

18 DE OCTUBRE DE 2020/2021

BITÁCORA DE PRÁCTICAS: ELABORACIÓN DE UN SENSOR DE PRESIÓN BASADO EN FIBRA ÓPTICA

LLAMAS TOLEDO, MARIO
NRG-CENTRO DE INVESTIGACIÓN CAJAL (CSIC)
UPM - Universidad Politécnica de Madrid

DATOS DE LAS PRÁCTICAS CURRICULARES

Datos del estudiante:

Nombre: Mario Llamas Toledo
Estudios: Máster en automática y robótica (UPM)

Datos de la entidad colaboradora:

Nombre: Neural rehabilitation group (NRG)-CSIC
Sede: Instituto Cajal

Datos de las prácticas:

Fecha de inicio: 30 de Noviembre de 2020
Finalización: 18 de Enero de 2021
Horas al día: 5
Horas Total: 180

Descripción de la empresa:

El Grupo de Rehabilitación Neural (NRG) centra sus principales esfuerzos de investigación en el desarrollo de métodos y tecnologías que puedan ayudar a comprender y controlar los sistemas biológicos humanos y su interacción con el entorno. En particular, se establece un programa de investigación interdisciplinar con la misión de perseguir de forma colaborativa el desarrollo de metodologías, intervenciones y dispositivos de asistencia innovadores para mejorar la calidad de los cuidados y la calidad de vida de las personas con discapacidad.

En este contexto, sus objetivos abarcan el análisis y la evaluación de los sistemas neuromusculoesqueléticos y cognitivos que permiten a los seres humanos producir movimiento y tomar decisiones en entornos no estructurados. Persiguen activamente la investigación innovadora y de impacto hacia el desarrollo de métodos que mejoren los resultados funcionales o de salud de los individuos con discapacidades físicas, incluyendo pero no limitado a los individuos con accidente cerebrovascular, lesión de la médula espinal, parálisis cerebral. Interesándose además en la mejora cognitiva y física del ser humano a través de medios naturales o artificiales.

En concreto, el departamento en que me situaron se enfoca en estudiar la interacción del exoesqueleto con el ser humano, estudiando así las diferentes señales empleadas para el control del exoesqueleto y las diferentes fuerzas ejercidas por el exoesqueleto sobre el cuerpo humano.

SEMANA 1. INTRODUCCIÓN

La primera semana fue de adaptación. Me explicaron los diferentes proyectos que se estaban llevando a cabo y cómo se estaban afrontando; comprendiendo así cómo funciona el centro de investigación y los diferentes equipos presentes en él, junto a sus respectivos proyectos.

Además, en esta primera semana me explicaron cuál iba a ser mi labor en el centro. Explicándome así el funcionamiento y la teoría presente en los sensores ópticos, así como su proceso de elaboración.

Dichos sensores se basan en la transmisión de luz a través de la fibra óptica para medir la presión ejercida sobre uno, o varios puntos de la misma. Para ello, se realiza un corte en la fibra, de forma que su núcleo quede expuesto. A continuación, se pega un led a dicha fibra, de forma que su luz incida directamente sobre el núcleo de la misma. Y, por último, se encapsula todo mediante un cilindro de silicona, que contendrá tanto a la fibra, como al led en su interior. De esta forma al presionar sobre el cilindro de silicona el led se acercará más a la fibra, aumentando así la luz recibida en el extremo de esta. Lugar dónde se colocará un sensor de luz. Esta variación de luz es proporcional a la variación de presión sobre el led.

Tras explicarme el funcionamiento del sensor, me facilitaron un programa: desarrollado en Arduino junto a Visual Studio.

El código Arduino ("*Multiplexing*"¹) será el encargado de encender los diferentes leds presentes en la fibra, uno a uno, y tras ello medir la luz incidente en el sensor (dispuesto en el extremo de la fibra) y apagar dicho led para proceder de igual manera con el siguiente led. De esta forma, se pueden medir diferentes puntos de presión en la fibra sin un gran retraso entre medidas, pues el proceso es muy rápido.

Y el código desarrollado en C# (C Sharp) mediante el IDE Visual Studio ("*Multiplexado_VS*"); simplemente sirve para visualizar los datos de una manera mucho más cómoda, en tiempo real. En la Figura 1 podemos observar dicha visualización de datos.

Para ello recibe los datos del puerto COM enviados por la placa SP32, encargada de ejecutar el código Arduino anteriormente mencionado.

