

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND ROBOTICS

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



RESUMEN PROYECTO FINAL DE CARRERA

**Specification, design and kinematic analysis of
an Electric Toothbrush using
*CATIA® V5R19***

Autora: Lorena Zurdo Martín
Tutor AGH: Dr. Eng. Zbigniew Sliwa
Tutora UC3M: Ana Muñoz Sánchez

Leganés a 1 de Septiembre de 2011

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	4
2. EXPLICACIÓN DEL MECANISMO BÁSICO	5
2.1. INTRODUCCIÓN.....	5
2.2. CINEMÁTICA DEL MECANISMO BIELA-MANIVELA-DESLIZADERA	7
3. SOFTWARE UTILIZADO	9
4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO	10
4.1. INTRODUCCIÓN.....	10
4.2. MATERIALES USADOS	13
5. FUNCIONAMIENTO DEL MODELO	14
6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO	17
6.1. INTRODUCCIÓN.....	17
6.2. OPTIMIZACIÓN DEL ÁNGULO DE ROTACIÓN DE UPPER BRUSH	18
6.3. RELACIÓN DE MOVIMIENTO ENTE ENGRANAJES	21
6.4. OTROS ANÁLISIS.....	23
6.5. VOLUMEN BARRIDO POR EL MODELO	25
6.6. COLISIONES.....	26
7. CONCLUSIONES	27
8. TRABAJOS FUTUROS.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Elementos mecanismo <i>Biela-Manivela-Deslizadera</i>	5
Figura 2.2. Movimiento de avance del mecanismo <i>Biela-Manivela-Deslizadera.1</i>	5
Figura 2.3. Movimiento de retroceso del mecanismo <i>Biela-Manivela-Deslizadera</i>	6
Figura 2.4. Movimiento de avance del mecanismo <i>Biela-Manivela-Deslizadera.2</i>	6
Figura 2.5. Mecanismo a analizar	7
Figura 3.1. CATIA V5 R19	9
Figura 4.1. Cepillo de Dientes Eléctico	10
Figura 5.1. Transmisión del movimiento del Motor a Plastic Gear	14
Figura 5.2. Los engranajes cónicos cambian en tipo de movimiento	15
Figura 5.3. Deslizadera	15
Figura 5.4. Transmisión de movimiento entre los cepillos	16
Figura 5.5. Partes del Cepillo de Dientes Eléctico	16
Figura 6.1. e Definición	18
Figura 6.2. L Definición	18
Figura 6.3. S Definición	18
Figura 6.4. Volumen barrido por el Mecanismo	25
Figura 6.5. Volumen barrido por el Mecanismo 2	25
Figura 6.6. Tipos de Colisiones	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Componentes del Cepillo de Dientes Eléctico	12
Tabla 4.2. Propiedades de los materiales usados	13
Tabla 6.1. Resumen de optimizaciones	20
Tabla 6.2. Comparación entre los diferentes métodos de transmisión de movimiento	21

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 6.1. Ángulo girado por Upper Brush	20
Gráfico 6.2. Ángulos girados por los engranajes	22
Gráfico 6.3. Relación entre los ángulos girados por los engranajes	22
Gráfico 6.4. Desplazamiento de Lower Brush	23
Gráfico 6.5. Velocidad y Aceleración de Lower Brush	24
Gráfico 6.6. Velocidad y Aceleración Lineal de Lower Brush 2.	24
Gráfico 6.7. Contactos relevantes entre los elementos del <i>Cepillo de Dientes Eléctico</i>	26

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

A lo largo de este documento se va a explicar el desarrollo de un cepillo dental eléctrico. En primer lugar, se presentarán en los *Capítulos 2 y 3* unas introducciones teóricas acerca del sistema diseñado y su evolución histórica. Además, en el *Capítulo 4* se explicarán los conceptos básicos de los módulos de *CATIA®* utilizados para la concepción del proyecto.

Seguidamente, las siguientes páginas (*Capítulos 5 y 6*) están dedicadas a describir el modelo, cada uno de sus componentes y sus características. También se narran las características cinemáticas requeridas para que el modelo funcione correctamente.

Cuando el diseño del *Cepillo de Dientes Eléctrico* está terminado, comienza la etapa de optimización y análisis. Durante este paso hay que realizar diversos estudios. Por un lado, el objetivo principal es la optimización del ángulo de giro del cepillo superior (*Upper Brush*) porque para un buen cepillado este debe rotar lo máximo posible.

Por otro lado, el modelo ha de ser sometido a otros estudios: test de colisiones, cálculo del volumen barrido por sus piezas móviles. Además es necesario estudiar el comportamiento de los engranajes a lo largo de la transmisión del movimiento y comprobar la relación entre las partes cinemáticas y el movimiento de los mismos.

En conclusión, los objetivos generales de este proyecto son conocer el modo de funcionamiento de diversos módulos de *CATIA® V5 R19* y desarrollar el sistema mecánico de un *Cepillo de Dientes Eléctrico* para que tenga un comportamiento cinemático correcto.

2. EXPLICACIÓN DEL MECANISMO BÁSICO

2.1. INTRODUCCIÓN

El diseño del mecanismo del cepillo de dientes eléctrico, objetivo principal de este proyecto, está basado en un mecanismo *Biela-Manivela-Deslizadera*. Este es un sistema que transforma el movimiento circular en desplazamiento lineal alternativo. Este mecanismo está compuesto por un elemento rotativo llamado *Manivela*, que se conecta con una *Deslizadera* mediante la *Biela*.

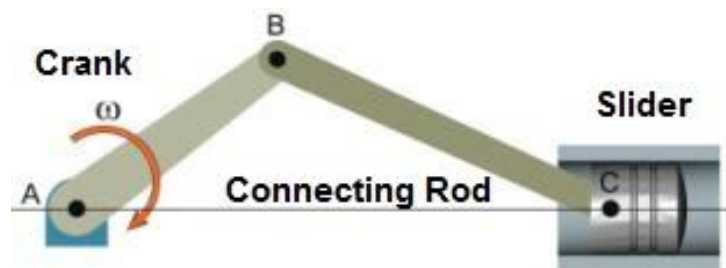


Figura 2.1. Elementos mecanismo *Biela-Manivela-Deslizadera*
(Universidad Nacional de Colombia, 2011)

Cuando se mueve el elemento giratorio, el movimiento se transmite a la *Biela* mediante una junta de rotación. Esta pieza obliga a la *Deslizadera* a moverse mediante otra junta de rotación, generando un movimiento de vaivén.

