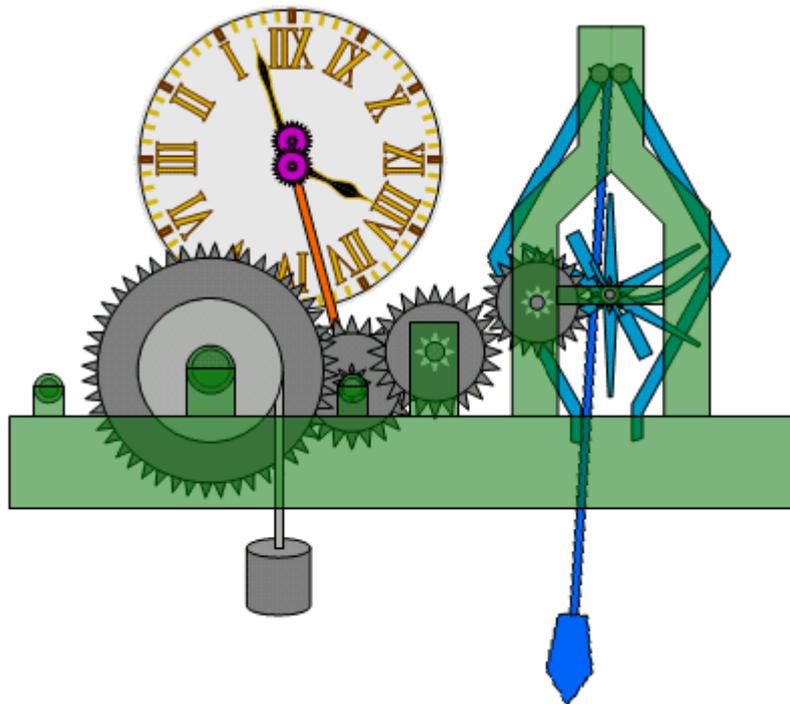


Figura 4.15. Esquema de un escape de gravedad.

4.5.2 Simulación del mecanismo de gravedad

Para la simulación del mecanismo lo primero será analizar que parte son prescindibles y cuales se pueden simplificar sin que provoquen un cambio en el

comportamiento que queremos analizar. Las simplificaciones realizadas son las siguientes:

- La primera será suponer que el sistema de aporte de energía es un motor que nos permita un mejor control sobre el momento aplicado. Esto se hace por dos motivos principalmente tener un mayor control a la hora de simular y también la complejidad de simular el mecanismo de pesas.
- Otro de los cambios es sustituir el tren de engranajes por dos ruedas que se encarguen de transmitir el par desde el motor a la aguja, permitiendo controlar el par al transmitirlo a la rueda de escape.
- Las agujas son un elemento totalmente prescindible pero se ha optado por incluirlas simplemente por motivos estéticos.

Por último cabe destacar la precisión necesaria tanto en los brazos laterales no tanto en su geometría como en su posición debido a que los topes en los que entraran en contacto las paletas están unidos a estos, como en el choque que se produce en los pines interiores de reloj con las extensiones de los brazos que son los encargados de detener el movimiento mediante dicho choque. En este escape a precisión va mucho más orientada hacia la posición y orientación de los diferentes elementos que hacia su geometría.

Otro factor a tener en cuenta en este mecanismo son la forma de los extremos de las paletas, ya que estos deben detenerse completamente al entrar en contacto con los pines de los brazos por tanto se ha de procurar todo lo posible que las superficies al entrar en contacto sean todo lo colineales posible.

Tras tener en consideración todos estos aspectos se realiza la siguiente simulación y se incluye una gráfica que señala movimiento del péndulo para así poder observar la variación del periodo cuando ejecutemos el programa variando progresivamente el par aplicado por el actuador.

