

3 de junio de 2022

# **PROYECTO FINAL: RELOJ DE BOLSILLO**

**DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA**

**PROFESOR SERGIO ROMERO HERNÁNDEZ**

**Mauricio Verduzco Chavira 195106**

**Mariana Zapata Covarrubias 195111**

**Chan Mun Won Lee 195243**

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	3
DISTRIBUCIÓN DE TRABAJO EN EQUIPO .....	4
DISTRIBUCIÓN GENERAL.....	4
ESTRATEGIAS.....	4
RELOJ MODELADO.....	5
PIEZAS .....	6
ESTRATEGIA DE MODELADO.....	7
ESTRATEGIA GENERAL .....	7
ESTRATEGIA DE LOS ENGRANES.....	8
PIEZAS COMPLICADAS .....	11
09_Front Board .....	11
37_Escapement .....	12
39_Escapement Wheel.....	13
32_Ratchet .....	13
ESTRATEGIA DE ENSAMBLE Y ANIMACIÓN.....	14
ESTRATEGIA GENERAL .....	14
ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO .....	15
ANEXOS .....	20
VISTAS DEL RELOJ.....	20
RELOJ FINAL.....	21
REFERENCIAS.....	22

# INTRODUCCIÓN

El ingenio de la creación del reloj mecánico comienza desde la innovación occidental en el siglo XII. Su mecanismo ha influido desde su creación hasta el día de hoy, el cual, sin un reloj mecánico, no podríamos tener una clara referencia de los segundos que pasan en cada momento.

El mecanismo del reloj se compone de tres componentes mínimos: un motor, un rodaje y un órgano regulador, los cuales los dos últimos están unidos por un escape. El motor tiene como función principal en acumular toda la energía que se da por el movimiento del mecanismo. El motor transmite su energía a los trenes de rodaje o engranes; estos conforman los principios básicos de los engranajes para que nosotros podemos observar en la manecilla del reloj los segundos, minutos y horas en cada instante. El regulador tiene como función de dosificar la descarga que generan los trenes de rodaje, es decir, libera el movimiento de estos para que funcione como un escape.

Nosotros elegimos el reloj *Law Wooden Clock 9*, y nuestro objetivo principal es demostrar, a través de los principios básicos de los engranes, la animación hecha en computadora para observar si se cumplen las leyes de estos. Además de tener piezas complejas en cuanto al diseño de estas, observaremos el funcionamiento temporal del reloj con base a una pesa ya que esta se encargará en determinar por cuánto tiempo estará corriendo. El reloj está principalmente hecho de madera, y con ese material podremos analizar la deformación y esfuerzo de algunas piezas específicas.

# **DISTRIBUCIÓN DE TRABAJO EN EQUIPO**

## **DISTRIBUCIÓN GENERAL**

Nuestro trabajo se compone de cuatro ramas principales: el modelado, el ensamble, la animación y el análisis de elemento finito.

El modelado fue dividido entre todos ya que las tres etapas que seguían dependían de esta: Mauricio fue el encargado en hacer todos los engranes con el cálculo de los módulos con base al diámetro y número de dientes de cada uno de ellos; Mariana se encargó en hacer las piezas base para lograr hacer el ensamblaje con éxito; y, por último, Chan estuvo encargado en modelar las demás piezas con sus respectivos diseños.

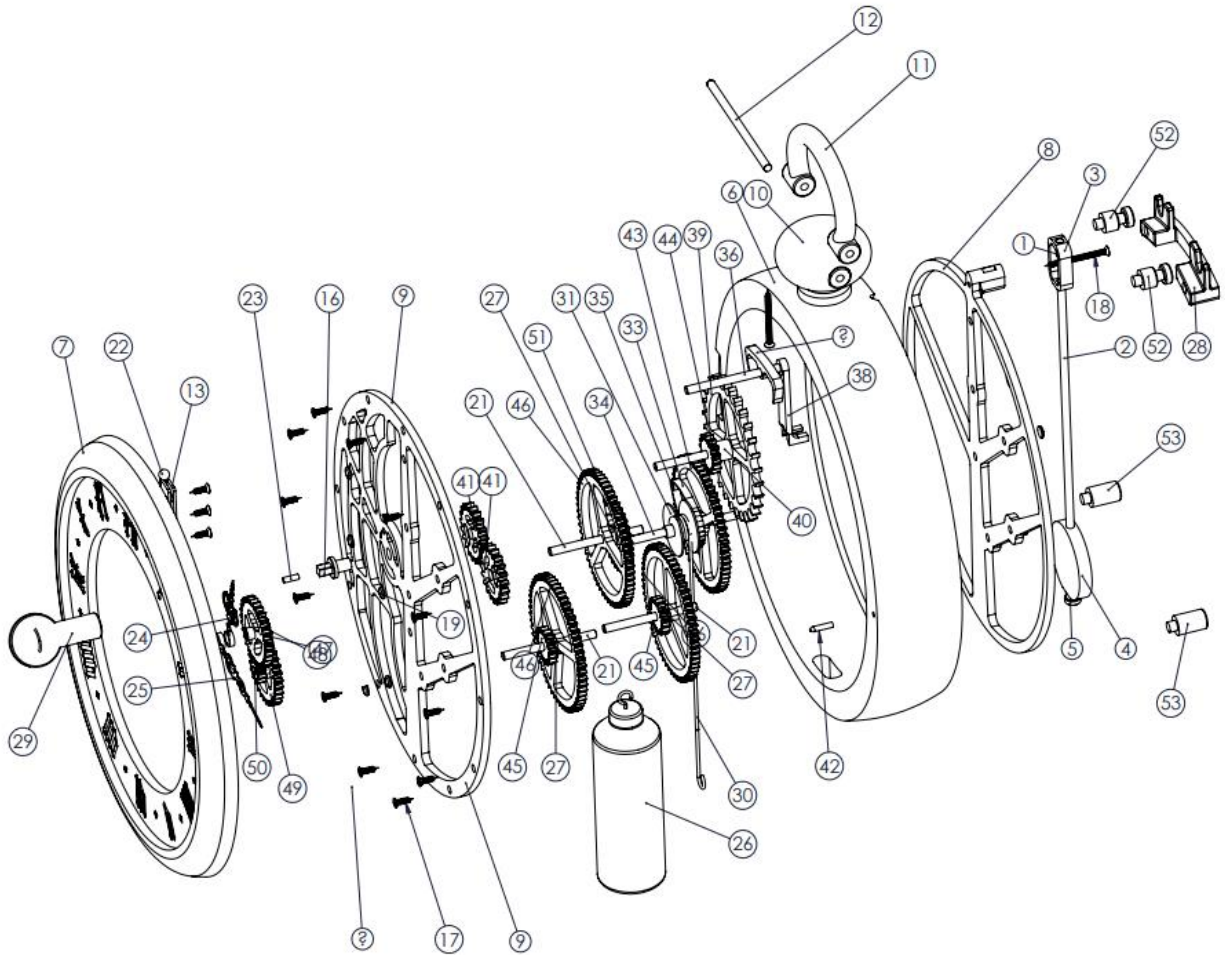
Los encargados del ensamble y animación fueron Mariana y Mauricio. Lograron insertar cada restricción adecuadamente para que en el siguiente paso, la animación, todo saliera bien.