Es un sistema reversible, la *Manivela* puede mover a la *Biela* y viceversa. Si la *Biela* produce en movimiento de entrada, la *Manivela* es forzada a rotar. El movimiento del mecanismo *Biela-Manivela-Deslizadera* queda representado en la siguiente secuencia de figuras. (Xie, 2004-2011)

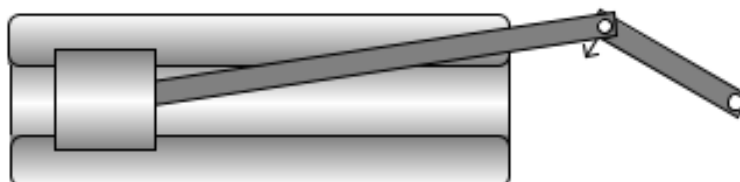


Figura 2.2. Movimiento de avance del mecanismo *Biela-Manivela-Deslizadera.1*

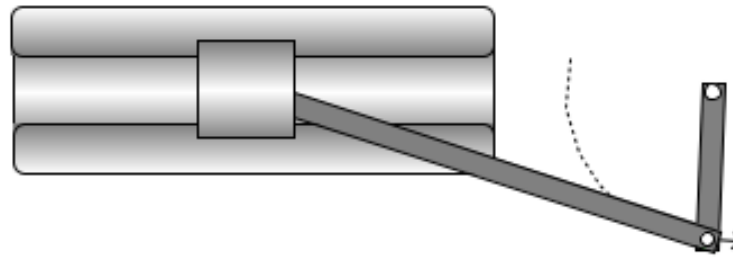


Figura 2.3. Movimiento de retroceso del mecanismo *Biela-Manivela-Deslizadera*.

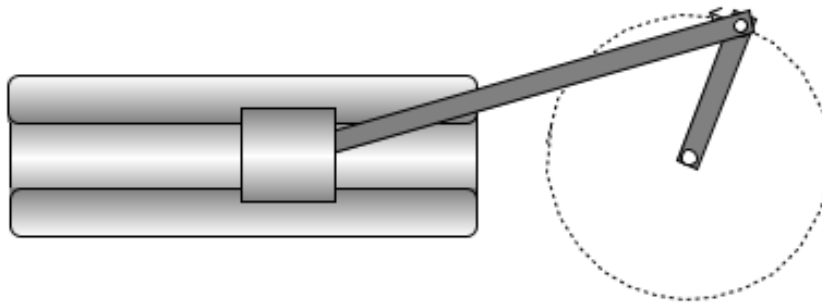


Figura 2.4. Movimiento de avance del mecanismo *Biela-Manivela-Deslizadera*.2

La longitud de desplazamiento de la *Deslizadera* depende de las dimensiones de la *Manivela*, cuando esta completa un círculo, la *Biela* se desplaza el doble de la longitud de la *Manivela*.

$$L = 2 \cdot r \quad (1)$$

Donde L es el desplazamiento de la *Biela* y r es la longitud de la *Manivela*.

El mecanismo *Biela-Manivela-Deslizadera* es usado en aplicaciones industriales como los pistones en un motor de combustión interna, el mecanismo básico de una máquina de coser, etc.

2.2. CINEMÁTICA DEL MECANISMO BIELA-MANIVELA-DESLIZADERA

En este apartado va a ser explicado el análisis cinemático del mecanismo *Biela-Manivela-Deslizadera*. Este tipo de estudio consiste en conocer las posiciones, velocidades y aceleraciones de todos los componentes del sistema.

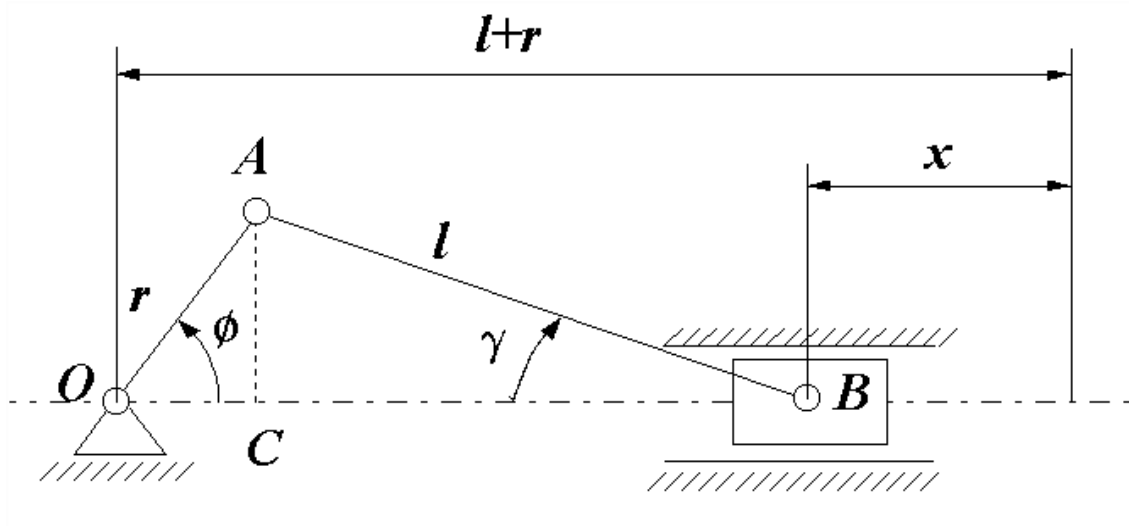


Figura 2.5. Mecanismo a analizar
(Monografias.com S.A.)

- **Análisis de posiciones:**

Antes de un análisis cinemático se requiere un estudio estructural para conocer las dimensiones del mecanismo. Si todos los valores iniciales requeridos son conocidos, se puede calcular la posición de la *Deslizadera* en un instante de tiempo con la siguiente fórmula:

$$x = l + r - (OA \cdot \cos\phi + AB \cdot \cos\gamma) \quad (2)$$

El ángulo rotado por la *Biela* y está directamente relacionado con el ángulo ϕ girado por la *Manivela*. Puede ser conocido mediante la siguiente expresión:

$$\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{r \cdot \sin\phi}{l}\right) \quad (3)$$

- **Análisis de velocidades:**

Para encontrar la velocidad de la Deslizadera es suficiente con derivar la expresión del desplazamiento en función del tiempo:

$$\frac{dx}{dt} = OA \cdot \sin\phi \cdot \frac{d\phi}{dt} - AB \cdot \sin\gamma \cdot \frac{d\gamma}{dt}$$

$$V_B = \omega_{OA} \cdot r \cdot \sin\phi - l \cdot \omega_{AB} \cdot \sin\gamma \quad (4)$$

Para encontrar el valor de la velocidad angular de la *Manivela* ω_{AB} , es necesario diferenciar la ecuación que relaciona el ángulo girado por la *Manivela* con el rotado por la *Biela*.

$$\omega_{AB} = \omega_{OA} \cdot \frac{r}{l} \cdot \frac{\cos\phi}{\cos\gamma} \quad (5)$$

- **Análisis de aceleraciones:**

Derivando la ecuación de la velocidad de la *Deslizadera* es posible hallar su aceleración:

$$a_B = \omega_{OA}^2 \cdot r \cdot \cos\phi - l \cdot (\alpha_{AB} \cdot \sin\gamma + \omega_{AB}^2 \cdot \cos\gamma) \quad (6)$$

Donde α_{AB} es:

$$\alpha_{AB} = \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{\omega_{OA} \cdot \omega_{AB} \cdot \sin\gamma \cdot \cos\phi - \omega_{OA}^2 \cdot \sin\phi \cdot \cos\gamma}{(\cos\gamma)^2} \right) \quad (7)$$

3. SOFTWARE UTILIZADO

CATIA® es un software de diseño integral, creado y desarrollado por la empresa francesa *Dassault Systemes*® y distribuido a nivel mundial por *IBM*®. El programa comenzó como un sistema CAD paramétrico (Computer Aided Design) y actualmente, es uno de los software más potentes en gestión de ciclo de vida de un producto. Este tipo de productos son *PLM* o Product Lifecycle Management.

