

# DISEÑO DE UNA PRÓTESIS PARA UN BRAZO

Éric Blanca Pizarro

Trabajo de Final de Grado de Ingeniería de Diseño Industrial y Desarrollo del Producto - Departamento de Ingeniería Gráfica y de Diseño de Vilanova i la Geltrú – UPC (EPSEVG)

## Resumen

Con la intención de poder mejorar la calidad de vida de un individuo en concreto, nace la idea de este proyecto, el cual se basa en el diseño y desarrollo de una prótesis de brazo y mano, fabricada mediante impresión 3D y con una función añadida: la integración de un reloj inteligente y de su propia aplicación para el móvil. Esta prótesis se diseñará a medida para el amigo del autor, cuyo brazo presenta una malformación de nacimiento, debido al Síndrome Poland.

## 1- Introducción

A día de hoy, en relación a las prótesis de cualquier tipo, no hay las suficientes ayudas como para mejorar la calidad de vida de todos aquellos individuos que requieran de una de ellas, y cuando las hay, a veces no son la mejor solución a su problema.

Es por eso que, a lo largo de este artículo, se mostrará todo el camino que se ha seguido, con tal de ver el proceso de diseño y desarrollo de una prótesis de brazo y mano, en concreto para una única persona, exactamente para el amigo del autor del TFG, el cual sufre una malformación en su brazo derecho, debido a un síndrome conocido como: Síndrome de Poland. Este síndrome le afecta de manera directa a la musculatura del brazo y a los dedos de su mano, ya que carece de ellos.

Con este proyecto no se quiere únicamente obtener una prótesis funcional, sino que se le quiere agregar un valor añadido, de reloj inteligente. Además, esta no será fabricada mediante procesos convencionales, sino que se hará uso de la actual y

en auge tecnología de fabricación aditiva, por lo que esta prótesis será diseñada para ser impresa en 3D.

## 2- Objetivos

Hay una serie de objetivos que se han contemplado, en todo momento, a lo largo del proyecto y, a partir de los cuales se ha basado el desarrollo de este TFG. Como es evidente, el objetivo principal era tratar de obtener una prótesis totalmente funcional, con la idea de que comprendiese algún tipo de valor añadido, mejorando así la experiencia de uso del usuario en concreto.

Además, de tratar de utilizar la fabricación aditiva para llevar a cabo esta prótesis, con la intención de dominar esta tecnología, con tal de poder sacar su máximo potencial.

A nivel personal, es decir, del autor del TFG, hay un objetivo claro y es que, este proyecto pueda llegar a ser la base de algo mayor en un futuro, tratando de involucrar a más de un usuario, mejorando así la calidad de vida de todo aquel que lo requiera.

## 3- Estado del arte

Con tal de poder entender mejor todos los campos que intervienen en este proyecto, se lleva a cabo un estado del arte en el cual se llegan a tratar hasta tres temas en relación a este TFG: Por un lado, el síndrome sufrido por el autor, es decir, el Síndrome de Poland, por otro lado, la fabricación aditiva y, finalmente, las prótesis, tanto su evolución, como su relación con la impresión 3D.

## Síndrome de Poland

Este síndrome, debe su nombre al cirujano británico conocido como Sir Alfred Poland (1822-1872), al cual se le atribuye la primera descripción anatómica que se le dio a esta afección, en el año 1841.

El Síndrome de Poland es una malformación congénita de nacimiento muy poco frecuente, ya que únicamente se suele dar en 1 niño de entre 20.000-32.000 nacidos, provocándoles un subdesarrollo o ausencia del pectoral, siendo la mayoría de los casos, en hasta un 70%, el lado derecho el que se ve afectado.

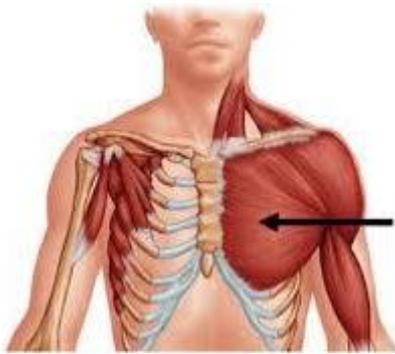


Figura 1. Ausencia del pectoral a causa del Síndrome de Poland.