Por otra parte, también recibí una explicación de la conexión presente en la placa. Y me informé sobre el microcontrolador empleado, SP32 (un microcontrolador ARM de bajo coste).

¹ Todos los códigos generados se pueden hallar en el siguiente repositorio: <https://github.com/mariollamasupm/Mario.PCajal>.

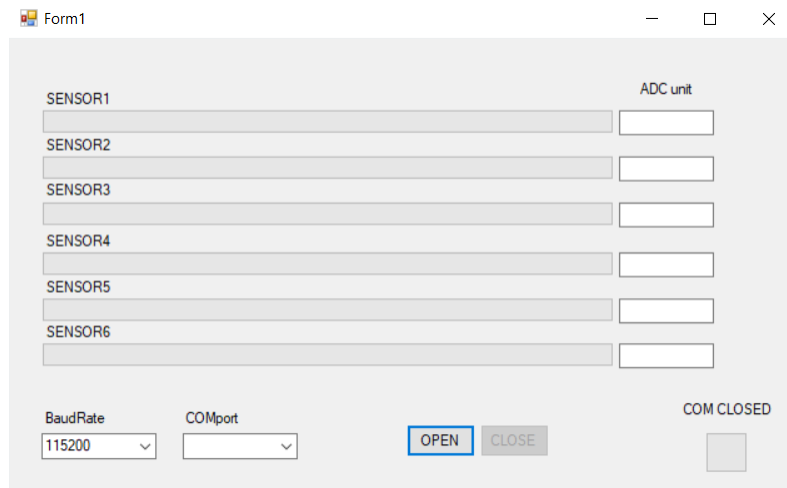


Figura 1- Visualización de datos (Visual Studio)

Tras todas estas explicaciones, comenzó mi labor en el centro: Mi primer objetivo fue la creación del código necesario para la comunicación inalámbrica de la placa. De forma que se pudiesen ver y grabar los datos desde un terminal remoto.

Para ello escogí desarrollar mi código en el IDE Arduino, y realizar la transferencia de datos mediante Wifi. Ya que la transferencia es más rápida y posee mayor alcance que la comunicación Bluetooth. Sin embargo, al desarrollar el código ("*Sensor_wifi_final*"), pude comprobar que la transferencia de datos no era lo suficientemente rápida (pues tarda demasiado en graficar los datos), y por lo tanto este código se empleará únicamente para la visualización de datos en tiempo real, y no para su grabación.

SEMANA 2. SOFTWARE INICIAL

Esta semana comenzó con el desarrollo del código anteriormente mencionado, la comunicación de datos mediante Wifi. Para ello, el código se encarga de crear una página web que refrescará cada segundo con los nuevos datos del sensor. Para mostrar dichos datos crea 6 gráficas, una para sensor, en las cuales mostrará el valor del sensor en función del tiempo.

Para crear la página web se modificó un ejemplo de HTML descargado de internet. Aprendiendo algunas de las posibilidades que ofrece dicho lenguaje. En la Figura 2 podemos observar la visualización de la página web.

Ya que la página web se había descartado como forma de guardar los datos leídos del sensor, se debió pensar en otra vía. Se valoró guardar los datos en la memoria Flash del dispositivo, pero se descartó debido a que la escritura en memoria Flash está limitada a un número máximo de veces. Finalmente se optó por comprar un módulo que nos permitiese la conexión con una tarjeta SD, de forma que los datos se

guardarían en la SD y posteriormente esta se extraería para su análisis. Resultando así una forma más eficiente y práctica para el grabado de datos y su posterior análisis.



Figura 2 -Página Web para la visualización de sensores

Con este objetivo se elaboró un código ("*Datos_SD*") que nos permitirá grabar los datos en la tarjeta SD de manera simultánea a la lectura de datos. Y otro ("*SD_test*") que comprobará las características principales de la tarjeta conectada, así como su correcto funcionamiento.

Los datos se guardarán en la tarjeta como un archivo csv, es decir, separados por comas. Para mayor facilidad en su posterior procesamiento con Matlab.

Tras realizar la lectura y grabado de datos se comenzó a explorar la forma de calibrar dichos sensores. Se valoró caracterizar los mismos mediante un kit de pesas y una recta característica, pero se decidió emplear un sensor de fuerza para mayor rapidez.