El análisis de elemento finito fue realizado por Chan que investigó las propiedades del material que se iba a utilizar para este proyecto y además realizó tres análisis para complementar satisfactoriamente este trabajo.

## **ESTRATEGIAS**

La comunicación fue esencial para realizar este trabajo. Con cada idea que se proporcionaba en su desarrollo, nos complementábamos para llegar a nuestro objetivo en común. Los conocimientos básicos que teníamos de NX fueron más que suficientes para modelar y animar el reloj, aunque esto si presentó algunos retos. Nos encargábamos de reunirnos todos presencialmente para un buen funcionamiento del trabajo en equipo y la comunicación, por ello se sentía ameno el realizar este proyecto bastante complejo. Para realizar la animación era importante contar con la presencia de todos ya que las restricciones dentro del ensamble eran esenciales al comenzar este y, con la perspectiva de tres personas, era más fácil realizarlo. Sin embargo, hubo un reto en específico dentro de la animación: la función de GCToolkits no era compatible con el software en general. Más adelante explicaremos cómo se realizó la animación de estos y como resolvimos cada problema.

# RELOJ MODELADO



## PIEZAS

#	Pieza	Cant.
01	Pendulum Pivot	1
02	Pendulum Rod	1
03	Pendulum Head	1
04	Pendulum Bob	1
05	Pendulum Nut	1
06	Case	1
07	Door	1
08	Base Board	1
09	Front Board	1
10	Ball	1
11	Bow	1
12	Bow Pivot	1
13	Hinge Section	2
14	Hour Tube	1
15	Hour Pivot	1
16	Winder Pivot	1
19	Small shaft cap	9
20	Small shaft cap-Flatted	1
21	Shaft-74	4
22	Hinge Pivot	1
23	Pawl Pin	1
24	Hour Hand	1
25	Minute Hand	1

26	Weight	1
27	Gear Spacer	3
28	Hanger	1
29	WINDER	1
31	Drum	1
32	Ratchet	1
33	Pawl	1
34	Shaft-100	1
35	Ratchet Pivot	1
36	Shaft-80	1
37	Escapement	1
38	Yoke	1
39	Escapement Wheel	1
40	Gear Spacer	1
41	MOD 2-2 20 Teeth	2
42	Door Catch	1
43	60	1
44	16	1
45	15	2
46	60	3
47	30	1
48	8	1
49	32	1
50	10	1
51	30	1
52	Hanger Spacer	2
53	Hanger Spacer-Bottom	2

## **ESTRATEGIA DE MODELADO**

### **ESTRATEGIA GENERAL**

El modelo final del reloj consta de 53 piezas. De ellas solo modelamos 50 ya que dos de ellas eran tornillos genéricos y la tercera era una cuerda que para efectos de este proyecto no era útil. Las otras 50 piezas se partieron en dos apartados: engranes y estructura (de los engranes se hablará en el siguiente apartado). En general, las piezas no fueron muy complicadas, pero la precisión fue clave ya que sin ella no funcionaría la animación final del reloj. Entraremos a detalle de las piezas principales en el apartado de “Piezas complicadas” en donde se desarrolla la estructura principal que sostiene los engranes.

Para solucionar el modelado de la mayoría de las piezas se utilizaron sketches, extrudes, revolves y tubos. Principalmente se hicieron sketches bidimensionales con uno o más extrudes, pero en algunas ocasiones fue necesario trabajar en más de un plano. En cuanto a estética, nos apoyamos de edge blends y chamfers, así como pequeños extrudes para relieves. Para los engranes utilizamos la herramienta GC Toolkits, aunque algunos tuvieron que modelarse a mano en sketches debido a su estructura inusual.

## **ESTRATEGIA DE LOS ENGRANES**

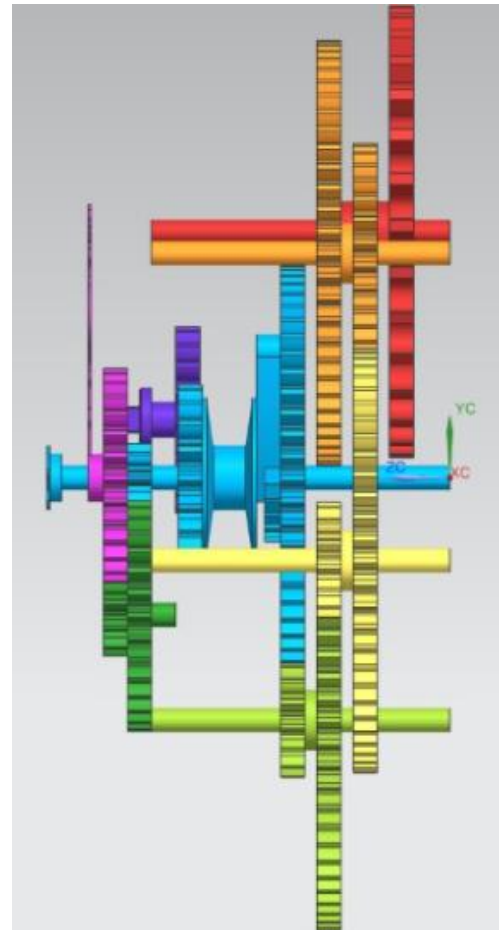
Para el presente proyecto se diseñaron doce engranes, de ellos diez son los que permiten el funcionamiento del reloj. Los nombres, diámetros y números de dientes y los módulos están descritos como en la siguiente tabla:

Nombre	Diámetro	Dientes	Módulo
43_Gear	102	60	1.7
45_Gear	25.5	15	1.7
46_Gear	102	60	1.7
51_Gear	51	30	1.7
44_Gear	27.2	16	1.7
41_Gear	42	20	2.1
48_Gear	13.6	8	1.7
49_Gear	54.4	32	1.7
50_Gear	17	10	1.7
47_Gear	51	30	1.7

El diseño de los engranes se hizo con la herramienta “GC Toolkits” cada uno como una pieza particular sin la extensión de “engage”.