Esta patología, cuya causa, a día de hoy, sigue siendo desconocida, ciertos expertos coinciden en cuales podrían ser las causas. Esta recae sobre una alteración en la arteria subclavia, la cual es interrumpida, provocando una obstrucción del flujo sanguíneo, que irriga los músculos del pecho, hombro, brazo y mano, durante la sexta semana de gestación del embrión.

Cabe destacar, que la principal afectación sobre un individuo a causa de este síndrome, es la ausencia del pectoral, pero esta no es el único síntoma que pueden padecer, ya que en el caso del amigo del autor, se ve afectado en: ausencia del músculo pectoral, ausencia de la musculatura del hombro, ausencia de la musculatura del brazo, antebrazo más corto de lo normal, braquidactilia (dedos más pequeños que otros), sindactilia (fusión de los dedos entre sí), ausencia de pelos en las axilas y ausencia de las glándulas sudoríparas.

## Fabricación aditiva o impresión 3D

Esta técnica de fabricación, se podría definir como el grupo de tecnologías capaz de crear objetos tridimensionales, mediante la superposición de

capas sucesivas de un determinado material, siendo un proceso por el cual se crean objetos físicos a partir de un modelo digital.

A pesar de que se piense que esta tecnología es reciente, cabe destacar que empezó en 1976, cuando salieron los primeros equipos y materiales, pero es realmente en la actualidad cuando se está explotando esta técnica, debido a:

- La disponibilidad de nuevos materiales.
- El vencimiento de patentes que limitaba su uso.
- El máquetin realizado por las empresas líderes.
- El movimiento *Maker*.

Esta tecnología ha sufrido su mayor crecimiento desde del 2017, ya que, en este mismo año, el coste global (materiales, servicios, hardware, software...) supuso una cantidad superior a los 10 mil millones de dólares, previendo que durante este 2021 ese gasto aumente un 20%, superando los 20 mil millones de dólares.

Además, caben destacar los sectores que mayor influencia tienen en esta técnica: Prototipaje, piezas de productos, arquitectura, tejidos humanos y, las prótesis.

## Prótesis de mano y brazo

Las prótesis, las cuales según el diccionario médico se define como: *Sustitución de una parte del esqueleto o de un órgano por una pieza o implante especial, que reproduce más o menos exactamente lo que ha de sustituir*, a lo largo de la historia han ido cogiendo cada vez más protagonismo, pero es un sector que ha sufrido una evolución muy lenta.

Aun así, en la actualidad se han conseguido gran cantidad de avances, respecto a la prótesis, por lo que a día de hoy se puede realizar una clasificación de estas en función de sus mecanismos de actuación. Estas se dividen en:

- Prótesis mecánicas.
- Prótesis neumáticas.
- Prótesis con actuadores eléctricos.
- Prótesis mioeléctricas

Es por eso que, a raíz de la fusión de los grandes avances protésicos y de los grandes avances producidos en la fabricación aditiva, cada vez son más las empresas que, dentro de este sector, tratan de mejorar la calidad de vida de las personas.

A día de hoy, las organizaciones más conocidas en la fabricación de prótesis con impresión 3D son: E-Nable, Bionico Hand, Youbionic Hand, Unlimited Tomorrow, Limbforge, Hero Arm...

#### 4- Briefing

Con la implementación de este método previo al diseño y desarrollo de un producto o servicio, se quiso obtener un seguido de objetivos, expectativas y metas a conseguir a lo largo del proyecto.

Gracias a la frase de utilidad, la cual sería: *Dispositivo protésico articulado de brazo y mano, fabricada mediante impresión 3D, con una función añadida de reloj inteligente y con un mecanismo de quitar y poner fácil, rápido y seguro*, del análisis del usuario, del cuadro funcional, precedentes, referentes... Se acabó obteniendo una ventana de hasta 4 funciones, de las cuales una de ella es menor, dos mayores y una crítica. Dicha ventana es mostrada a continuación (Tabla 1):

Tabla 1. Ventana de funciones.