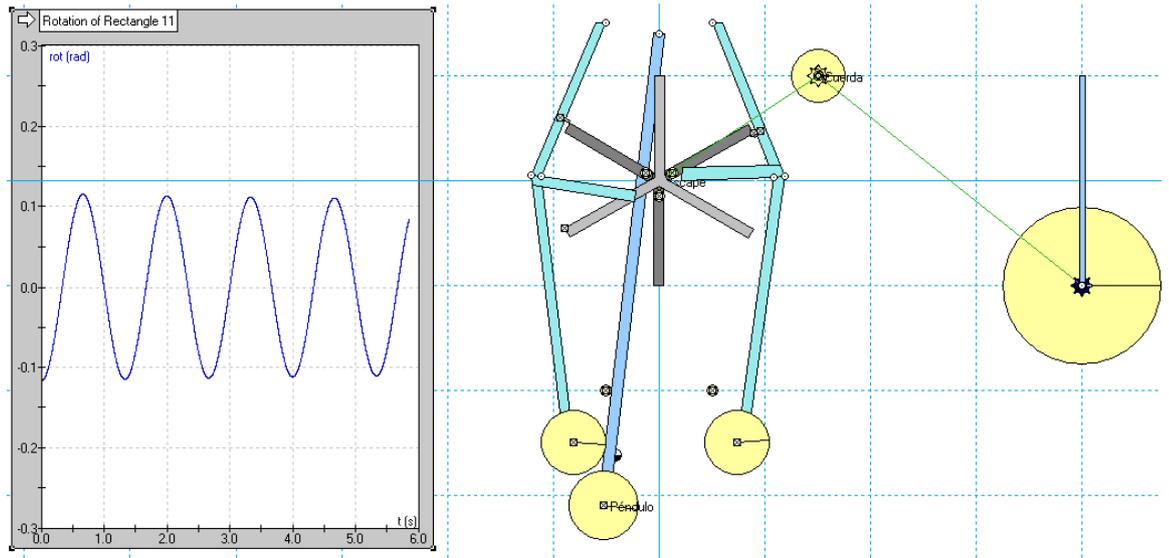


Figura 4.16. Simulación realizada para el escape de gravedad.

Para la realización de la simulación se ha tenido en cuenta que lo que se quiere analizar es como afecta la disminución de la energía aportada al periodo del mecanismo, por tanto se han realizado varias simulaciones y se va a comparar la media entre el par máximo y mínimo que permiten su funcionamiento con un par cercano al mínimo y así observar la variación claramente, en caso de que se produjera.

4.5.3 Análisis del mecanismo de gravedad

En nuestro caso contamos con un reloj de gravedad de tamaño pequeño con un péndulo de 452,5 mm y una masa de 100 g, con masas laterales despreciables a la que le aplicaremos pares de 0,3 Nmm para simular la falta de cuerda y de 0,8 Nmm para un funcionamiento ideal, este reloj está diseñado para que en condiciones de un par adecuado produzca un periodo cada 4/3 de segundo. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes imágenes.