El acrónimo CATIA® significa *Computer Aided Three-dimensional Interactive Application*. El objetivo de *Dassault Systemes*® fue crear una solución que incluya las áreas CAD, CAM, CAE, KBE y PDM o en otras palabras, diseño, mecanizado, cálculo de estructuras and gestión del conocimiento y producto.



Figura 3.1. CATIA V5 R19

Este programa está concebido para satisfacer los requerimientos de los consumidores, por esta razón, su estructura básica es modular y cada cliente puede elegir los módulos más adecuados para el trabajo que va a desarrollar posteriormente y siempre tiene la posibilidad de comprar e integrar nuevos módulos.

El diseño del *Cepillo de Dientes Eléctrico* fue realizado con CATIA®V5R19 porque es la versión disponible en los laboratorios de la *Akademia Górniczo-Hutnicza*.

El proyecto ha sido realizado utilizando los modules disponibles en las siguientes áreas: *Mechanical Design* y *Digital Mock Up*. Dentro de *Mechanical Design* ha sido usado *Part Design* para la implementación de las piezas del *Cepillo de Dientes* y la unidad *Assembly Design* para la unión de estos elementos. De igual modo, ha sido utilizado la sección *Drafting* para generar los planos de construcción y de unión del modelo. Con *Digital Mock Up* se han realizado los posteriores estudios.

4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

4.1. INTRODUCCIÓN

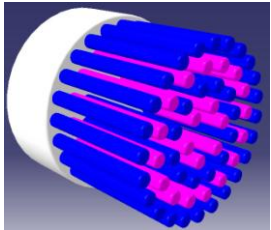
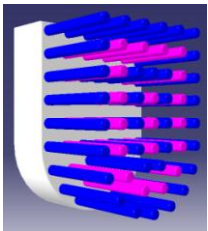
En el siguiente capítulo van a ser explicados los subconjuntos y elementos que componen el modelo del *Cepillo de Dientes Eléctrico* y las características de los materiales usados en el proceso de diseño.



Figura 4.1. Cepillo de Dientes Eléctrico

El *Cepillo de Dientes Eléctrico* (Figura 5.1) está compuesto por 18 piezas y está incompleto, ya que los elementos eléctricos no han sido diseñados. Los materiales usados son: nylon 66 para las cerdas, acetal en los engranajes and polipropileno en el resto del conjunto.

La siguiente table resumen muestra los elementos del modelo:

SUBCONJUNTO	ELEMENTO	CANTIDAD	MATERIAL	FIGURA
Fix Part	Casing	1	Polipropileno	
	Rear Casing	1	Polipropileno	
	Motor	1	-	
Upper Brush	External Cylinder Upper Brush	1	Polipropileno	
	Hear1	36	Nylon	
	Hear2	22	Nylon	
Lower Brush	External Part Lower Brush	1	Polipropileno	
	Hear1	34	Nylon	
	Hear2	19	Nylon	
	Internal Cylinder Upper Brush	1	Polipropileno	
	Connection Lower Brush with Mechanism	1	Polipropileno	
	Connection Between Brushes	1	Polipropileno	
	Stick	1	Polipropileno	

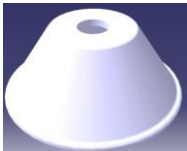
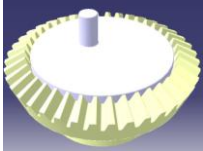
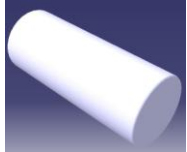
	Cone	1	Polipropileno	
	L	1	Polipropileno	
	Connection with Wheel	1	Polipropileno	
	Plastic Wheel	1	Acetal	
	Plastic Gear	1	Acetal	
	Head of Motor	1	Polipropileno	
	Axle PW	1	Polipropileno	

Tabla 4.1. Componentes del Cepillo de Dientes Eléctrico

4.2. MATERIALES USADOS

Los materiales utilizados en el proceso de creación son: acetal, polipropileno y nylon 66, ya que son los usados típicamente en este tipo de aplicaciones.

MATERIAL PROPIEDADES	ACETAL	POLIPROPILENO	NYLON 66
Densidad(Kg/m³)	1410	913,00	1070,00
Modulo de Elasticidad (GPa)	3,3	1,10	4,14 (Seco)
			1,66 (Húmedo)
Coeficiente de Poisson	0,35	0,35	0,39
Límite Elástico (MPa)	70	33,01	42,00
Conductividad Térmica (W/m·K)	0,31	0,22	0,43
Calor Específico (J/mol·K)	-	-	1,67
Elongación (%)	-	-	37
Meltic Point (°C)	165	164	255
Coeficiente de Expansion Térmica (C⁻¹)	$110 \cdot 10^{-6}$	$100 \cdot 10^{-6}$	$80 \cdot 10^{-6}$

Tabla 4.2. Propiedades de los materiales usados

El acetal es un termoplástico usado en la industria mecánica que tiene alta dureza y buena estabilidad dimensional. Tiene un alto peso molecular que es caracterizado por su elevada resistencia mecánica, casi nula absorción de agua y buenas propiedades de fricción.

El polipropileno es un polímero termoplástico, semicristalino, semiopaco que es producido en una amplia variedad de calidades y tipos. Es un material rígido y duro con buena resistencia al impacto, a los productos químicos corrosivos y es dieléctrico.

El nylon 66 es una poliamida con excelentes cualidades: durabilidad, alta elongación, tenacidad, excelente resistencia a la abrasión, altamente tenaz en la absorción de choques, ruido y vibraciones. Es resistente a la humedad ya que se seca completamente y evita el crecimiento bacteriano. (*Plasticbages Industrial S.L.*)

5. FUNCIONAMIENTO DEL MODELO

En el presente capítulo se va a describir detalladamente los tipos de movimiento y su transmisión en cada una de las partes del mecanismo. En primer lugar, el movimiento de rotación es generado por el *Motor* y transmitido al resto del sistema por la pieza *PlasticGear* que está insertada en *Head of Motor*, con la que forma una junta rígida.

