

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA
INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***AUTOMATIZACIÓN DE TATUAJES
SIMPLES Y ALTERNATIVAS DE DISEÑO***

Alumno: Sánchez Espinosa, Iñigo
Director: Petuya Arcocha, Victor

Curso: 2018/2019

Fecha: Bilbao, 8 de Julio de 2019

RESUMEN

El objetivo de este trabajo de fin de grado está enfocado al desarrollo de una idea como es la realización de tatuajes de forma automática, inspirada en los mecanismos que rigen las impresoras 3D. Para ello se ha realizado un modelo completo de la idea en el software AUTOCAD Inventor y se han estudiado los distintos mecanismos que definen su funcionalidad por diferentes medios (algún estudio por elemento finitos y otros por ecuaciones de sólido libre), mejorando y optimizando estos. Se ha llegado hasta el punto que se quería alcanzar en el desarrollo de la idea y se han dejado partes planteadas para una posible ampliación a futuro de mayor detalle y con posibilidades de llegar a un prototipado real, ofreciendo propuestas para ensayos, usos alternativos de la máquina, estudios de partes en mayor profundidad...

Palabras clave: tatuajes, automática, impresoras 3D, mecanismos, elementos finitos, ensayos, usos alternativos.

ABSTRACT

The main objective of this project is the development of the idea of the realization of tattoos by automatic means, inspired by the mechanisms that make the 3D printers work the way they do. For this purpose, a 3D model of a prototype was made via the software AUTOCAD Inventor. The different mechanisms that were used in the model were analysed with different methods (some with the FEM, finite element method, and others with more classic ones, with free solid equations) in order to optimize them. The point that was wanted to be achieved was reached in the development of the idea and some parts were left to be studied in further detail in the future. Though, at least some suggestions were established in order to guide the future steps, like some test, alternative uses for the machine...

Keywords: tattoos, automatic, 3D printer, mechanism, finite elements, test, alternative uses.

LABURPENA

Gradu amaierako lan honen helburua, 3D inprimagailu baten funtzionamenduan oinarrituz, tatuajeak egiteko makina automatiko baten ideia garatzea da. Honako helburu hau asebetetzeko, AUTOCAD Inventor softwarea erabiliz makinaren modeloa egin da eta haren mekanismoren erabilgarritasuna aztertu da (elementu finituak zein solido askeen ekuazioak erabiliz), beraien hobekuntzak eta optimizazioak planteatuz. Nahiz eta proiektu honi dagokion irismena bete, hainbat diseinu proposatu dira etorkizunean gara daitezen, baita prototipo erreal bat egiteko aukera ere (entsegu proposamenak, makinaren erabilera alternatiboak eta hainbat atalen sakontasuneko ikasketa planteatuz).

Hitz gakoak: tatuajeak, automatiko, 3D inprimagailu, mekanismo, elementu finituak, entsegu, erabilera alternatiboak.

LISTA DE FIGURAS Y ECUACIONES

Figura 2-1. Impresora tipo 1.	10
Figura 2-2. Impresora tipo 2.	10
Figura 2-3. Impresora tipo 2, 2 apoyos.	10
Figura 2-4. Impresora tipo 2, 4 apoyos.	10
Figura 3-1-1. Tipos de agujas de tatuado.	12
Figura 3-2-1. Modelo impresora 3D.	12
Ecuación 3-2-1. Grados de libertad.	13
Figura 3-2-2. Base de impresora 3D y sistema de referencia B (origen en A).	13
Ecuaciones 3-3-1. Ecuaciones paramétricas del círculo.	14
Figura 3-2-5. Tabla Excel.	15
Figura 3-2-6. X-Y.	15
Figura 3-2-7. $x(t)$.	16
Figura 3-2-8. $y(t)$.	16
Figura 3-2-9. $z(t)$.	16
Figura 4-1. Montaje completo sin cabezal. Vista 1.	17
Figura 4-2. Montaje completo sin cabezal. Vista 2.	17
Figura 4-3. Apoyo del brazo. Vista 1.	18
Figura 4-4. Apoyo del brazo. Vista 2.	18
Figura 4-5. Cabezal con leva. Vista 1.	19
Figura 4-6. Cabezal con leva. Vista 2.	19
Figura 4-7. Cabezal con leva. Vista 1 sin transparencias.	19
Figura 4-8. Organigrama de funcionamiento de la máquina.	20
Figura 4-9. Engranajes y correa obtenidos en Inventor.	21
Figura 5-1-1. Antigua plataforma de acoplamiento.	22
Figura 5-2-1. Nueva plataforma de acoplamiento.	23
Figura 6-1-1. Prediseño de máquina de tatuar con mecanismo de leva, esqueleto unificado.	25
Figura 6-2-1. Modelo del prediseño para el estudio de los parámetros.	25
Figura 6-2-2. Modelo del prediseño para el estudio de los parámetros y diagramas de sólido libre.	26
Figura 6-2-3. Diagramas de posición (mm), velocidades (mm/s) y aceleraciones (mm/s ²) del seguidor en el prediseño.	26
Figura 6-2-2. Modelo de leva optimizada.	27
Figura 6-2-3. Diagramas de posición (mm), velocidades (mm/s), aceleraciones (mm/s ²) y sobre aceleraciones (mm/s ³) de la leva cicloidal.	28
Ecuación 6-2-1-1.	29
Ecuación 6-2-1-2.	30
Figura 6-3-1. Diseño clásico y diagramas posición (mm), velocidades (mm/s) y aceleraciones (mm/s ²).	31
Figura 7-1-1. Regulación con tuercas.	32
Figura 7-3-1. Localización del muelle a torsión.	34
Figura 7-3-2. Posición de 0°.	34
Figura 7-3-3. Posición de ángulo máximo.	35
Figura 7-3-4. Diseño del muelle a torsión.	36
Figura 7-3-5. Fórmulas del par, de la tensión y del diámetro exterior mínimo del muelle a torsión.	36
Figura 7-4-1. Localización del mecanismo.	39
Figura 7-4-2. Fuerzas en el mecanismo.	39
Figura 7-4-3. Ejemplo de motor a utilizar.	40
Figura 8-2-2-1. Gráfica de factor de amplificación dinámica.	42
Figura 8-3-1. Modelo y elemento que se cree más solicitado.	43
Figura 8-3-1-1. Función de la fuerza de la aguja.	44
Figura 8-3-1-2. Representación de fuerzas y puntos de importancia.	45
Figura 8-3-1-3. Representación de fuerzas y puntos de importancia.	45
Figura 8-3-1-4. Representación de fuerzas y puntos de importancia.	46
Figura 8-3-2-1. Representación de la posición de las fuerzas descompuestas.	46

Ecuación 8-3-2-1.	47
Ecuación 8-3-2-2.	47
Ecuación 8-3-2-3.	47
Ecuación 8-3-2-4.	47
Ecuación 8-3-2-5.	47
Ecuación 8-3-2-6.	47
Figura 8-3-2-2. Representación de descomposición de fuerzas.	48
Ecuaciones 8-3-2-7.	48
Figura 8-3-2-3. Posición de estudio.	48
Figura 8-3-2-4. Parámetros y resultados del estudio.	50
Figura 12-1-1. Modelo impresora 3D.	55
Ecuación 12-1-1. Ecuación vectorial de los lazos.	55
Ecuación 12-1-2. ${}^B P_i$.	56
Figura 12-1-2. Matriz de cambio de base y sistemas de referencia.	56
Figura 12-1-3. Ecuaciones de los lazos.	57
Figura 12-1-4. Programa de Matlab de resolución del problema inverso.	58
Figura 12-1-5. Resolución problema directo.	58
Figura 12-2-1. Datos técnicos sobre la piel humana.	59
Figura 12-3-1. Lista de piezas del montaje completo sin cabezal.	63
Figura 12-3-2. Estructura externa.	65
Figura 12-3-3. Apoyo de brazo.	67
Figura 12-3-4. Lista de piezas del cabezal con leva.	68
Figura 12-3-5. Máquina de tatuar seleccionada.	71
Figura 12-3-6. Añadidos máquina de tatuar clásica.	72
Figura 12-4-1. Diseño de muelle a torsión.	73
Figura 12-5-1. Permiso de uso de patente.	74
Figura 12-6-1. Resolución con mathematica.	74
Figura 12-7-1-1. Gantt.	76
Figura 12-7-2-1. Presupuesto.	77
Ecuaciones 12-7-2-1. Precio máquina de tatuar.	77

ÍNDICE

1	Introducción	7
1.1	Contexto	7
1.2	Introducción a los contenidos.....	8
1.3	Análisis de alternativas, beneficios y objetivos.....	8
2	Selección de tipo de impresora 3d	9
3	Introducción de grado de libertad y posicionamiento del robot	11
3.1	Entrada de aguja en piel.....	11
3.2	Procedimiento teórico.....	12
3.3	Aplicación.....	14
4	Montaje completo (Predimensionamiento) y funcionamiento	17
5	Diseño de plataforma de la máquina de tatuar	22
5.1	Descripción.....	22
5.2	Diseño 3d final.....	23
6	Alternativa de diseño de máquina de tatuar	24
6.1	Descripción general.....	24
6.2	Estudio de patente	25
6.3	Comparación de mecanismos.....	30
7	Diseño de agarre para el brazo.....	32
7.1	Descripción	32
7.2	Diseño 3d.....	33
7.3	Definición del muelle a torsión	34
7.4	Definición de discos a fricción.....	37
8	Fuerzas actuantes	41
8.1	Ensayos.....	41
8.2	Tren de impulsos	41
8.3	Fuerzas estáticas y dinámicas.....	43
9	Propuesta de uso distinto.....	51
10	Futuras ampliaciones.....	52
11	Referencias	53
12	Apéndices	55
12.1	Apéndice 1. Planteamiento geométrico de impresora 3d delta más rotación añadida y resoluciones en Matlab.	55
12.2	Apéndice 2. Ensayo de entrada de aguja en piel.....	59
12.3	Apéndice 3. Piezas realizadas.	63
12.4	Apéndice 4. Cálculo del muelle a torsión.	73
12.5	Apéndice 5. Estudio de patente.	74
12.6	Apéndice 6. Resolución con mathematica.	74
12.7	Apéndice 7. Aspectos económicos y de organización.	75

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

Debido al auge de las tecnologías de automatización y la aplicación de estas en procesos antes realizados de forma manual, las posibilidades de realización de tareas sencillas o de trabajos indeseables por robots han aumentado exponencialmente. De este pretexto surge la justificación de la idea en la que se basa este trabajo. Los tatuajes más simples, como pueden ser pequeñas formas geométricas, fechas, elementos numéricos simples..., suelen ser trabajos que un tatuador puede reconocer como carentes de arte, poco motivadores etc. Por esta razón, este nicho también aclamado por el consumidor del servicio de tatuajes podría ser cumplimentado por una máquina.

Este nuevo contexto generaría una convivencia que no entorpece las labores del tatuador, que podría tener el común miedo de ser reemplazado por un robot. Dedicándose así, el trabajador, a obras con mayor valor artístico o de mayor reto y dejando de lado una clase de tatuajes realizables por una máquina; ya que esta no posee las capacidades artísticas y de ideación que el humano posee, pero que puede reproducir con facilidad movimientos de geometrías sencillas, generando a su vez un beneficio para el susodicho tatuador, amortizando la máquina.

La idea surge de la posible adaptación del mecanismo y software de una impresora 3D. El aprovechamiento de estos haría de ella una máquina perfecta para ser adaptada a una máquina de tatuar automatizada. El proyecto comenzó con la idea de, directamente, modificar una de estas impresoras 3D, pero, durante este, la experiencia demostró que la complejidad de este proceso era demasiado alta como para un TFG, por lo que se decidió dejarlo para posibles fases posteriores del proyecto y concentrarse en el modelizado, diseño y estudio de fuerzas que esta soportaría si se llegase a construir o llevar a la realidad.

1.2 INTRODUCCIÓN A LOS CONTENIDOS.

Este apartado está dedicado a realizar una pequeña introducción de los contenidos que se desarrollan durante la lectura de este documento.

1. Se empieza por la introducción de la idea del proyecto con el apartado de introducción y selección de tipo de impresora 3D.
2. Se comenta la propuesta de modificación del robot delta (tipo de impresora 3D seleccionada) y la adición de un grado de libertad estudiando el procedimiento teórico y la aplicación a este al proyecto.
3. Se enseña la adaptación del cabezal de extrusión para poder realizar el proceso de tatuado junto con un modelo predimensionado de la impresora 3D y el dispositivo de agarre para el brazo.
4. Se muestra el proceso de diseño del adaptador del cabezal (plataforma móvil).
5. Se comparan y se estudian los mecanismos de dos tipos de máquinas de tatuar y se contrasta la mejoría de uso para esta aplicación de una frente a otra.
6. Se propone un agarre para el brazo con un mecanismo de estirado que emula el estirado de la piel que ejecutan los tatuadores con los dedos a la hora de realizar un tatuaje, diseñando los mecanismos que forman parte de este.
7. Se estudian las fuerzas actuantes en el sistema a través de ensayos y datos obtenidos de internet y se realiza la comprobación del que se cree elemento más débil y se obtiene la sección mínima necesaria para aguantar peso propio y fuerzas externas que surgen en la máquina.
8. Se propone un uso alternativo de la máquina, aplicado a otro campo de estudio.
9. Se concluye proponiendo futuras ampliaciones del proyecto.
10. Referencias y apéndices, incluyendo un el desarrollo del problema inverso y su resolución con Matlab, los estudios encontrados sobre el punzonamiento de la piel, todas las piezas diseñadas desde cero para el modelo realizado en Inventor, las directrices para el diseño de uno de los muelles utilizados en el proyecto, siendo este de un tipo más atípico y la parte de organización y económica del proyecto entre otras.

1.3 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS, BENEFICIOS Y OBJETIVOS.

El análisis de alternativas se ha realizado durante el desarrollo del trabajo en los apartados competentes, ofreciendo alternativas de diseño y procedimientos.

Los beneficios de este trabajo son el desarrollo de la idea de un producto de fines estéticos y que podría llegar a representar un ahorro para los tatuadores o generar un nuevo nicho de mercado en el mundo del tatuaje.

El objetivo del trabajo es la realización de un prediseño ampliable en fases futuras de una máquina de tatuar automática mediante un proceso de innovación basado en el diseño de una impresora 3D.

2 SELECCIÓN DE TIPO DE IMPRESORA 3D

Antes de nada, cabe comentar que se comprobaron los requisitos legales y sanitarios que deben cumplir las tiendas de tatuajes, piercings y micropigmentación en el País Vasco (Ver referencia 1.1) que se deberán tener en cuenta en el caso de que se llegase a realizar un prototipo del proyecto.

Para el comienzo de este trabajo se realizó un estudio de mercado de los tipos de impresoras 3D existentes. La motivación de este hecho se basa en la opcionalidad de continuación de proyecto en posteriores fases académicas, el conocimiento de las posibilidades en mercado y decisión del mejor prototipo de adaptación de la idea a desarrollar.

Se llegó a valorar la posibilidad de compra. Esta se descartó por el incremento de tareas a realizar una vez acometida esa acción por lo que se postergará para próximas fases.

Resumidamente, tras largas horas de comparación y lectura de uso, propiedades y detalles de las impresoras, estas se podrían clasificar en tres tipos:

1. Impresoras tipo delta (Ver figura 2-1).
2. Impresoras con base móvil en dirección longitudinal y movimiento de extrusor en el plano Y-Z (Ver figura 2-2).
3. Impresoras con base móvil en dirección vertical y movimiento de extrusor en el plano X-Y (figura 2-3).

Al ser uno de los objetivos el apoyo del brazo del usuario de este servicio, la impresora tipo 2 se descartó. La razón de basa en la incomodidad de no mantener el brazo estático y la imprecisión en el tatuado que esto generaría.

Hubo un gran debate entre el tipo 1 y el tipo 3 pero finalmente se optó por la 1. La 3 se descartó por que el peso propio del brazo y la adición del agarre de este necesitarían una base más rígida y probablemente 4 apoyos en vez de dos (Ver figuras 2-3 y 2-4). Además, seguiría habiendo un movimiento de la base, aunque de menor influencia ya que sería vertical.

Se concluyó que la que mejores características podría ofrecer era la impresora tipo 1 por las razones siguientes:

1. La facilidad de retirada de la parte del extrusor.
2. La elasticidad de la base.
3. La apertura y la facilidad de insertar el brazo en su estructura.
4. El aprovechamiento del movimiento del mecanismo ya montado.
5. El potencial para los cambios que se propondrán en este trabajo.
6. Facilidad de montaje.
7. Precio asequible según el modelo.

Durante el desarrollo del trabajo se llegó a la conclusión de que sería mejor partir de la idea de la impresora 3D delta, pero construirla desde cero en vez de comprarla, ya que se necesitarían modificar muchos elementos como para que saliese rentable comprar

una y modificarla. Otra opción que se podría barajar sería la compra por piezas y el aprovechamiento de algunas de ellas.



Figura 2-1. Impresora tipo 1.

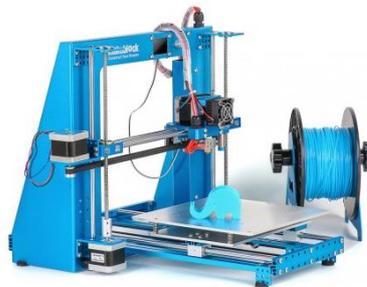


Figura 2-2. Impresora tipo 2.



Figura 2-3. Impresora tipo 2, 2 apoyos.



Figura 2-4. Impresora tipo 2, 4 apoyos.

3 INTRODUCCIÓN DE GRADO DE LIBERTAD Y POSICIONAMIENTO DEL ROBOT

3.1 ENTRADA DE AGUJA EN PIEL

Previo al desarrollo técnico del proyecto se intentó comprender la física detrás de un tatuaje, para ello se consultaron varias referencias (Ver referencia 2.1) y se habló con un tatuador de una tienda de tatuajes de Bilbao llamada Cleyviton Studio Tattoo.

De la conversación con el tatuador y la información recabada se obtuvo que:

- En los tatuajes en el antebrazo se intenta que la entrada de la aguja sea a 90° con la superficie de la piel. Esto no ocurre en todas las partes del cuerpo en las que se tatúa, pero sí en esta en concreto. Por esta razón, se decidió implementar este grado de libertad extra para poder emular la entrada a 90°.
- Los tipos de piel son muy distintos, depende de muchos factores como, por ejemplo, si vas a la piscina frecuentemente, donde vives, tu raza, tu color de piel, si fumas... Para poder combatir contra esta variabilidad fue comentado que el procedimiento que se sigue es muy simple, se hace la primera línea del tatuaje con un "voltaje de prueba", lo que se traduce a una velocidad de entrada de la aguja de prueba o una fuerza de la aguja de prueba. Con esta línea el tatuador sabe, más o menos, qué tipo de piel tiene en frente. Por lo tanto, se mencionó en la conversación que para hacer tatuajes complejos la automatización del proceso requeriría un sensor o algún mecanismo que emulase esta intuición. Una propuesta que se valoró durante la realización del proyecto fue un sensor de presión ejercida por la aguja a tiempo real para poder tener una entrada que como salida diese una variación del voltaje de entrada. Aun con todo, para la realización de tatuajes simples esta variabilidad de la piel no sería un factor tan influyente.
- Los tipos de agujas que se usan para el tatuado son diferentes a las que uno podría imaginar a priori. Se puede pensar que se utiliza una aguja de cabeza única y que la tinta va por dentro, como en las inyecciones. Pues muy lejos de la realidad, las agujas son del tipo de la figura 3-1-1 y se mojan en el bote de tinta para que queden impregnadas, así con su entrada en la piel, empujan la tinta y la depositan en la profundidad necesaria.
- La profundidad de entrada de aguja en la piel que ellos estiman es de 2-3mm. La suficiente para que la tinta penetre bien y la justa para no llegar a la vena y evitar el sangrado. Se depositaría pasando la epidermis y a media altura en la dermis.
- Para realizar el tatuado se suele estirar la piel con los dedos, lo justo para que entre mejor la aguja pero que no se deforme el tatuaje al desistir en el tensionado de la piel.

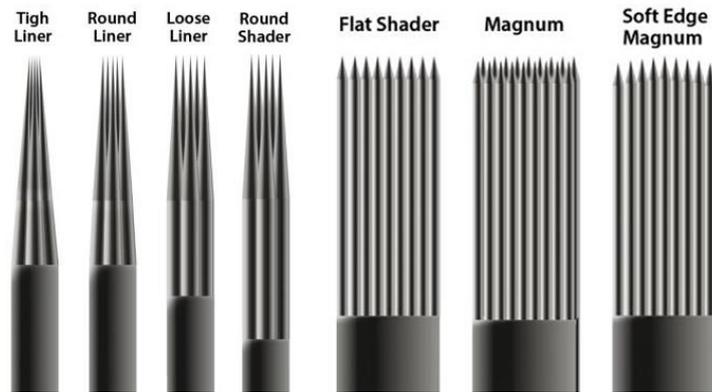


Figura 3-1-1. Tipos de agujas de tatuado.

3.2 PROCEDIMIENTO TEÓRICO

Para la realización de este apartado se tomaron de referencia las consideraciones que aparecen en la referencia 3.1.

"Esta parte está directamente extraída de la referencia con pequeños cambios"

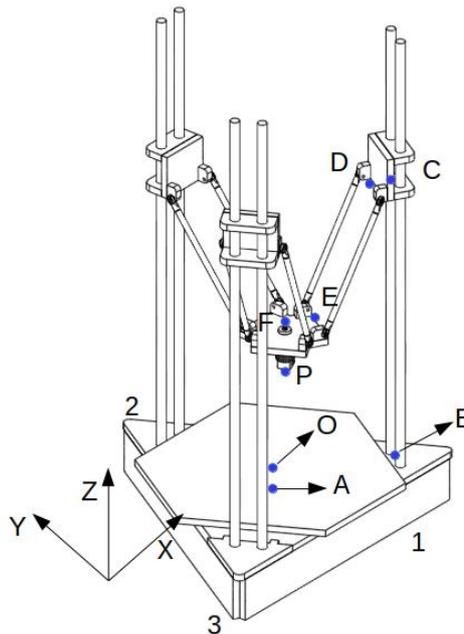


Figura 3-2-1. Modelo impresora 3D.

1. Descripción de puntos:
 - a. O= punto central de la plataforma.
 - b. A= punto justo debajo de O, está separado una distancia ϵ que se deja a propósito para la calibración o nivelación de la plataforma.
 - c. B= punto entre los centros de los tubos de una columna.
 - d. C= punto que denota la altura del carro respecto a la columna.
 - e. D= punto ubicado en el punto medio de las dos juntas esféricas superiores.
 - f. E= punto ubicado en el punto medio de las dos juntas esféricas inferiores.
 - g. F= punto ubicado encima del centro de la plataforma móvil.
 - h. P= punto ubicado en la punta del extrusor (tatuadora en nuestro caso).

2. Descripción del movimiento: La plataforma en la que se encontraría la tatuadora se mueve en el plano XY y cambia de altura en Z a través del movimiento independiente de las guías (punto C) en Z por las columnas, accionado este movimiento por un servomotor y una conexión con una correa dentada tipo "timing".
3. Entradas y salidas: En el problema directo las entradas son las acciones de estos motores, V1, V2 y V3 (V=voltaje) y la salida la posición del punto P, P (x, y, z). En el problema inverso es justo lo contrario.
4. El problema cinemático:
 - a. Calculamos grados de libertad con la ecuación de Grubler:

$$NGDL = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j fi$$

Ecuación 3-2-1. Grados de libertad.

λ = Grados de libertad del espacio de trabajo (3 en el plano, 6 en el espacio).

n = Número de eslabones (incluyendo la base).

j = Número de articulaciones.

fi = Grados de libertad de la articulación i .

Aplicando la ecuación obtenemos $NGDL=6(17-21-1) +21=-9$. Lo cual es incorrecto, para hacer que la fórmula funcione debemos tratar las barras paralelas como un solo eslabón por brazo. Por lo tanto, $NGDL=6(17-15-1) +15=3$. Estos 3 serían los x, y z antes mencionados. Cabe destacar que esta configuración no posee rotación de ningún tipo, así la plataforma móvil es siempre paralela a la plataforma fija. Por ello, para basarnos en esta resolución de mecanismo de carácter más sencilla, el grado de libertad no se integra como dependiente de los otros, sino que se hace totalmente independiente como otra entrada. Esta nueva entrada sería el ángulo de rotación respecto del plano central y el eje del brazo, lo denominaremos θ .

- b. Planteamiento geométrico (La resolución del problema se programará con Matlab):

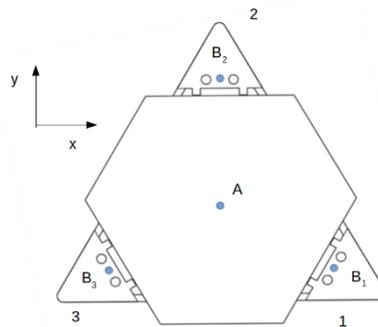


Figura 3-2-2. Base de impresora 3D y sistema de referencia B (origen en A).

"Aquí comienza la parte no extraída de la referencia, pero con ayuda de la información que hay en ella"

La resolución del problema inverso se puede ver el en apéndice 1 incluyendo la función de Matlab que resolvería las ecuaciones del problema inverso y que nos devolverían las alturas de las guías. Se consideró interesante plantear el problema directo (también planteado en Matlab) para poder ver la imprecisión que causaría una desviación de las distancias l_1 , l_2 y l_3 (alturas de las guías) y así, con los errores en los motores poder evaluar la imprecisión de posicionamiento de la máquina. Para realizar este problema directo necesitamos una ecuación extra, ya que tendríamos 4 incógnitas (los 4 grados de libertad) y 3 ecuaciones (los tres lazos cerrados). La ecuación surge de imponer la perpendicularidad con la superficie a tatuar o directamente imponer el ángulo a través del motor de la plataforma. Para resolver este problema directo necesitamos resolver un sistema de ecuaciones no lineales teniendo como incógnitas x_1 , y_1 y z_1 .

3.3 APLICACIÓN

Con el problema resuelto si se introduce una función a tatuar, como puede ser un círculo en plano, el procedimiento sería:

1. Partiendo de la función matemática en el espacio del círculo tenemos que convertirla a sus ecuaciones paramétricas para trabajar en una dimensión extra, el tiempo, desacoplando las coordenadas en $x(t)$, $y(t)$ y $z(t)$ para poder obtener así $l_1(t)$, $l_2(t)$ y $l_3(t)$. Además, con las funciones en el tiempo podemos modelizar la velocidad a la que queremos que se recorra esa función espacial.
2. Introducimos los datos de partida $x(t)$, $y(t)$ y $z(t)$, en este caso, en Matlab y obtenemos los datos de salida $l_1(t)$, $l_2(t)$ y $l_3(t)$

Ejemplo del círculo:

$$x(t) = x_0 + r \cdot \cos(\beta)$$

$$y(t) = y_0 + r \cdot \sin(\beta)$$

$$z(t) = z_0$$

Ecuaciones 3-3-1. Ecuaciones paramétricas del círculo.

definimos la velocidad con $\beta = v \cdot t$ [$0 \leq t \leq 2\pi/v$]

Se han metido todos los datos para poder trabajar con ellos en Matlab. (Ver figuras 3-2-5,6,7,8,9).