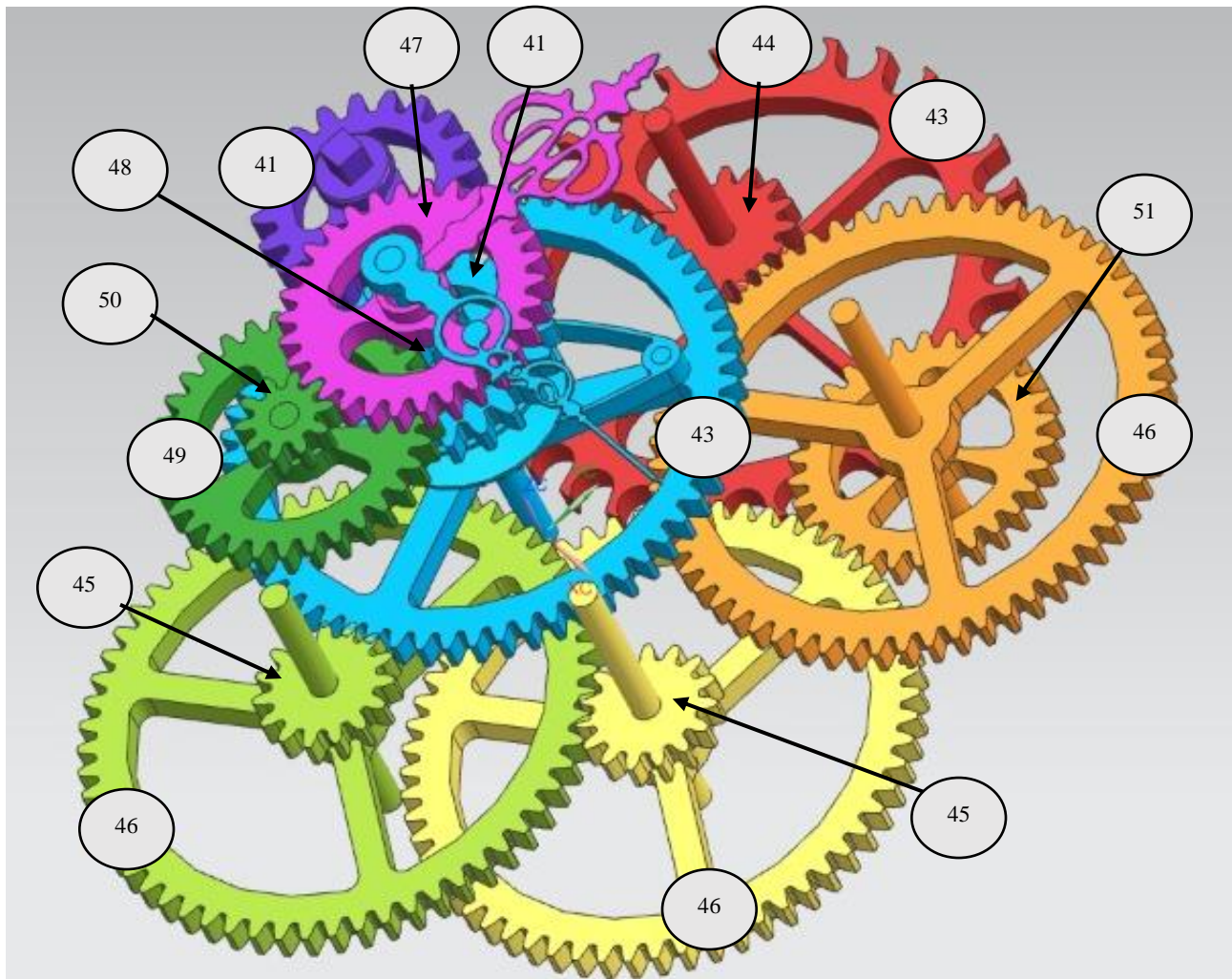
Los engranes se utilizarán para formar trenes entre sí y modificar las velocidades de giro según los parámetros de un reloj convencional.

En la imagen de la izquierda se puede apreciar el resultado final del ensamble de engranes que se explicará más adelante.





El acomodo de los engranes es de la siguiente manera:



Los engranes se ensamblan entre sí para generar distintos factores de conversión. En la siguiente tabla se detalla cada ensamble describiendo cual es el principal (Driving) y cuál es el secundario (Driven) y de tal forma, que factor de conversión de velocidad es el que se experimenta (Radio).

# engage	Driving	Diámetro	Driven	Diámetro	Pivote Principal	Pivote Secundario	Radio
1	43_Gear	102	45_Gear	25.5	azul	verde claro	4.00
2	46_Gear	102	45_Gear	25.5	verde claro	amarillo	4.00
3	46_Gear	102	51_Gear	51	amarillo	naranja	2.00
4	46_Gear	102	44_Gear	27.2	naranja	rojo	3.75
5	41_Gear	42	41_Gear	42	morado	azul	1.00
6	48_Gear	13.6	49_Gear	54.4	azul	verde oscuro	0.25
7	50_Gear	17	47_Gear	51	verde oscuro	rosa	0.33

Tabla 1

Los ensambles anteriores se combinan entre sí para generar “trenes” que son la parte medular del comportamiento de reloj. Los trenes funcionan como describe la siguiente tabla. En ella observamos cómo cada tren se compone de distintos ensambles y por lo tanto de distinto factor resultante Z (el cual obtenemos a partir del producto de radios).

# tren	Ensambls	Factor Z
1	1, 2, 3 & 4	120.00
2	5	1.00
3	6 & 7	0.08

Tabla 2

En suma:

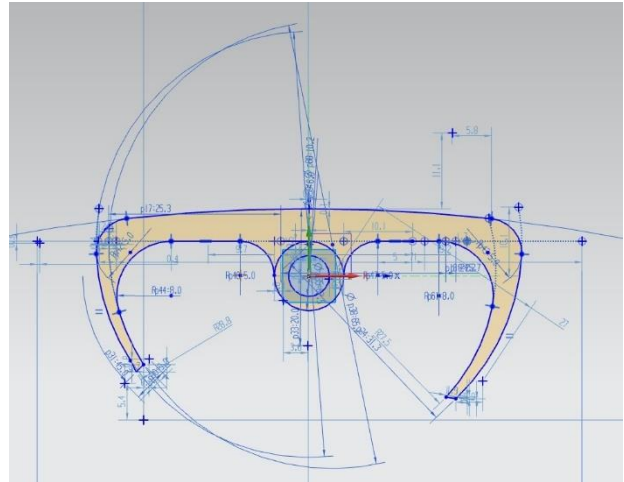
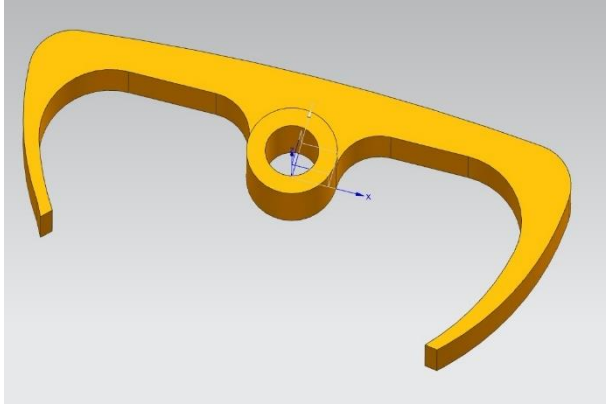
El pivote azul es el principal, el cual obtiene cuerda a partir del pivote (tren #2) morado. La conexión de estos dos es de uno a uno y se genera a partir de girar una llave para “darle cuerda”. El objetivo de esta primera conexión es enrollar una cuerda que sostiene a una pesa que bajará controladamente para así generar el giro.