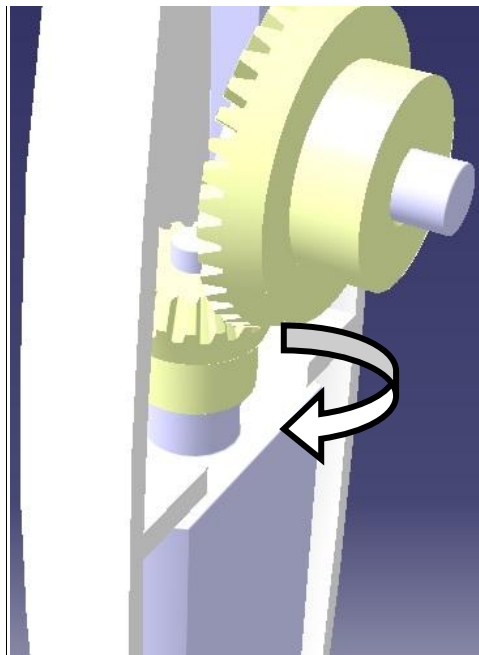


Figura 5.1. Transmisión del movimiento del Motor a Plastic Gear

El tipo de movimiento es cambiado en la pareja de engranajes cónicos, el movimiento de rotación generado por el *Motor* es modificado a desplazamiento lineal cuando pasa por esta parte del sistema.

PlasticWheel tiene un cilindro de plástico unido coaxialmente con él, en el que se encuentra otro pequeño cilindro que permite la conexión con *Connection with Wheel*. Este pequeño cilindro tiene una excentricidad de 2mm desde el centro de *Plastic Wheel* para permitir el movimiento alternante de *Lower Brush*. *Plastic Wheel* actúa como manivela en este sistema.

La pieza *Connection with Wheel* trabaja como biela entre los engranajes cónicos y el resto del sistema. Este elemento está unido con *L* en el otro extremo, que es el comienzo de la deslizadera.

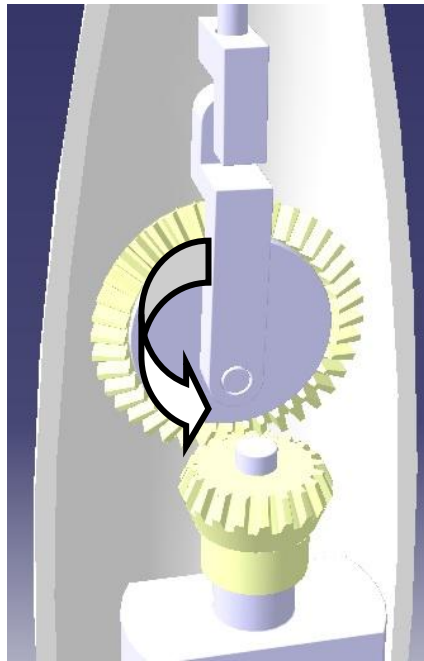


Figura 5.2. Los engranajes cónicos cambian en tipo de movimiento

La deslizadera del *Cepillo de Dientes Eléctrico* está formada por las siguientes piezas: *L*, *Stick*, *Connection Lower Brush with Mechanism* y el subconjunto *Lower Brush*. Este conjunto de elementos transmite el movimiento lineal.

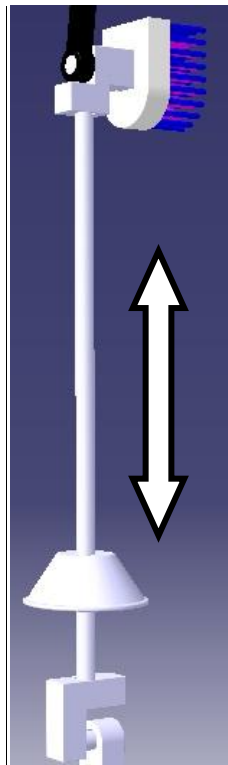


Figura 5.3. Deslizadera

Debido a *Connection Between Brushes* es posible el movimiento circular del subconjunto *Upper Brush*. Esta pieza tiene forma de biela simétrica cuyos en extremos están ensamblados con *Internal Cylinder Upper Brush* y *Connection Lower Brush with Mechanism*. Trabaja como una segunda biela que cambia otra vez el tipo de movimiento.

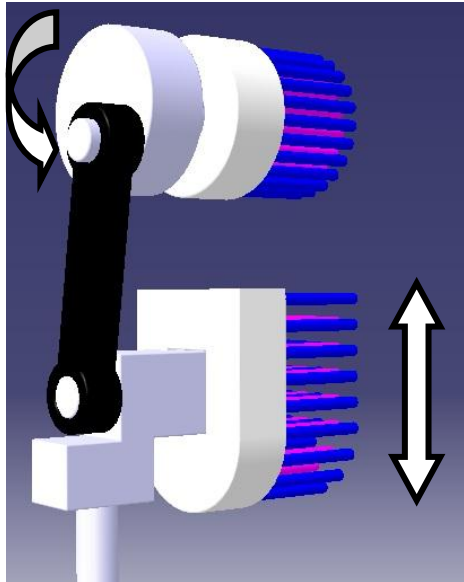


Figura 5.4. Transmisión de movimiento entre los cepillos

Como resumen, en la *Figura 5.5* están representadas las siguientes: *biela*, *manivela* and *deslizadera* que forman el mecanismo del *Cepillo de Dientes Eléctrico*.

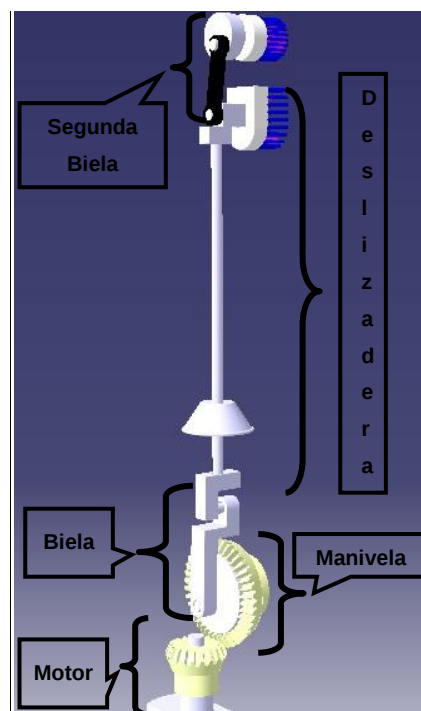


Figura 5.5. Partes del Cepillo de Dientes Eléctrico

6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CINEMÁTICO

6.1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto está dividido en tres partes importantes; la primera es la especificación del modelo y mecanismo a estudiar, la segunda es el diseño utilizando los módulos de *CATIA*® pertinentes y finalmente, el mecanismo es caracterizado y analizado cinemáticamente, cuyos resultados se van a presentar en este capítulo.

Además, el modulo usado para esta última etapa es *DMU kinematic*, donde el programa permite definir características como: juntas, comandos, leyes (determinan los datos de entrada, en nuestro caso la velocidad angular de *PlasticGear*), parte fija, sensores para analizar los movimientos, velocidades y aceleraciones y exportar los resultados. Además, también permite grabar videos en movimiento, realizar análisis de colisiones, dibujar el volumen barrido en movimiento por cada parte del conjunto. Para esta última parte es importante estudiar algunos parámetros, como pueden ser:

- ***Optimización del ángulo de rotación de Upper Brush***

El ángulo de rotación de *Upper Brush* debe ser máximo para un óptimo cepillado, pero ha de preservar el movimiento alternativo (menos que 360°).