Con los datos de la tabla de la figura 4 y los parámetros requeridos de la impresora o máquina entraríamos en Matlab y obtenemos los $l_1(t)$, $l_2(t)$ y $l_3(t)$ en este caso con ángulo de ataque constante igual a 0.

Ecuación del círculo				Datos
t (s)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	v (mm/s)
0	-55	60	40	1,5
0,04231101	-55,0503331	61,585598	40	xo (mm)
0,08462202	-55,2011297	63,1648113	40	-80
0,12693304	-55,4517826	64,7312811	40	yo (mm)
0,16924405	-55,8012825	66,2786997	40	60
0,21155506	-56,2482221	67,8008361	40	zo (mm)
0,25386607	-56,7908017	69,2915614	40	40
0,29617709	-57,4268365	70,7448728	40	r (mm)
0,3384881	-58,1537656	72,1549184	40	25
0,38079911	-58,9686617	73,5160204	40	
0,42311012	-59,8682436	74,8226982	40	
0,46542113	-60,8488889	76,0696902	40	
0,50773215	-61,906649	77,2519753	40	
0,55004316	-63,0372647	78,3647927	40	
0,59235417	-64,2361833	79,4036616	40	
0,63466518	-65,4985773	80,3643988	40	
0,67697619	-66,8193633	81,2431357	40	
0,71928721	-68,1932231	82,0363341	40	

...

Figura 3-2-5. Tabla Excel.

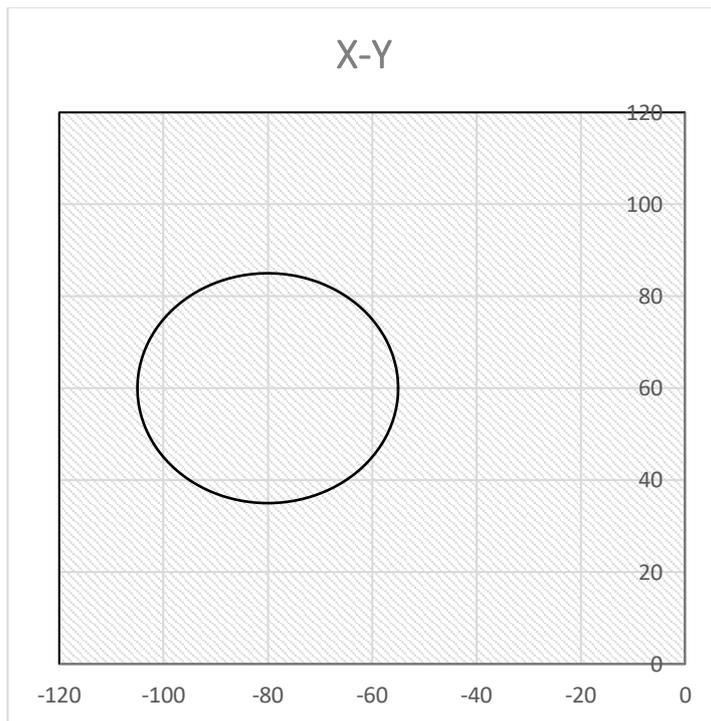


Figura 3-2-6. X-Y.

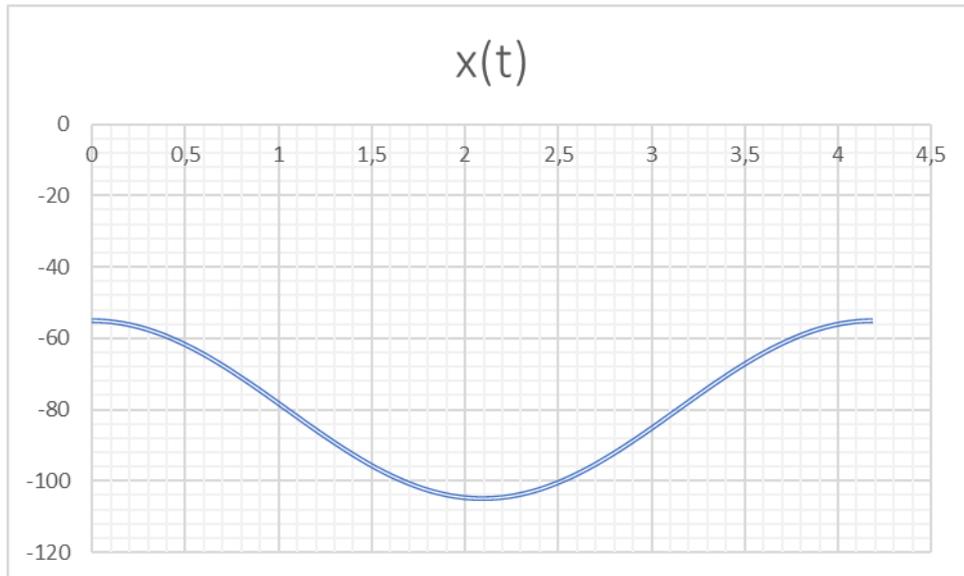


Figura 3-2-7. $x(t)$.

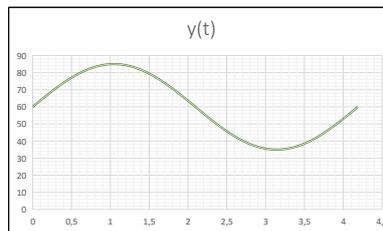


Figura 3-2-8. $y(t)$.

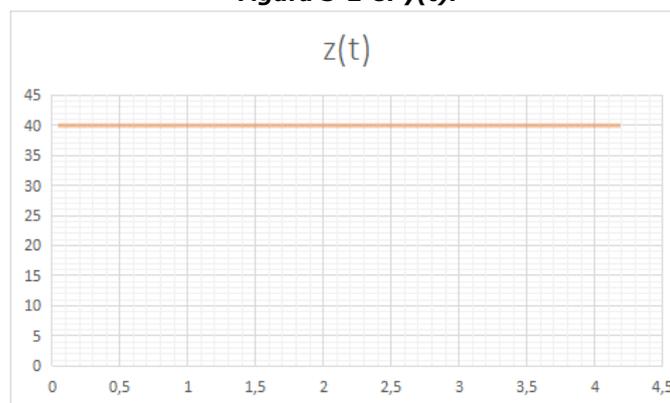


Figura 3-2-9. $z(t)$.

4 MONTAJE COMPLETO (PREDIMENSIONAMIENTO) Y FUNCIONAMIENTO

El primer paso del proyecto fue realizar un modelo de la máquina de tatuaje automatizado, para ello, se observaron varias referencias obtenidas por internet mencionadas en el apartado de referencias (Ver referencia 4). Basados en la idea general de lo que se quería construir, se realizó un modelo guiado por la intuición ingenieril, cuadrando todas las dimensiones para realizar un montaje con sentido, introduciendo secciones, materiales... pensando en las fuerzas que soportaría el sistema y otorgándole los grados de libertad necesarios para el libre movimiento de estos. El diseño de casi todas las piezas fue realizado desde cero con el programa Inventor, cogiendo algunas ideas de piezas parecidas y tomando otras de una librería virtual de CAD (Ver referencia 4) con algunas modificaciones personalizadas como cambios de escala, inclusión de piezas nuevas y modificación de partes.

Los resultados de este predimensionamiento se mostrarán en las siguientes figuras ampliadas en el apéndice 3 con una lista de las piezas realizadas:

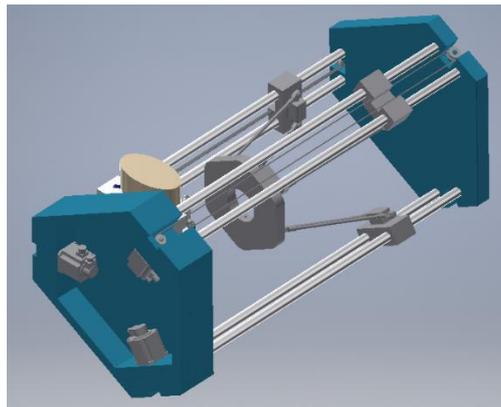


Figura 4-1. Montaje completo sin cabezal. Vista 1.

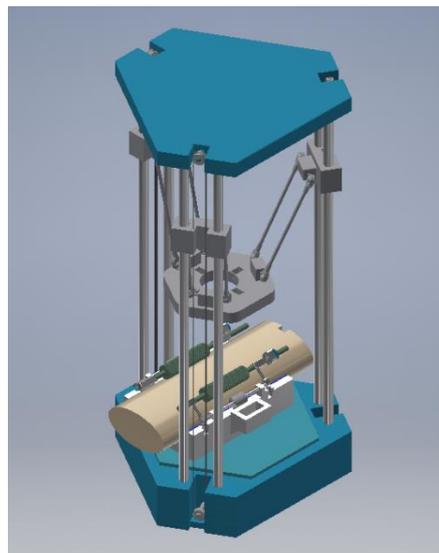


Figura 4-2. Montaje completo sin cabezal. Vista 2.

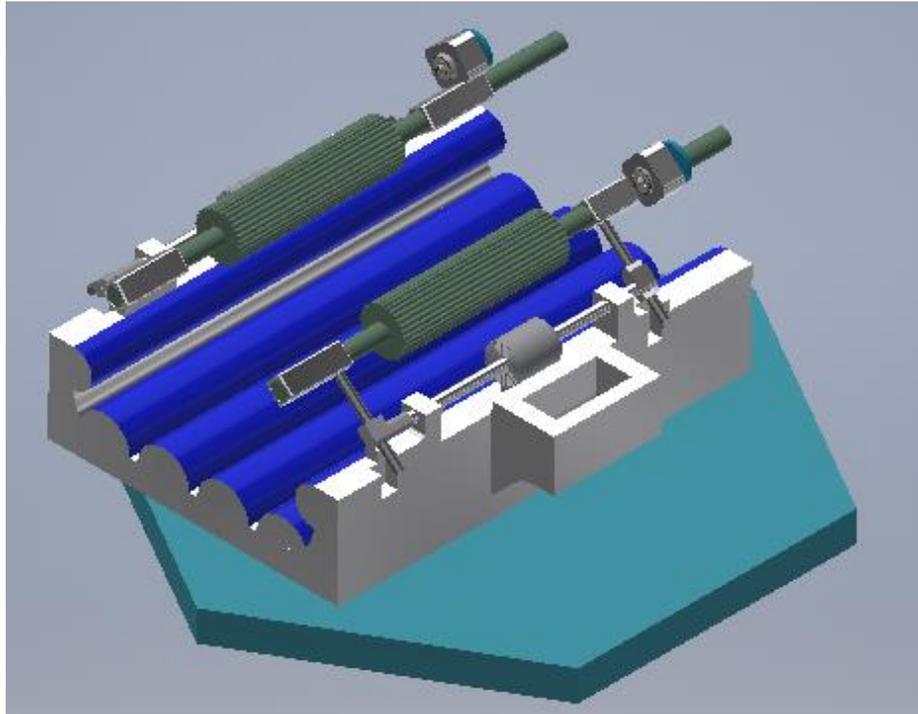


Figura 4-3. Apoyo del brazo. Vista 1.

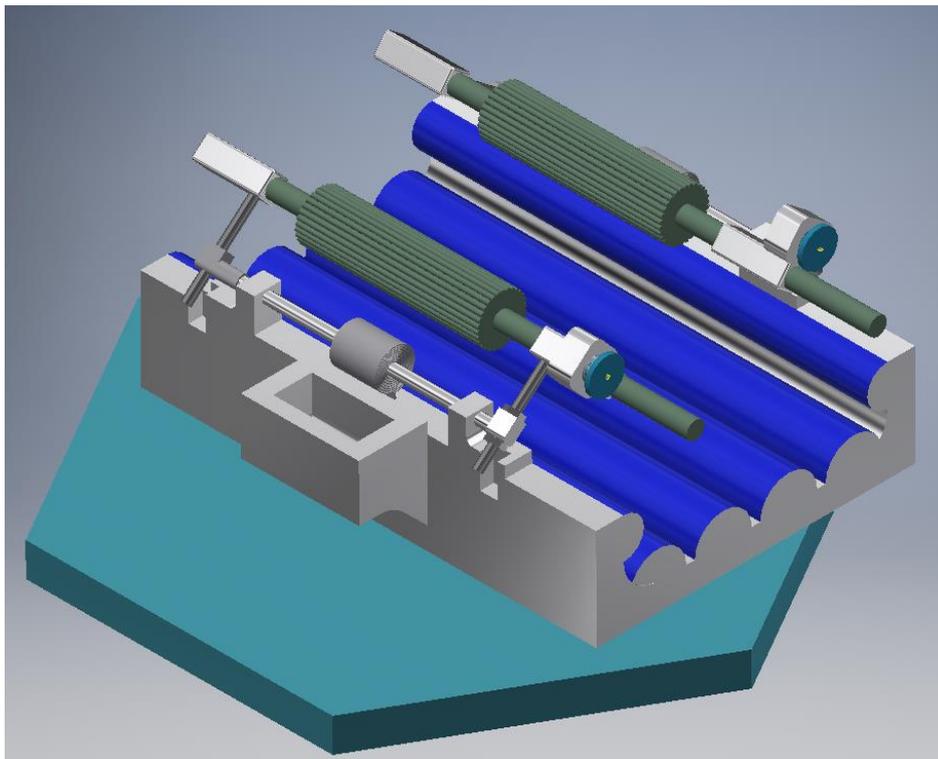


Figura 4-4. Apoyo del brazo. Vista 2.

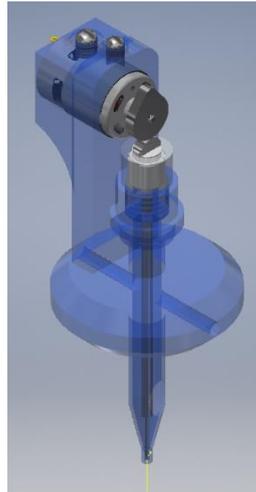


Figura 4-5. Cabezal con leva. Vista 1.

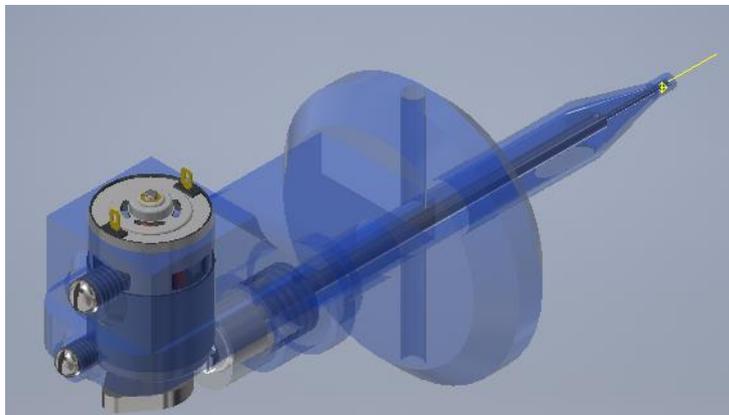


Figura 4-6. Cabezal con leva. Vista 2.

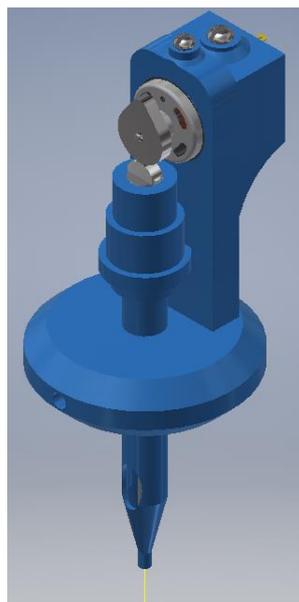


Figura 4-7. Cabezal con leva. Vista 1 sin transparencias.

En la figura 4-8 que se presenta debajo está explicado el organigrama de funcionamiento de la máquina, esto, en futuras ampliaciones, debería ser materializado como un programa/software que ejecutase o coordinase todos estos comandos.

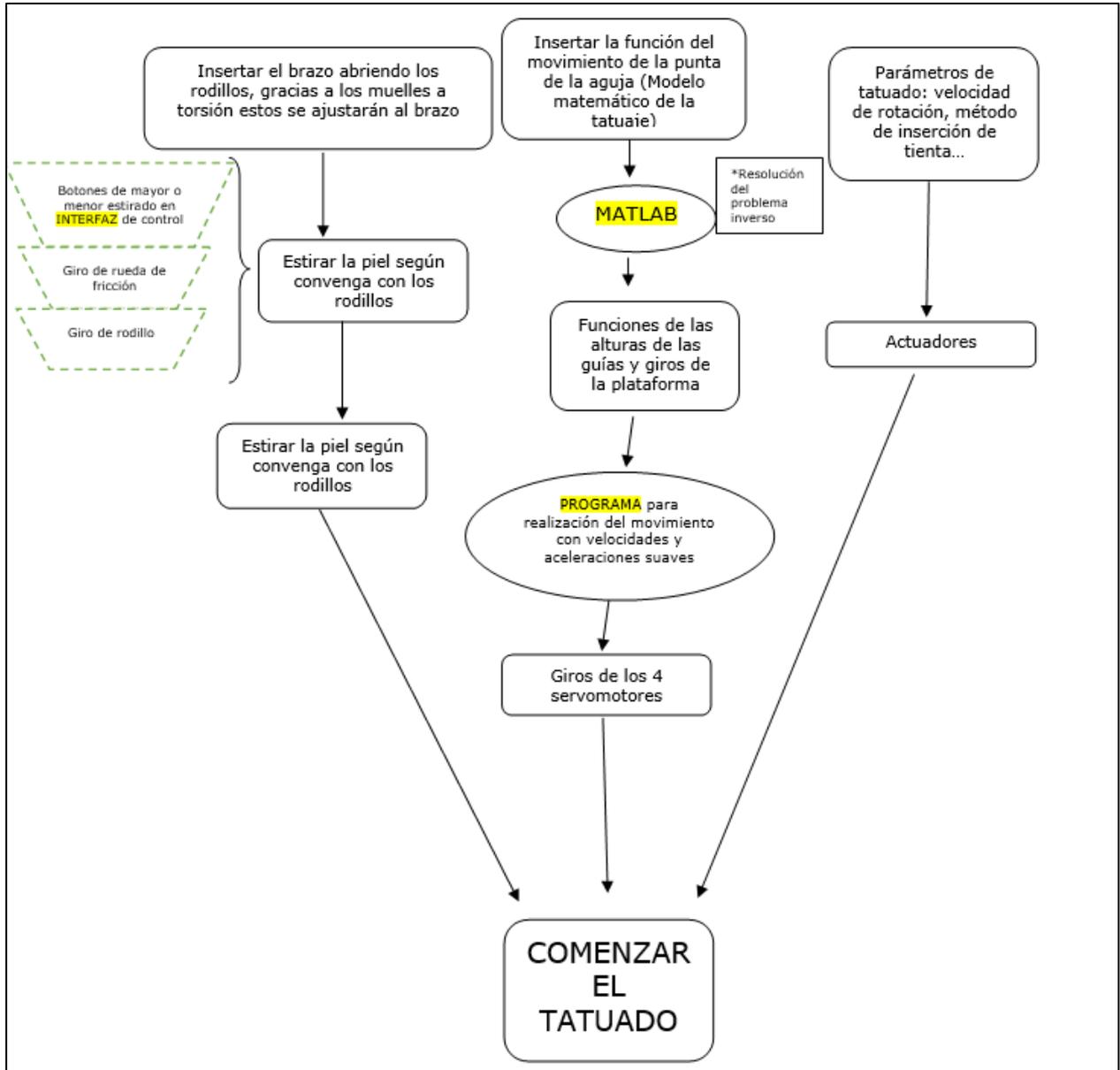


Figura 4-8. Organigrama de funcionamiento de la máquina.

A continuación de este predimensionamiento se realizaron estudios de mecanismos y partes específicas de la máquina lo cual llevó a una optimización o mejora de estas.

Los estudios realizados fueron:

- Cálculo y estudio de la estructura soportando su peso propio.
- Cálculo y modificación del mecanismo de leva del cabezal.
- Cálculo de muelles a torsión del apoyo del brazo.
- Cálculo de discos a fricción del apoyo del brazo.
- Cálculo de correa y engranajes del movimiento de las guías. (Este está realizado directamente en el modelo de inventor con los parámetros del programa obteniendo las distancias necesarias para dar una correa y unos engranajes factibles, realmente es un estudio más geométrico que mecánico con las opciones predeterminadas de características de la correa, ver figura 4-9)

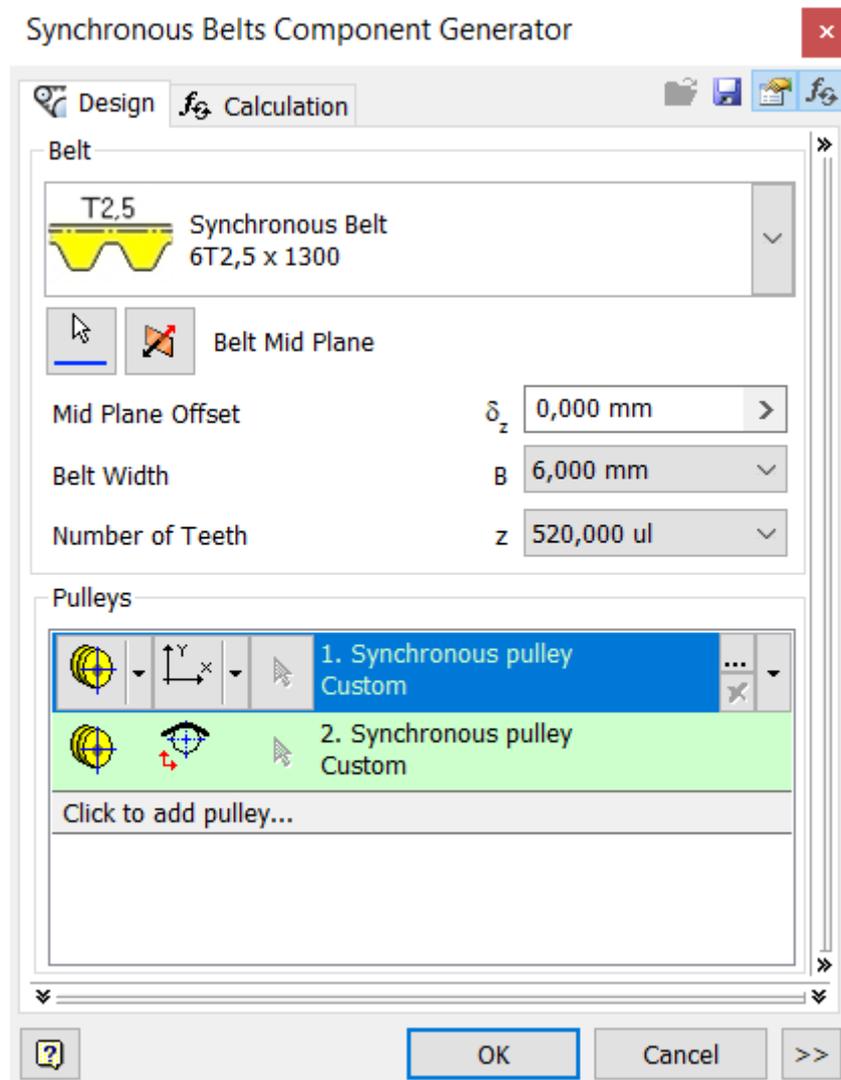


Figura 4-9. Engranajes y correa obtenidos en Inventor.

5 DISEÑO DE PLATAFORMA DE LA MÁQUINA DE TATUAR

5.1 DESCRIPCIÓN

Este apartado muestra el adaptador de la máquina de tatuar, si se llegara a adquirir una impresora 3D y modificarla, en el caso de que esta tuviera articulaciones esféricas, sustituiría al extrusor junto a su plataforma.

Contrariamente, si se decidiese construir de cero, este sería un posible diseño a utilizar.

En primer lugar, se apostó por un diseño que se muestra en la figura 5-1-1 pero durante el desarrollo del proyecto y siguiendo las directrices de lo que se conoce como "Design for manufacturing and assembly principles" (Ver referencia 5) (unas directrices para el diseño óptimo y adecuado de elementos a construir) se decidió optar por un rediseño mostrado en el apartado 5.2 en la figura 5-2-1. Esta decisión fue tomada por qué:

- El rango de movimiento de la articulación esférica se aumentaría.
- Se reduciría el número de piezas a ensamblar, consiguiendo un diseño de pieza única.

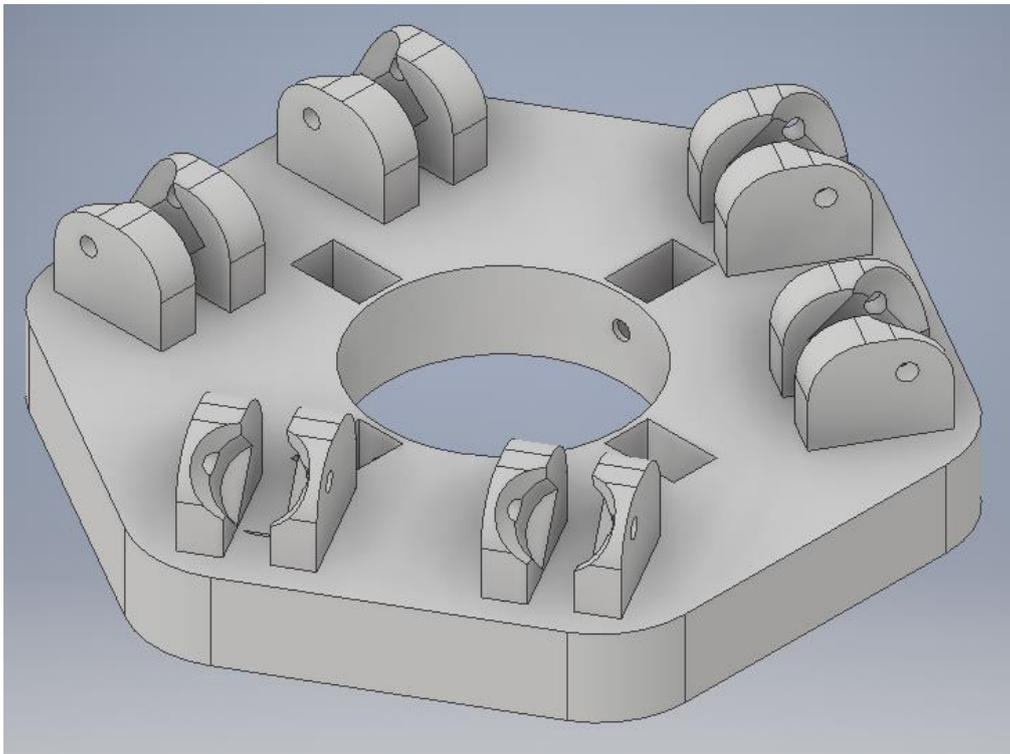


Figura 5-1-1. Antigua plataforma de acoplamiento.