El tren 1 pasa el giro del pivote azul en un factor de 120 al pivote rojo, el cual se conecta con uno de los engranes únicos con el péndulo. El objetivo de este tren es crear el fenómeno aproximado del “tiempo” que controlará la precisión del reloj. Es decir, el pivote rojo deberá dar 120 vueltas para que el pivote azul avance una. El pivote rojo avanza dos unidades por segundo, es decir, en sesenta segundos debería haber avanzado su giro completo, provocando un factor de 1/60 en nuestro pivote azul. El pivote azul representa este giro a través de la manecilla larga o minuterero. Es decir, con ayuda de este tren controlamos los minutos.

Finalmente, el tren 3 involucra tres pivotes. El primero el azul, que pasa por el pivote auxiliar de reducción verde oscuro y termina en el pivote rosado (el cual tiene conectada la manecilla de las horas). El factor de conversión del tren es de 1/12, lo que significa que el pivote azul deberá dar doce vueltas para que el pivote rosado de una, y así nos encontramos con la conversión/relación entre la manecilla de las horas y la de los minutos.



### 37\_Escapement



Esta pieza forma parte del funcionamiento del péndulo. El péndulo oscila en la parte de atrás del reloj, moviendo a su vez esta pieza que al final se mueve junto con la Pieza 39 (Escapement Wheel).

Como se puede observar, la pieza no es un espejo de un lado con otro, sino que cada “gancho” tiene medidas diferentes. Al empezar a modelarla nos dimos cuenta de que las medidas del plano eran difíciles de interpretar, por lo que terminamos realizando medidas y constraints de más en la pieza final. La pieza se conformó principalmente de círculos y rectángulos que al final se fueron recortando para dar forma al cuerpo. Además, tuvimos que añadirle algunos edge blends en algunas zonas que no venían indicadas en el plano original.

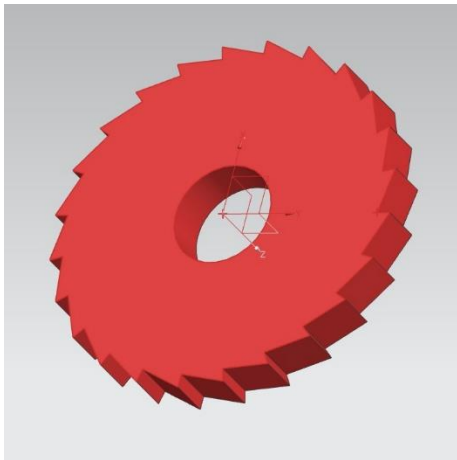
### 39\_Escapement Wheel



Este engrane limita la velocidad de giro del mecanismo completo del reloj, permitiendo avanzar según el movimiento pendular a través de la Pieza 38 (Escapement).

Esta pieza es un engrane, pero debido a su compleja geometría se realizó manualmente en lugar de con GC Toolkits. Para modelarla nos apoyamos de varios círculos para las geometrías principales. En cuanto a los dientes, nos enfocamos en solo modelar uno y hacerle un pattern feature que después necesito de trims para dar forma a la pieza final.

### 32\_Ratchet



La pieza Ratchet se utiliza para pausar la continuidad del giro del pivote principal. Esto nos ayuda a acercarnos a una mayor precisión del tiempo y a evitar que la pesa caiga de golpe.

Al igual que la pieza anterior, al tratarse de una geometría diferente se modeló a mano en lugar de con GC Toolkits. Para realizar los dientes se tomó en cuenta los ángulos entre dos de ellos y el resto se completó con un pattern feature.

# ESTRATEGIA DE ENSAMBLE Y ANIMACIÓN

## ESTRATEGIA GENERAL

El ensamble se realizó sobre la pieza número 8 (8\_baseBoard) que tenía agujeros en las posiciones dónde entrarían los pivotes. Los pivotes fueron colocados con restricciones concéntricas. Los engranes fueron ubicados infiriendo el eje central de cada engrane y del pivote respectivo, se hicieron restricciones de distancia y también participaron piezas separadoras.

Al momento de animarlo, declaramos la base como un grupo rígido fijo. Después, cada pivote con todos sus engranes como grupos rígidos separados. Creamos articulaciones giratorias de cada pivote con respecto a la base. Luego creamos relaciones tipo “engrane” con cada articulación indicando los factores de giro especificados en la Tabla 1 y 2. Finalmente, insertamos un motor de posición único con la articulación del pivote principal (el pivote azul), el cual coordina todo el comportamiento del reloj.

El resto de las piezas se colocaron en torno a la base, la mayoría no tienen movimiento ni articulaciones (excepto la puerta, la pesa y el péndulo). La mayoría de las piezas formaron parte del cuerpo rígido al que pertenecía la base. La puerta tuvo una articulación de giro con respecto al cuerpo ubicada en el eje de la bisagra. El péndulo tuvo el mismo tipo de articulación respecto a la base. La pesa, en cambio tiene una articulación cilíndrica que le permite bajar respecto a un eje “cuasi-central”.



## ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO

En esta sección analizamos el desplazamiento y esfuerzo de Von-Mises para tres casos: el primero es de la Pieza 28, que es un sostén atornillado en la pared para que el reloj quede fijo; el segundo es un sub-ensamble de las Piezas 10, 11 y 12, tratándose de la manija para sostener el reloj; y, por último, la Pieza 30 que es la cuerda que carga una pesa y está sostenida con la pieza 31.