Pues se requiere que el procedimiento sea automatizado al máximo posible, ya que el número de sensores que se pretende crear es elevado.

El sensor de fuerza empleado en este caso es el sensor lcm200. El problema de este sensor es su diseño (Figura 3), pensado para medir fuerzas tanto de tracción como de compresión.



Figura 3 -Sensor de fuerza

Debido al diseño de dicho sensor se hace necesario elaborar un soporte tanto para su calibración, como para su uso. Y tras estudiar dichos sensores se detecta que es necesario un módulo denominado "Load Cell" para su lectura. Por lo que se abandonó dicha vía temporalmente hasta tener un soporte y el módulo "Load Cell".

Además, estudiando el comportamiento de los sensores, se comienza a valorar la necesidad de estandarizar su proceso de elaboración. Pues la sensibilidad de los diferentes sensores recibidos es muy dispar y su desgaste con el tiempo muy notable.

También he de mencionar que estos sensores son únicamente válidos para fuerzas normales, no son capaces de leer la componente tangencial de la fuerza.

SEMANA 3. *CALIBRACIÓN DE SENSORES*

Durante la tercera semana de prácticas en el laboratorio del instituto Cajal se continuó con algunas de las tareas de la segunda semana y se comenzó a explorar a fondo la calibración de los sensores ópticos de presión.

Lo más destacado es la creación de dos programas Matlab: Uno encargado de realizar un test falso de los sensores de presión ("*Generar_test_falso*"), ya que aún no era posible grabar los datos reales por falta de pesos medidos, o en su defecto, del sensor calibrado de fuerza con su debido soporte. Y otro encargado de realizar la calibración de los sensores ("*Leer_test_falso*"), extrayendo para ello su recta característica.

El primero de los programas tiene en cuenta el ruido presente en una medida real, así como su forma. Realizando por lo tanto una señal escalonada, en la que podremos

ajustar la altura y anchura de los escalones (la altura se corresponde con la fuerza ejercida, mientras que la anchura estará relacionada con el número de medidas tomadas de dicha fuerza). El objetivo de dicho programa es simular un conjunto de datos reales medidos del sensor de presión, para poder así elaborar una primera aproximación a la calibración de un sensor real.

El segundo programa tiene el objetivo de extraer la recta característica del sensor simulado, y posteriormente también del real. Para ello emplea un filtro para eliminar ruido y trata de obtener la media para un conjunto de medidas correspondientes a la misma fuerza, ignorando las zonas de cambio de fuerzas. Una vez obtenida la recta característica, solo quedaría ajustar la pendiente y moverla para comenzar en el origen.

SEMANA 4. *LECTURA/ESCRITURA EXO H3*

La cuarta semana fue algo diferente. Me separé de mi trabajo realizado hasta el momento y estuve aprendiendo sobre la comunicación del EXO H3, el exoesqueleto presente en el laboratorio. Para ello exploré el datasheet del propio exoesqueleto, y los scripts proporcionados para su comunicación. Además, me explicaron cómo se realiza el control del exoesqueleto, generando la trayectoria mediante una cicloide y proporcionando al exoesqueleto cada uno de los puntos de dicha trayectoria.

El problema a afrontar esta semana era conseguir la comunicación bidireccional con el exoesqueleto, es decir, poder leer los sensores del exoesqueleto de forma simultánea al envío de comandos (la trayectoria). Sin embargo, la comunicación se realiza mediante un único bus CAN, por lo que esto resulta físicamente imposible. Lo que sí se puede conseguir, es que la lectura y emisión de datos se realice de forma solapada y lo suficientemente rápida para dar la sensación de simultaneidad.

Primero, se trató de abordar el problema mediante un script de Matlab. Pero en él debíamos abrir y cerrar la comunicación para cambiar entre envío y recepción de datos. Por ello se decidió cambiar a Matlab App, desarrollando una GUI con un botón para comenzar la lectura y escritura y una serie de gráficas para mostrar los datos leídos. En Matlab App se permite cambiar entre lectura y escritura para la comunicación de datos, sin necesidad de cerrar el canal de comunicaciones, por lo que se aceleró notablemente la comunicación. Para ello se hizo uso de una función callback para leer los datos.