Los principios del diseño para la fabricación y el montaje se pueden resumir en 8 puntos:

- Minimizar el número de componentes en el producto final.
- Usar componentes estandar comercialmente disponibles siempre que se pueda.
- Usar procedimientos comunes de montaje y fabricación para distintas partes y piezas en la línea de producción.
- Diseñar con tolerancias viables y factibles.
- Diseñar el producto para un montaje a prueba de errores.
- Utilizar diseño modular.
- Realizar productos que sean fácilmente empaquetables.
- Eliminar o reducir ajustes.

5.2 DISEÑO 3D FINAL

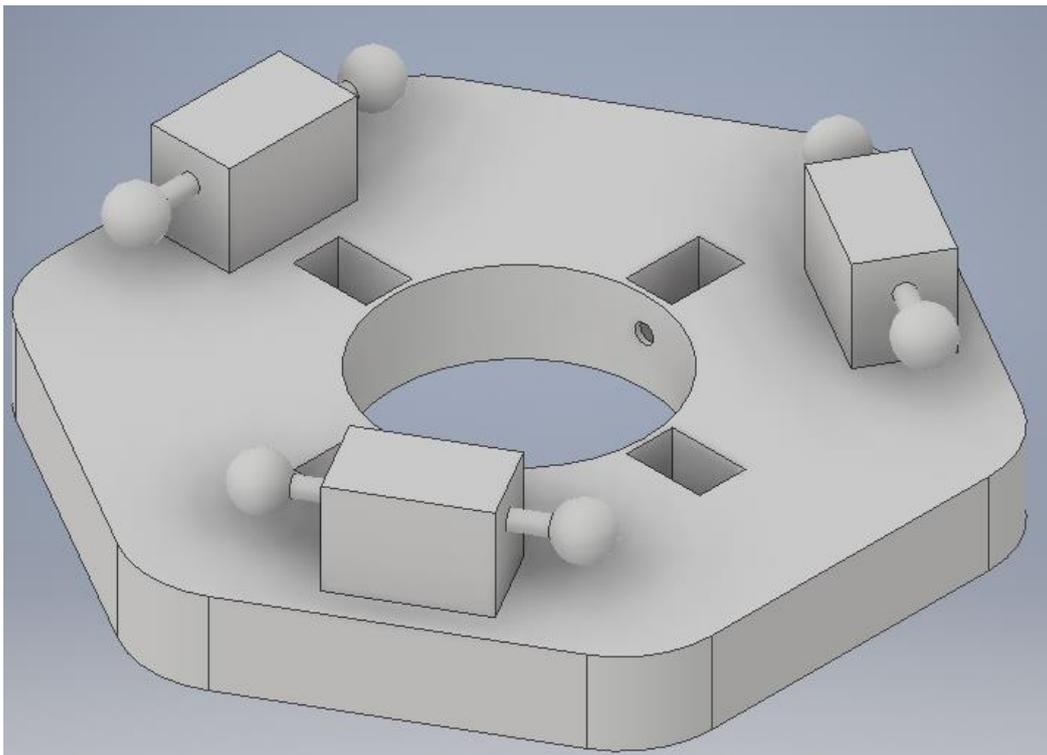


Figura 5-2-1. Nueva plataforma de acoplamiento.

6 ALTERNATIVA DE DISEÑO DE MÁQUINA DE TATUAR

6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Tras larga búsqueda y estudio del mecanismo que rige la máquina de tatuar rotativa y la física del tatuado se concluyó que los principios que sigue son estos:

- Se tiene como entrada principal el voltaje del motor implementado en la máquina. Este voltaje es variable, por lo tanto, lo que se puede variar es las rpm a las que el motor está funcionando. Para ello se han buscado motores usados en las máquinas de tatuar con el objetivo futuro (para la realización del software) de encontrar la relación de voltaje con las rpm y el par del motor. Con esto se puede saber si mantendría la velocidad constante según las variaciones en las solicitudes externas (en este caso, la entrada de la aguja de la piel y el peso propio de la máquina, mirar sección 8) y también comprobar las variaciones del par por la aplicación de estas variaciones.
- Esa rotación constante pasa a la excéntrica, en el diseño clásico, o a la leva, en la patente encontrada. Esta rotación se transmite por un mecanismo biela-manivela o derivado a una traslación vertical de la aguja guiada por el orificio en el que se encuentra retenida.
- Se añade un muelle al sistema para que el movimiento se realice con mayor suavidad.

Durante esta búsqueda se dio con una patente de una máquina de tatuajes que se consideró que podría ser mejor que la máquina convencional para esta aplicación, ya que esta reducía los elementos en juego en el mecanismo reduciendo las inercias. En los siguientes apartados se realiza un estudio y una comparativa de estas dos alternativas.

Respecto al diseño, ya que la plataforma (sección 5) es un elemento que se añadiría a una impresora 3D ya existente o sería un elemento construido de cero, se decidió que la máquina de tatuar se podría realizar bajo los mismos principios que se muestran en la sección 5.

En vez de, primero, hacer una plataforma interna circular acoplada en el agujero de la plataforma de la sección 5 y, segundo, en esta introducir una máquina de tatuar ya existente, se pensó en un diseño de un elemento que unificase todo. Este elemento posibilita una mayor estabilidad ya que rigidiza el conjunto al no tener que hacer 3 acoplamientos sucesivos (sustituye la secuencia plataforma externa a plataforma interna a máquina de tatuar por plataforma externa a elemento unificado) (Ver figura 6-1-1).

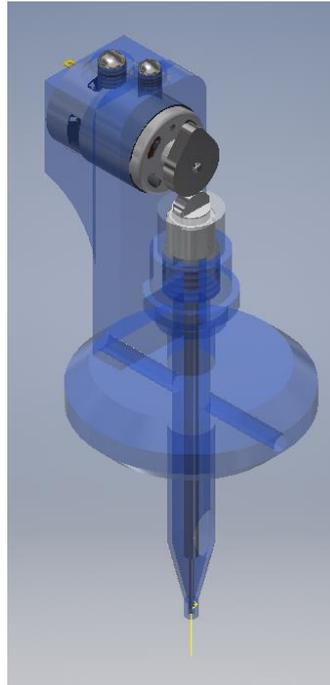


Figura 6-1-1. Prediseño de máquina de tatuar con mecanismo de leva, esqueleto unificado.

6.2 ESTUDIO DE PATENTE

Para la inclusión de esta patente se pidió permiso expreso de su uso a uno de los realizadores de la susodicha, este está reflejado en el apéndice 5 a través de las capturas de los emails intercambiados.

La patente en la que está inspirado el diseño es esta: (Ver figura 6-2-1 y referencia 6.1)

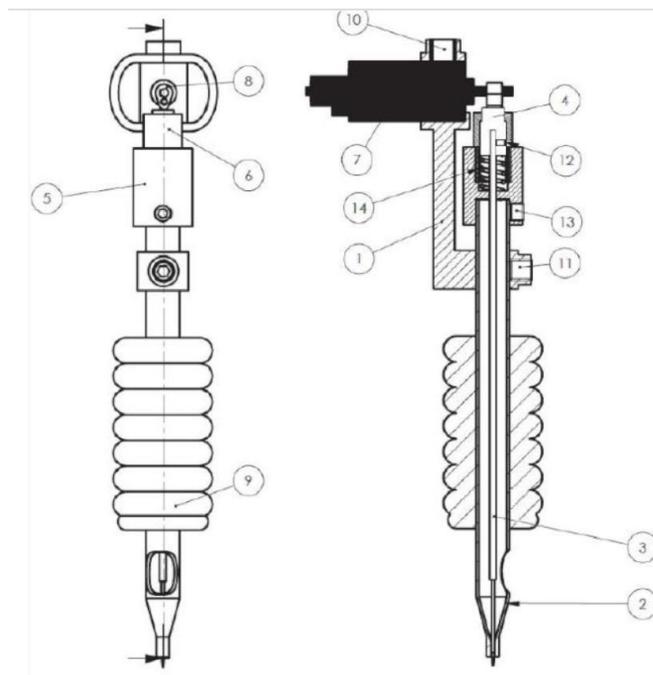


Figura 6-2-1. Modelo del prediseño para el estudio de los parámetros.

En el diseño se realizó un estudio en 2 etapas, primero se pre diseñó la máquina de tatuar con una leva cualquiera realizada en Inventor y se estudiaron los parámetros necesarios en base a ese prediseño y a continuación se optó por la mejora de la leva optando por una de ascenso y descenso cicloidal con programa de desplazamientos ADRADR (ascenso-descenso-reposo- ascenso-descenso-reposo) en un ciclo (giro completo de la leva). Se hace doble para que la leva ya se encuentre equilibrada.

Estudio de los parámetros en base al prediseño (Ver figura 6-2-2) (la leva es realmente dos circunferencias de radios distintos unidas por las tangentes al contacto que dan un diagrama de posición, velocidades y aceleraciones que podemos observar en la figura 6-2-3):

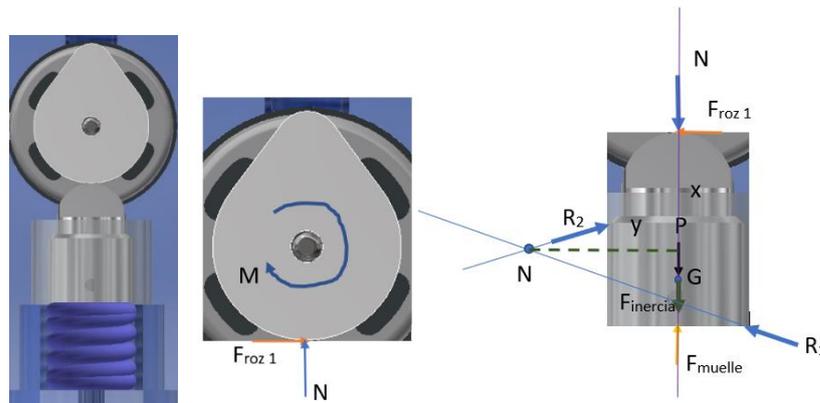


Figura 6-2-2. Modelo del prediseño para el estudio de los parámetros y diagramas de sólido libre.

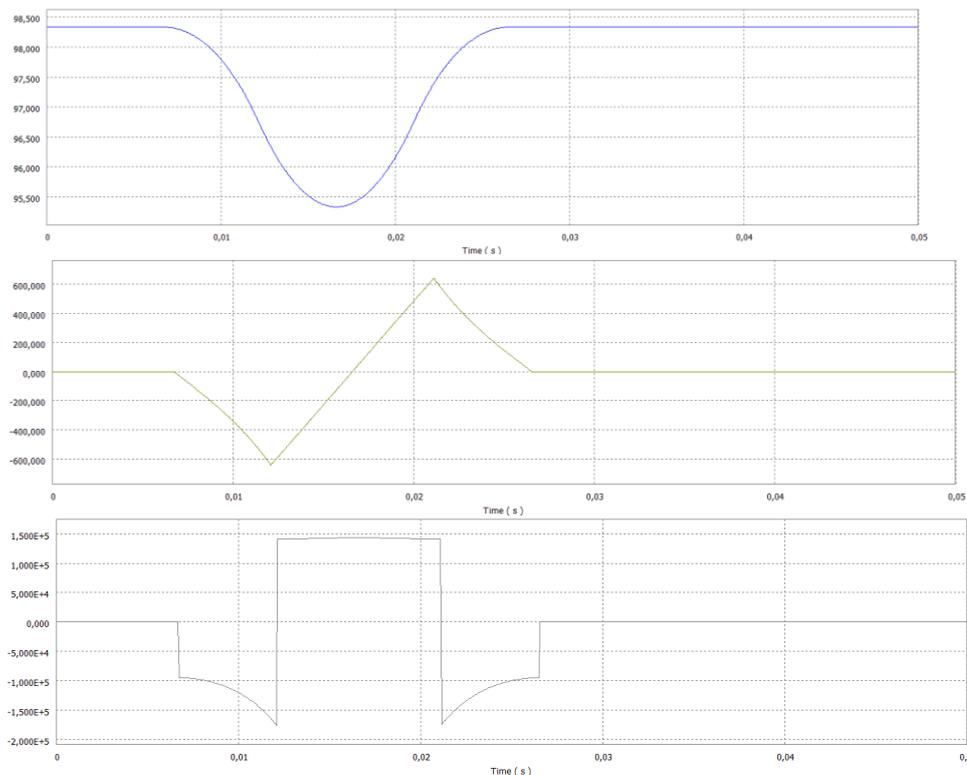


Figura 6-2-3. Diagramas de posición (mm), velocidades (mm/s) y aceleraciones (mm/s²) del seguidor en el prediseño.

Parámetros para el diseño de la leva:

- Altura máxima: 3 mm (Ver referencia 6.2). 2 mm es la distancia máxima a la que la aguja debe entrar para depositar la tinta por debajo de la epidermis en el proceso de tatuado. Se eligen 3 para tener posibilidad de maniobra.
- Programa de desplazamientos: explicado al principio de la sección.
- Radio base para que no haya apuntamiento (Al realizarlo en inventor si el diseño sale factible es que no hay apuntamiento).
- La fuerza de inercia máxima tiene que ser de 4 Newton como máximo intentando que se encuentre entre 2 y 1 Newton (Ver apéndice 2).

Como se puede observar, la leva del prediseño genera un diagrama de posición y velocidades continuo pero un diagrama de aceleraciones discontinuo, lo que hace que no se cumpla la ley fundamental del diseño de levas. Esto se traduce a la aparición de vibraciones en la estructura que darían lugar a imprecisiones. Cuando uno de los principales objetivos del proyecto es la precisión de la máquina y al estar tratando un tema como el tatuado, se decidió optimizar el diseño. Como lo que se buscaba eran, primero, altas aceleraciones para generar la inercia necesaria en la pequeña masa del seguidor, así, cumpliendo con las fuerzas obtenidas en el ensayo encontrado en internet (Ver apéndice 2) y, segundo, continuidad de los diagramas, se optó por diseñar una leva de rotación con seguidor de forma cualquiera con cierre de muelle y con diagrama de desplazamientos ascenso y descenso cicloidal:

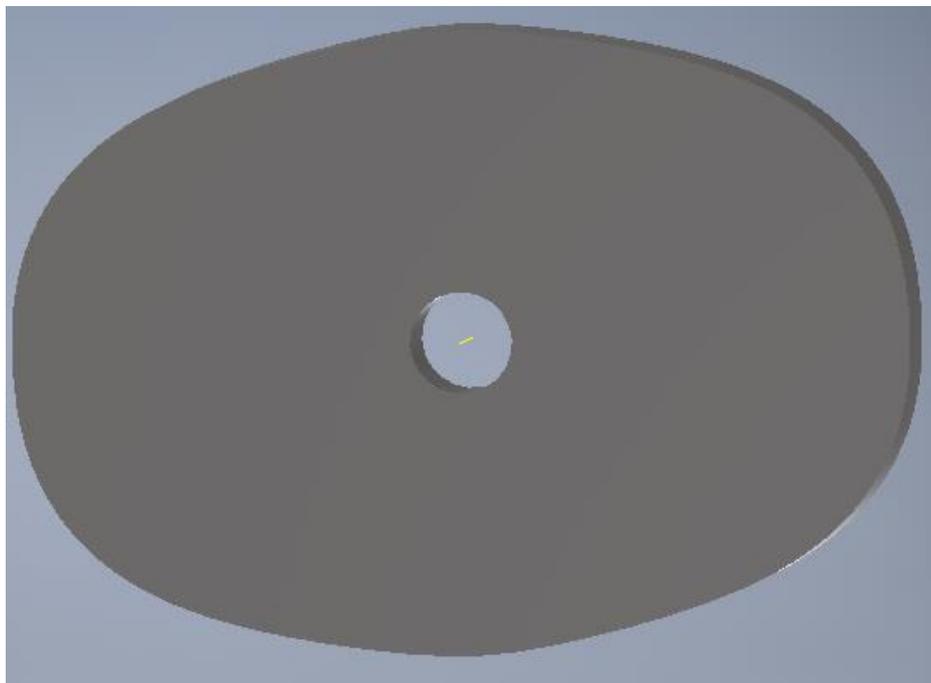


Figura 6-2-2. Modelo de leva optimizada.

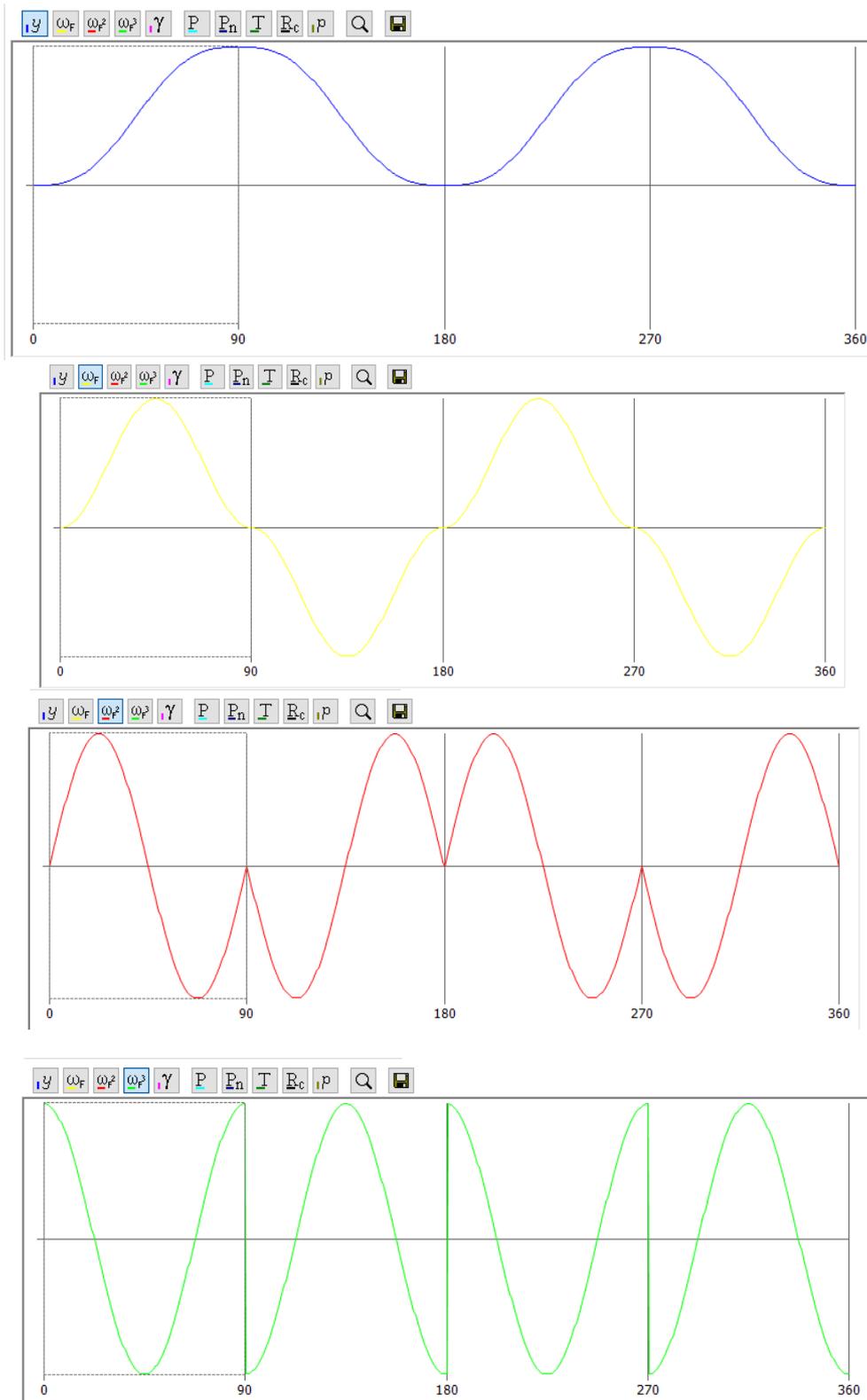


Figura 6-2-3. Diagramas de posición (mm), velocidades (mm/s), aceleraciones (mm/s²) y sobre aceleraciones (mm/s³) de la leva cicloidal.

Parámetros para el diseño del muelle:

- Masa del conjunto seguidor + camisa aguja + aguja=0.004kg (acero)+ 0.002kg (aluminio)+ 0.0005kg (acero inoxidable) = 6.5 g.
- Fuerza de inercia del conjunto seguidor, aguja...: Aceleración del seguidor máxima=4N (comentado anteriormente) /0.0065kg=616.38m/s², con esto podemos obtener que la velocidad de rotación máxima para la leva a través del software de diseño de levas de Inventor: $W_{max}=2712$ rpm.

Esta velocidad de rotación es excesiva ya que la frecuencia de las máquinas de tatuado suele rondar los 120 Hz (Ver referencia 5.3) que corresponde a una W de 754 rpm, para la masa del seguidor que se ha prediseñado la fuerza ejercida sería de 0.0065kg*47.628m/s²=0.31N, insuficiente para la penetración de la aguja, por lo que se requeriría de un seguidor más pesado. Este proceso de optimización se estudiará en futuras ampliaciones del proyecto. Para el diseño del muelle se tomará la W que da lugar a una fuerza de 1 N que es 1350 rpm que da una aceleración máxima de 152.681m/s².

- Fuerza del muelle a desplazamiento 0.
- K del muelle.
- Rozamiento de la superficie del seguidor y reacciones con las paredes del cilindro: acero-acero sin lubricación, $f=0.36$ (considerando el peor caso) (Ver referencia 8.2).
- Rozamiento de leva seguidor: acero-acero sin lubricación, $f=0.36$ (considerando el peor caso).
- Por geometría, el ángulo que forman las reacciones en el seguidor= $\arctg(f)$ y conociendo el diámetro y la longitud del seguidor obtenemos: $y=9.963$ mm, $x=1.868$ mm.

Cálculo en el límite para el muelle, es decir, considerando que en las ecuaciones de la dinámica del seguidor la normal en el contacto se hace cero.

6.2.1 Cálculo del muelle.

Para estos cálculos y obtener un motor que cumpla de sobra los requerimientos se mayorarán las fuerzas variables por un factor de seguridad de 1.5 y las permanentes de 1.35.

Con los parámetros mencionados para el muelle planteamos las ecuaciones de la dinámica:

- Equilibrio de leva (Se considera que la leva cicloidal doble esta equilibrada y que está sometida a una rotación constante por lo que el equilibrio de momentos es =0):
 - Sumatorio de Momentos en el centro:

$$fN * s(\theta) = M$$

Ecuación 6-2-1-1.

- Equilibrio del seguidor (La posición del punto N se obtiene por geometría):
 - Sumatorio de Momentos en N:

$$(N + P + Finercia) * y = (fN + Fmuelle) * x$$

Haciendo $N=0$ y siendo l_0 la distancia que representa el apriete inicial del muelle y l_i la longitud sin deformar del muelle.

$$(P + Finercia max) * y/x = K * (l_i + s(\theta)_{acel max} - l_0) = Fmuelle max$$

Ecuación 6-2-1-2.

De la ecuación 6-2-1-2 se obtiene que $Fmuelle max = (1.35 * 0.0065kg * 9.81N/kg + 1.5 * 0.0065kg * 152.681m/s^2) * 9.963mm/1.868mm = 8.4 N$ por lo tanto podemos diseñar el muelle tomando como longitud inicial sin deformar el doble de la longitud en el punto de aceleración 0 y para asegurar el contacto hacemos que $Fmuelle inicial = K * l_0 = Fmuelle max$. Tomando l_0 del modelo de inventor como el hueco que hay para alojar el muelle cuando $s(\theta)=0$, $l_0=10mm$. Obtenemos que $K=840N/m$.

6.3 COMPARACIÓN DE MECANISMOS

Se simulan los dos mecanismos con el mismo muelle ($K=840N/m$), la misma velocidad de rotación del motor ($W=1350rpm$) y el mismo rozamiento. Se compara el diseño clásico de máquina de tatuar rotativa (Ver figura 6-3-1) que se basa en un mecanismo de excéntrica con barra flexible (simulado en este caso con barra rígida más muelle, para mantener la geometría del diseño propuesto) y la patente estudiada en la sección anterior.

Las diferencias principales son:

- Al optar por una leva doble obtenemos una actuación doble para la misma velocidad de rotación por lo que se podrían optar por motores más pequeños o de menores requisitos.
- Al contener menos elementos en la transmisión del mecanismo seleccionado hay menos inercias influyentes que puedan generar inestabilidades o vibraciones que afecten a la estructura.
- El cierre de cadena del mecanismo clásico es mejor por la continuidad de los materiales, pero el cierre de fuerza del mecanismo de leva basado en un muelle, si está bien diseñado, no tendría que tener ningún problema.
- Al ser una trayectoria sencilla la generación de funciones y trayectorias de los mecanismos de pares inferiores no juega un papel importante.
- Los desplazamientos son pequeños por lo que no da pie a la comparativa de que los mecanismos de pares inferiores pueden conseguir desplazamientos mayores.
- Al elegir un diagrama de leva cicloidal, la continuidad de los diagramas de desplazamientos, velocidades y aceleraciones se cumple en los dos casos.
- Por último, las aceleraciones obtenidas son las que se ven en la figura 6-3-1. El valor máximo es muy pequeño como para llegar a 1N por lo que requeriría un motor de mayor potencia con mayor velocidad angular comparado con la configuración de la leva.