El material principal del reloj es de madera de roble. Entonces al realizar los análisis teníamos que crear un nuevo material que tuviera las propiedades de la madera. Estas son las siguientes:

Material	Densidad de masa ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )	Límite elástico (MPa)	Módulo de Young (MPa)
Madera de roble	0.9	56.5	9300

Para hacer el análisis de la Pieza 30, también tuvimos que crear un nuevo material. En este caso, supusimos que está hecho de algodón. Las propiedades de este varían, pero logramos encontrar las propiedades específicas de una cuerda de algodón, las cuales son las siguientes:

Material	Densidad de masa ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )	Límite elástico (MPa)	Módulo de Young (MPa)
Algodón	1,540	225	7900

### Pieza 28: *Hanger*

Como mencionamos al principio, esta pieza será el soporte del reloj y estará atornillada en la pared. Aplicamos una fuerza de 25.5N en el área (área 1) porque es la fuerza total del reloj. Para determinar el peso del reloj hicimos una serie de conversiones para llegar a lo deseado: primero, sacamos el volumen del reloj suponiendo que es tres veces menor al volumen teórico porque existen muchos vacíos dentro de este; después lo multiplicamos con la densidad de masa para calcular los kilogramos; y, por último, determinamos los Newtons para obtener el valor deseado de la fuerza.

$$\left( \left( \frac{\pi r^2 h [\text{m}^3]}{3} \right) \left( \rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) + (\text{pesa}) \right) * 9.81$$

$r = \text{radio del reloj}$

$h = \text{altura del reloj}$

$\rho = \text{densidad de masa}$

$$\left( \left( \frac{\pi \left( \frac{0.35}{2} \right)^2 (0.115) [\text{m}^3]}{3} \right) \left( 900 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \right) + (1.6) \right) * 9.81 = 2.6 \text{ kg} * 9.81 = 25.5 \text{ N}$$

En los orificios de los tornillos colocamos las restricciones. Estos quedaron fijos en todos los grados de libertad. En las siguientes imágenes podemos observar las soluciones:

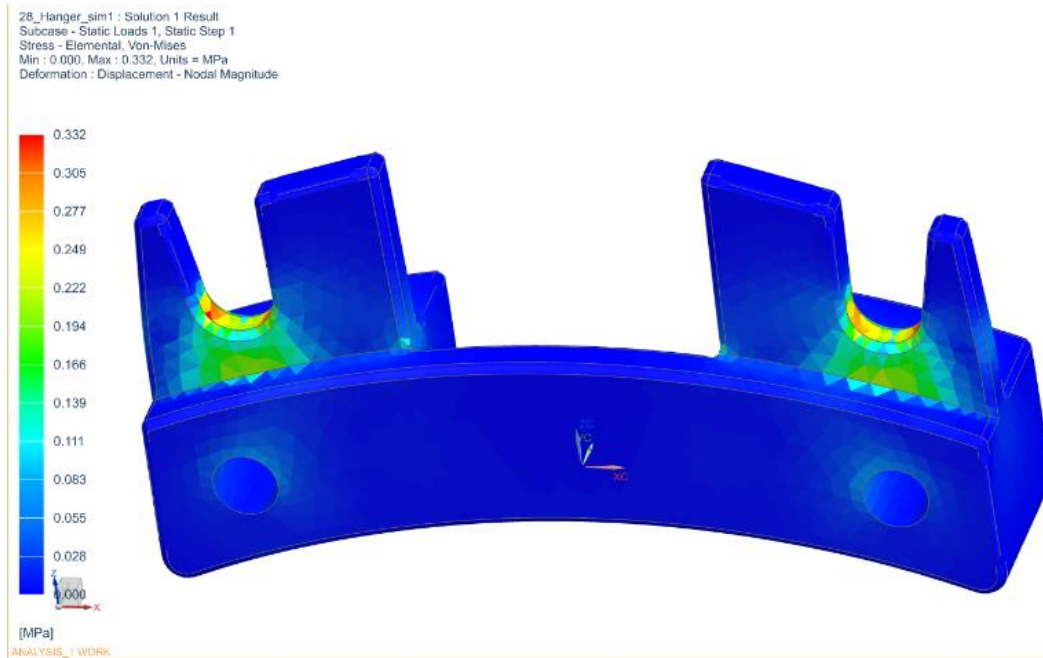


Figura 1

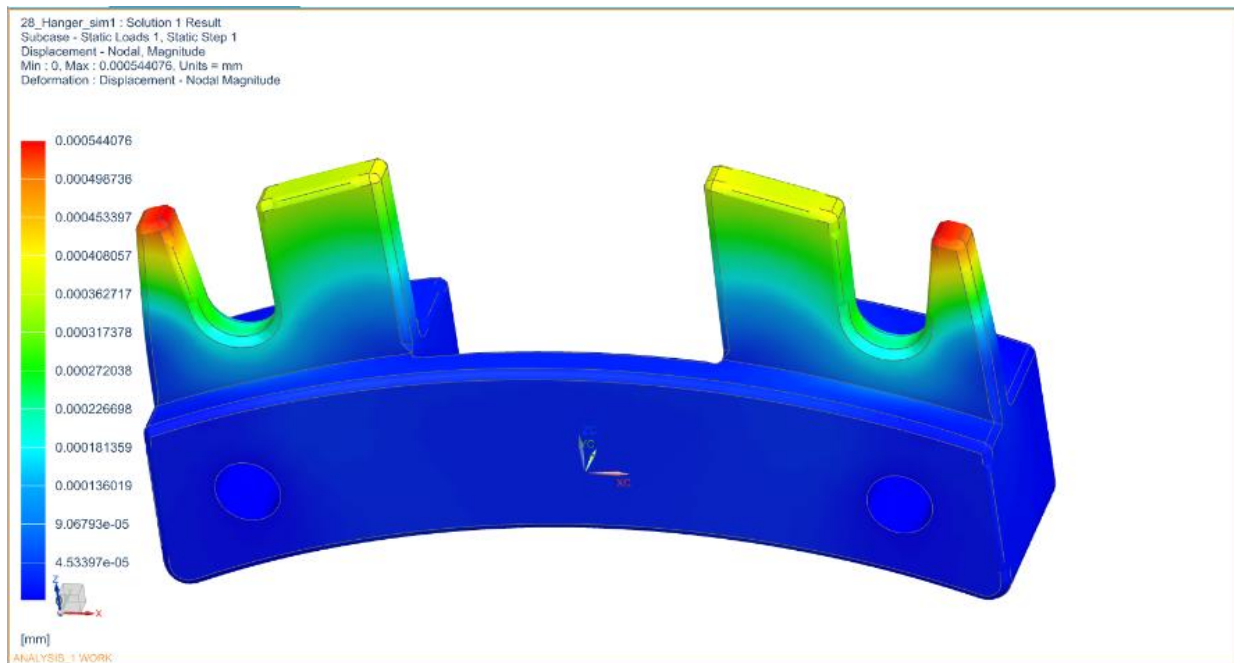


Figura 2



En la Figura 1 podemos observar el esfuerzo Von-Mises, que está distribuido por toda el área seleccionada con un valor máximo de 0.332MPa. En la Figura 2 podemos observar que el desplazamiento es mínimo ya que nos señala un valor máximo de 0.000544mm y sus desplazamientos están concentrados en los extremos del soporte principal.