Finalmente, el programa era capaz de realizar la lectura y escritura solapada, pero a baja velocidad. Para ello, el programa entra en un bucle en el que enviará un comando de trayectoria y posteriormente leerá los ángulos de las seis articulaciones (cadera, rodilla y tobillo x2) y los graficará en sus correspondientes ejes. El problema de la velocidad fue solucionado mediante la supresión de la gráfica en tiempo real, pues crearla tarda demasiado y ralentiza el programa considerablemente. En su lugar se creará y mostrará la gráfica tras terminar la trayectoria.

Cabe destacar que en esta semana aprendí mucho sobre el control del exoesqueleto, sus características, la comunicación por CAN y la creación de una aplicación en Matlab y el uso de las funciones de callback.

SEMANA 5. *SENSOR DE FUERZA*

Durante esta semana recuperé el trabajo previo. Aprovechando que ya habíamos recibido tanto el módulo SD como la Load Cell, pude comprobar el código realizado y ajustarlo. Así como, realizar el código necesario para leer el sensor de fuerza ("*Medir fuerza*"), calibrarlo ("*Calibration_sketch*") y realizar la lectura simultánea de fuerza y presión ("*CalibrarPres*"). Además, se comienza a plantear el diseño del soporte para el sensor de fuerza y del molde para encapsular el sensor en silicona. Y se asiste a una conferencia con la creadora de estos sensores, aún en fase de desarrollo. En esta conferencia se explicaron las diferentes aplicaciones de la fibra óptica como sensor, no solo de presión sino también de curvatura. Y sus diferentes características.

Uno de los principales problemas del sensor, es su saturación, permitiendo así un rango de medidas reducido.

También se descubrieron dos programas: Realterm, útil para grabar medidas leídas por uno de los puertos COM del ordenador. Empleado para grabar las medidas del programa de lectura de presión y fuerza. Y kst2, empleado para graficar dichas medidas, aunque posteriormente se grafican en Matlab por mayor sencillez.

Además, se tuvo que realizar la distribución de los componentes en las placas, obligando a hacer una relocalización y reconexión de todos ellos.

SEMANA 6. *IMPRESIÓN 3D*

Durante esta semana se aprendió Fusion 360, el programa de Autodesk, para el diseño de piezas 3D. Y el programa Ultimaker Cura, para la impresión en 3D.

Con estas dos herramientas se elaboraron diferentes versiones de soporte del sensor de fuerza, hasta dar con la versión final ("*Soporte sensor fuerza*"), que podemos observar en la Figura 4.

El principal problema fue dar con el diámetro exacto para que el soporte entrase sin holgura en la pieza, pero sin roscar. Ya que si el soporte se roscaba al sensor al situar un peso sobre él encontraríamos tanto fuerzas de presión como de tracción y el sensor

tomaría una medida errónea. Y el diámetro exacto era difícil de hallar, pues la impresora no posee precisión suficiente para un diámetro tan pequeño. Al poseer gran repetibilidad, una vez hallado el diámetro no habría más problemas.

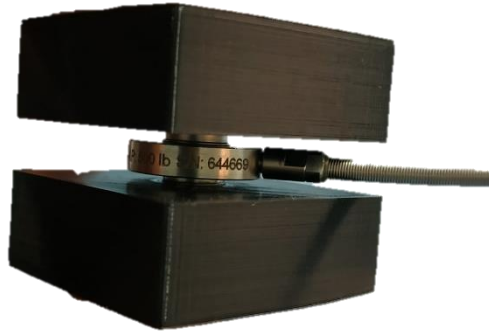


Figura 4 -Soporte sensor de fuerza

Por otra parte, se realizó de forma simultánea el diseño del molde que permitiría encapsular el sensor en silicona. Se comenzó con el diseño de la Figura 5.



Figura 5 -Molde Sensor

Y el diseño de la pieza que nos permita cortar la fibra de forma estándar, es decir, con el mismo ángulo y la misma profundidad para cada sensor. Para ello se basó en el paper "Optics and laser Technology".

Con esto se pretende estandarizar el proceso de elaboración de los sensores, estandarizando tanto el corte, como el encapsulamiento. Y valiéndonos de una máquina que nos permita estandarizar la distancia entre sensores.

Además, durante esta semana se aprendió y se practicó la micro soldadura. Pues era necesario soldar un cable a los leds comprados.

SEMANA 7. *PIEL SINTÉTICA*

Durante la séptima semana de prácticas se realizó el primer sensor de presión a través de fibra óptica. Dicho sensor se encapsuló con silicona, y no se pudo sacar del molde. Por este motivo se buscan otras opciones de encapsulamiento, recurriendo así a un compuesto que simula la piel a base de silicona. Este compuesto, es más flexible y blando que la silicona; por ello, junto a la modificación del molde para incluir ángulos de desmoldeo, nos permite desmoldarlo fácilmente.