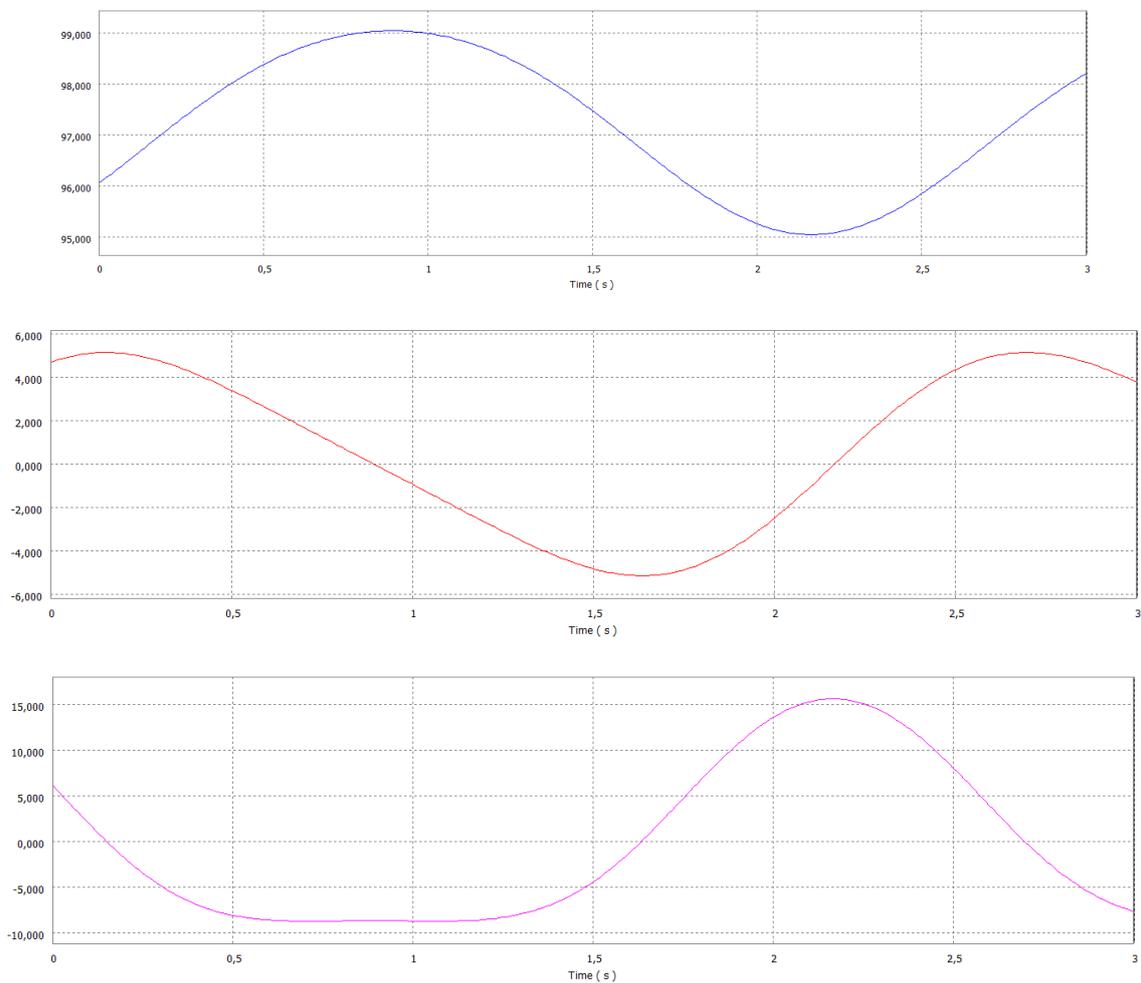


Figura 6-3-1. Diseño clásico y diagramas posición (mm), velocidades (mm/s) y aceleraciones (mm/s²).

7 DISEÑO DE AGARRE PARA EL BRAZO

7.1 DESCRIPCIÓN

Función: servir de apoyo para el brazo y como plano de referencia para el movimiento del robot delta.

Componentes: Base hexagonal para acoplarla a la base de la impresora 3D, depósito para la tinta en caso de aplicar esta por un proceso de untado de la aguja, almohadillas de gel representadas en azul oscuro para el confort del apoyo del brazo y mecanismo de estirado de piel estudiado en los próximos apartados, compuesto por barras de aluminio, un rodillo de goma, discos de fricción, un motor eléctrico ligero y un muelle a torsión.

Funcionamiento: Meter el brazo abriendo el mecanismo de estirado con los muelles a torsión, regular el brazo mecánico con las tuercas (Ver figura 7-1-1) y activar el estirado en la interfaz de control de la máquina lo que sea necesario (se tendría que desarrollar esta opción dentro del software).

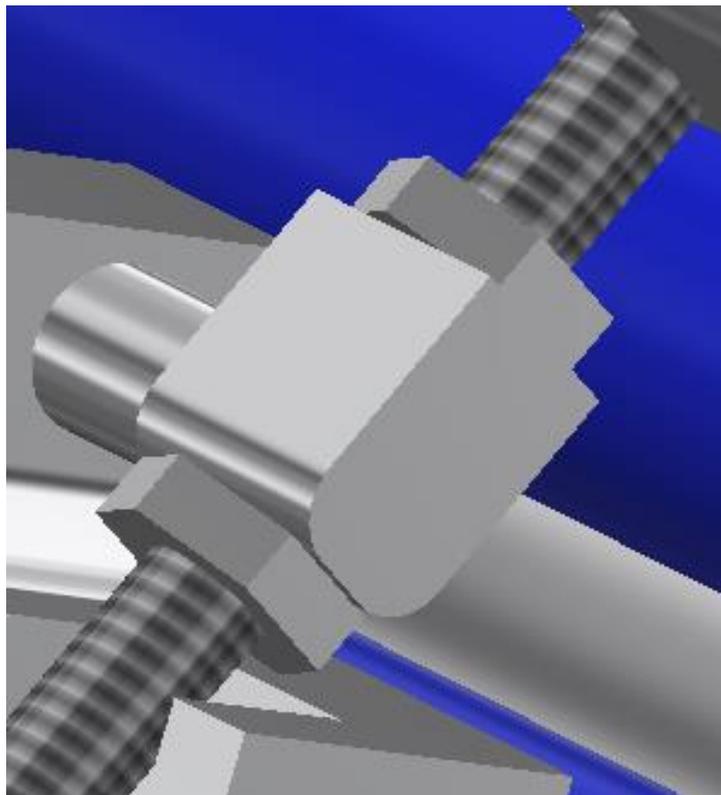


Figura 7-1-1. Regulación con tuercas.

7.2 DISEÑO 3D

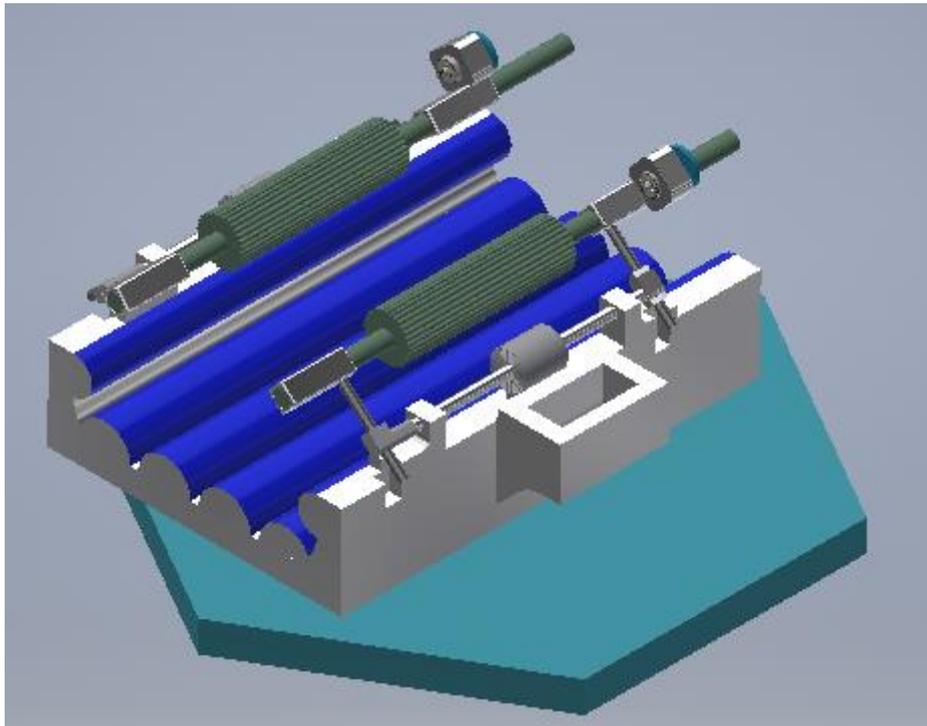


Figura 7-2-1. Apoyo del brazo. Vista 1.

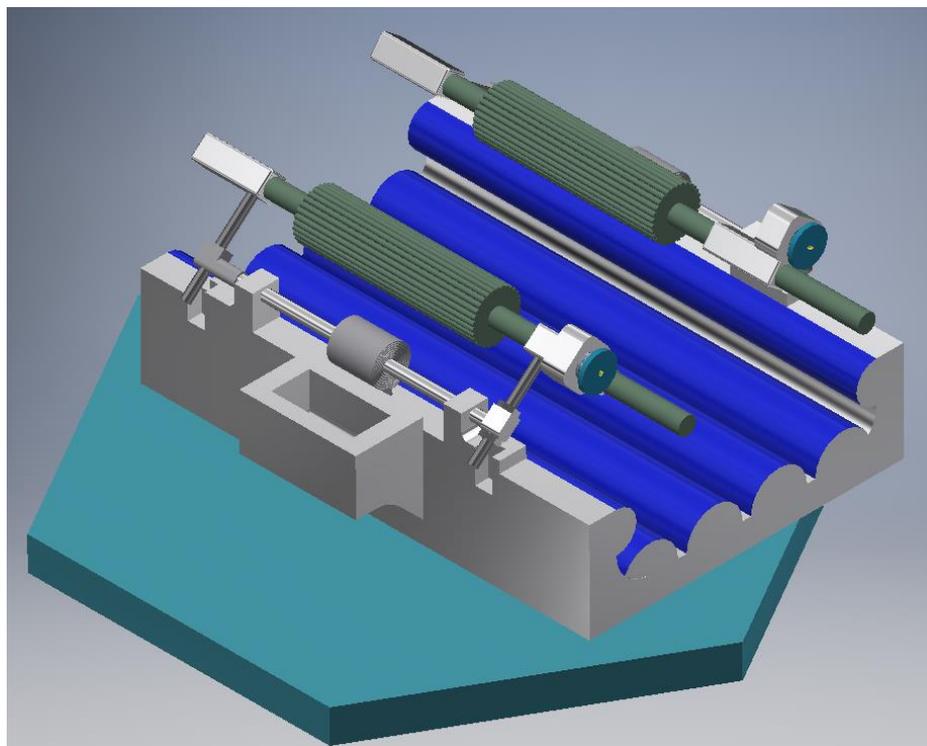


Figura 7-2-2. Apoyo del brazo. Vista 2.

7.3 DEFINICIÓN DEL MUELLE A TORSIÓN

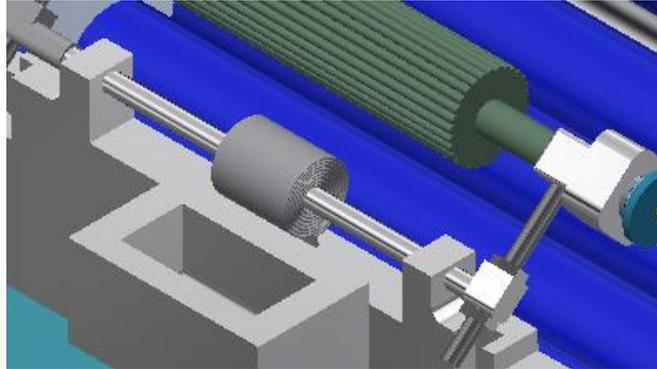


Figura 7-3-1. Localización del muelle a torsión.

Dentro de la tipología de muelles a torsión se ha optado por el de tipo espiral por la localización de este dentro del mecanismo y el trabajo a desempeñar. El extremo inferior o externo del muelle irá anclado a el soporte y el interior enganchado a la barra. Su función será realizar un apriete del rodillo para estirar la piel contra el brazo.

Para su cálculo hay que tener varios factores en cuenta:

- Se requiere que haya algo más de recorrido en el muelle para que se pueda regular para distintos brazos y para poder meter el brazo. Recorrido máximo (Ángulos obtenidos calcando los ejes en un papel en la pantalla del ordenador con la imagen a la misma escala) = 0° a 102° . El brazo de mayor tamaño que podrá albergar es para un ángulo de 84° que corresponde con un brazo de alrededor de 65 mm de altura apoyado (Medida tomada del modelo en Inventor).

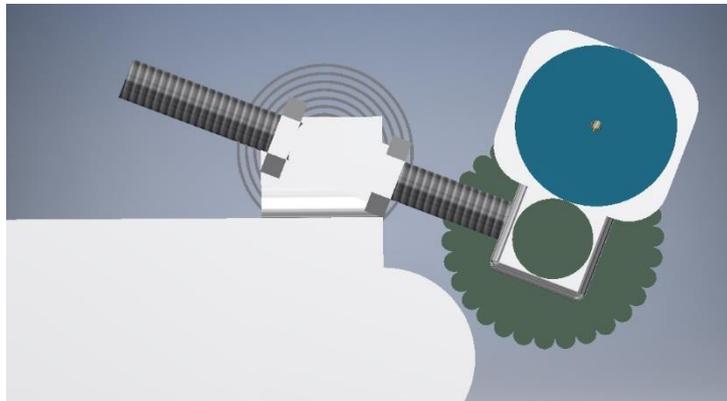


Figura 7-3-2. Posición de 0° .

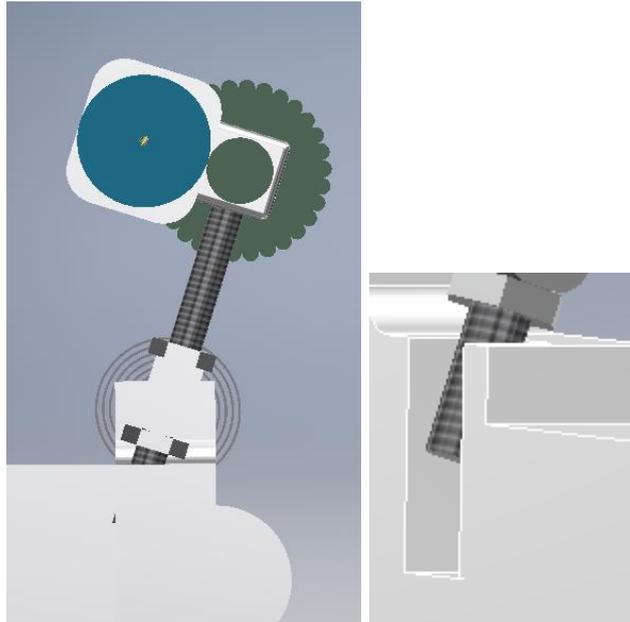


Figura 7-3-3. Posición de ángulo máximo.

- Se requiere que, con el brazo colocado en el soporte, el muelle tiene que estar en tensión y generando un momento que apriete el brazo (Factor de diseño principal).
 - Calcularemos para la posición útil máxima, 84°.
 - En el apartado siguiente se demostrará que la fuerza necesaria para estirar la piel es de alrededor de 1.5 kg fuerza.
 - Para aportar esta fuerza (que se consigue por rozamiento) necesitamos una normal que la asegure. La normal será el momento torsor necesario del muelle por la distancia del eje de giro al eje del rodillo.
 - El coeficiente de rozamiento será el relativo a goma piel (Lo suponemos 0.8 ya que goma sobre terreno firme es 0.4-0.6, ver referencia 8.2)
 - Poniéndonos en la peor situación (dentro de la distancia regulable, la más pequeña=19.8mm) calculamos que el momento torsor necesario es (Con coeficiente de seguridad de 1.35 arbitrario) =

$$N * R * CS = F_{roz} * R * CS / f = 1.5KgF * 9.81N/Kg * 19.8mm * 1.35/0.8 =$$

$$314.66 \text{ Nmm}$$

- El espacio físico que hay para la colocación del muelle: (Medidas tomadas del modelo de Inventor) Diámetro interior=5mm (A en la figura 7-4-4), Diámetro exterior máximo=19mm (OD_F en la figura 7-4-4).

Para comprobar la tensión supondremos la situación peor, esta será: Mayor par posible, siendo este el momento en el que se está estirando para meter el brazo dando lugar al recorrido máximo del muelle (102°).

El cálculo se basará en un artículo encontrado en internet que se puede ver en el apéndice 4. (Ver referencias 7.1 y 7.3)

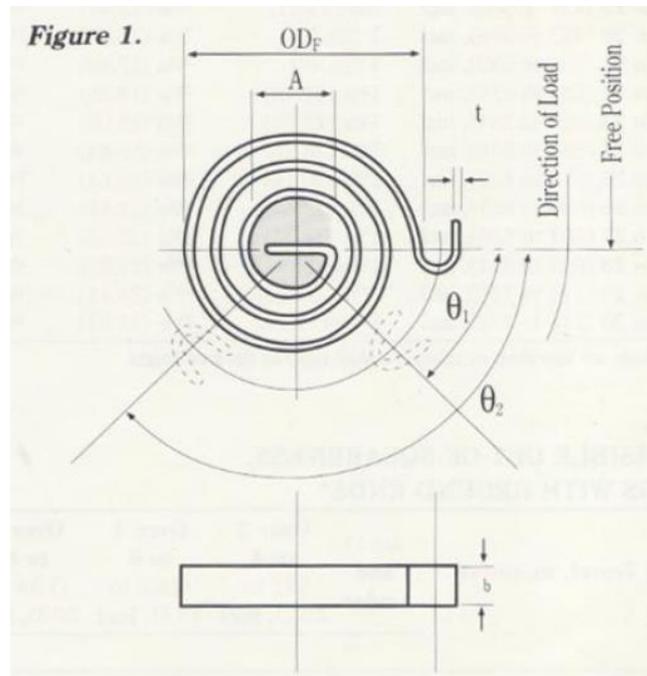


Figura 7-3-4. Diseño del muelle a torsión.

$$(1) \quad M = \frac{\pi E b t^3 \theta}{6L} \text{ lb.} \cdot \text{in (N} \cdot \text{mm)}$$

where

E = Modulus of elasticity, psi (MPa)

θ = Angular deflection in revolutions

L = Length of active material, in. (mm)

M = Moment or torque, lb. • in (N • mm)

b = Material width, in. (mm)

t = Material thickness, in. (mm)

$$(2) \quad S = \frac{6M}{bt^2} \text{ psi (MPa)}$$

$$OD_F = \frac{2L}{\pi \left(\frac{\sqrt{A^2 + 1.27Lt} - A}{2t} - \theta \right)} - A \text{ in. (mm)}$$

Figura 7-3-5. Fórmulas del par, de la tensión y del diámetro exterior mínimo del muelle a torsión.

Según lo leído en la referencia antes mencionada, la tensión (S) del muelle suele que estar entre 1210-1380 MPa dependiendo del material.

Ejemplo de diseño:

Con todos los parámetros mencionados y seleccionando un muelle de, por ejemplo, acero inoxidable ASTM A 313 de $E=193000$ MPa y $S=862-2241$ MPa \rightarrow 1210 MPa (límite mínimo de lo mencionado en el párrafo anterior). Se obtiene:

- $bt^2 = 314.66Nmm * 6/1210N/mm^2 = 1.56mm^3$
- Tomando $b=10mm$ (valor arbitrario), $t=0.4mm$.
- Con estos datos obtenemos de la ecuación 1 ($\Theta=84^\circ/360^\circ=0.2333$ rev) una $L=48mm$ (No válida, demasiado pequeña).
- Siendo $A=20$ mm con la tercera ecuación obtendríamos $OD_F=-18.8mm$ (negativo, no válido).

Habría que seguir iterando hasta dar con un resultado que satisfaga las necesidades estipuladas pero se ha querido mostrar el proceso más que el resultado final.

7.4 DEFINICIÓN DE DISCOS A FRICCIÓN

Para la realización de este apartado se han tomado datos de la referencia 8.

Las ventajas de usar este mecanismo son:

- Construcciones sencillas.
- Pueden trabajar eficientemente hasta con relaciones de transmisión de diez, sin embargo, no trabajan bien con relaciones mayores.
- Trabajo silencioso.
- Las potencias que transmiten van desde aparatos pequeños hasta 300 kW.

Los inconvenientes, en cambio, son:

- Presiones más altas sobre el eje y los cojinetes.
 - Fuerzas en el caso de estudio de magnitudes pequeñas y uso de materiales rígidos.
- Relación de transmisión no constante.
 - Trabajo cuasi estático y generalmente en parado.
- El rendimiento de las transmisiones por fricción oscila entre 0.95 a 0.96 (pérdidas en calor).
 - No se realiza trabajo continuo.
- Para disminuir las pérdidas y aumentar el rendimiento es conveniente aumentar los diámetros de las ruedas, y emplear mecanismos que regulan automáticamente el esfuerzo de apriete en función de la fuerza a transmitir.
 - Fuerzas en el caso de estudio de magnitudes pequeñas y uso de materiales rígidos.

A continuación, se muestra en las figuras 7-4-1, 7-4-2 el emplazamiento del mecanismo y el diagrama de sólido libre. Los parámetros a determinar son:

- Par resistente= el proceso de deducción del par necesario se realizó de la siguiente manera: debido a la nula información en internet respecto a la fuerza necesaria para estirar la piel con los dedos se decidió aproximar el valor necesario por otro método. Se cogieron dos pesos caseros, uno para determinar el peso de una persona (rango de medida de 0 a 150 kg) y otro para pesar alimentos (rango de medida de 0 a 5 kg). Con el primero se aplicó la fuerza máxima posible con cada uno de los dedos de la mano y se determinó que esta se encontraba entre 5 y 8 kg fuerza. Con el segundo se aplicó la fuerza que se suponía necesaria para estirar la piel y se determinó que se podría encontrar entre 400 y 700 gramos fuerza. A fin de elegir un motor que pueda proporcionar mayor fuerza de la necesaria y pueda ser regulado en función de la piel se decidió diseñar el mecanismo para una fuerza tangencial a el cilindro nervado verde (Ver figura 7-4-1) de 1.5 kg fuerza.
- Par motor= característica para seleccionar el motor.
- Potencia necesaria del motor= característica para seleccionar el motor.
- Fuerza de cierre.

Las ecuaciones de cálculo serían:

- $T_{resis} = 1.5 \text{ kgF} * 10 \text{ N/kgF} * 0.01 \text{ m} = 0.15 \text{ Nm}$
- Consideramos el momento de inercia de la dinámica 0 ya que el movimiento será corto, cuasi estático y discontinuo.
- $F_{roz} = T_{resis} / 0.004 \text{ m} = 37.5 \text{ N}$.
- $F_{cierre} = F_{roz} / f \rightarrow$ La f es el coeficiente de rozamiento dinámico de los materiales de las ruedas en contacto (en este caso: goma-aluminio= 0.76, ver referencia 8.2). $F_{cierre}=49.34\text{N}$. Esta fuerza se conseguirá por apriete en el contacto de una rueda contra la otra (geoméricamente, haciendo que la distancia entre centros sea un poco menor a la suma de radios).
- $T_{motor} = F_{roz} * 0.008 \text{ m} = 0.3 \text{ Nm}$.
- $P_{motor} = T_{motor} * w * CS = 0.405 \text{ W}$. Siendo CS un coeficiente de seguridad de 1.35 arbitrario (Para asegurar el movimiento) y w la velocidad angular a la que queríamos realizar la operación ($w=8\text{mm/s}/8\text{mm}=1 \text{ rad/s}$), con el valor de esta potencia y la velocidad se iría a un catálogo de motores y se elegiría el que aporte las características buscadas. Por ejemplo: Ver figura 7-4-3.

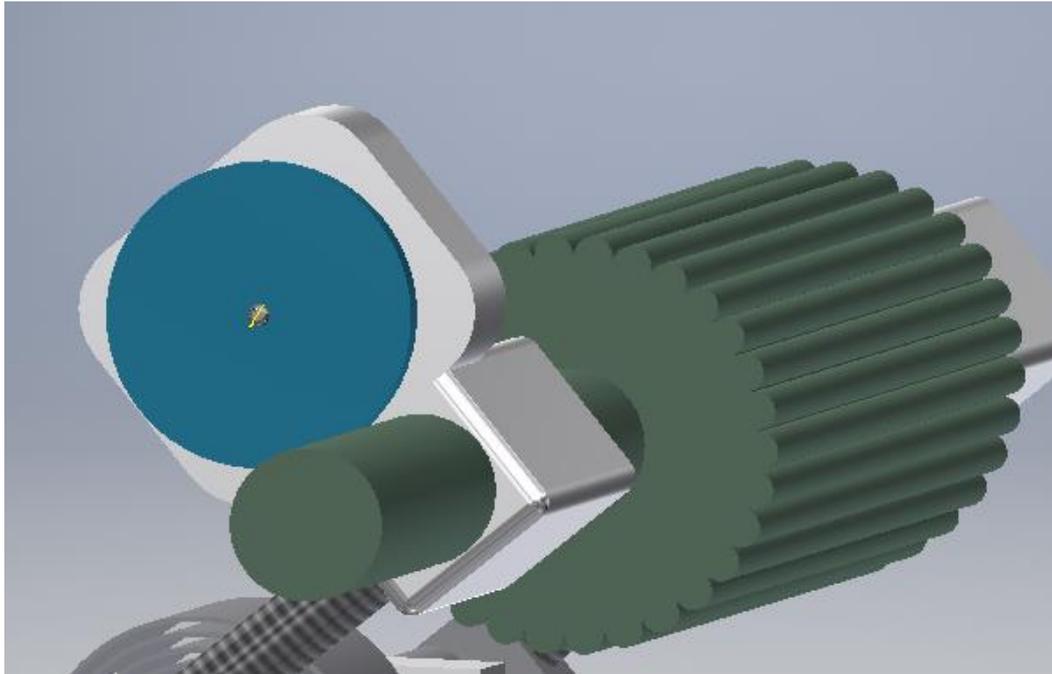


Figura 7-4-1. Localización del mecanismo.