Piezas 10, 11 y 12: *Bow*

El análisis de este sub-ensamble consistió en la suposición de cargar el reloj con las piezas del *Bow*. Los resultados de este fueron los siguientes:

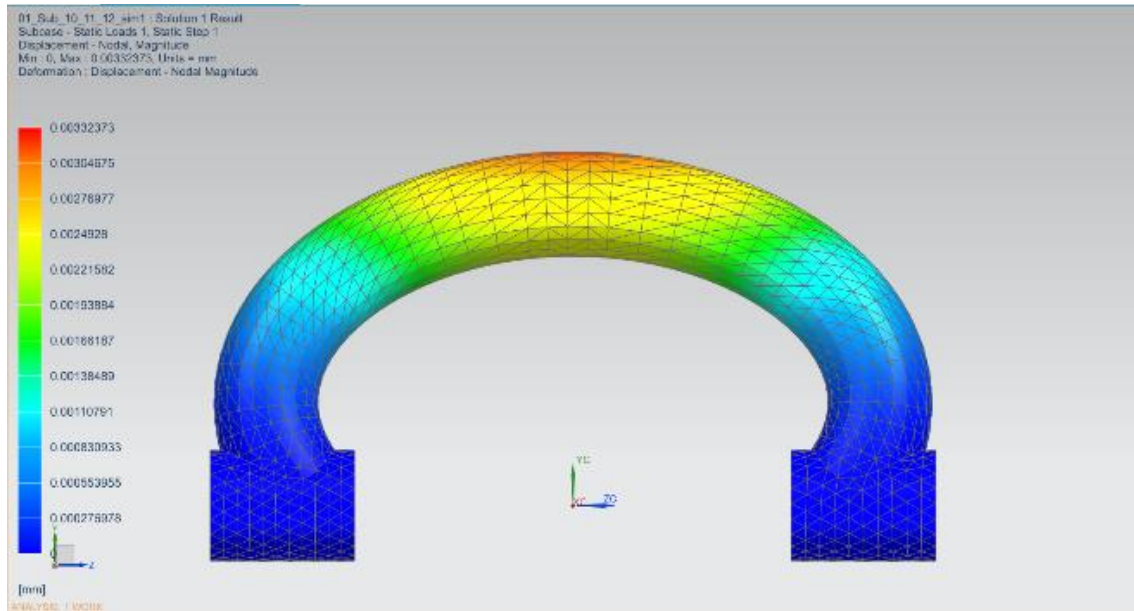


Figura 3

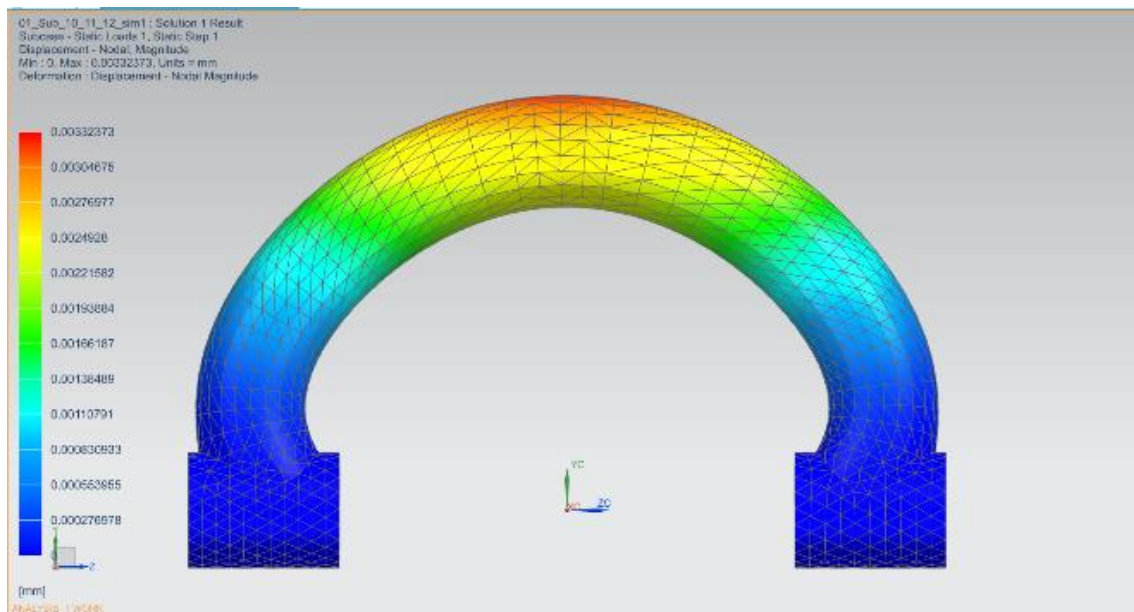


Figura 4

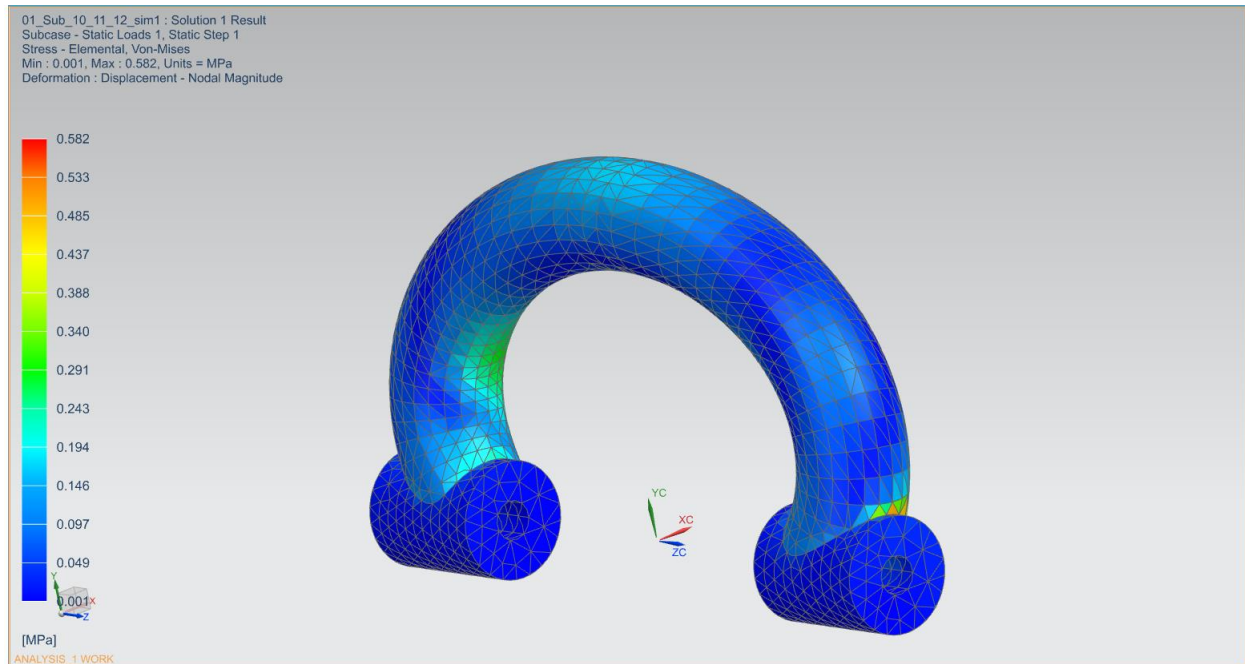


Figura 5

En la Figura 3 podemos observar que el desplazamiento de la pieza se concentra en la parte superior de la pieza con un valor máximo de 0.3323mm. Entonces, si exageramos su deformidad, podemos imaginarlo