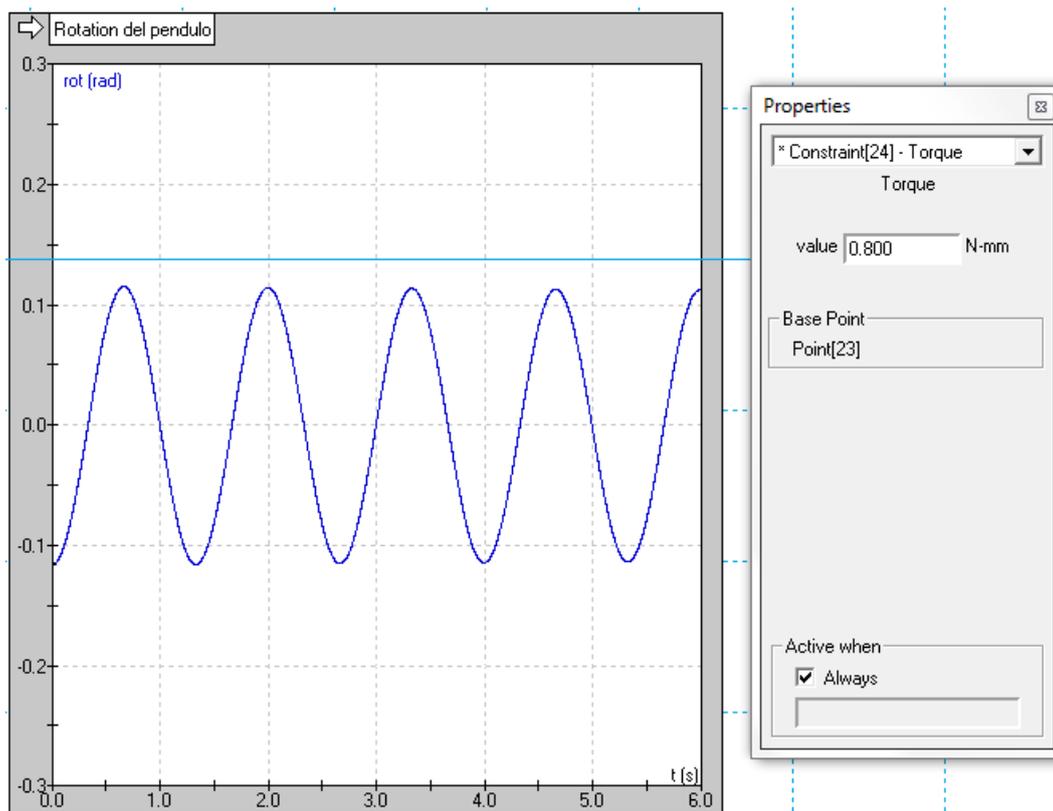


Figura 4.17. Periodo oscilación péndulo para 0,8 Nmm.

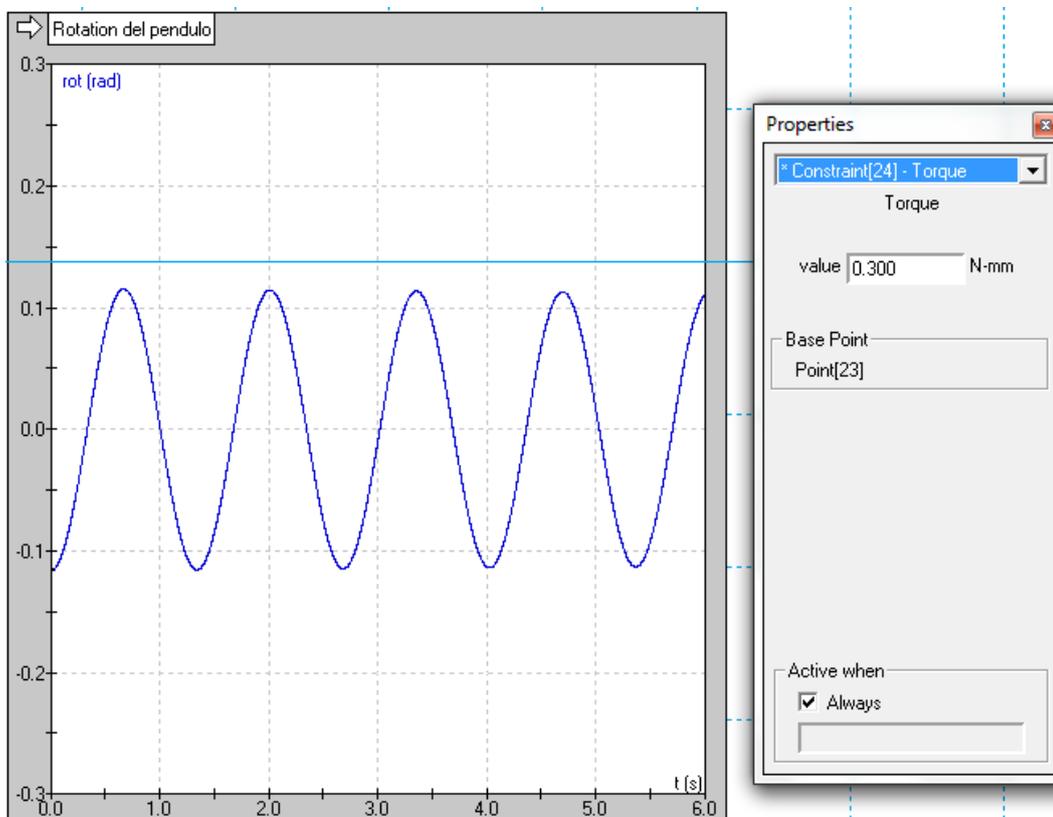


Figura 4.18. Periodo oscilación péndulo para 0,3 Nmm.