- ***Relación de movimiento entre los engranajes***

Para un buen diseño, la relación de movimiento entre los engranajes ha de ser considerada, ya que no es ideal y puede afectar a las dimensiones finales del modelo o a ciertos parámetros.

- ***Otros análisis: Desplazamiento de Lower Brush.***

El desplazamiento de *Lower Brush* está diseñado con una condición y ha de ser revisado su cumplimiento.

- ***Volumen Barrido por el modelo***

El volumen barrido por el mecanismo y por los elementos es importante ser comprobado porque es necesario conocer el espacio libre entre los elementos y el espacio necesario en el diseño de las carcasas.

- ***Colisiones***

Otro análisis esencial es el estudio de colisiones entre las piezas en movimiento, porque el software no reconoce si el diseñador ha ensamblado una pieza sobre otra.

6.2. OPTIMIZACIÓN DEL ÁNGULO DE ROTACIÓN DE UPPER BRUSH

Uno de los objetivos principales es encontrar el ángulo de rotación máximo de *Upper Brush* con unas condiciones de diseño. En este caso, la principal restricción es el desplazamiento lineal de *Lower Brush*, que debe ser 4mm, al igual que la excentricidad de la conexión entre *PlasticWheel* y *Connection with Wheel*.

Además, el movimiento circular de *Upper Brush* es logrado cuando la excentricidad diametral en la unión entre *Internal Cylinder Upper Brush* y *Connection Between Brushes* es mayor que 4mm. Con estas especificaciones y las colisiones entre las piezas del modelo, los siguientes parámetros han de ser modificados:

- La excentricidad e del apéndice cilíndrico localizado en la superficie interna de *Internal Cylinder Upper Brush*. *Figura 6.1.*

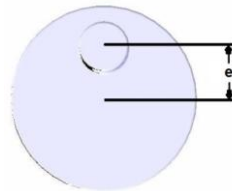


Figura 6.1. e Definición

- La longitud L entre los centros localizados en los extremos de elemento *Connection Between Brushes*. *Figura 6.2.*



Figura 6.2. L Definición

- La longitud S de *Stick*. *Figura 6.3.*



Figura 6.3. S Definición

El procedimiento de modificaciones es el siguiente: en primer lugar, se cambia la excentricidad e con el resto de los parámetros constantes; en segundo lugar, con la nueva e se cambia L , y si es necesario en cada caso se modifica S para evitar colisiones. Toda esta información está resumida en la *Tabla 6.1* donde están recogidos los resultados del test realizado and los resultados obtenidos.

ARCHIVO	DIMENSIONES (mm)	ÁNGULO GIRADO POR UPPER BRUSH (Deg)
Inicial	$e = 2.50$	108.26
	$L = 11.87$	
Optimización1	$e = 2.70$	108.26
	$L = 11.87$	
Optimización2	$e = 2.70$	99.42
	$L = 12.07$	
Optimización3	$e = 2.30$	Bloqueado después de 11.33s
	$L = 11.87$	
Optimización4	$e = 2.30$	Bloqueado después de 11.33s
	$L = 12.07$	
Optimización5	$e = 2.30$	121.17
	$L = 11.67$	
Optimización6	$e = 2.10$	No funciona alrededor del círculo completo
	$L = 11.67$	
Optimización7	$e = 2.10$	146.08
	$L = 11.47$	
Optimización8	$e = 2.00$	No se mueve
	$L = 11.37$	
Optimización9	$e = 1.90$	No funciona alrededor del círculo completo
	$L = 11.47$	
Optimización10	$e = 1.90$	No funciona alrededor del círculo completo
	$L = 11.27$	
Optimización11	$e = 1.90$	No se mueve
	$L = 11.07$	
Optimización12	$e = 2.10$	No funciona alrededor del círculo completo
	$L = 11.67$	
	$S=60.00$	
Optimización13	$e = 2.10$	No funciona alrededor del círculo completo
	$L = 11.67$	

	S =64.00	
Optimización14	e = 2.30	No funciona alrededor del círculo completo
	L <11.67	
	S =61.20	
Optimización15	e = 2.30	No funciona alrededor del círculo completo
	L <11.67	
	S >61.20	
Optimización16	e = 2.30	No funciona alrededor del círculo completo
	L <11.67	
	S <61.20	

Tabla 6.1. Resumen de optimizaciones

Después de las simulaciones hechas, las dimensiones de la *Optimización 7* son las elegidas ya que maximizan este ángulo. Para un mejor diseño, el ángulo debería ser mayor que 180° pero otros parámetros de diseño han de ser cambiados, como la excentricidad diametral de la unión entre *PlasticWheel* y *Connection with Wheel* para que *Upper Brush* tenga mayor amplitud en su movimiento lineal.

En el siguiente gráfico, el ángulo girado por *Upper Brush* es mostrado; este es negativo debido a la dirección de la rotación, el máximo valor es -156.15° y el mínimo es -302.23° , entonces, el ángulo de rotación es **146.08°** . Cabe señalar que la velocidad angular de entrada es $\pi/5 \text{ rad/s}$.

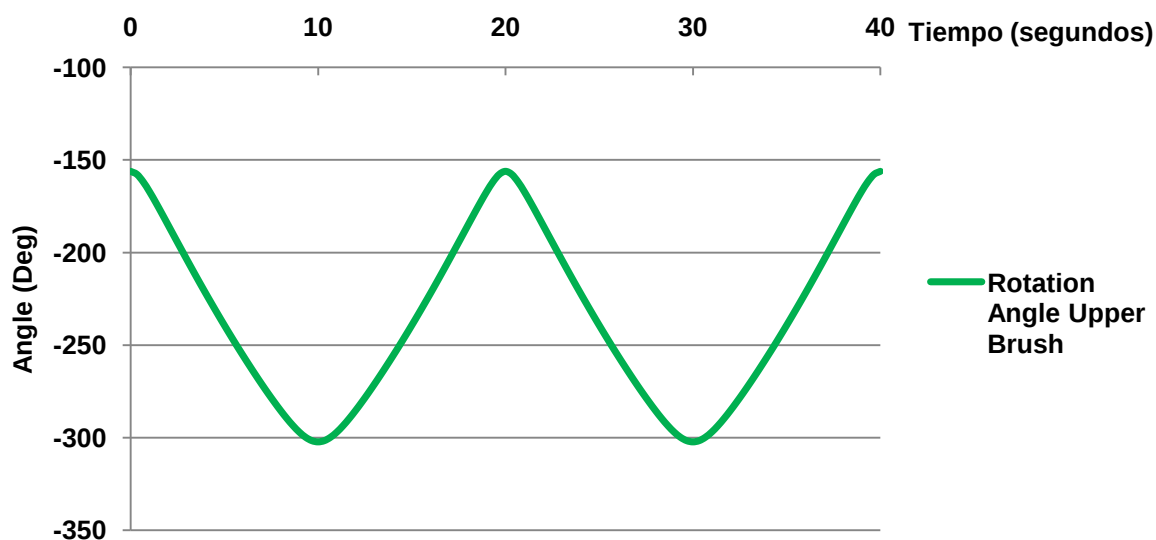


Gráfico 6.1. Ángulo girado por Upper Brush

6.3.RELACIÓN DE MOVIMIENTO ENTE ENGRANAJES

Uno de los focos de estudio dentro del desarrollo del modelo, es la relación entre los ángulos girados por los engranajes. Este aspecto es importante ya que es el lugar donde el movimiento