como en la Figura 4. El valor máximo del esfuerzo Von-Mises nos señala a uno de 0.582MPa. Sin embargo, como el reloj no es tan pesado, sus esfuerzos son mínimos ya que el material es rígido (Figura 5).

### Pieza 30: *Rope*

La cuerda tiene una medida total de 40cm. Para hacer este análisis, tomamos una sección de la cuerda para observar la deformación más de cerca. Los resultados fueron los siguientes:

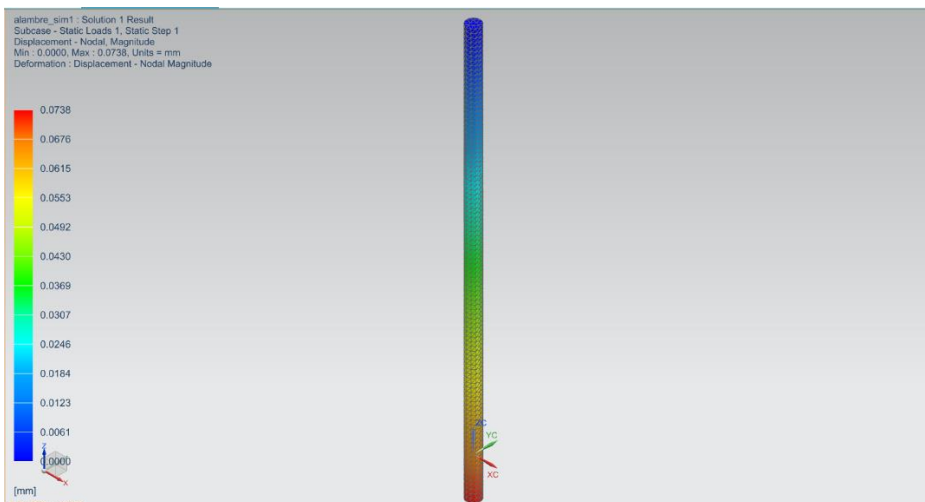


Figura 6

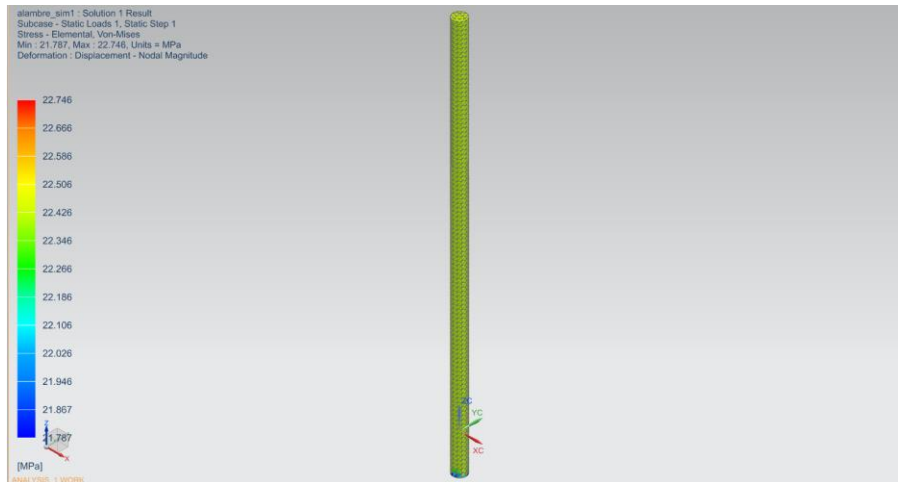
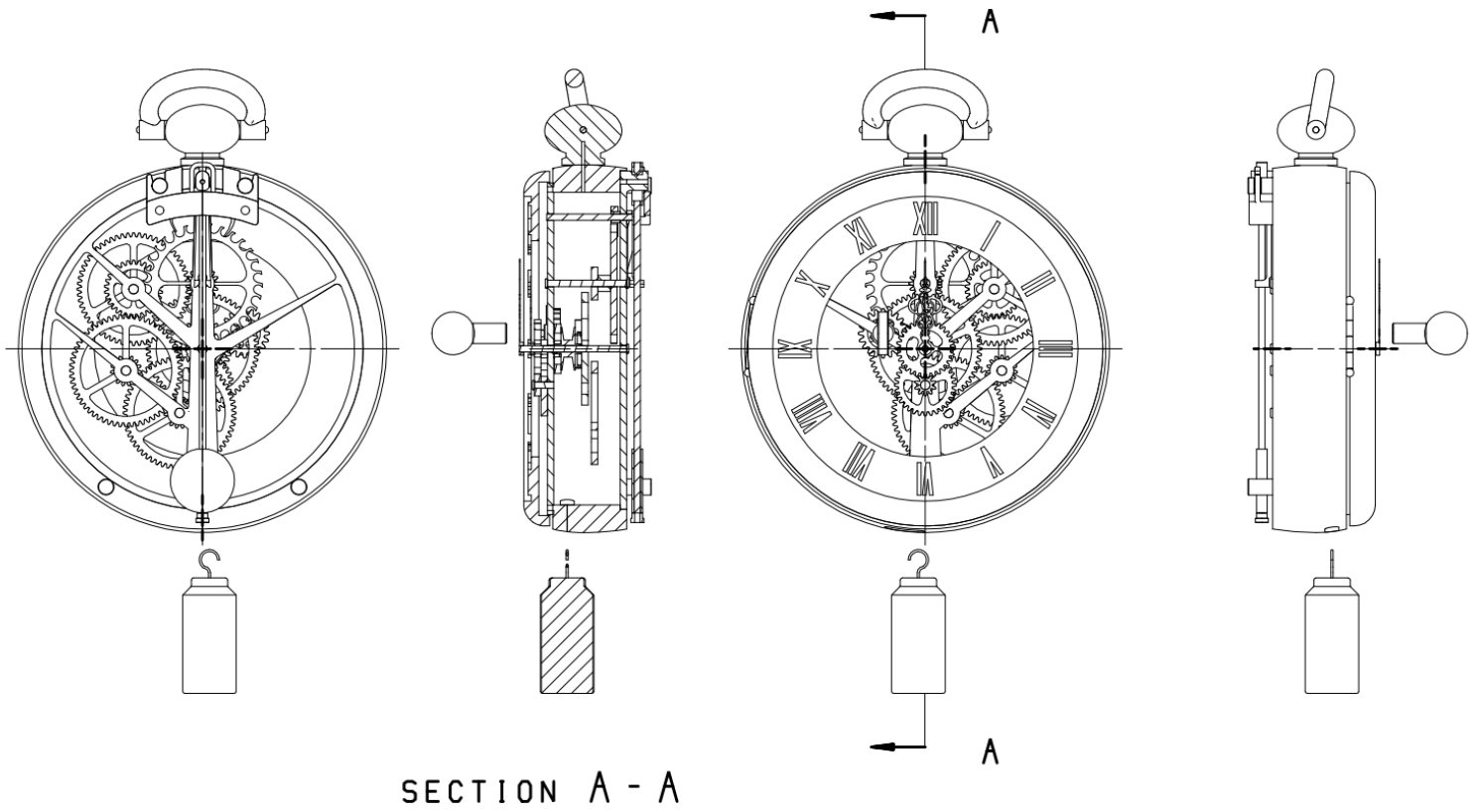