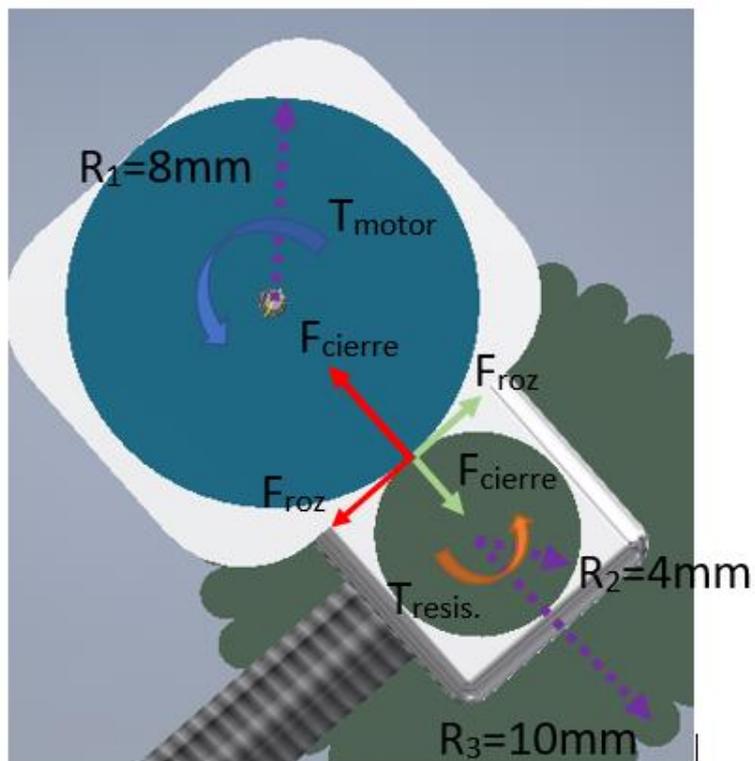
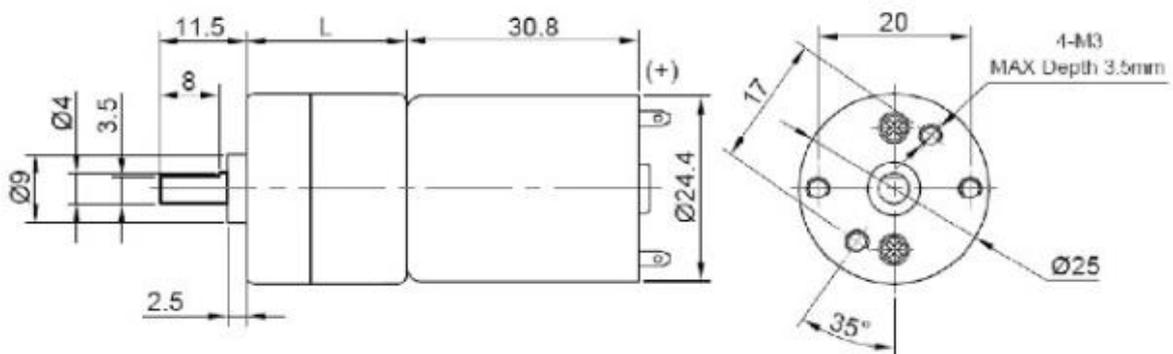


Figura 7-4-2. Fuerzas en el mecanismo.



- Voltage:** 3-24V
- Speed:** 10-1000RPM
- Torque:** 0.1-5kgf.cm
- Output Power:** 0.1-3W
- Gearbox Ratio:** 1: 9.7 to 1: 498.9
- Gearbox Diameter:** 25mm
- Gearbox Length:** 19-27mm
- Motor Length:** 30.8mm
- Shaft Diameter:** 4mm
- Shaft Length:** Customized
- Typical Application:** Robot, Door Lock, Camera, Medical Device and others

Figura 7-4-3. Ejemplo de motor a utilizar.

8 FUERZAS ACTUANTES

8.1 ENSAYOS

Para conocer la fuerza resistente de la piel se realizó una búsqueda exhaustiva de artículos científicos, informes... al respecto y se consiguieron encontrar varios de gran utilidad que se asemejaban mucho a las solicitaciones del proyecto y que podían ser usados como referencia para modelizar esta fuerza tan variable y compleja.

Los resultados de la búsqueda fueron estos: (Ver referencia 9)

"Experimental Investigation Into the Deep Penetration of Soft Solids by Sharp and Blunt Punches, With Application to the Piercing of Skin" (Ver apéndice 2)

Para ampliación futura de este proyecto, la realización del ensayo presentado sería necesaria y de gran utilidad. Por lo tanto, se realizaron propuestas de ensayo más específicas para el caso que se está desarrollando, estas se presentarán a continuación. Los objetivos de este ensayo propio serían: estudiar la inserción cuasi estática e intermitente de la aguja y el testado en diferentes tipos de brazo. Las propuestas están basadas en el intento de realización de los propios ensayos en el taller de la universidad, pero al no tener los medios para medir la magnitud de la fuerza ejercida por la aguja sobre la piel al mismo tiempo que la distancia de penetración de la aguja, únicamente se podía obtener la lectura de la distancia e inferir la fuerza por las leyes de Newton que gobiernan el mecanismo de ensayo. Este procedimiento generaría tantas fuentes de error que para una medición de distancias y de fuerzas tan pequeñas sería inservible.

Entre todas las propuestas la que parecía más viable era la de utilizar la regla óptica de una impresora desmontada y poder controlar electrónicamente las subidas y la bajada de la aguja. Generando una estructura alrededor de este mecanismo para apoyar el brazo e implementar una aguja en la guía que penetraría en el brazo de forma controlada. Aun con todo, no hubo el tiempo suficiente para desarrollarlo y por lo comentado anteriormente de las fuentes de error múltiples se decidió dejarlo para futuras ampliaciones.

8.2 TREN DE IMPULSOS

8.2.1 Descripción

En este apartado se pasa a realizar un estudio de la forma en la que afectan las fuerzas externas obtenidas en los ensayos y las internas al sistema planteando un estudio dinámico y uno más estático.

8.2.2 Estudio de vibraciones

Dado que los ensayos determinan una fuerza máxima de entre 1 y 2 Newton (Ver apéndice 2) y que las vibraciones se han intentado minimizar usando el cierre de muelle con el mecanismo de leva de tipo cicloidal con diagrama de aceleraciones continuo, se supone que ante un caso de cercanía a los modos de vibración de la máquina de tatuar o del seguidor de la leva, el factor de amplificación dinámica generaría una fuerza de pocos Newton o una fuerza suficientemente pequeña como para no tener un efecto notable en la estabilidad estática de la estructura, por lo que la optimización de las secciones se deja en manos del apartado anterior.

Aun así, es interesante comentar que se ha tenido en cuenta la frecuencia natural de $\sqrt{k/m} = \sqrt{(840 \text{ N/m} / 0.065 \text{ kg})} = 360 \text{ rpm}$ siendo k la constante del muelle y m la masa del seguidor con la aguja para la selección de la frecuencia de aplicación de la fuerza de la aguja sobre la piel, es decir, la frecuencia de giro de la leva. Además, se eligen frecuencias a la derecha de la frecuencia natural, disminuyendo así las vibraciones.

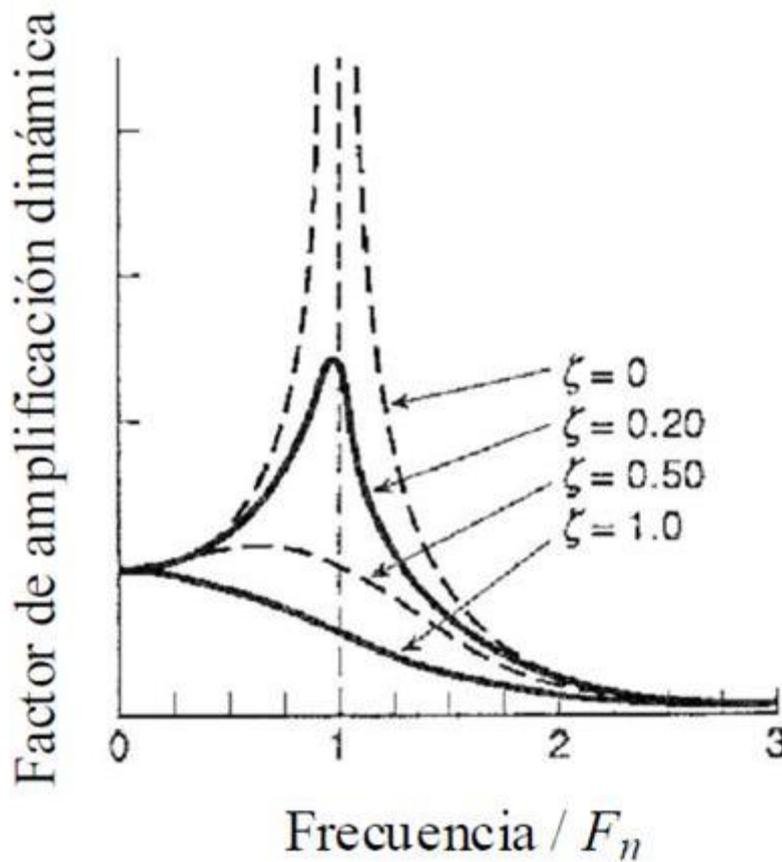


Figura 8-2-2-1. Gráfica de factor de amplificación dinámica.

8.3 FUERZAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS

Este apartado sirve para el estudio de la influencia del peso propio del sistema sobre sus componentes en el predimensionamiento. También se añadirá el efecto de lo mencionado en el apartado anterior. En ampliaciones futuras del proyecto se podría pensar en optimizar las secciones y los materiales a usar.



Figura 8-3-1. Modelo y elemento que se cree más solicitado.

Al ser una estructura rígida basada en elementos metálicos y plásticos se cree que los pesos propios de esta no generarán las suficientes deformaciones como para generar una pérdida de precisión de alto grado. Aun así, debido a las fuerzas de la máquina de tatuar y la plataforma se cree que el elemento más solicitado podría ser la barra biarticulada marcada en azul en la figura 8-3-1.

Para comprobar su deformación y sus sollicitaciones se va a hacer primero un análisis de las fuerzas que llegan a sus extremos y a continuación un análisis estructural de esta.

8.3.1 Análisis de fuerzas.

Para la simplificación del problema y realizar un estudio sin entrar en la compatibilidad de deformaciones de la plataforma, siendo las barras conectoras de la plataforma con las guías biarticuladas elementos sin cargas intermedias, se suponen como elemento de trabajo a tracción/compresión. Por lo tanto, las reacciones en las articulaciones esféricas serán paralelas con la dirección de la barra (Ver figura 8-3-1-4). El problema se estudia desde el equilibrio de fuerzas. Las fuerzas que las barras tienen que soportar/transmitir son (las cargas permanentes serán mayoradas por un coeficiente de seguridad de 1.35 y las cargas variables con 1.5):

- $Peso\ total = masa\ total * g * 1.35 = 14.46N$
 - Peso propio de la plataforma (permanente, asignando materiales a cada elemento).
 - Peso propio de máquina de tatuado puesta en el centro (permanente, asignando materiales a cada elemento).
 - Masa total= masa plataforma + motor x 3+ pasador x 2 + esqueleto máquina tatuar + tornillos de apriete + leva + camisa seguidor + seguidor + camisa aguja + aguja=

0.833kg (aluminio) + 0.027kg x3 + 0.001kg x2 (aluminio)+ 0.125kg (aluminio)+ 0.03kg (acero) + 0.006kg (acero) + 0.009kg (acero) + 0.004kg (acero)+ 0.002kg (aluminio)+ despreciable (acero inoxidable) =

1.092kg
- Fuerza de la aguja contra la piel (variable) (Ver sección). F_{aguja} =mismo diagrama que la función del diagrama de aceleraciones, pero con una amplitud de 1 Newton *1.5 (en este caso n rad a 1350rpm equivalen a 0.02222s=0.02s):
 - De 0 a 0.01s: $1.5 * sen(200 \pi * t)$ (N)
 - De 0.01s a 0.02s: $-1.5 * sen(200 \pi * t)$ (N)

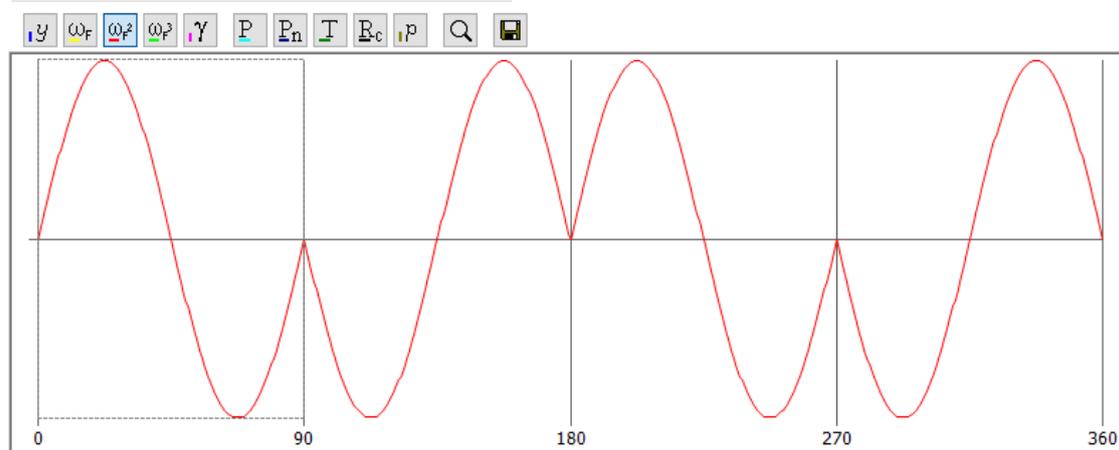


Figura 8-3-1-1. Función de la fuerza de la aguja.

Las cargas permanentes se representan en los centros de gravedad de los respectivos elementos:

- El centro de gravedad de la plataforma + la plataforma giratoria intermedia será equilibrado con pesos en las ranuras en las que no se colocarán el o los motores (1 o 2) necesarios para rotar la plataforma giratoria, por lo que se puede considerar centrado. Por la cantidad de masa que hay por encima de plano superior de la plataforma se supone que el centro de gravedad se sitúa contenido en el plano superior y en el centro.

La carga variable se representará dependiente del ángulo de giro de la plataforma intermedia.

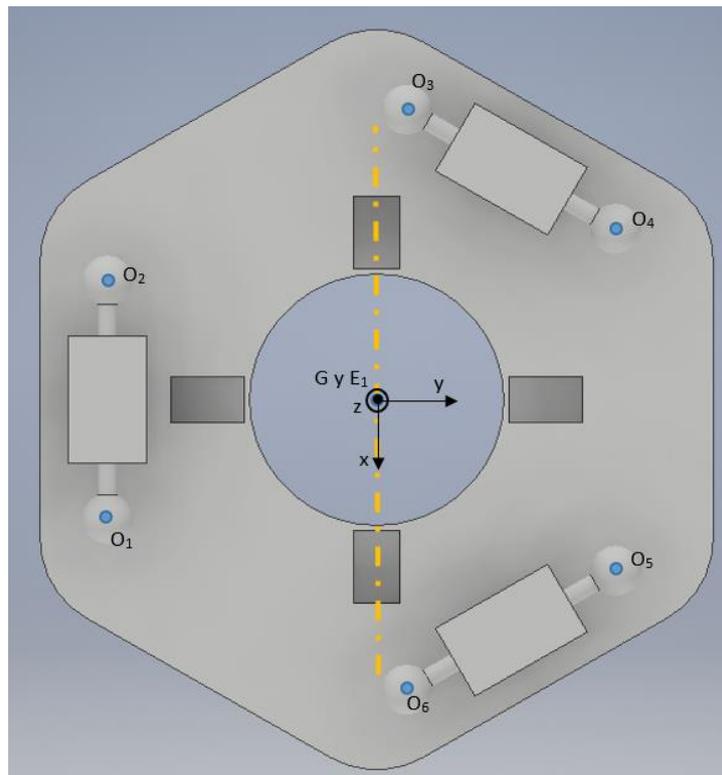


Figura 8-3-1-2. Representación de fuerzas y puntos de importancia.

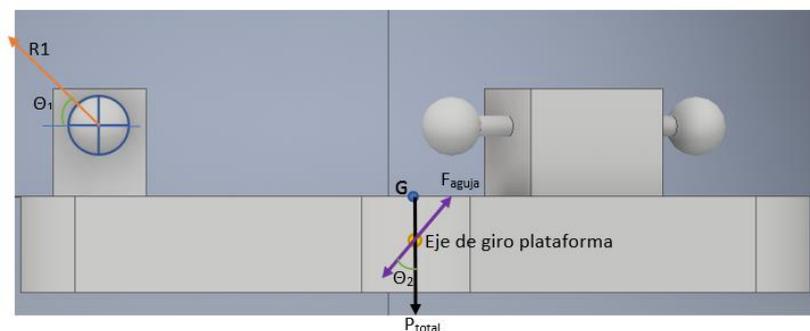


Figura 8-3-1-3. Representación de fuerzas y puntos de importancia.



Figura 8-3-1-4. Representación de fuerzas y puntos de importancia.

8.3.2 Análisis estructural.

Primero, tenemos que obtener el valor de R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 y R_6 en función de 2 ángulos que hay que establecer y luego determinar el valor máximo posible que se puede dar una de las reacciones:

Para realizar los sumatorios de fuerzas hay que llevar todas las fuerzas al centro de gravedad establecido como G y los ángulos definidos son β (ángulo con el eje z) y φ (ángulo con el eje x) que son dependientes de la posición de la plataforma y la geometría.

Para realizar el análisis de momentos y de fuerzas se tomarán las fuerzas en su forma descompuesta realizada y se tomarán las distancias necesarias de Inventor (Ver figura 8-3-2-1). Después se añadirán las relaciones geométricas de las fuerzas descompuestas con la original.

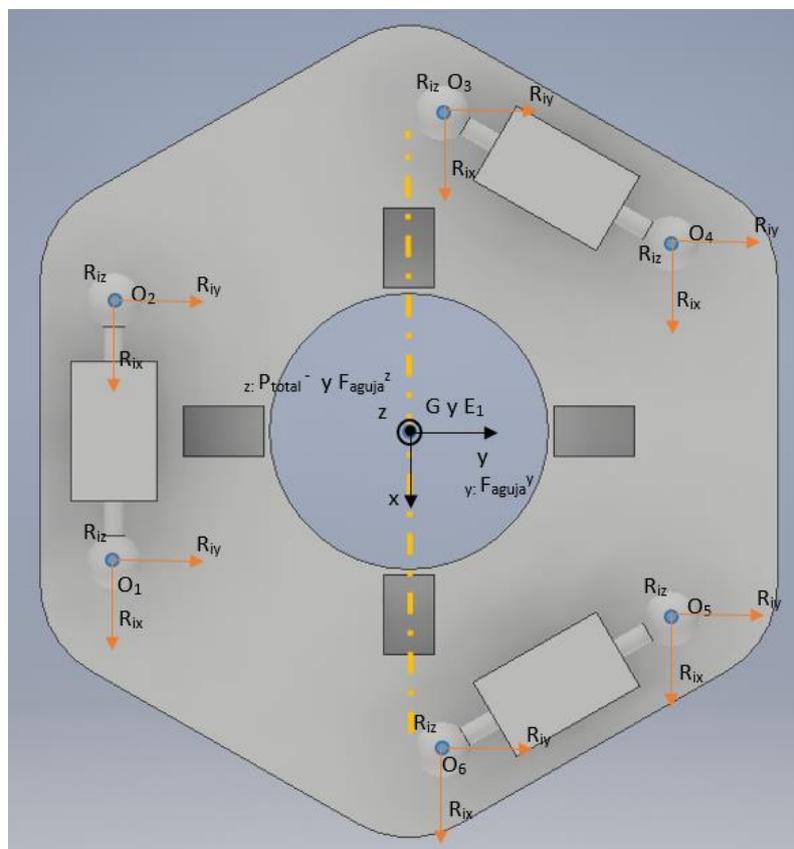


Figura 8-3-2-1. Representación de la posición de las fuerzas descompuestas.

- Sumatorio de fuerzas en X:

$$R1x + R2x + R3x + R4x + R5x + R6x = 0$$

Ecuación 8-3-2-1.

- Sumatorio de fuerzas en Y:

$$R1y + R2y + R3y + R4y + R5y + R6y + Faguja * \text{sen}(\theta 2) = 0$$

Ecuación 8-3-2-2.

- Sumatorio de fuerzas en Z:

$$R1z + R2z + R3z + R4z + R5z + R6z + Faguja * \text{cos}(\theta 2) - Total = 0$$

Ecuación 8-3-2-3.

- Distancias para momentos:

$$\begin{aligned} O_1G^x &= 26\text{mm}, O_1G^y = 60.273\text{mm}, O_1G^z = 13\text{mm} \\ O_2G^x &= 26\text{mm}, O_2G^y = 60.273\text{mm}, O_2G^z = 13\text{mm} \\ O_3G^x &= 65\text{mm}, O_3G^y = 7.682\text{mm}, O_3G^z = 13\text{mm} \\ O_4G^x &= 38.41\text{mm}, O_4G^y = 53.182\text{mm}, O_4G^z = 13\text{mm} \\ O_5G^x &= 38.41\text{mm}, O_5G^y = 53.182\text{mm}, O_5G^z = 13\text{mm} \\ O_6G^x &= 65\text{mm}, O_6G^y = 7.682\text{mm}, O_6G^z = 13\text{mm} \\ E_1G &= 7.5\text{mm} \end{aligned}$$

- Sumatorio de momentos en G_x :

$$\begin{aligned} &R3z * O3Gy + R4z * O4Gy + R5z * O5Gy + R6z * O6Gy \\ = &R1y * O1Gz + R2y * O2Gz + R3y * O3Gz + R4y * O4Gz + R5y * O5Gz + R6y * O6Gz + R1z * O1Gy \\ &+ R2z * O2Gy + Faguja * \text{sen}(\theta 2) * E1G \end{aligned}$$

Ecuación 8-3-2-4.

- Sumatorio de momentos en G_y :

$$\begin{aligned} &R1x * O1Gz + R2x * O2Gz + R3x * O3Gz + R4x * O4Gz + R5x * O5Gz + R6x * O6Gz + R2z * O2Gx \\ &+ R3z * O3Gx + R4z * O4Gx = R1z * O1Gx + R5z * O5Gx + R6z * O6Gx \end{aligned}$$

Ecuación 8-3-2-5.

- Sumatorio de momentos en G_z :

$$\begin{aligned} &R1y * O1Gx + R5y * O5Gx + R6y * O6Gx + R1x * O1Gy + R2x * O2Gy \\ = &R2y * O2Gx + R3y * O3Gx + R4y * O4Gx + R3x * O3Gy + R4x * O4Gy + R5x * O5Gy + R6x * O6Gy \end{aligned}$$

Ecuación 8-3-2-6.

- Relación de fuerzas descompuestas con fuerzas axiales (3*6=18 ecuaciones):

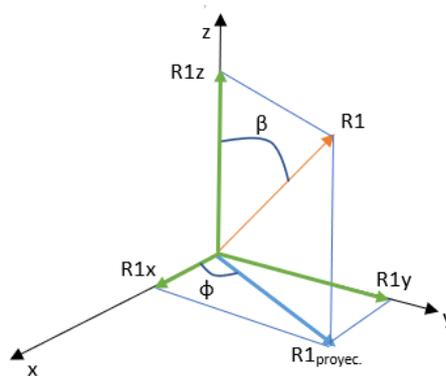


Figura 8-3-2-2. Representación de descomposición de fuerzas.

$$\begin{aligned}
 R_{ix} &= R_i * \text{sen}(\beta_i) * \text{cos}(\Phi_i) \\
 R_{iy} &= R_i * \text{sen}(\beta_i) * \text{sen}(\Phi_i) \\
 R_{iz} &= R_i * \text{cos}(\beta_i)
 \end{aligned}$$

Ecuaciones 8-3-2-7.

- Esto nos deja con un sistema de 24 ecuaciones con 24 incógnitas en el que habría que determinar primeramente los ángulos β y Φ que diesen la reacción máxima. Debido a la complejidad de esta resolución mediante el proceso teórico se procede a probar una posición determinada obteniendo los datos de partida con Inventor, esto simplificará el problema dejando un sistema de 6 ecuaciones y 6 incógnitas:

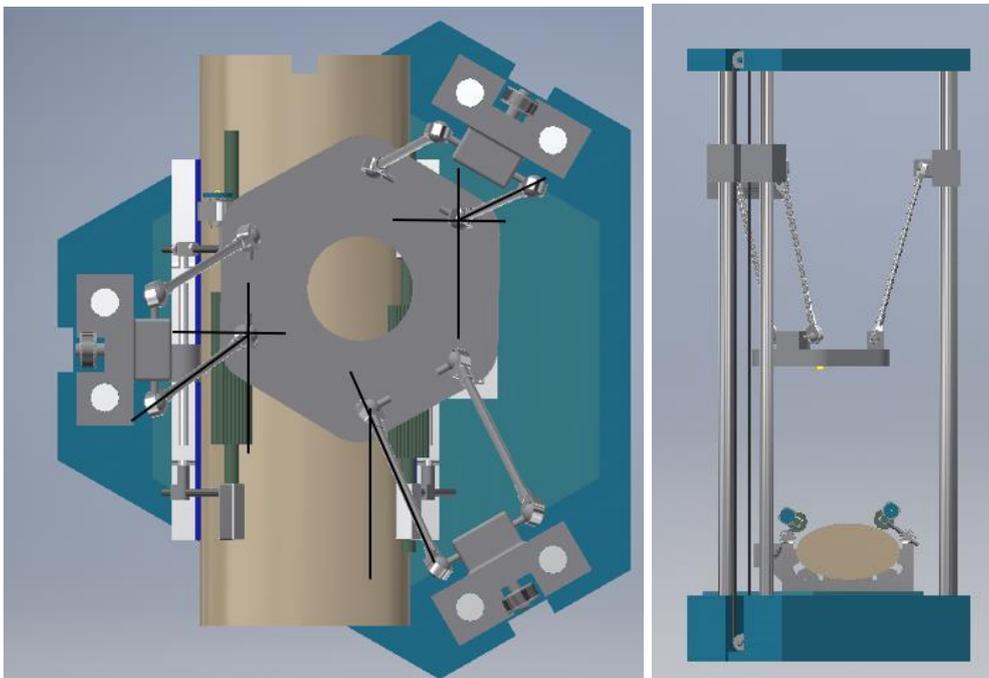


Figura 8-3-2-3. Posición de estudio.