El primer sensor realizado en piel sintética nos mostró los defectos del molde. Las paredes que permitían fijar el led impedían que se encapsulase. Y aunque se hicieron pruebas en las que se echaba primero una capa del material y posteriormente se colocaba el led, dicho procedimiento solo resolvía la ausencia de material bajo el led, pero no a sus lados (ver Figura 6).

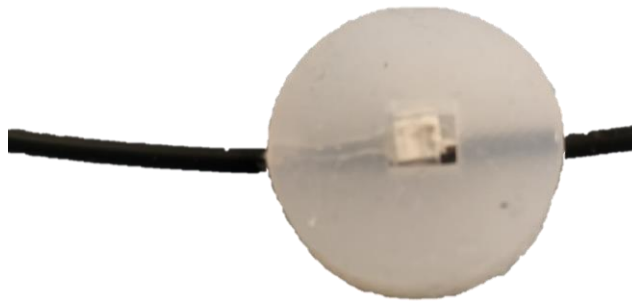


Figura 6 -Primer intento de encapsular el sensor con piel sintética

Se probó también la adicción de material a la piel sintética una vez que se había secado y desmoldeado, o incluso la posibilidad de añadir silicona caliente. Pero ambos experimentos fueron fallidos. Una vez se seque el material no se puede adherir más material, ni silicona caliente.

Además, se ajustaron también otras piezas 3D, como el soporte y la pieza de corte de la fibra óptica.

A finales de semana se comienza a plantear un nuevo modelo para el molde, en este caso situando la fibra por debajo del led y el led suspendido mediante un hilo de metal.

SEMANA 8. AJUSTE DEL MODELO

Durante la octava semana de mi estancia en el Cajal se terminó la pieza definitiva para el corte de la fibra (Figura 7).



Figura 7 -Pieza para el corte de la fibra óptica

Se creó el nuevo molde para el encapsulado del sensor (Figura 8), situando la fibra por debajo del led y el led suspendido mediante un hilo de metal. Se imprimió con diferentes alturas para comprobar la influencia de la distancia entre el sensor y la fibra en la sensibilidad y el rango del sensor.

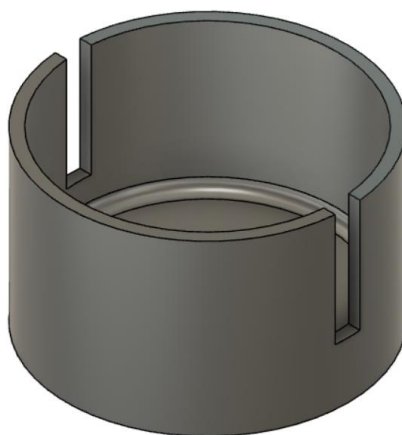


Figura 8 -Molde de encapsulado (v2)

Tras diversas pruebas se decidió cambiar el led empleado en las anteriores pruebas por un nuevo modelo, un led no infrarrojo y de superficie plana para evitar los problemas derivados de la superficie semiesférica del anterior led.

Se compró y se incorporó un conversor ADC de 16 bits, con el fin de mejorar la resolución de la medida.

Y además se realizaron diferentes pruebas con un nuevo material para el encapsulado; similar al anterior, pero de mayor densidad y dureza, por lo que daría mejores resultados de sensibilidad, pero con una distancia entre el led y la fibra menor.

RESULTADOS Y VALORACIÓN DE LA EXPERIENCIA

Como resultado de las prácticas, se creó un sensor de presión basado en la transmisión de luz de la fibra óptica. Generando diferentes modelos del mismo, variando el material de encapsulado y la distancia entre el led y la fibra óptica, para comprobar así su comportamiento ante dichos cambios.

Además, se creó todo el entorno software necesario para el tratamiento y comunicación de los datos medidos por el sensor. Creando así un programa encargado de comunicar dichos datos a través de wifi, otro encargado de grabarlos en una tarjeta SD para su posterior procesamiento y los diferentes programas relacionados con la adquisición de los datos y su posterior procesamiento, así como su calibración y la calibración del sensor de fuerza empleado para calibrar dichos sensores.