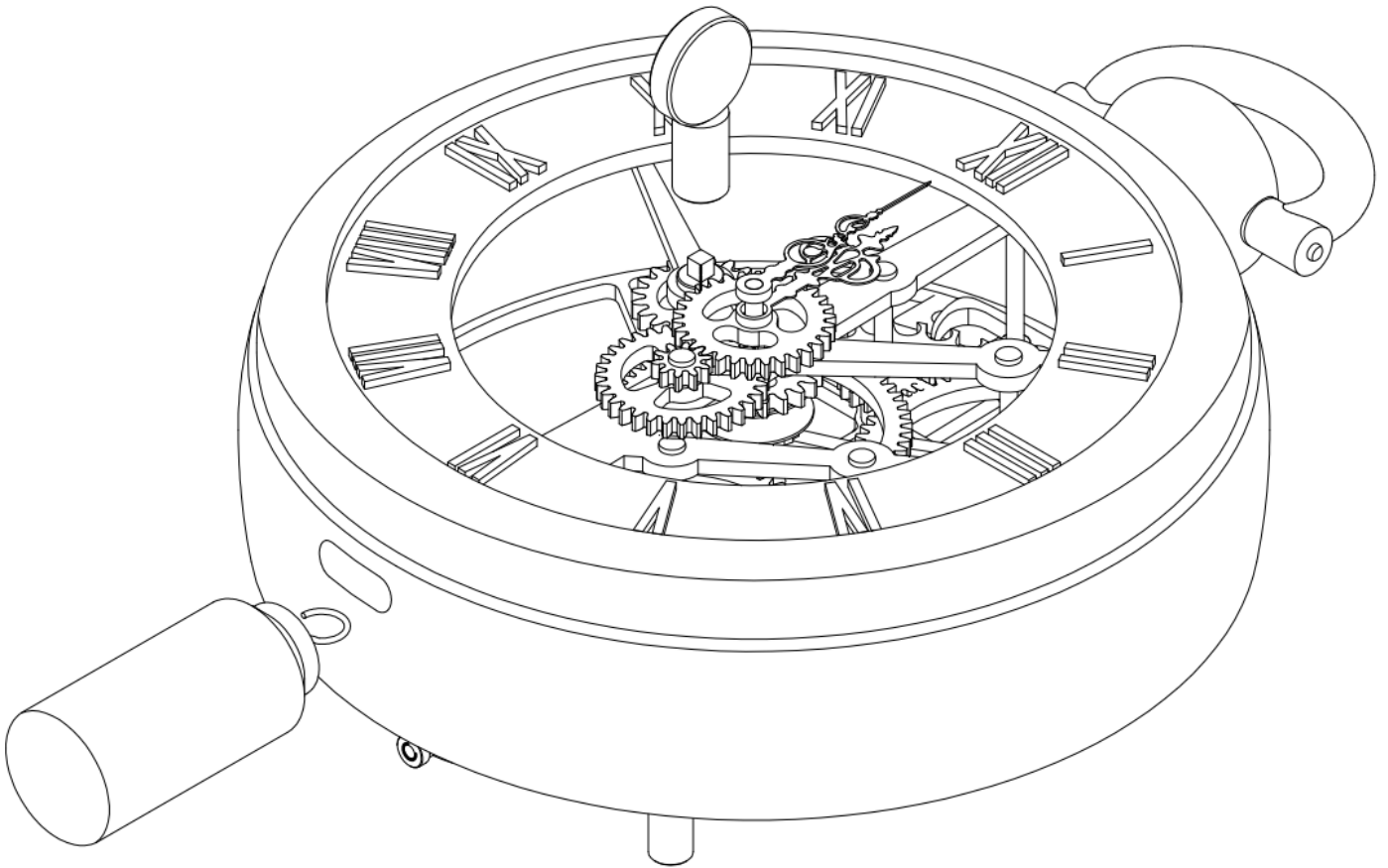
Figura 7

En la Figura 6 podemos observar que la máxima deformación de la cuerda se da principalmente en la parte inferior de ella; esto sucede porque en aquella posición colocamos la pesa de 1.6 kg. El esfuerzo Von-Mises está distribuida uniformemente por toda la cuerda con un valor de 22.346 MPa ya que el material de la cuerda está hecho de algodón y la pesa no es lo suficientemente pesada para que exista un esfuerzo máximo.

**ANEXOS**  
**VISTAS DEL RELOJ**



## **RELOJ FINAL**



## REFERENCIAS

Baumeister, T. (2007) Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. McGraw-Hill, Estados Unidos.

Wooden Clocks (2014) How long will my clock run? Recuperado de:  
<https://brianlawswoodenclocks.blogspot.com/2014/11/how-long-will-my-clock-run.html>

Inglaterra. Recuperado de: <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/mpsite/short/OCR/ropes/ropes.pdf>