- $\beta_1=18.55^\circ, \beta_2=18.55^\circ, \beta_3=11.78^\circ, \beta_4=11.78^\circ, \beta_5=28.04^\circ, \beta_6=28.04^\circ.$
- $\Phi_1=307.5^\circ, \Phi_2=307.5^\circ, \Phi_3=116.5^\circ, \Phi_4=116.5^\circ, \Phi_5=24^\circ, \Phi_6=24^\circ.$
- $\theta_2= 5^\circ$ (arbitrario)
- Solución del sistema:
 - $0.194 * (R1 + R2) - 0.0911(R3 + R4) + 0.43 * (R5 + R6) = 0$
 - $-0.2524(R1 + R2) + 0.183(R3 + R4) + 0.1912(R5 + R6) + Faguja * 0.087156 = 0$
 - $0.95(R1 + R2) + 0.98(R3 + R4) + 0.88262(R5 + R6) + Faguja * 0.9962 - 14.46 = 0$
 - $0.98R3 * 7.682mm + 0.98R4 * 53.182mm + 0.88262R5 * 53.182mm + 0.88262R6 * 7.682mm = -0.2524R1 * 13mm - 0.2524R2 * 13mm + 0.183R3 * 13mm + 0.183R4 * 13mm + 0.1912R5 * 13mm + 0.1912R6 * 13mm + 0.95R1 * 60.273mm + 0.95R2 * 60.273mm + Faguja * 0.087156 * 7.5mm$
 - $0.194R1 * 13mm + 0.194R2 * 13mm - 0.0911R3 * 13mm - 0.0911R4 * 13mm + 0.43R5 * 13mm + 0.43R6 * 13mm + 0.95R2 * 26mm + 0.98R3 * 65mm + 0.98R4 * 38.41mm = 0.95R1 * 26mm + 0.88262R5 * 38.41mm + 0.88262R6 * 65mm$
 - $-0.2524R1 * 26mm + 0.1912R5 * 38.41mm + 0.1912R6 * 65mm + 0.194R1 * 60.273mm + 0.194R2 * 60.273mm = -0.2524R2 * 26mm + 0.183R3 * 65mm + 0.183R4 * 38.41mm - 0.0911R3 * 7.682mm - 0.0911R4 * 53.182mm + 0.43R5 * 53.182mm + 0.43R6 * 7.682mm$

Resolviendo con Mathematica obtenemos (Ver apéndice 6):

$$\begin{cases} R1 \rightarrow 10.514209479993353 - 0.6253639083624565F, \\ R2 \rightarrow -4.2815564338197545 + 0.39211970290404685F, \\ R3 \rightarrow 0.7541100942157012 - 0.2861215269586906F, \\ R4 \rightarrow 8.689701360593007 - 0.4572399298958231F, \\ R5 \rightarrow -2.395280255855425 + 0.31136504904416296F, \\ R6 \rightarrow 1.5841094013796 - 0.36362284639419734F \end{cases}$$

Siendo F un valor entre -1.5 y 1.5 obtenemos que R máxima (R1) por 1.5 como coeficiente de seguridad=11.45225548*1.5=17.18N

Una vez obtenida la R máxima se pasa al modelo mostrado en la figura 8-3-1-4 y se realiza un análisis por elementos finitos de las tensiones y deformaciones. Tanto la barra como los enganches son de Aluminio 6061. Los parámetros escogidos en el estudio son:

- Se empotra una de las dos articulaciones.
- Se usa la función de contactos automáticos y genera las conexiones correctas entre los elementos.
- Se elige el mallado predeterminado.

- Se aplica la fuerza en una de las dos articulaciones por la cara exterior, esto generará una situación cercana a la realidad ya que la fuerza que se transmite a través del contacto de la bola y el alojamiento de la articulación esférica se concentrará en una pequeña área en la dirección de la carga (como demuestra la teoría del contacto de Hertz). Aun así, no reflejara 100% la situación real, pero como el alcance del estudio es comprobar el coeficiente de seguridad que tiene la barra y si la deformación generada es suficientemente pequeña para que no haya una gran pérdida de precisión, es suficiente.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos (Las deformaciones están exageradas):

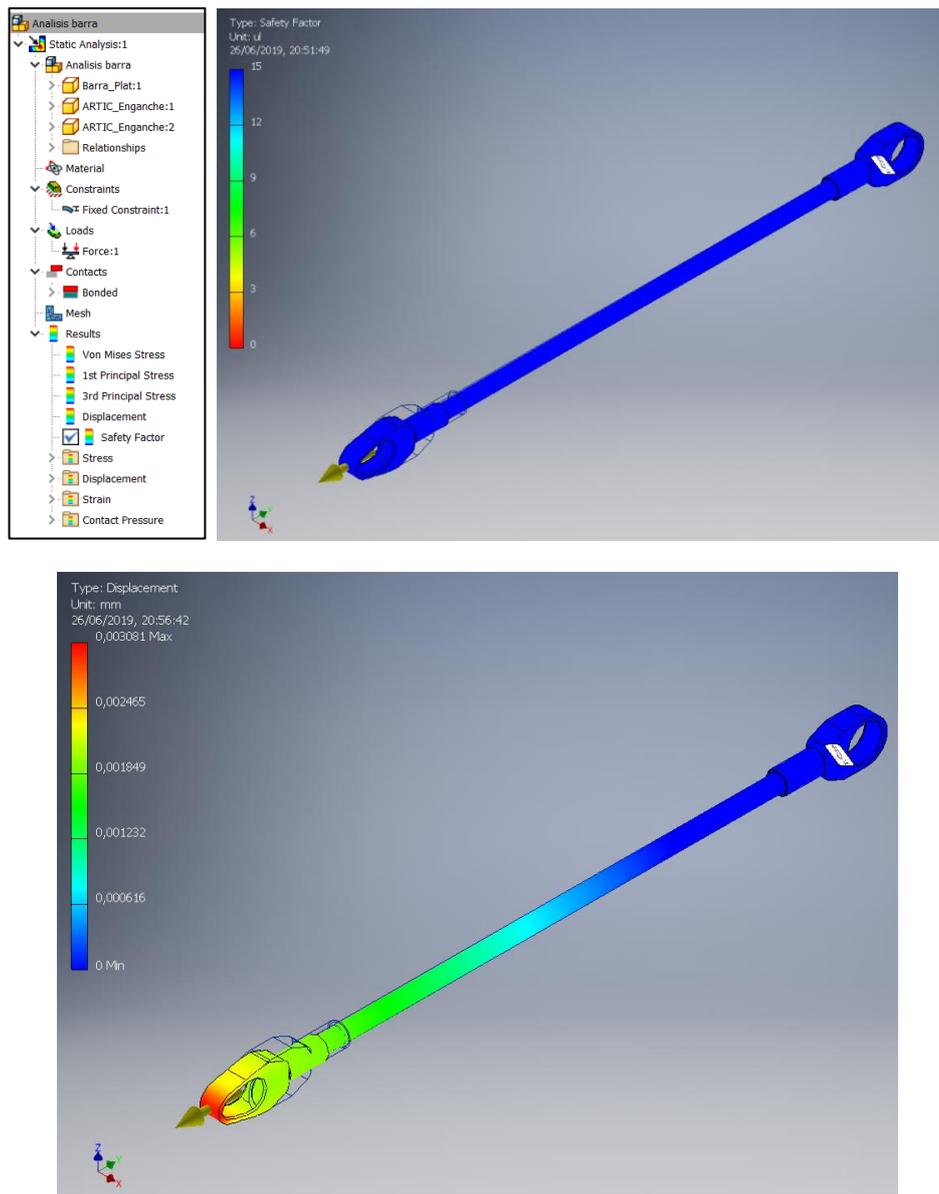


Figura 8-3-2-4. Parámetros y resultados del estudio.

Se concluye que con los materiales seleccionados no habría prácticamente pérdidas de precisión influyentes y que los elementos están lejos del fallo.

9 PROPUESTA DE USO DISTINTO

Una vez visto el posible uso de este tipo de máquina para la aplicación del tatuado, se quiere proponer una alternativa de uso interesante pensada durante la realización del propio trabajo.

La propuesta sería usar la máquina para la realización médica de vacunas o extracciones de sangre. Para poder realizar esta tarea varias cosas cambiarían en la máquina y habría que incluir ciertos extras:

- Se eliminaría la existencia de fuerzas dinámicas. Por lo tanto, al estar diseñada para soportar estas, seguiría siendo válida.
- La inserción de la aguja sería más profunda y el líquido tendría que circular por dentro de esta, por lo tanto, habría que cambiar el dispositivo de tatuado por uno distinto. Este nuevo dispositivo se valdría de la rotación añadida como grado de libertad para la entrada perpendicular sobre la piel. En este caso, poseería una aguja hipodérmica que debería poder ser intercambiable después de cada uso o desinfectada de manera que cumpliera los requisitos sanitarios. Entre las opciones barajadas, se cree que la más correcta sería la del procedimiento que sigue: acercamiento y localización de la vena, posicionamiento para entrada, inserción de la aguja emulando el tatuado (con la máquina estática y la aguja en movimiento), extracción de sangre o inserción de líquido con dispositivo neumático o hidráulico a través de la aguja y finalmente, extracción de la aguja.
- Localización de la vena. Al ser una zona más amplia que el seguimiento del trazado del tatuaje la máquina no necesitaría una solicitud de precisión tan grande y se podría diseñar algún tipo de sensor que detectase la localización de la vena basándose en el principio de que la vena posee un líquido en movimiento y por encima de ella todo es estático (propuesta). El desarrollo de esto sería acometido de futuras ampliaciones u otro proyecto.

Este proceso podría agilizar el trabajo de los vacunadores o enfermeros dedicados a la extracción de sangre, permitiéndoles dedicarse solo al análisis de resultados, agilizando las colas e implementando la automatización en este sector. Aun así, se podría llegar a pensar que esto quitaría muchos puestos de trabajo humanos. Por lo cual, sería necesario un estudio de la necesidad de implementación de la automatización en este proceso y la compatibilización con los trabajos humanos, si surgirían nuevos puestos, si sería compatible con los ya existentes...

10 FUTURAS AMPLIACIONES

A continuación, se realizará una lista de las posibles futuras ampliaciones de este proyecto:

- Realización de software de control de los grados de libertad.
- Optimizar las secciones y los materiales a usar
- Realización de ensayos para conocer más en detalle las fuerzas y vibraciones que ocurren en el proceso de tatuado.
- Mayor optimización de los elementos constructivos adecuados a los ensayos.
- Estudio de modo de inserción de la tinta. Propuestas:
 - Untar la aguja en la caja que se encuentra solidaria al apoyo del brazo.
 - Introducir la tinta por dentro de la máquina de tatuar implementando un sistema de goteo constante (al subir la aguja dejar un pequeño paso de tinta) teniendo una reserva de tinta (rellenable e intercambiable) en la tapa superior de la estructura externa y llevando la tinta por un tubo a la apertura que la máquina de tatuar tiene en la parte inferior, cerca de la salida de la aguja.
 - Introducir la tinta por dentro de la aguja y coordinar la deposición de esta con el movimiento de la aguja.
- Construcción de maqueta del proyecto.
- Testeo de la maqueta de la máquina realizando el círculo propuesto en la sección 3 sobre piel artificial.
- Pruebas reales.

11 REFERENCIAS

1. 2. Selección de impresora 3D
 1. <https://www.asociacionmicropigmentacion.com/downloads/legislacion/autonomica/pais-vasco.pdf>
 2. Figura 2-1. <https://es.aliexpress.com/item/Nuevo-2019-FLSUN-QQ-S-3D-impresora-de-celos-a-de-Pre-Asamblea-Delta-3D-impresora/32681171687.html?spm=a219c.search0204.6.1.b159cdcdyAh5Fm&s=p>
 3. Figura 2-2. <http://tdrobotica.co/melephant-impresora-3d/364.html>
 4. Figura 2-3. https://es.aliexpress.com/store/product/Best-Tronxy-X5-model-aluminium-structure-3D-Printer-DIY-full-kits-impresora-3D-printing-PLA-ABS/1951499_32826072492.html?spm=a219c.search0204.3.248.b159cdcdyAh5Fm&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_2_10065_10068_10547_319_10891_317_10548_10696_10084_453_454_10083_10618_10307_10820_10821_10301_10303_537_536_10902_10059_10884_10887_321_322_10103,searchweb201603_55,ppcSwitch_0&algo_expid=00ae631c-af1d-4e3d-a8e7-9993750f15b1-36&algo_pvid=00ae631c-af1d-4e3d-a8e7-9993750f15b1&transAbTest=ae803_5
 5. Figura 2-4. https://es.aliexpress.com/store/product/2019-Newest-Flsun-3d-printer-Large-Printing-Area-260-260-350mm-Touch-Screen-Dual-Extruder-Metal/2222054_32861914335.html?spm=a219c.search0204.3.9.364c7de7tURyIH&s=p&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_2_10065_10068_10547_319_10891_317_10548_10696_10084_453_454_10083_10618_10307_10820_10821_10301_10303_537_536_10902_10059_10884_10887_321_322_10103,searchweb201603_55,ppcSwitch_0&algo_expid=3915178f-9dff-4100-8e35-b4799e163165-1&algo_pvid=3915178f-9dff-4100-8e35-b4799e163165&transAbTest=ae803_5
2. 3.1 Entrada de aguja en piel:
 1. <https://www.pinterest.es/pin/111464159512985169>
 2. Figura 3-1-1. <https://maquinasparatatuar.com.mx/blog/guias/aguja-para-tatuar/>
3. 3.2 Procedimiento teórico:
 1. <https://eduardoivblog.wordpress.com/2016/07/09/diseo-y-construccion-de-una-impresora-delta-1/>
4. 4 Montaje completo (Predimensionamiento) y funcionamiento.
 1. <https://grabcad.com/library/electric-motor-brushed-24vdc-3500rpm-update-1>
 2. <https://eduardoivblog.wordpress.com/2016/07/09/diseo-y-construccion-de-una-impresora-delta-1/>
 3. <https://grabcad.com/library/electric-motor--2>
 4. <https://grabcad.com/library/traxxas-5347-ball-joint-rod-end-1>
5. 5.1 Descripción
 1. Figura 5-1-2: "contenido del curso Basic Automation, basado en el libro *Automation, production systems and computer integrated manufacturing* de Mikell P. Groover, cursado en el Erasmus en la University of Southern Denmark, impartido por Niels Korsager."
6. 6.1 Estudio de patente y justificación de diseño:
 1. <https://patentados.com/2015/dispositivo-electromecanico-para-tatuaje>
 2. <https://www.zonatattoos.com/foros/viewtopic.php?t=4875>
 3. https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A1quina_de_tatuaje
7. 7.3 Diseño de muelle a torsión:
 1. <http://www.springsandthings.com/pdf/spiral-torsion-springs.pdf>
 2. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/rozamiento/general/rozamiento.htm>
 3. https://www.masterspring.com/wp-content/uploads/2015/08/properties_of_materials.pdf
8. 7.4 Definición de discos a fricción:
 1. <http://www.fullmecanica.com/definiciones/t/1043-transmisiones-por-friccion-entre-dos-ruedas-calculo>

2. http://atc.sif.stuba.sk/files/mechanika_vms_ADAMS/Contact_Table.pdf
3. *Figura 7-4-3.* <https://spanish.alibaba.com/product-detail/25qa370-25mm-low-rpm-1w-12v-dc-micro-gear-motor-for-robot-60812396031.html?spm=a2700.8699010.normalList.14.39576ae2yhPGkd>

9. 8.1 Ensayos:

1. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.546.8073&rep=rep1&type=pdf>

2. *Figura 8-2-2-1.*

https://www.google.com/search?q=qr%C3%A1fica+de+amplificacion+dinamica&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKFwj-pLWH4-viAhVLaBoKHW9iARcQ_AUIFCqB&biw=1536&bih=722#imgsrc=rQcRiJNW3OHYOM:

10. 12.7 Aspectos económicos y de organización:

1. <https://soloingenieria.net/foros/viewtopic.php?t=12238#p91975>

2. *Links de precios de los software:* <https://www.autodesk.es/products/inventor/overview>,
<http://www.wolfram.com/mathematica/pricing/industry-individuals.php>, [https://es.mathworks.com/pricing-licensing.html?prodcode=ML](https://es.mathworks.com/pricing/licensing.html?prodcode=ML),
<https://products.office.com/es-es/business/compare-more-office-365-for-business-plans>.

12 APÉNDICES

12.1 APÉNDICE 1. PLANTEAMIENTO GEOMÉTRICO DE IMPRESORA 3D DELTA MÁS ROTACIÓN AÑADIDA Y RESOLUCIONES EN MATLAB.

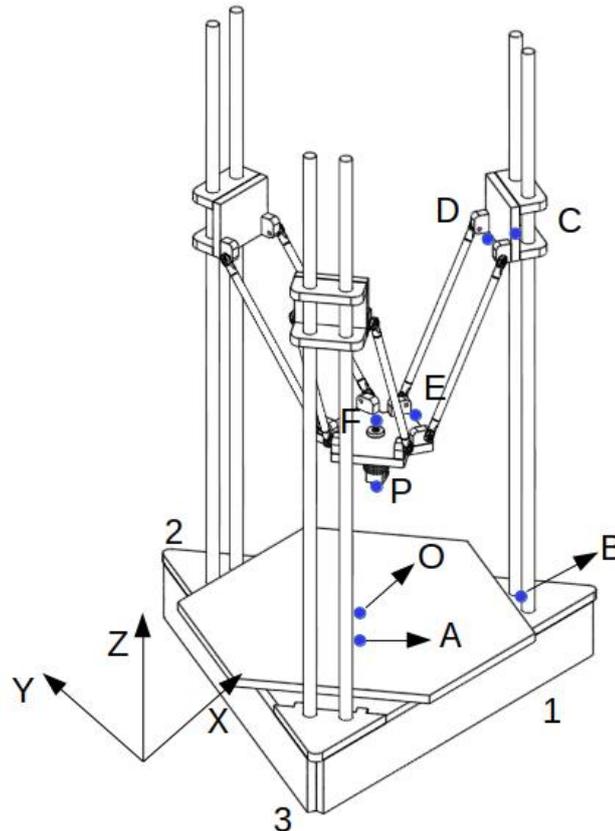


Figura 12-1-1. Modelo impresora 3D.

1. Se plantean los lazos como una ecuación vectorial genérica:

$${}^B\text{OA}_i + {}^B\text{AB}_i + {}^B\text{BC}_i + {}^B\text{CD}_i + {}^B\text{DE}_i = {}^B\text{P}_0 + {}^B\text{P}_i$$

Ecuación 12-1-1. Ecuación vectorial de los lazos.

2. Definimos cada uno de los vectores:

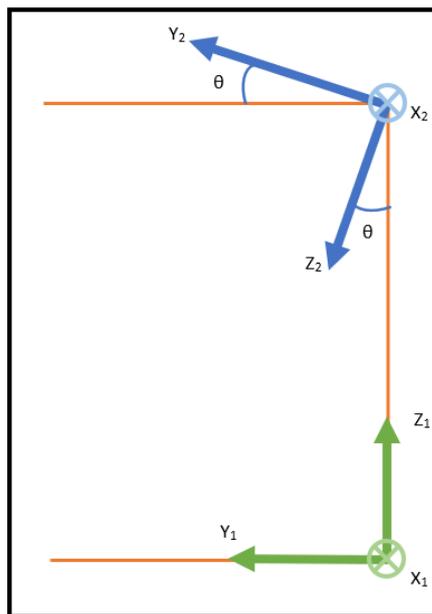
- ${}^B\text{OA}_i$ = Es igual para todas las columnas $\rightarrow [0, 0, -\varepsilon]$. En nuestro caso "ε" podría ser solo el espesor de la base o la distancia al plano tangente al brazo y paralelo al xy.
- ${}^B\text{AB}_i$ = Los puntos B_1, B_2, B_3 , forman un triángulo equilátero, si llamamos "s" a la distancia entre columnas (ie, B_1B_2): ${}^B\text{AB}_1 = [s/2, -\sqrt{3}\cdot s/6, 0]$, ${}^B\text{AB}_2 = [0, \sqrt{3}\cdot s/3, 0]$, ${}^B\text{AB}_3 = [-s/2, -\sqrt{3}\cdot s/6, 0]$.

- ${}^B BC_i$ = Definimos las magnitudes a conseguir (altura de la guía movida por la correa y siendo esta accionada por un motor) como incógnitas "l_i".
 ${}^B BC_1 = [0, 0, l_1]$, ${}^B BC_2 = [0, 0, l_2]$, ${}^B BC_3 = [0, 0, l_3]$.
- ${}^B CD_i$ = Tienen la misma dirección que los vectores ${}^B AB_i$ pero sentido contrario. Definimos la magnitud de este vector como "a".
 ${}^B CD_1 = [-\sqrt{3} \cdot a/2, a/2, 0]$, ${}^B CD_2 = [0, -a, 0]$, ${}^B CD_3 = [\sqrt{3} \cdot a/2, a/2, 0]$.
- ${}^B DE_i$ = Trataremos este vector en la resolución de los lazos.
- ${}^B P_p$ = Las coordenadas del extrusor, en nuestro caso el punto de salida de la aguja, son las coordenadas de entrada en el problema inverso y de salida en el directo. ${}^B P_{p1} = {}^B P_{p2} = {}^B P_{p3} = [x, y, z]$.

$${}^B P_i = {}^B FE_i + {}^{P \rightarrow B} R \cdot {}^P PF_i$$

Ecuación 12-1-2. ${}^B P_i$.

- ${}^B FE_i$ = Llamando a la distancia entre los puntos "c", tenemos el mismo caso que ${}^B AB_i$. ${}^B FE_1 = [c/2, -\sqrt{3} \cdot c/6, 0]$, ${}^B FE_2 = [0, \sqrt{3} \cdot c/3, 0]$, ${}^B FE_3 = [-c/2, -\sqrt{3} \cdot c/6, 0]$.
- ${}^{P \rightarrow B} R$ = Matriz de cambio de base que incluye la rotación de un sistema de referencia respecto de otro:



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Figura 12-1-2. Matriz de cambio de base y sistemas de referencia.

- ${}^P PF_i$ = Son todos iguales y en dirección Z_2 , llamaremos a su magnitud "b". ${}^P PF_1 = {}^P PF_2 = {}^P PF_3 = [0, 0, -b]$.

3. Resolución de la ecuación:

- Aparentemente, para el problema directo tenemos 3 ecuaciones (3 lazos) y 4 salidas (x, y, z, θ), pero hay que añadir la ecuación de la entrada angular, que vendrá determinada por la rotación independiente de un motor. Para el problema inverso θ ya está determinado como entrada por lo que tenemos 3 ecuaciones y 3 incógnitas.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s/2 \\ -\sqrt{3} \cdot s/6 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\sqrt{3} \cdot a/2 \\ a/2 \\ 0 \end{bmatrix} + [{}^B DE_i] = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c/2 \\ -\sqrt{3} \cdot c/6 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \cdot s/3 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -a \\ 0 \end{bmatrix} + [{}^B DE_i] = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \cdot c/3 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -s/2 \\ -\sqrt{3} \cdot s/6 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{3} \cdot a/2 \\ a/2 \\ 0 \end{bmatrix} + [{}^B DE_i] = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c/2 \\ -\sqrt{3} \cdot c/6 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -b \end{bmatrix}$$

Figura 12-1-3. Ecuaciones de los lazos.

- Sabemos que $|{}^B DE_i| = L$ siendo "L" una distancia fija, por lo tanto, despejamos ${}^B DE_i$, obtenemos el módulo del vector despejado e igualamos. Introducimos las ecuaciones obtenidas en Matlab y para una entrada, resolvemos.

A continuación, se muestran los programas elaborados en Matlab para la resolución del problema directo y problema inverso, explicados a través de comentarios en el propio programa.

```

Posicion_aguja.m x +
1 function [l11,l22,l33]=Posicion_aguja(x1,y1,z1,t1,c1,a1,s1,b1,e1,long1)
2   %{
3   Ayuda: Introducir (x1,y1,z1,t1,c1,a1,s1,b1)
4   x1,y1,z1,t1 son los grados de libertad de la punta de la aguja.
5   c1 es el valor del lado del triángulo equilátero formado por los 3 puntos
6   centrales de las articulaciones esféricas de la plataforma.
7   a1 es la distancia de el centro de las guías al eje de las articulaciones
8   esféricas.
9   s1 es el valor del lado del triángulo equilátero formado por los 3 puntos
10  centrales de las 3 guías.
11  e1 es la distancia del plano de trabajo de la aguja a el plano de la base
12  de las guías, ambos en horizontal.
13  long1 es la distancia entre los ejes de las articulaciones esféricas.
14  Los valores de salida son (l11,l22,l33) que son las alturas de las guías.
15  %}
16  ecu1=long1^2==(x1+c1/2+a1*sqrt(3)/2-s1/2)^2+(y1-c1*sqrt(3)/6+b1*sen(t1)...
17  -a1/2+s1*sqrt(3)/6)^2+(z1-b1*cos(t1)-l1+e1)^2;
18  ecu2=long1^2==(x1)^2+(y1+c1*sqrt(3)/3+b1*sen(t1)+a1-s1*sqrt(3)/3)^2....
19  +(z1-b1*cos(t1)-l2+e1)^2;
20  ecu3=long1^2==(x1-c1/2-a1*sqrt(3)/2+s1/2)^2+(y1-c1*sqrt(3)/6+b1*sen(t1)...
21  -a1/2+s1*sqrt(3)/6)^2+(z1-b1*cos(t1)-l3+e1)^2;
22  l11=solve(ecu1,l1);
23  l22=solve(ecu2,l2);
24  l33=solve(ecu3,l3);
  
```

Figura 12-1-4. Programa de Matlab de resolución del problema inverso.

```

Posicion_aguja.m x Problema_directo.m x +
1 function [F]=Problema_directo(l1,l2,l3,c1,a1,s1,b1,e1,long1,x)
2   %{
3   Ayuda: Introducir (l1,l2,l3,c1,a1,s1,b1,e1,long1)
4   x1,y1,z1,t1 son los grados de libertad de la punta de la aguja.
5   c1 es el valor del lado del triángulo equilátero formado por los 3 puntos
6   centrales de las articulaciones esféricas de la plataforma.
7   a1 es la distancia de el centro de las guías al eje de las articulaciones
8   esféricas.
9   s1 es el valor del lado del triángulo equilátero formado por los 3 puntos
10  centrales de las 3 guías.
11  e1 es la distancia del plano de trabajo de la aguja a el plano de la base
12  de las guías, ambos en horizontal.
13  long1 es la distancia entre los ejes de las articulaciones esféricas.
14  l1, l2 y l3 son las alturas de las guías.
15  Los valores de salida son los del vector x (posición de la punta)
16  USO:
17  1. Escribir func1=@Problema_directo(l1,l2,l3,c1,a1,s1,b1,e1,long1)
18  2. Escribir punto de inicio de resolución, x0[0,0,0] (mejor cercano a punto estimado)
19  3. Escribir f1=fsolve(func1,x0)-->obtencion de posición.
20  %}
21  t1=0;
22  F(1)=-long1^2+(x(1)+c1/2+a1*sqrt(3)/2-s1/2)^2+(x(2)-c1*sqrt(3)/6+b1*sen(t1)...
23  -a1/2+s1*sqrt(3)/6)^2+(x(3)-b1*cos(t1)-l1+e1)^2;
24  F(2)=-long1^2+(x(1))^2+(x(2)+c1*sqrt(3)/3+b1*sen(t1)+a1-s1*sqrt(3)/3)^2....
25  +(x(3)-b1*cos(t1)-l2+e1)^2;
26  F(3)=-long1^2+(x(1)-c1/2-a1*sqrt(3)/2+s1/2)^2+(x(2)-c1*sqrt(3)/6+b1*sen(t1)...
27  -a1/2+s1*sqrt(3)/6)^2+(x(3)-b1*cos(t1)-l3+e1)^2;
  
```

Figura 12-1-5. Resolución problema directo.

12.2 APÉNDICE 2. ENSAYO DE ENTRADA DE AGUJA EN PIEL.

Información relevante obtenida del artículo (referencia 7):

		Skin
Young's modulus	MPa	0.3–1.0
Tensile strength	MPa	10–20
Breaking elongation	%	100
Tear strength	kN m ⁻¹	2–20
Strain crystallizes		No
Crystallization temperature (T_m)	°C	...
Glass transition temperature (T_g)	°C	...
Density	kg m ⁻³	1176
Molecular weight	Daltons	$1 \times 10^4 - 3 \times 10^6$

Figura 12-2-1. Datos técnicos sobre la piel humana.