Como se puede observar a simple vista una vez alcanzado el estacionario en ambos casos el periodo se mantiene constante. Como era de esperar en el caso de un par suficiente el periodo se mantiene exactamente en 1,33 s, en cambio se observa que cuando el par va disminuyendo el periodo aumenta aunque de forma muy discreta.

Tras realizar unas mediciones se observó que el valor del periodo alcanza valores alrededor 1,356 s, por lo tanto cuando el reloj indique que ha pasado una hora en realidad habrá pasado 1 hora, 1 minuto y 3 segundos produciendo un adelanto en el mismo de un 1,7%.

Esta pequeña variación comparada con los otros relojes que incluyen péndulo es la esperada debido principalmente a que este reloj es el que se usa en torres cuando se quiere una precisión alta, que en un caso realista se puede disminuir este efecto aún más con una mayor lubricación y controlando en mayor medida la energía residual.

4.6 Conclusiones

Tras la realización de las simulaciones realizadas y analizar los resultados obtenidos se observa que en todos los mecanismos aparece el efecto esperado de inestabilidad del periodo en diferentes magnitudes. Siendo los que mayor desviaciones llegaban a sufrir tanto el escape de péndulo como el saltamontes y en menor medida el escape de ancla suiza y el de gravedad. Estas dos categorías eran las esperables debido principalmente al uso que se les dan a los dos últimos mecanismos en la realidad.

Por otro lado también se observa que los diferentes mecanismos pueden variar mucho tanto en sus masas como en las potencias requeridas para su funcionamiento pudiendo llegar a haber diferencias de varios órdenes de magnitud.

Otra propiedad a tener en cuenta es las diferentes formas que tienen las gráficas algunas acercándose en mayor medida a una función senoidal y otras presentando un comportamiento con unos cambios de velocidad mayores, todo esto se comporta a lo esperado principalmente por su gran diferencia estructural

Tras todo este análisis se concluye que todos los resultados son los esperados tanto con la teoría expuesta en el segundo capítulo de esta memoria como en otros

medios así como el comportamiento observado en la realidad y los diferentes usos que se les dan a los diferentes mecanismos.

5

Conclusiones y Líneas Futuras

5.1 Conclusiones

En este Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo un estudio de investigación que consiste en realizar el análisis teórico de los principios físicos que rigen el funcionamiento del mecanismo de escape de un reloj mecánico. Este mecanismo es el responsable de la temporización en sí, es decir, de asegurar que la energía mecánica almacenada en el reloj se libere de forma controlada a un ritmo constante. Posteriormente se ha simulado con el software *Working Model 2D* varios mecanismos de este tipo para verificar empíricamente el funcionamiento descrito y modelar su dependencia respecto de la energía residual acumulada en el reloj.

Para llevar a cabo esta tarea, en un principio se ha recopilado información sobre el estado del arte en el ámbito de la relojería tanto sus usos en la actualidad como su historia y desarrollo.

A continuación, se ha procedido a explicar de forma simplificada los fundamentos teóricos que rigen estos comportamientos para poder compararlos con la información que se halle durante este trabajo.

Posteriormente se ha llevado a cabo un análisis de la herramienta principal que se va a usar en este proyecto para la simulación, explicando de forma sencilla sus principales características y como aprovecharlas, para posteriormente indicar tanto sus principales ventajas como desventajas y justificar así el uso de ese software.

Por último se han realizado las obtenciones de datos sobre los diferentes mecanismos seguidas de sus simulaciones y un análisis de los resultados obtenidos obteniendo así por último una relación de cómo afecta la energía residual a la precisión de los diferentes mecanismos y se ha comprobado que se comporta como cabría esperar según la teoría relativa a este aspecto indica. Además se han realizado análisis individuales y comparativos de los diferentes mecanismos indicando características

particulares de cada uno y si estas tenían correlación con lo esperable. Cumpliendo así el objetivo de este trabajo y quedando así resuelto.