VENTANA		PRECEDENTES				
		Prótesis gancho	Prótesis mioeléctrica	Prótesis estética	Prótesis mecánica	Prótesis neumática
Buena transpiración de la piel del usuario en contacto con la prótesis	MA	NO	NO	NO	NO	NO
Buena implementación entre el brazo humano y la prótesis	MA	NO	NO	NO	NO	NO
Módulos o subconjuntos intercambiables	ME	NO	NO	NO	NO	NO
Incorporación de un reloj inteligente	CR	NO	NO	NO	NO	NO

A raíz de esa ventana, se realizó una selección y, finalmente, se obtuvo un tipo de diseño que contempla todos los objetivos a cumplir. Estos objetivos hacen referencia a:

- Estética moderna.
- Prótesis impresa en 3D.
- Prótesis articulada.
- Cierre y ajuste fiable.
- Diseño modular.

#### 5- Herramientas de diseño

Con la intención de obtener una idea final, la cual se pueda llevar a cabo, se realizó un trabajo de campo en el cual se utilizaron una gran cantidad de herramientas de diseño. Estas herramientas

seleccionadas, vienen dadas de la metodología escogida para realizar este TFG, la cual surge de la combinación de dos metodologías distintas: el *Design Thinking* y el *Human Centered Design*.

Para ello, se llevaron a cabo hasta un total de 10 herramientas. Inicialmente, se realizó un *Brainstorming*, en el cual se recogieron en *Post-it* un seguido de ideas para posteriormente ser valoradas. Seguidamente, se llevó a cabo un *Mind Map*, para poder organizar toda la información de una manera rápida y estructurada. A continuación, se desarrollaron dos *Storyboards*, con tal de contrastar y empatizar con el usuario, cuando este no tiene prótesis y cuando sí. Para poder entender las necesidades, experiencias, comportamientos y metas de nuestro usuario, el siguiente paso fue la creación de una *Persona*, para posteriormente realizar un *Mapa de Empatía* basado en la anterior herramienta, para saber lo que nuestro usuario dice, piensa, hace y siente. El siguiente paso, y ya más centrado en el estudio de mercado actual, se realizó un *Benchmarking* y una *Matriz DAFO*. A continuación, se realizó una *Entrevista* al amigo del autor del TFG, con tal de conocer e indagar en sus necesidades, intereses, motivaciones, actitudes o preferencias... Finalmente, antes de empezar con la *Generación de ideas y bocetos*, se realizó un *Estudio antropométrico del brazo y la mano*, con tal de conocer más a fondo las mediciones del cuerpo humano.

#### Concepto final

Tras haber definido ciertos aspectos, como pueden ser: las formas de la mano, las formas de los dedos, las formas del antebrazo, tras haber generado diferentes ideas y bocetos y tras haberle realizado una entrevista al amigo del autor y haber conocido sus preferencias, se escogió el que sería el diseño final y en el cual se basaría el resto del proyecto.

Este concepto final, se muestra a continuación en la Figura 2:

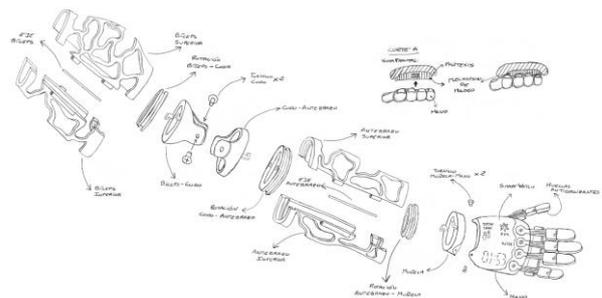


Figura 2. Concepto final.

En esta idea, obtenemos una prótesis modular, la cual está articulada, tanto en flexión como en rotación de cada una de las extremidades. Además, presenta una serie de formas huecas, con tal de reducir costes de material, reducir peso y conseguir una mayor transpiración de la piel del usuario. También, en la zona convexa de la mano encontramos la función añadida de *smartwatch*.

## 6- Desarrollo del modelo

Una vez escogido el concepto final y con tal de elaborar el modelado 3D de todas y cada una de las piezas que forman el conjunto de la prótesis, se necesitó inicialmente obtener las dimensiones, con tal de producir un resultado lo más ajustado posible.

A falta de un escáner 3D, la solución fue el uso de un molde de yeso del brazo del propio usuario, obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 3, para posteriormente poder recoger las medidas a partir de este.



Figura 3. Molde de yeso del brazo del usuario.