"3. Solid Punch Experiments.

An investigation has been conducted into the penetration of silicone rubber blocks (Sil8800 and B452) and human skin in vivo by sharp-tipped and flat-bottomed punches. The objective of these investigations was to determine the sensitivity of the penetration mechanism, and load on the punch, to the punch tip geometry. Details of the experiments are as follows, for a flat-bottomed punch, a hypodermic needle and a conically-tipped punch.

3.1 Puncture of Human Skin With a Hypodermic Needle and a Flat-Bottomed Punch.

The test instrument sketched in Fig. 5 was developed in-house and manufactured to measure the load and displacement of a punch as it pierces the skin in vivo. The punch connects to a load cell, which in turn is attached to a connecting rod. The connecting rod slides inside of a bearing mounted at one end of an acrylic tube. A linear variable differential transformer (LVDT) measures the position of the punch as the connecting rod is moved. A spring within the LVDT keeps the punch retracted from the open end of the tube. Data acquisition from the load cell and the LVDT is by a National Instruments PCMCIA DAQ card installed in a laptop computer. A Matlab programme controls the data acquisition. To operate the instrument, the open end of the tube is placed on the surface of the skin with the punch retracted. The human subject depresses the connecting rod at about 1 mm s⁻¹ in order to cause the punch to pierce the skin. The advantage of manually driving the punch is that the human subject can immediately stop the experiment when the penetration depth, or load on the punch, is considered excessive. However, the disadvantage of this test method is that the velocity of the punch cannot be accurately controlled. Sterile hypodermic needles of diameter 0.3 mm and 0.6 mm were used as sharp tipped punches. A hypodermic needle has a chamfered tip, as shown in Fig. 6(a). The 0.3 mm diameter needle had a chamfer length of 1.4 mm and a chamfer angle of 12 deg, while the 0.6 mm diameter needle had a chamfer length of 2.5 mm and a chamfer angle of 14 deg. Flat-bottomed punches of diameter 0.3 mm and 0.5 mm were made from stainless steel wire mounted in a stainless steel Luer fitting, as shown in Fig. 6(b). These punches were autoclaved prior to use. The abdomen was the first site chosen for the penetration tests, as this offered thicker skin and fat layers compared to most other regions of the body and is the preferred site for liquid jet injections. Digital pictures of the penetration sites were taken using a CCD camera attached to an Olympus stereoscopic microscope. However, it proved difficult for the subject to hold the abdomen

still while a picture was taken. Better quality images were achieved of penetration into the lower arm. The penetration site could be identified quickly before any blood seeped from the wound and obscured the surface of the skin.

4 Results

4.1 Load Versus Displacement Response.

A comparison is made of the load versus displacement response of a sharp-tipped and flat-bottomed punch as the punch penetrates each type of silicone rubber and skin. The load versus displacement responses for skin are shown in Fig. 7, for the 10.6 mm thick B452 rubber block in Fig. 8, and for the 12.0 mm thick Sil8800 rubber cylinders in Fig. 9. It was not possible to achieve penetration of skin in vivo with the $\phi 0.5$ mm flat-bottomed punch and no force versus displacement data are presented for these tests. As expected, the load on a flat-bottomed punch is greater than the load on a sharp tipped punch of equal diameter.

4.2 Observed Penetration Mechanisms.

A crack was observed on the surface of the solid upon removal of the punch (flat-bottomed or sharp-tipped). The geometry of the crack depended upon the geometry of the punch: a ring crack was observed following penetration by a flat-bottomed punch, while a planar crack was observed following penetration by a sharp-tipped punch. These cracking mechanisms are sketched in Figs. 1 and 2. Sections taken a posteriori reveal the ring crack or planar crack at varying depths through the rubber block. For example, Figs. 10 and 11 show the ring crack at different depths into Sil8800 and B452 silicone rubber blocks following penetration by a. The ring crack encompasses a column, which is shown emerging from the rear surface of the B452 block in Fig. 11(d). Figures 13 and 14 show the planar crack at different depths through a Sil8800 and B452 silicone rubber block following penetration by a sharp-tipped punch. Figure 14 also shows that the planar crack occasionally branched. We noted fewer incidences of crack branching as the punch diameter and as the shear modulus of the rubber increased. Although it was not possible to section human skin following penetration by a hypodermic needle or flat-bottomed punch, a planar crack or hole was observed on the surface of the skin (see Fig. 12) and we conclude that the penetration mechanism is also by the growth of a planar crack or ring crack. This was confirmed by performing additional tests on pig tissue in vitro. Fresh samples of pig skin ($\phi 3.0$ mm thick) and fat were obtained from a butcher and subjected to penetration by a flat-bottomed punch, sharp-tipped punch and hypodermic needle (all 0.5 mm in diameter) at a similar speed to the human skin penetration tests. Cross sections taken parallel to the skin surface at mid depth revealed the cracking morphology, see Fig. 15. This figure shows that deep penetration involved formation of a mode II ring crack ahead of the flat punch and the formation of a mode I opening crack along the flanks of the sharp-tipped punch and hypodermic needle.

5.2 Strategy for Determining the Penetration Load for a Sharp-Tipped Punch.

Consider a sharp-tipped punch that is penetrating a silicone rubber block. At low punch velocities, the growth and opening of the crack is quasi-static and wave effects are ignored. Figure 19(a) shows that the punch load achieves a maximum value P_{max} at a displacement of h_{max} just prior to the punch tip breaking through the rear surface of the silicone rubber block. Once the punch tip has broken through the rear surface of the block, the only contribution to the load on the punch is from a friction load F_{max} . We define the frictionless penetration load PS associated with the work done in advancing the punch through the process of crack formation and subsequent opening of the crack as:

$$PS = P_{max} - F_{max} \quad (6)$$

Relation (6) is also used to determine the penetration load PS associated with the penetration of skin by a hypodermic needle. The puncture of the front and rear surfaces of the skin layer can be identified on the sharp-tipped punch load versus displacement responses shown in Fig. 7. There is a significant drop in the punch load as the sharp-tipped punch punctures the rear surface of the skin layer and starts to penetrate the underlying fat layer. The investigations of O'Callaghan et al. [10] and Brett et al. [1] indicate that the force required to penetrate the fat layer is negligible. Consequently, we assume that the load on the punch following penetration of the skin layer is due to friction between the skin and punch."

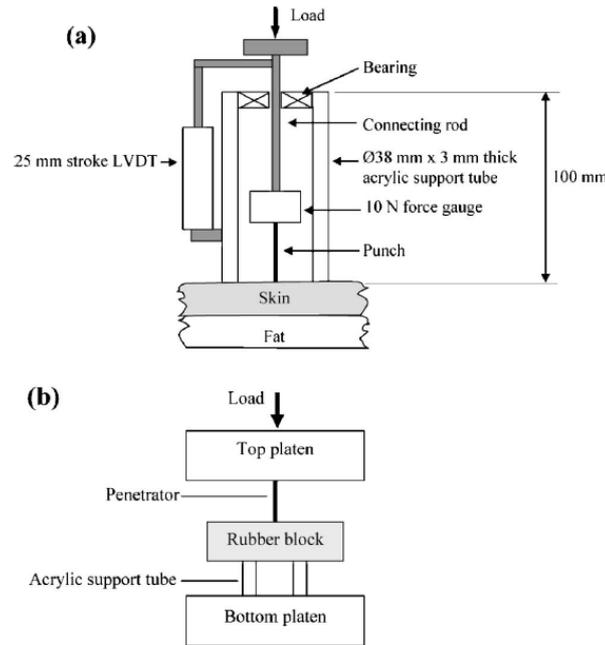


Figure 5 of the referred document. (a) Hand-operated instrument for measuring the force required to penetrate the skin in vivo and (b) rubber block penetration test configuration.

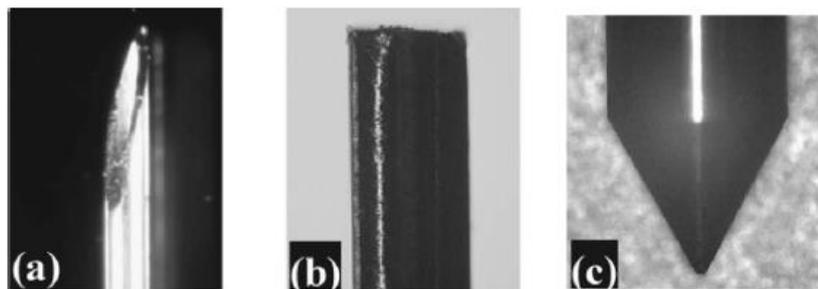


Figure 6 of the referred document. Stainless steel punch tips used in the penetration experiments (not to scale) (a) ø0.3 mm hypodermic needle, (b) ø0.3 mm flat-bottomed punch, and (c) ø2 mm sharp tipped needle.

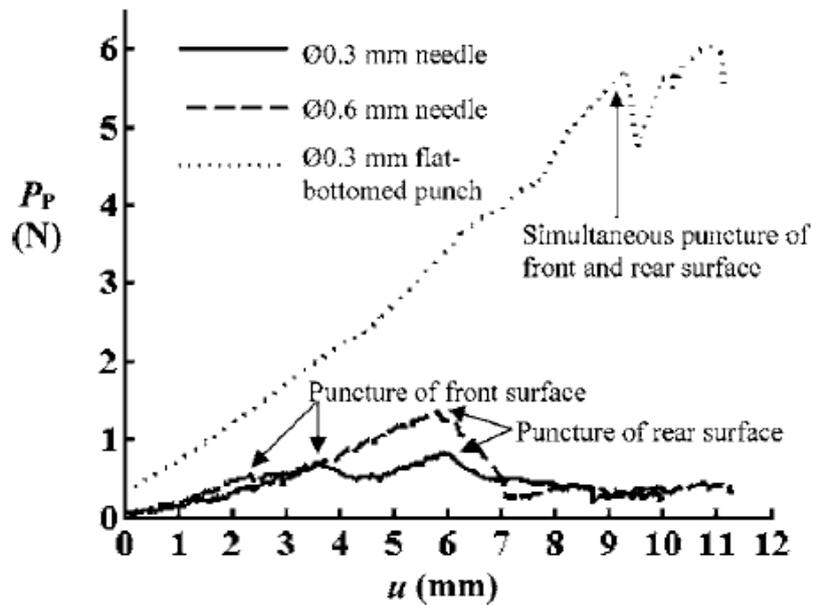


Figure 7 of the referred document. Punch load versus displacement response for the penetration of lower arm skin by a hypodermic needle and penetration of abdomen skin by a flat-bottomed punch.

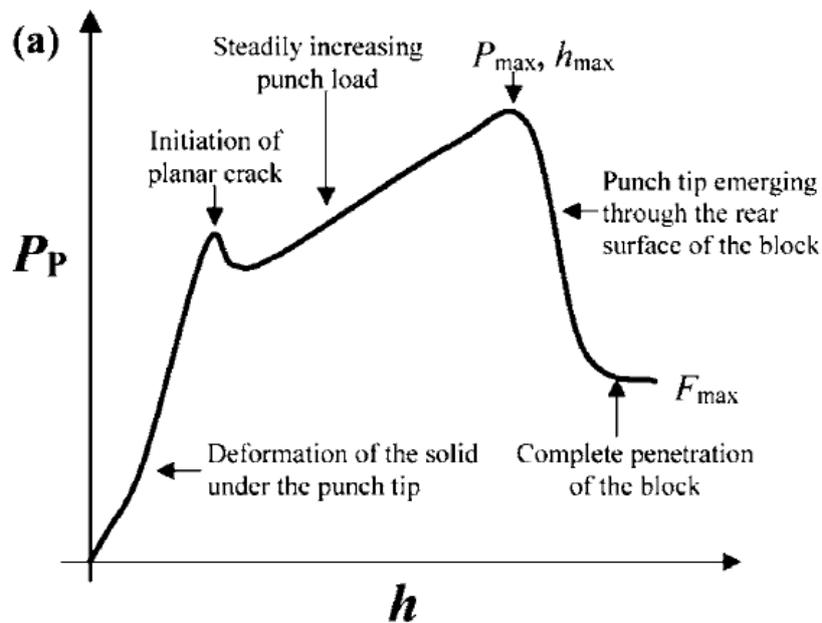


Figure 19 of the referred document. Characteristics of the punch load versus displacement response for the penetration of a soft solid by (a) a sharp tipped punch and (b) a flat-bottomed punch

12.3 APÉNDICE 3. PIEZAS REALIZADAS.

Los elementos obtenidos de librerías de CAD serán especificados en el apartado y se podrán constatar con la referencia 4.

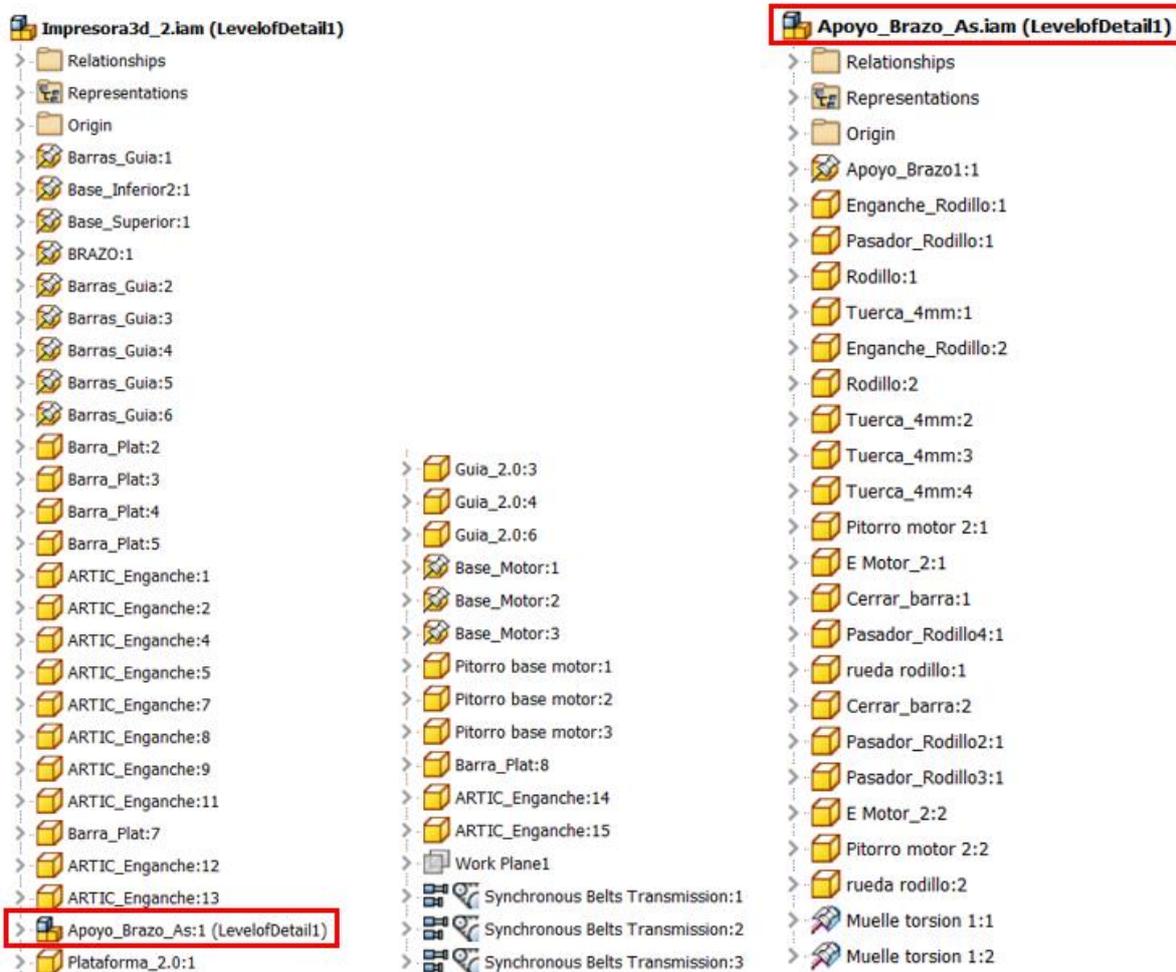
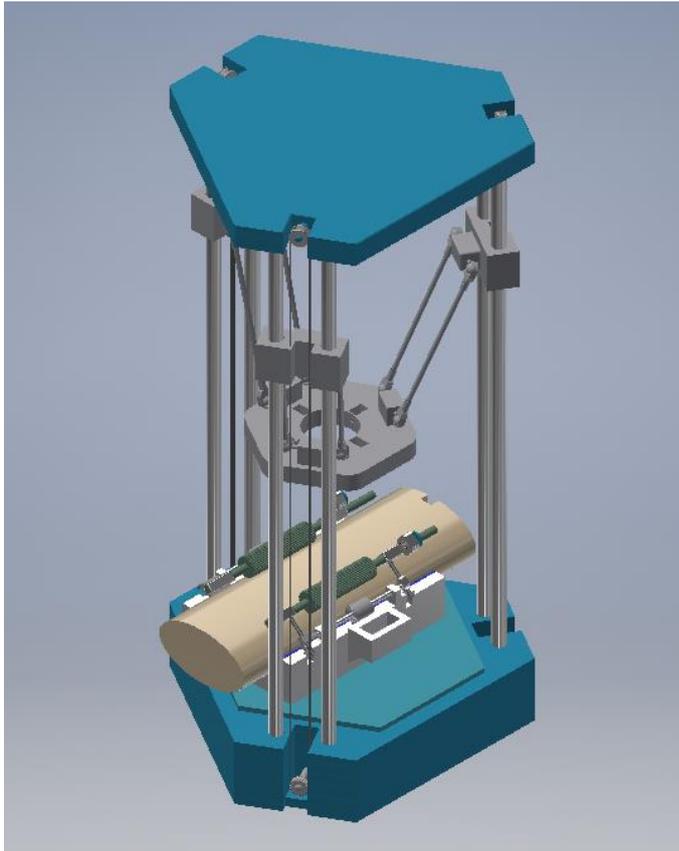


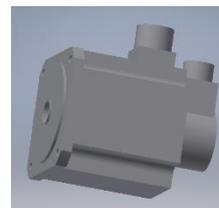
Figura 12-3-1. Lista de piezas del montaje completo sin cabezal.



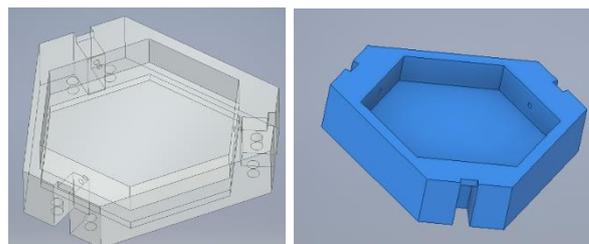
→ Brazo:



→ Motor de la base (Obtenido de librería de CAD):

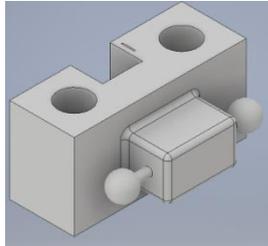


→ Plataforma de la base:

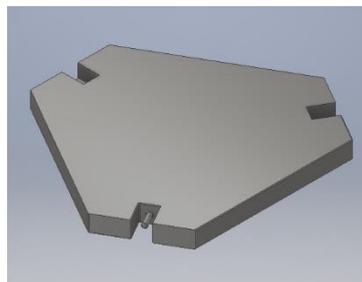


→ Baras guía: 

→ Polea-correa: elemento generado por Inventor con parámetros seleccionados a mano.*



→ Guías:



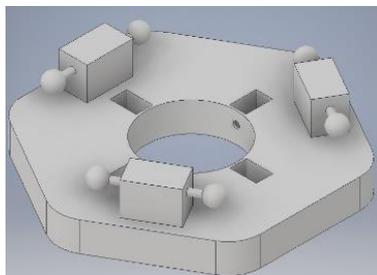
→ Plataforma superior:



→ Enganche barras plataforma:

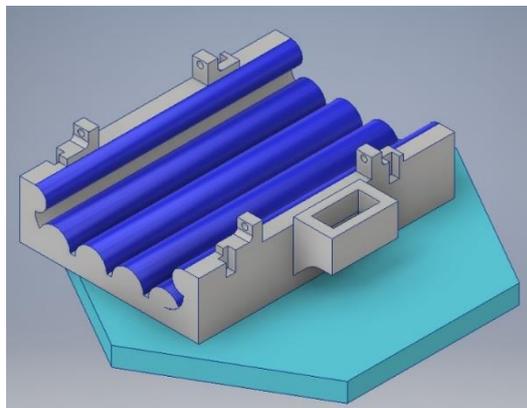
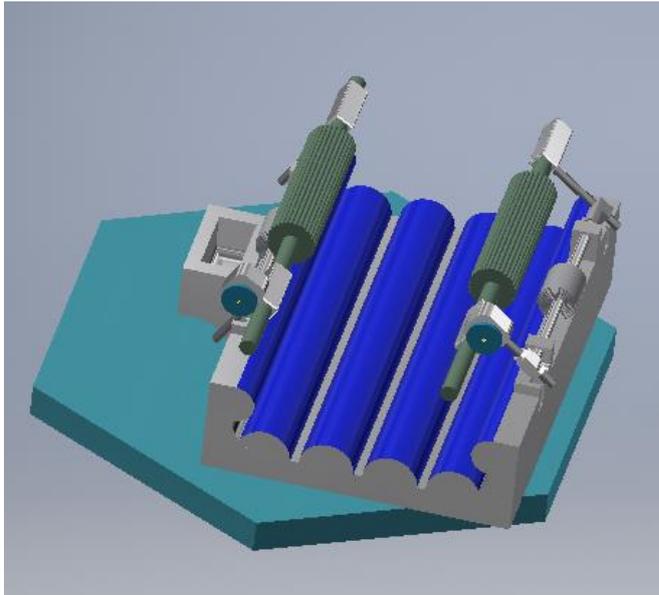


→ Barras de plataforma:



→ Plataforma:

Figura 12-3-2. Estructura externa.



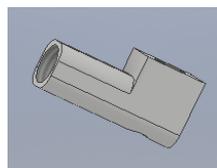
→ Base:



→ Barra inferior:



→ Muelle a torsión:



→ Enganche brazo mecánico:

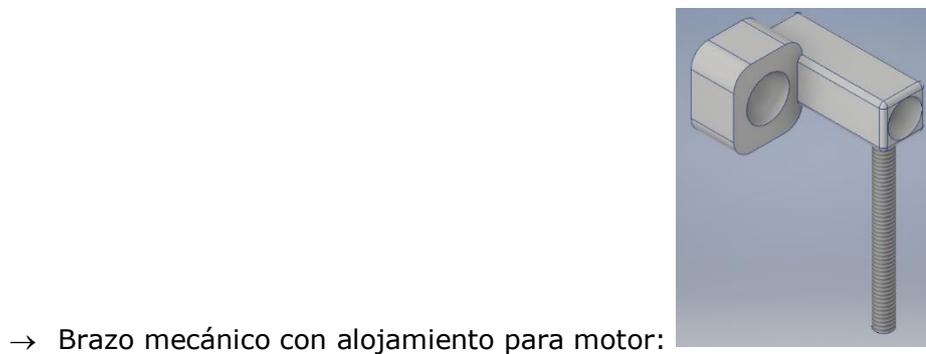
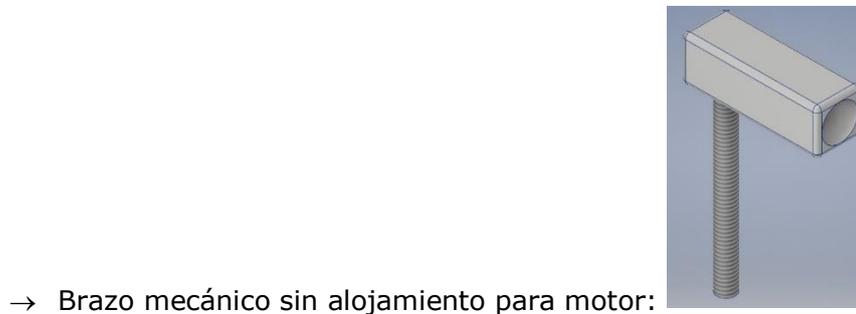
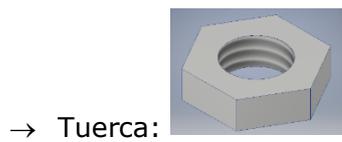
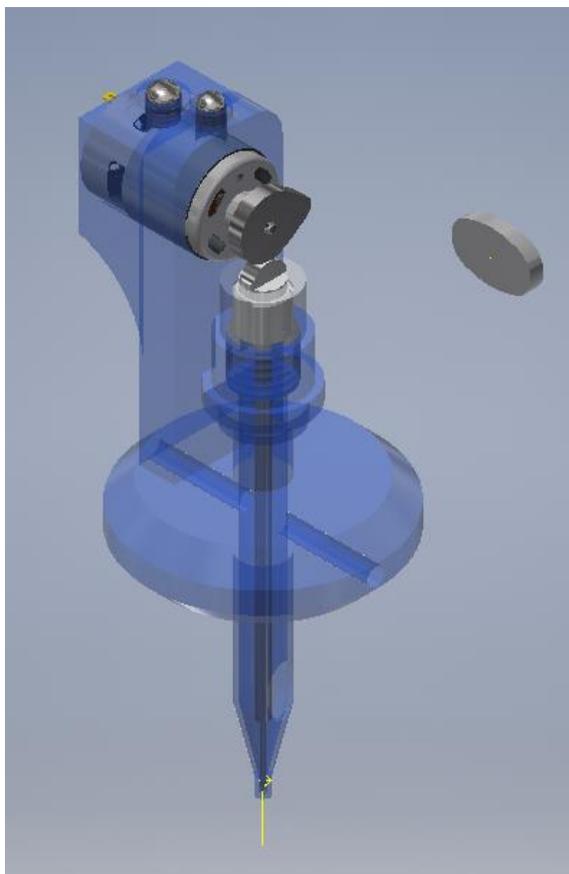
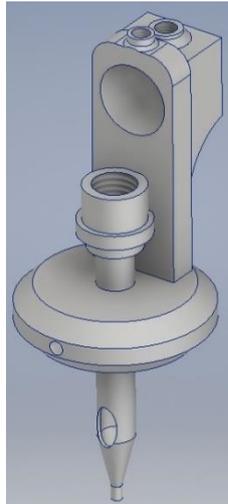


Figura 12-3-3. Apoyo de brazo.