Que la eficiencia de los engranajes es inferior al 100% es algo conocido por todos, porque ningún mecanismo es perfecto, estos siempre tienen fallos debido al desgaste de los dientes, deslizamiento, etc. Pero la transmisión de movimiento por engranajes es uno de los sistemas más eficientes dentro de los métodos conocidos; su eficiencia es alrededor del 97% como aparece en la *Tabla 6.2*.

Characteristic	Friction wheel	Spur gears	Flat belts	Trapezoidal belts	Toothed belts	Chains
Max power [kW]	80	80000	200	350	120	400
Max torque [kNm]	5	7000	3	5	1	40
Max linear speed [m/s]	20	30	100	30	60	10
Efficiency	0.95	0.97	0.97	0.97	0.96	0.95
Power function os speed	y	n	y	y	y	y
Max ratio (1 stage)	6-18	6-10	6-8	6-10	6-10	6-10
Tensioning required	y	n	y	y	n	n
Load on bearing	high	low	high	high	low	low
Build precision	average	high	low	low	low	average
Presence of sliding	y	n	y	y	n	n
Noise	low	average	low	low	low	high
Overload limiter	y	n	y	y	n	n

Tabla 6.2. Comparación entre los diferentes métodos de transmisión de movimiento

Para comparar la relación en este modelo, los valores obtenidos durante la simulación han sido guardados en un archivo Excel y representados gráficamente. La relación ideal de transmisión entre los engranajes cónicos del modelo es:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

Donde:

n_1 = velocidad angular de *PlasticGear*

n_2 = velocidad angular de *PlasticWheel*

Z_1 =número de dientes de *PlasticGear*

Z_2 = número de dientes de *PlasticWheel*

En este caso es:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{40}{20} = 2$$

En el siguiente gráfico han sido representados los resultados generados por *DMU Kinematic* sobre los ángulos girados por ambos engranajes. Como se puede ver, si comparamos las ecuaciones de movimiento, la relación de transmisión entre *PlasticGear* y *PlasticWheel* es 2 y la diferencia en el instante inicial es de 180°.

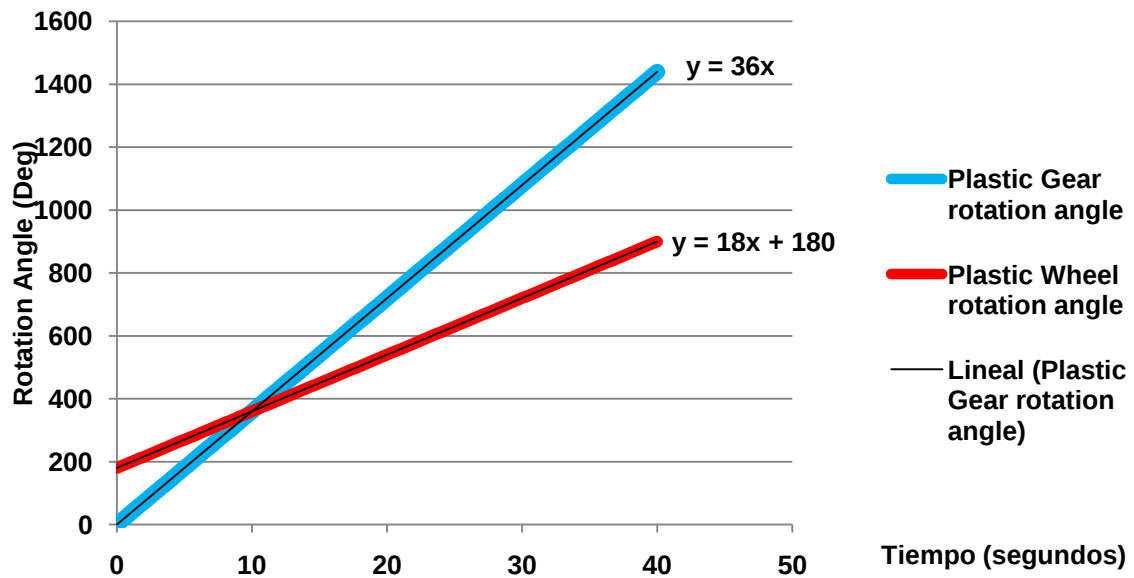


Gráfico 6.2. Ángulos girados por los engranajes

El Gráfico 6.3 muestra más claramente la relación de transmisión entre los engranajes cónicos. Esta relación es la ideal calculada en la página anterior.

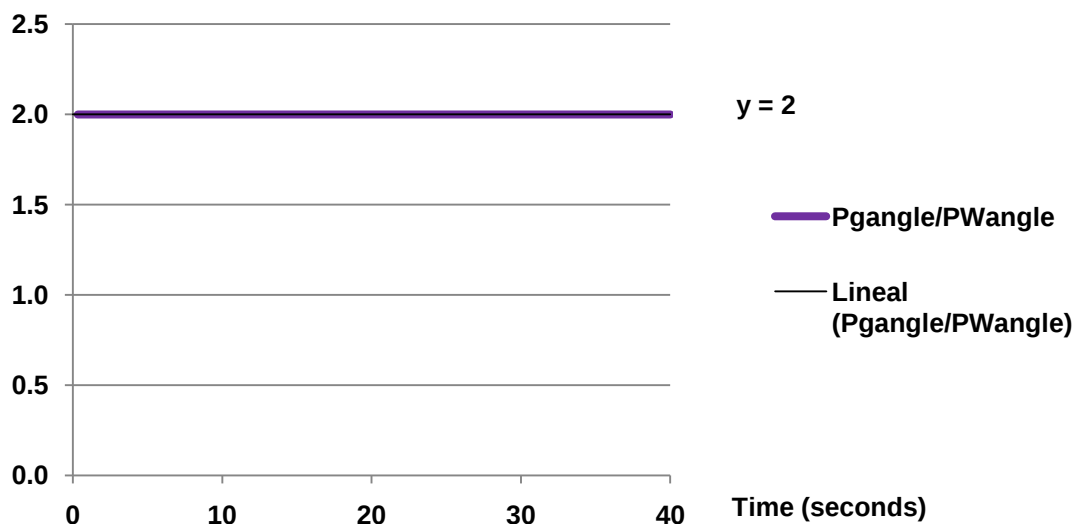


Gráfico 6.3. Relación entre los ángulos girados por los engranajes

Aunque la diferencia sea solo alrededor de un 3%, ha de ser considerada para el diseño definitivo ya que puede cambiar ligeramente las dimensiones de las carcasas y las piezas móviles y los parámetros iniciales (velocidad de entrada,...)