Una vez obtenidas todas las dimensiones necesarias, se pudieron comenzar a desarrollar todas las piezas y componentes necesarios, para posteriormente realizar otro tipo de trabajos, como: renderizaciones y contextualizaciones, planos, maqueta, simulaciones, etc.

El resultado final obtenido una vez realizado el ensamble, se muestra a continuación (Figura 4), en el cual se deja ver un render del producto final, dónde se pueden observar los colores y materiales de cada uno de los componentes, el reloj inteligente situado en la mano, las proporciones de las diferentes partes de la mano...:

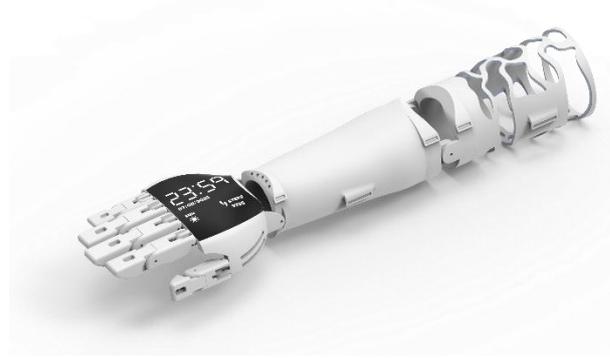


Figura 4. Render del producto final.

### Componentes normalizados

Cabe destacar que, este diseño no únicamente presenta componentes diseñados por el autor del TFG, si no que presenta hasta 27 componentes normalizados, los cuales hacen referencia a los pasadores que permiten las aperturas, cierres y articulaciones necesarias de la prótesis. Estos pasadores, varían en diámetro y longitud en función de su ubicación en el producto. Este componente corresponde a:

- Pasador cilíndrico DIN 6325.

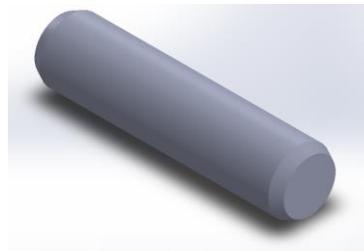


Figura 5. Pasador cilíndrico DIN 6325.

### Maqueta

Una vez desarrollados todos los componentes de la prótesis mediante un software CAD, estos pudieron ser impresos con una impresora 3D, con tal de obtener una maqueta representativa del producto final, ya que se ha realizado a escala 1:1, con la idea de tener la mayor percepción de esta antes de obtener un producto final.

Para poder tener un mejor acabado, esta fue lijada, se le añadieron acolchados interiores, se le puso una pegatina a modo de representación de reloj inteligente y, mediante un mecanismo, se pudo hacer que los dedos estén articulados y vuelvan a su posición original, en caso de ser doblados.

Además, tanto la muñeca como el codo, también han sido elaborados de manera articulada.



Figura 6. Maqueta de la prótesis.

### Aplicación móvil

Como todo *smartwatch*, este también requería de su propia aplicación móvil. Es por eso que, mediante una página web, se pudo desarrollar un prototipo funcional de la idea prematura de la app.

A continuación, se muestra el logotipo de la aplicación, la cual aparecería en nuestros dispositivos móviles, y la pantalla inicial de esta, una vez se haya registrado el usuario:



Figura 7. Logotipo y app móvil.

En caso de querer navegar e investigar el prototipo de la app, se puede hacer a través del siguiente enlace:

<https://www.figma.com/proto/0QP0qUe1CSygsOoTaTzcrh/App-Pr%C3%B3tesis?node-id=19%3A123&scaling=scale-down&page-id=0%3A1>

### Softwares utilizados

En función del tipo de trabajo que se ha querido realizar, como es evidente, se ha utilizado un *software* u otro. Estos han sido los siguientes:

- *SolidWorks 2019*: Para la realización de todos los componentes, sus respectivos planos y las simulaciones de esfuerzos.
- *Keyshot 8*: Para la elaboración de imágenes renderizadas y contextualizadas.
- *Figma*: Para el desarrollo del prototipo de la aplicación móvil.
- *Cura*: Para introducir los parámetros necesarios a las piezas y, crear sus archivos Gcode, para posteriormente ser impresas en 3D.

### Maquinaria utilizada

Para poder llevar a cabo la maqueta final, se ha utilizado una impresora 3D, a partir de la cual se han producido todas las piezas necesarias.