- Ensayo2.iam
 - > Relationships
 - > Representations
 - > Origin
 - > Aguja1:1
 - > Agujaarriba1:1
 - > E Motor_1:1
 - > Levaabajo:1
 - > Mesa_Plat2:1
 - > Tapon_Tattoo:1
 - > Tornillo_M5_L4.5:1
 - > Tornillo_M6_L8:1
 - > Pitorro motor:1
 - > Leva2:1

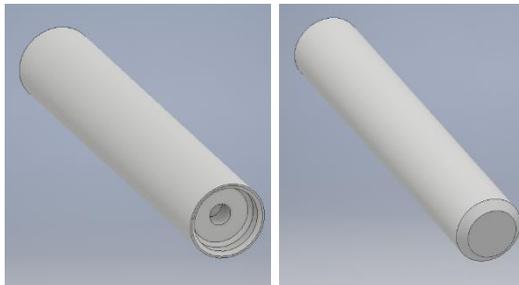
Figura 12-3-4. Lista de piezas del cabezal con leva.





→ Estructura externa:

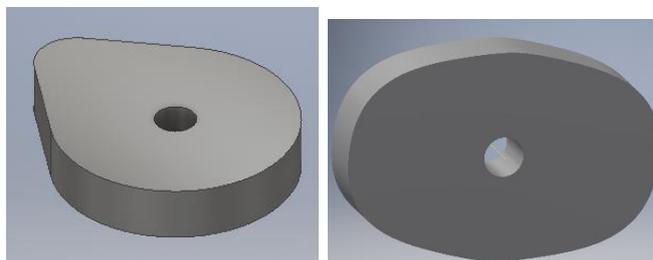
→ Pasadores plataforma (No se ve en el general):

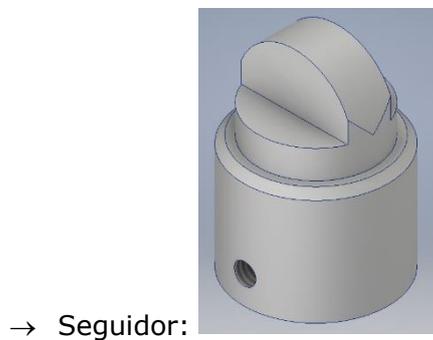
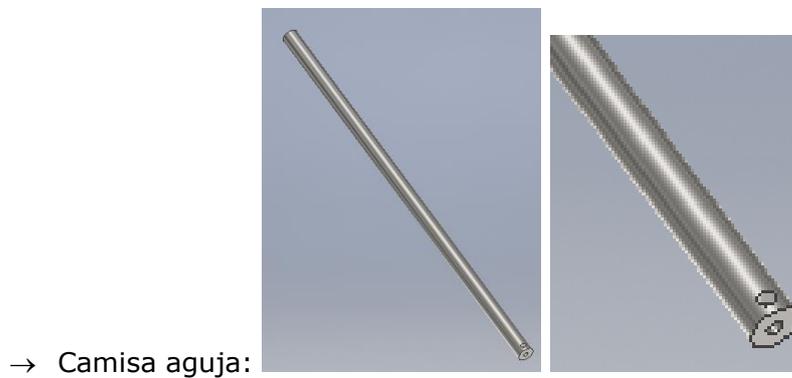


→ Motor plataforma (No se ve en el general) (Obtenido de librería de CAD):



→ Leva:





- Leva inicial: Generado por Inventor. *
- Leva mejorada: Generado por Inventor. *
- Muelle: Generado por Inventor. *



→ Motor (Obtenido de librería de CAD):

→ Tornillos y pasadores de apriete:

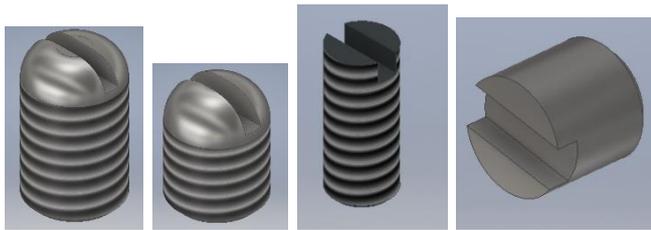
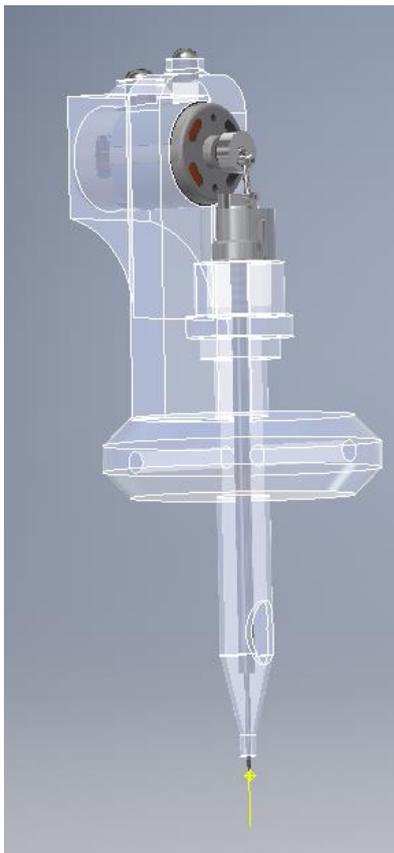
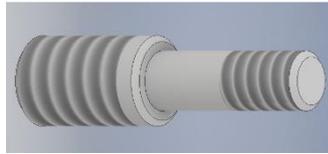


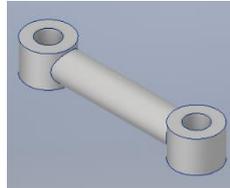
Figura 12-3-5. Máquina de tatuar seleccionada.



→ Pasador excéntrica:



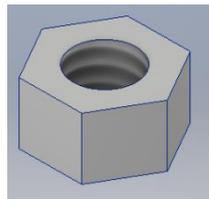
→ Barra conectora:



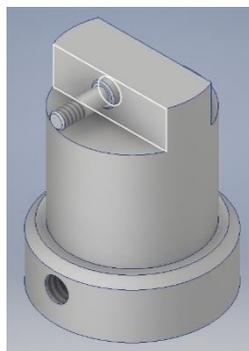
→ Aguja 2:



→ Tuerca:



→ Seguidor 2:



→ Rueda:

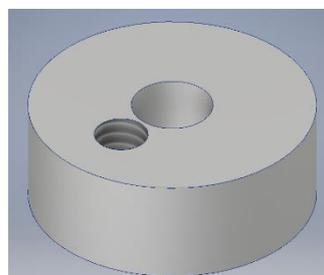


Figura 12-3-6. Añadidos máquina de tatuar clásica.

12.4 APÉNDICE 4. CÁLCULO DEL MUELLE A TORSIÓN.

SPRINGS & THINGS

Spiral Torsion Springs

General Data

Spiral torsion springs, which are usually made of rectangular section material, are wound flat, generally with an increasing space between the coils. The torque delivered per revolution is linear for the first 360°. At greater angular rotations, the coils begin to close on the arbor, and the torque per turn increases rapidly. For this reason, springs of this type are usually used in applications requiring less than 360° of rotation.

Design Formulas

The formula for torque delivered by a spiral torsion spring is:

$$(1) M = \frac{\pi E b t^3 \theta}{6L} \text{ lb.} \cdot \text{in. (N} \cdot \text{mm)}$$

where

E = Modulus of elasticity, psi (MPa)
 θ = Angular deflection in revolutions
 L = Length of active material, in. (mm)
 M = Moment or torque, lb.·in (N·mm)
 b = Material width, in. (mm)
 t = Material thickness, in. (mm)

The stresses imposed on a spiral torsion spring are in bending, and the deflecting beam formula for stress may be used:

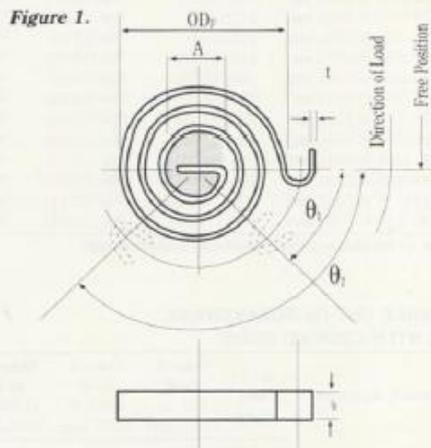
$$(2) S = \frac{6M}{bt^2} \text{ psi (MPa)}$$

Spiral torsion springs for general use can be stressed from 175,000 to 200,000 psi (1210–1380 MPa), depending on material hardness. In applications where higher stresses and material fatigue are involved, it is suggested that a spring manufacturer be consulted.

The arbor diameter (A) and outside diameter in the free condition (OD_F) do not appear in the formulas for torque or stress, but the space occupied by the spring must be considered in design. A spring which is too small may wind up tight on the arbor before the desired deflection is reached. If the outside diameter is too large, the spring will not fit the space available.

The following formula, based on concentric circles with a uniform space between the coils, gives a close approximation of the minimum OD_F:

$$OD_F = \frac{2L}{\pi \left(\frac{\sqrt{A^2 + 1.27Lt} - A}{2t} - \theta \right)} - A \text{ in. (mm)}$$

Figure 1. 

Design Example

Assume that a spiral torsion spring is made of 0.032 in. (0.81 mm) thick by 0.25 in. (6.35 mm) wide 1070 carbon steel and must deliver a moment of 4.5 lb.·in. (508 N·mm) at 135° deflection. The spring is to work over a 0.25 in. (6.35 mm) diameter arbor. What is the active length of material required, the stress imposed on the spring, and the spring O.D.?

Transposing the formula for torque, active length of material (L) is given by:

$$L = \frac{\pi E b t^3 \theta}{6M} \text{ in. (mm)}$$

where

$$\theta = \frac{135^\circ}{360^\circ} = 0.375 \text{ Revolutions}$$

$$L = \frac{\pi(30 \times 10^6)(0.25)(0.032)^3(0.375)}{6(4.5)} = 10.72 \text{ in. (272.3 mm)}$$

(L does not include the material needed for the end configurations)

$$S = \frac{6(4.5)}{0.25(0.032)^2} = 105,000 \text{ psi (724 MPa)}$$

$$OD_F = \frac{2(10.72)}{3.14 \left(\frac{\sqrt{0.25^2 + 1.27(10.72)(0.032)} - 0.25}{2(0.032)} - 0.375 \right)} - 0.25$$

$$OD_F = 0.762 \text{ in. (19.35 mm)}$$

Source: Handbook of Spring Design

Figura 12-4-1. Diseño de muelle a torsión.

12.5 APÉNDICE 5. ESTUDIO DE PATENTE.



Alejandro Rodriguez <Alejandro.Rodriguez@idiada.com>

30/04/2019 15:23



Para: inigosanchez777@gmail.com

Buenas!

Cítala sin problema.

No entré demasiado en el diseño, al ser masas tan pequeñas y funcionando a esas RPM, creo que es más importante un estudio del material a usar para tener una buena durabilidad antes que el propio perfil de la leva.
 La constante del muelle también es un punto clave.

El proyecto universitario (confidencial) incluye bastante más que la patente, en la que intenté abarcar al máximo ofreciendo el mínimo de detalles!

Saludos,
 Alex.

>>> iñigo sánchez <inigosanchez777@gmail.com> 30/04/2019 15:14 >>>

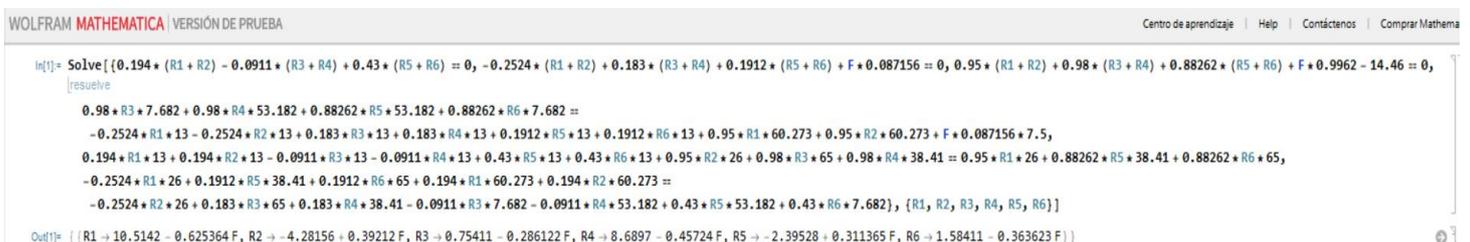
Hola Alejandro:

Ví vuestra patente del uso de una leva para cambiar el mecanismo de la máquina de tatuar y me pareció una gran idea, la pregunta es a ver si podría citar la patente en mi proyecto, también me gustaría saber si definísteis el mecanismo de alguna manera, es decir, cinemáticamente, dinámicamente, el perfil de la leva a usar, vibraciones inducidas en el sistema... probablemente cambiaré el perfil de la leva o la diseñaré yo mismo pero para saber si la patente estaba más desarrollada que lo que he encontrado en internet.

Muchas gracias y un saludo.
 Iñigo.

Figura 12-5-1. Permiso de uso de patente.

12.6 APÉNDICE 6. RESOLUCIÓN CON MATHEMATICA.



```

WOLFRAM MATHEMATICA | VERSIÓN DE PRUEBA
Centro de aprendizaje | Help | Contáctenos | Comprar Mathema

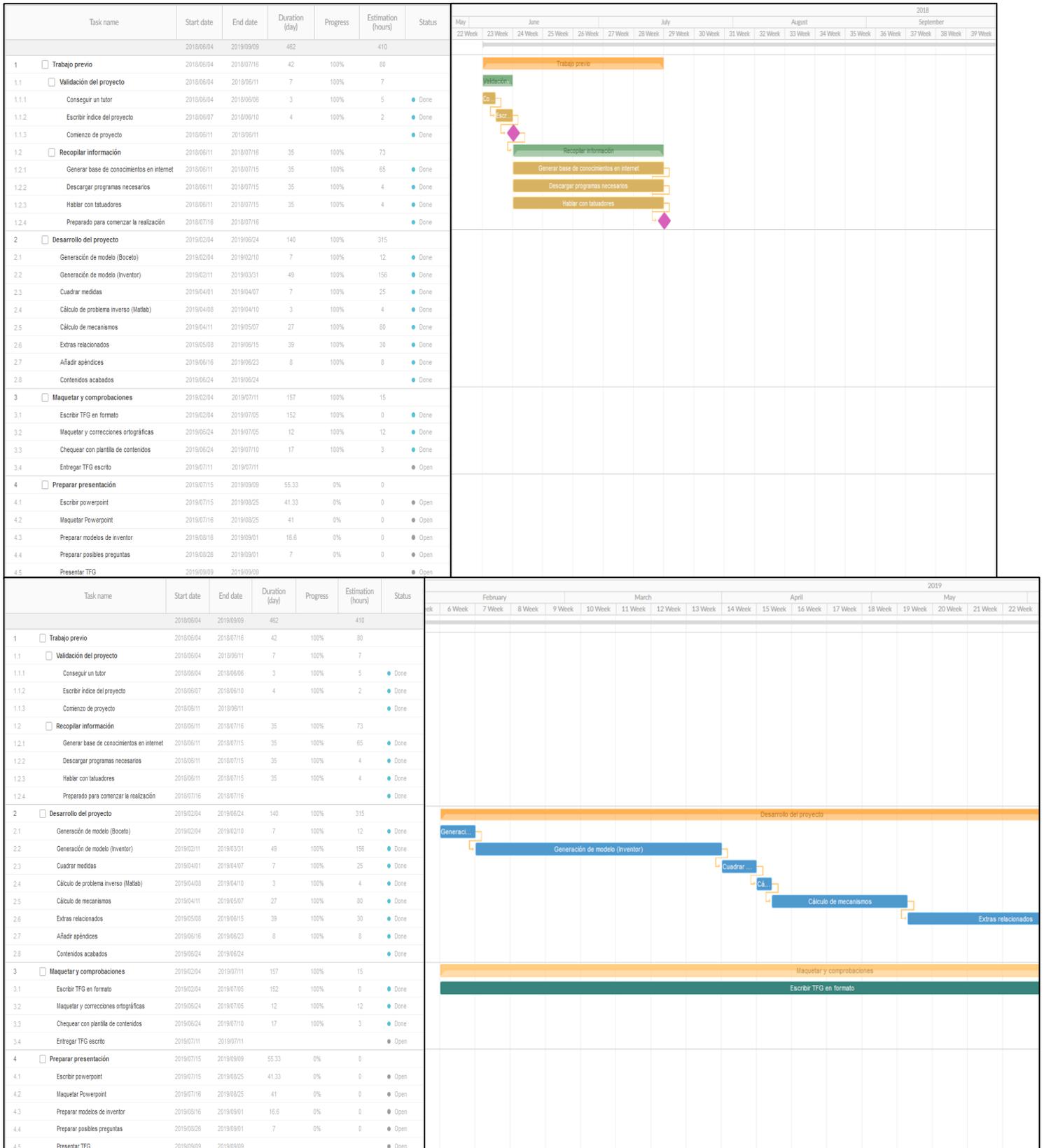
In[1]:= Solve[{0.194*(R1 + R2) - 0.0911*(R3 + R4) + 0.43*(R5 + R6) == 0, -0.2524*(R1 + R2) + 0.183*(R3 + R4) + 0.1912*(R5 + R6) + F*0.087156 == 0, 0.95*(R1 + R2) + 0.98*(R3 + R4) + 0.88262*(R5 + R6) + F*0.9962 - 14.46 == 0,
[resuelve]
0.98*R3 + 7.682 + 0.98*R4 + 53.182 + 0.88262*R5 + 53.182 + 0.88262*R6 + 7.682 ==
-0.2524*R1 + 13 - 0.2524*R2 + 13 + 0.183*R3 + 13 + 0.183*R4 + 13 + 0.1912*R5 + 13 + 0.1912*R6 + 13 + 0.95*R1 + 60.273 + 0.95*R2 + 60.273 + F*0.087156 + 7.5,
0.194*R1 + 13 + 0.194*R2 + 13 - 0.0911*R3 + 13 - 0.0911*R4 + 13 + 0.43*R5 + 13 + 0.43*R6 + 13 + 0.95*R2 + 26 + 0.98*R3 + 65 + 0.98*R4 + 38.41 == 0.95*R1 + 26 + 0.88262*R5 + 38.41 + 0.88262*R6 + 65,
-0.2524*R1 + 26 + 0.1912*R5 + 38.41 + 0.1912*R6 + 65 + 0.194*R1 + 60.273 + 0.194*R2 + 60.273 ==
-0.2524*R2 + 26 + 0.183*R3 + 65 + 0.183*R4 + 38.41 - 0.0911*R3 + 7.682 - 0.0911*R4 + 53.182 + 0.43*R5 + 53.182 + 0.43*R6 + 7.682], {R1, R2, R3, R4, R5, R6}]

Out[1]= {{R1 -> 10.5142 - 0.625364 F, R2 -> -4.28156 + 0.39212 F, R3 -> 0.75411 - 0.286122 F, R4 -> 8.6897 - 0.45724 F, R5 -> -2.39528 + 0.311365 F, R6 -> 1.58411 - 0.363623 F}}
  
```

Figura 12-6-1. Resolución con mathematica.

12.7 APÉNDICE 7. ASPECTOS ECONÓMICOS Y DE ORGANIZACIÓN.

12.7.1 Gantt



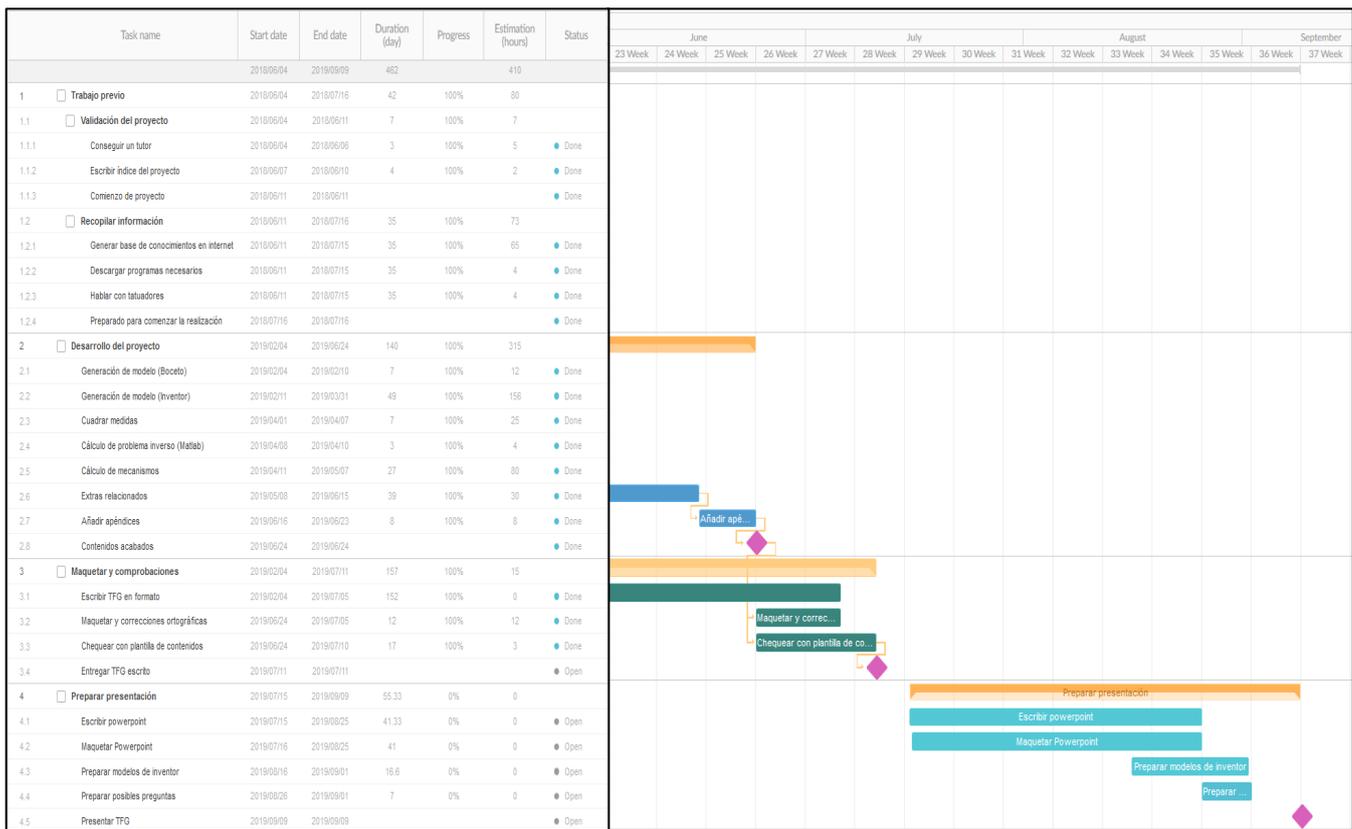


Figura 12-7-1-1. Gantt.

12.7.2 Presupuesto

En este apartado se valorarán las horas invertidas en el proyecto que equivale al trabajo de un ingeniero junior describiendo la distribución de estas (Aparece en la columna de "Estimation (Hours)" del Gantt, figura 12-7-1-1). También se tasará el prototipo generado de la máquina de tatuar en función del trabajo invertido y su posible coste de producción. Se incluirán también los precios de las licencias profesionales de los programas utilizados (No el formato estudiante ya que este no se podría utilizar en un proyecto real de empresa) y la amortización del equipo de trabajo utilizado.

Según la referencia 10.1 el sueldo de ingeniero junior por hora es de $(1300\text{€}/\text{mes} * 14 \text{ pagas/año}) / (250 \text{ días laborables/año} * 8\text{h}/\text{día}) = 9.33\text{€}/\text{hora}$. Por lo que el trabajo de ingeniero para realizar este trabajo se tasa en 3826.67€, para no quedarse corto y asegurar ser fiel a las condiciones laborales cambiantes dependiendo de la empresa redondeamos a tasar el trabajo en 4000€.

El precio de los materiales y fabricación se tomarán del 30% del coste de mercado de una impresora 3D profesional, según el estudio de mercado que se hizo al principio, comentado en el apartado 2 y reflejado en la recopilación de datos del Gantt, ese precio bascula entre 500€ y 600€ por lo que tasamos este coste en $550\text{€} * 0.3 = 165\text{€}$ por impresora.

Se tasan los materiales de oficina... usados durante el proyecto en una estimación de 40€.

Se toman los costes indirectos como un 7% de los costes directos.

Se ha utilizado un ordenador ASUS ZenBook Pro 15 cuyo precio asciende a 1300€ se calcula la amortización en base a una hora=1300 € / 9855 horas de vida ordenador (4.5 horas al día durante 6 años) = 0.132 €/hora.

Licencias de software (Ver referencia 10.2):

- Inventor: 2613.60 €/año= 217.8 €/mes.
- Mathematica: 1775 €/año=147.92 €/mes.
- Matlab: 800 €/año=66.66 €/mes.
- Microsoft office enterprise: 12,80 € usuario/mes.

Con estos datos se realiza el presupuesto:

Concepto	Cantidad	Unidades	Coste unitario	Coste total	Comentarios
Trabajo invertido en el proyecto				4.000,00 €	
Ingeniero junior	410	Horas	9,33 €	4.000,00 €	(Redondeado)
Amortizaciones				1.797,23 €	
Ordenadores	401	Horas	0,13 €	52,93 €	(410 - horas no invertidas en ordenador)
Licencia de Inventor	6	meses	217,80 €	1.306,80 €	
Licencia de Mathematica	1	mes	147,92 €	147,92 €	(Solo se ha usado 1 mes para los cálculos pertinentes)
Licencia de Matlab	3	meses	66,66 €	199,98 €	(Solo se ha usado 3 meses para los cálculos pertinentes)
Licencia de Microsoft Office	7	meses	12,80 €	89,60 €	(Duración total aproximada)
Gastos extra y de producto				40,00 €	(Fijos)
Material de oficina				40,00 €	
Coste de producción y materiales	200	al año	165,00 €	33.000,00 €	(Coste variable)
Costes Directos (fijos)				5.837,23 €	
Costes Indirectos (fijos)	7	%		408,61 €	
SUBTOTAL (fijos)				6.245,84 €	
Imprevistos (fijos)	15	%		936,88 €	
TOTAL (fijos)				7.182,71 €	

Figura 12-7-2-1. Presupuesto.

Si se quiere llegar a obtención de beneficios a 4 años vista y se estima una venta de al menos 200 máquinas de tatuado al año en los primeros 10 años el precio de una de estas debería ser de:

$$(Costes fijos + Costes variables) * 1.07 * 1.15 = Precio unidad * unidades * tiempo$$

$$(5837.23 € + 165 € * 200 uds/año * 4 años) * 1.07 * 1.15 = Precio unidad * 200 uds/año * 4 años$$

$$Precio unidad = 212.012€$$

Ecuaciones 12-7-2-1. Precio máquina de tatuar.