6.4. OTROS ANÁLISIS

Otro aspecto interesante es comprobar que el desplazamiento de *Lower Brush* es 4mm, especificación de diseño. Para ello se puede ubicar un sensor en *Lower Brush* que suministra la información deseada gráficamente y en un archivo Excel.

Si se observa el *Gráfico 6.4*, se puede concluir que la condición de 4mm de máximo desplazamiento en *Lower Brush* es constante a lo largo de todo el evento simulado. La simulación ha sido realizada con una velocidad angular inicial en *PlasticGear* de $\pi/5$ rad/s. Además, este gráfico indica que la velocidad impuesta es baja y debe ser analizada e incrementada. Para el cálculo de la velocidad y la aceleración de este elemento, la pieza de referencia utilizada es *Cone*.

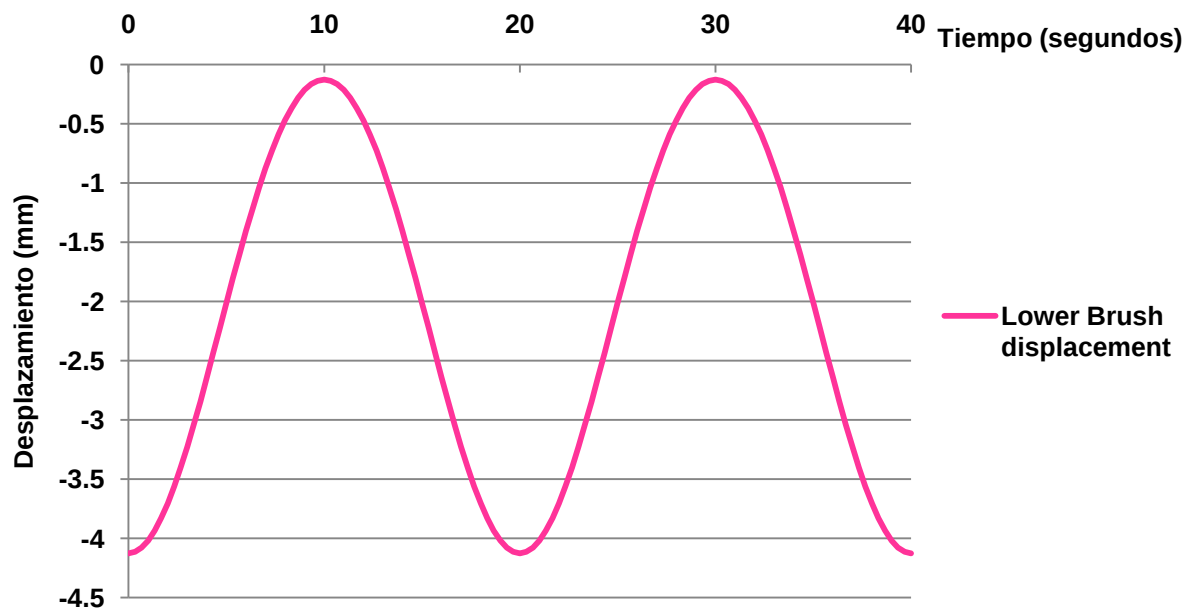


Gráfico 6.4. Desplazamiento de Lower Brush

$$LB_{max} - LB_{min} = -4mm$$

Where:

LB_{max} = máxima posición de *Lower Brush*

LB_{min} = mínima posición de *Lower Brush*

La máxima velocidad lineal de *Lower Brush* con las condiciones de baja velocidad angular inicial es $[6.3 \cdot 10^{-4}]$ m/s y se registra un instante de tiempo anterior al momento en que *Lower Brush* ha recorrido la mitad de su carrera. Sobre la aceleración lineal, este parámetro es máximo en el evento de tiempo anterior al que la velocidad será cero.

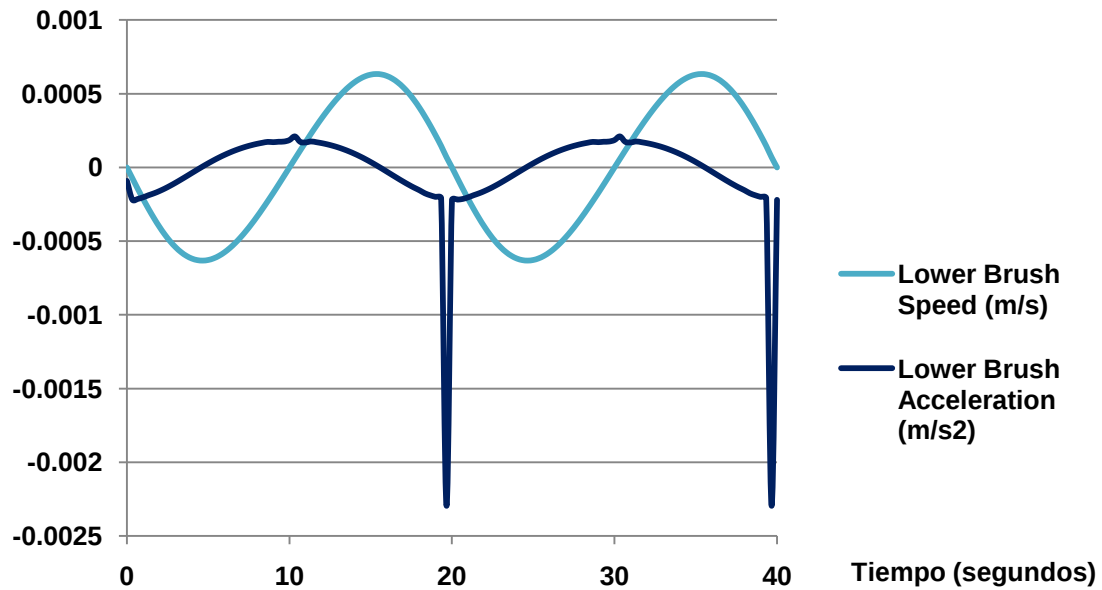


Gráfico 6.5. Velocidad y Aceleración de Lower Brush

Con los resultados mostrados en los gráficos anteriores, se puede concluir que la velocidad angular de entrada es baja para este tipo de aplicaciones. El repentino descenso en la velocidad es debido a fallos en el programa.

La velocidad angular inicial ha sido incrementada a 2π rad/s. La velocidad lineal de *Lower Brush* ha aumentado a $5 \cdot 10^{-3}$ m/s y la aceleración hasta $1.8 \cdot 10^{-2}$ m/s².