5.2 Líneas Futuras

El análisis realizado en este Trabajo Fin de Grado está centrado principalmente en la parte de simulación y como se correlaciona esta con la teoría, sin embargo se podría ampliar la parte teórica realizando un análisis más exhaustivo de cómo funcionan diferentes funciones de entrada a un mecanismo de que se desea obtener una respuesta periódica que está sometido a pérdidas por fricción, pudiendo llegar a calcular funciones de transferencia que indiquen exactamente el comportamiento esperado teóricamente y aplicar esta nueva información a los mecanismos analizados.

Por otra parte, en cuanto a la parte de simulación existen varias maneras de ampliar este trabajo. Una de ellas consistiría en buscar todos los mecanismos reales desmontarlos y hallar así unos parámetros físico más precisos que los usados, pudiendo obtener resultados más fidedignos a la realidad y mejores comparativas con la teoría. Otro apartado en el que se podría ampliar sería buscar un programa que permita unas simulaciones más potentes que permita trabajar en tres dimensiones y realizar una simulación más fidedigna de los componentes que almacenan la energía y realizar una simulación con un mayor recorrido temporal que analice a forma de disminución del par aplicado al escape y cómo se comporta este en grandes periodos de tiempo.

Finalmente, sería de gran interés analizar el efecto del desgaste en los componentes de los escapes ya que el rozamiento es el mecanismo de disipación principal del reloj y se ve muy afectado por el desgaste. Esto puede incluso acarrear la inclusión de diferentes mecanismos reales que se usan para evitar este efecto como por ejemplo un plato giratorio en los relojes de pulsera que se encargue de evitar un desgaste concentrado en un sentido y lo distribuye de forma más uniforme.

6

Bibliografía

- [1] J. E. Shigley, R. G. Budynas, y K. Nisbett, “Diseño en ingeniería mecánica”, *Editorial MCGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES DE C.V. Edición 6ª* ISBN 978–970-10-3646-4, Enero, 1997.
- [2] Design Simulation Technologies, “Working Model 2D User manual”. Visitada por última vez el 15 de julio de 2017. Disponible on-line en: <http://140.130.17.36/misc/wm2d-tutorial.pdf>
- [3] Web de Wikipedia Mechanical Watch, apartado Mechanism,. Visitada por última vez el 15 de julio de 2017, disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Mechanical_watch
- [4] Web de ACXESS SRING sección Constante de un Resorte de Torsión. Visitada por última vez el 15 de julio de 2017, disponible en: <https://www.acxesspring.com/espanol/constante-de-un-resorte-de-torsion.html>
- [5] Web de Ingemecanica artículo titulado Cálculo de Muelles Helicoidales apartado de Muelles helicoidales a torsión. Visitada por última vez el 15 de julio de 2017, disponible en: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn129.html>
- [6] Web de Wikipedia Escapement apartados Verge escapement, Anchor escapement, Deadbeat escapement, Grashopper escapement y Gravity escapement. Visitada por última vez el 15 de julio de 2017, disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Escapement>

- [7] Web oficial de Ranfft Watches, base de datos sobre nuestro modelo. Visitada por última vez el 15 de julio de 2017, disponible en: http://www.ranfft.de/cgi-bin/bidfundb.cgi?10&ranfft&&2uswk&ETA_2480
- [8] Web oficial de BALANCE STAFFS, donde incluye una lista con varios modelos incluyendo sus datos geométricos. Visitada por última vez el 15 de julio de 2017, disponible en: <http://www.balancestaffs.com/balancestaffs.php>
- [9] Web de Time Zone artículo The Anchor Escapement, incluye una explicación detallada del funcionamiento y componentes del escape de ancora. Visitada por última vez el 15 de julio de 2017, disponible en: <http://www.timezone.com/2002/09/16/the-anchor-escapement/>
- [10] A. V. Openheim, A. S. Willsky, S. Nawab., “Señales y Sistemas”. *Editorial Pearson Prentice-Hall. Edición 2ª*. 1998, traducción del original inglés *2ª Edición*. 1997.