Por todo ello concluyo diciendo que las prácticas en esta empresa han sido para mí una experiencia muy enriquecedora, aportándome una gran visión del mundo de la investigación y de la forma de organizarse dentro de él, así como una gran cantidad de conocimiento, no solo en el área de trabajo correspondiente y en el mundo de los exosqueletos (principal línea de investigación del departamento en el que me encontraba), sino también en otras áreas transversales y en gran cantidad de programas que me han ayudado a alcanzar mis objetivos durante todos estos días. Como resumen del trabajo realizado se adjunta la Tabla 1, en la cual se puede apreciar los objetivos alcanzados por semanas, así como los principales problemas hallados y los conocimientos transversales adquiridos durante la consecución de los mismos.

SEMANA	Título	Actividad Principal	Conocimientos Transversales	Problemas encontrados	Archivos
1	INTRODUCCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> Programa Arduino+Visual Studio Explicación del sensor Datos wifi 	<ul style="list-style-type: none"> C# Visual Studio HTML SPIFFS 		<ul style="list-style-type: none"> ProvaDisperata Multiplexing Datos_Wifi
2	SOFTWARE INICIAL	<ul style="list-style-type: none"> Datos wifi Grabado en SD Estudio del sensor de fuerza 		<ul style="list-style-type: none"> La comunicación wifi no es suficientemente rápida para grabar datos (Solución: grabar SD) Forma del sensor de fuerza 	<ul style="list-style-type: none"> Grabar_SD SD_test Sensor_wifi_final Datasheet lcm200
3	CALIBRACIÓN SENSORES	<ul style="list-style-type: none"> Continuación de software inicial Acoplar sensor (Falta Load Cell) Test falso MatLab Calibración en MatLab 		<ul style="list-style-type: none"> Se necesita Load Cell para leer la fuerza Falta de pesos medidos para calibración Sensibilidad de cada sensor muy dispar, falta estandarización de la elaboración 	<ul style="list-style-type: none"> Generar_test_falso Leer_test_falso
4	LECTURA/ESCRITURA EXO H3	<ul style="list-style-type: none"> Recibir y transmitir simultáneamente por CAN 	<ul style="list-style-type: none"> MatLab GUI Control del EXO H3 	<ul style="list-style-type: none"> Se debe abrir y cerrar comunicación CAN para cambiar de transmisión emisión de datos (Solución: Emplear Matlab app) 	<ul style="list-style-type: none"> Mario_app EXO H3 Datasheet
5	SENSOR FUERZA	<ul style="list-style-type: none"> Lectura sensor fuerza Calibración sensor de fuerza Lectura conjunta sensor y fuerza Primera aproximación al soporte del sensor Conferencia sobre el sensor de presión óptico 	<ul style="list-style-type: none"> Sensor lcm200 Programa kst2 Programa realterm 	<ul style="list-style-type: none"> Peso centrado en el sensor, sino da una medida errónea debido a la fuerza de tracción 	<ul style="list-style-type: none"> Datasheet Medir fuerza Calibration_sketch CalibrarPres
6	IMPRESIÓN 3D	<ul style="list-style-type: none"> Soporte Sensor de fuerza (Aproximación al diámetro) Molde sensor de presión Pieza para corte de fibra óptica 	<ul style="list-style-type: none"> Impresión 3D con Ultimaker Modelado 3D con Fusion 360 Microsoldadura 	<ul style="list-style-type: none"> Precisión de la impresora Tiempo de impresión 3D 	<ul style="list-style-type: none"> Molde sensor Soporte sensor fuerza Pieza de corte
7	PIEL SINTÉTICA	<ul style="list-style-type: none"> Ajuste de piezas 3D Primer sensor con silicona Primer sensor de piel sintética 	<ul style="list-style-type: none"> Ángulo de desmoldeo 	<ul style="list-style-type: none"> No se puede desmoldear silicona Tiempo de fabricación de piel sintética (4h) Diseño del molde No se adhiere más material ni silicona 	
8	AJUSTE DEL MODELO	<ul style="list-style-type: none"> Nuevo modelo de Molde Finalización de corte de fibra Incorporar conversor 16 bits Modelo (nuevo molde y led) Modelo (nuevo material) Comprobar sensibilidad 		<ul style="list-style-type: none"> Led infrarrojo (Su voltaje y diseño) Material del molde (demasiado blando) 	

Tabla 1- Actividades realizadas durante las prácticas