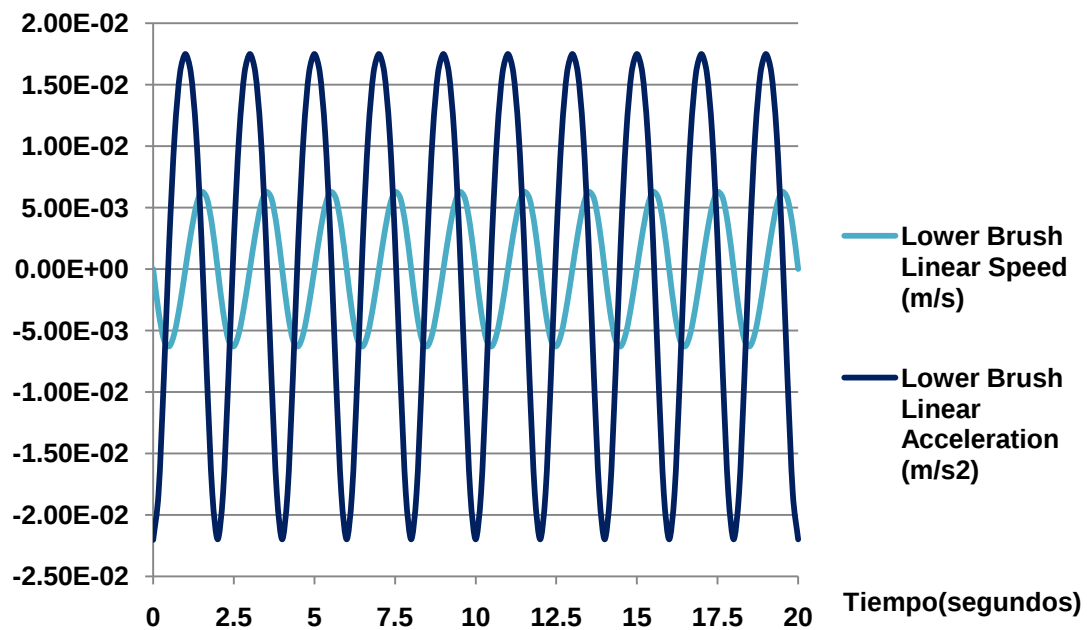


Gráfico 6.6. Velocidad y Aceleración Lineal de Lower Brush 2.

6.5. VOLUMEN BARRIDO POR EL MODELO

A lo largo de esta sección van a ser presentados los resultados del análisis realizado acerca del volumen barrido por el mecanismo diseñado. El volumen barrido por el mecanismo en su movimiento es similar al que tiene el mismo de forma estática, por lo tanto *Casing* y *Rear Casing* no necesitan más espacio libre que el ocupado por las piezas del conjunto. El volumen barrido es mostrado en las Figuras 6.4 y 6.5.



Figura 6.4. Volumen barrido por el Mecanismo



Figura 6.5. Volumen barrido por el Mecanismo 2

6.6. COLISIONES

CATIA® permite hacer diferentes análisis de colisiones. Por un lado, pueden ser calculadas las colisiones estáticas y por otro lado, las interferencias durante el movimiento (en la simulación) pueden ser detectadas de diferentes formas. En la siguiente figura se presenta un resumen de los 6 tipos.



Figura 6.6. Tipos de Colisiones

En el caso estudiado, es el ultimo tipo el que se ha llevado a cabo, ya que es el más claro mientras la simulación está en proceso Si el software detecta una colisión, la simulación se para. Inicialmente, el mecanismo tuvo problemas entre los engranajes debido a problemas en la posición de los dientes, pero que fueron resueltos.

Además, las interferencias estáticas fueron analizadas con resultado negativo. Los contactos relevantes entre piezas son mostrados en el siguiente gráfico:

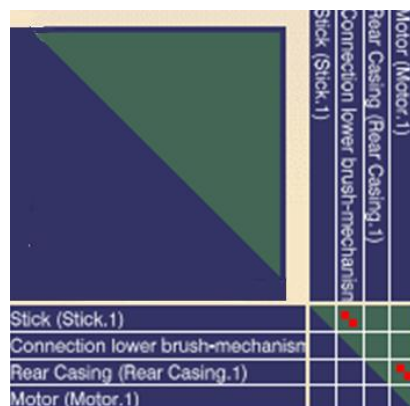


Gráfico 6.7. Contactos relevantes entre los elementos del Cepillo de Dientes Eléctrico

7. CONCLUSIONES

Como se mencionó al comienzo de este documento, los objetivos de este proyecto son: en primer lugar, el aprendizaje de las herramientas de diseño mecánico y módulos de simulación cinemática del software *CATIA*® debido a que es el programa de referencia en el campo del diseño mecánico. Como este es un proyecto de aprendizaje, se propuso diseñar un *Cepillo de Dientes Eléctrico* por la simplicidad de su método de operación.

En vista de los resultados presentados en el capítulo anterior, se puede concluir que después de las simulaciones realizadas, las dimensiones de la *Optimización 7* ($e=2.1mm$, $L=11.47mm$) son las elegidas porque maximizan en ángulo de rotación de *Upper Brush*.

Para un mejor diseño, este ángulo ha de ser mayor de 180° , pero otros parámetros de diseño han de ser modificados, como la excentricidad diametral de la conexión entre *PlasticWheel* y *Connection with Wheel* para que *Upper Brush* tenga mayor amplitud en su movimiento lineal.

Además, la relación de movimiento entre los engranajes es ideal durante la simulación; aunque la diferencia es alrededor de un 3% respecto a la relación real, es algo que debe ser considerado para el diseño definitivo ya que esto puede cambiar ligeramente las dimensiones de las carcasas y partes móviles y los parámetros iniciales (velocidad inicial,...)

Después del análisis cinemático de *Lower Brush*, se puede concluir que la condición de 4mm de desplazamiento máximo en *Lower Brushes* es constante a lo largo del evento simulado, y la velocidad angular inicial es baja para el funcionamiento normal de un *Cepillo de Dientes Eléctrico*. Entonces, la velocidad de entrada de *PlasticGear* ha sido incrementada hasta 2π rad/s

Si son considerados los resultados de los análisis de volumen barrido por las piezas móviles y colisiones, se puede concluir, el volumen barrido por el mecanismo completo es similar al mecanismo real, entonces *Casing* y *Rear Casing* no necesitan espacio libre adicional que el ocupado por los elementos.

8. TRABAJOS FUTUROS

A lo largo de este proyecto han sido realizados el diseño del sistema mecánico de un *Cepillo de Dientes Eléctrico* y su análisis cinemático. El desarrollo de este producto se completará con otros tipos de diseños y estudios.

Por un lado, el diseño podría ser terminado con los sistemas eléctricos y electrónicos y sus respectivos estudios, que en este proyecto no se han considerado, ya que el problema a estudiar era de tipo mecánico.

Por otro lado, serán necesarios estudios mecánicos adicionales. Dentro de este tipo de análisis, el modelo requiere: análisis dinámicos, test de tensiones y deformaciones, comprobar la impermeabilidad de la carcasa y su resistencia ante colisiones, etc.

Finalmente, el diseño del cargador de la batería es esencial antes de la fabricación del *Cepillo de Dientes Eléctrico*.