En este caso en concreto, se ha utilizado una *Creality Ender 3 Pro*.

### Especificaciones del modelo final

Tabla 2. Peso total del producto final.

<b>Peso total</b>	491,1 g
-------------------	---------

Tabla 3. Dimensiones generales del producto final.

	<b>Dimensiones</b>
<b>Altura</b>	93,9 mm
<b>Ancho</b>	134,9 mm
<b>Largo</b>	551,7 mm

## 7- Simulaciones

Con el objetivo de poder ver como actuarían ciertas piezas del diseño final bajo una serie de esfuerzos, se elaboró un estudio de esfuerzos estáticos en ciertos puntos que el autor del TFG consideró críticos. Dicho estudio, como se ha comentado anteriormente, se realizó en *SolidWorks 2019*.

### Especificaciones de las simulaciones

Para ello, inicialmente se tienen que establecer una serie de parámetros necesarios, entre ellos:

- Tamaño de la malla = 2,5 mm
- Factor de seguridad = 2
- Fuerza admisible = 6,95 N
- Material de los componentes = PLA

Para obtener la fuerza admisible, se realizó un cálculo muy sencillo, en el cual intervienen dos valores. Por un lado, el factor de seguridad ( $F_s = 2$ ), y por otro, la fuerza máxima, es decir, la carga límite del usuario ( $F_{m\acute{a}x} = 13,9 N$ ). Esos 13,9 N de fuerza máxima, salen de una aproximación obtenida a partir de la fuerza máxima que el usuario puede llegar a hacer sobre una balanza.

A partir de aquí, se aplica la siguiente fórmula, con tal de obtener la fuerza admisible final:

$$F_s = \frac{F_{m\acute{a}x}}{F_{adm}} ; [F_{adm} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{F_s} = \frac{13,9 N}{2} = 6,95 N]$$

En cuanto a las propiedades del material seleccionado, es decir, del PLA, son los mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 4. Propiedades del PLA.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	3450000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.39	N/D
Densidad de masa	1240	Kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	60000000	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión	76000000	N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	65000000	N/m <sup>2</sup>
Conductividad térmica	0.145	W/(m·K)
Calor específico	1200	J/(kg·K)

### Componentes simulados

Una vez se establecieron dichos parámetros y se realizó el estudio de esfuerzos, se obtuvieron los resultados acerca de: las tensiones de Von Mises, las cuales nos aportan una magnitud física proporcional al aumento de energía acumulada en el interior de un sólido, los desplazamientos generados en los puntos con cargas aplicadas; siendo estos la distancia que se llega a producir entre la posición inicial y final una vez se aplica una carga, y las deformaciones unitarias; correspondiendo a la proporción de cambio en longitud con respecto a la longitud original.

Los componentes los cuales fueron objeto de estudio, son: el codo, la muñeca y la mano.



Figura 8. Componentes simulados.

Pese a comprobar que los esfuerzos provocados en dichos puntos no suponían un gran problema, se propusieron una serie de mejoras, con el objetivo de poder distribuir mejor las cargas a lo largo de toda la superficie de las piezas.

## 8- Presupuestos

Para finalizar con el proyecto, se realizaron una serie de presupuestos y costes que podría llegar a suponer el diseño y desarrollo de este proyecto. Para ello, se llevaron a cabo hasta 3 presupuestos:

- *Presupuesto de ingeniería:* En este se tuvo en cuenta todo tipo de trabajo realizado por el autor del TFG, al cual se le estableció un precio de 30 €/h. Este presupuesto supondría 18.450 €.
- *Presupuesto de materiales:* Como los las piezas serán impresas por un proveedor, estas serán incluidas en el precio de producción, por lo que en este caso solo se tienen en cuenta el precio de los elementos normalizados, es decir, los pasadores cilíndricos DIN 6325, la estimación de los componentes electrónicos y el acolchado interno. Supondría un precio de 8,1616 €.
- *Presupuesto de producción:* Se tuvieron en cuenta los servicios de producción de la impresión 3D, el limado y pulido, el

desarrollo de la app móvil y el montaje del conjunto. El precio total es de 1.500 €.

Teniendo en cuenta que el presupuesto de ingeniería es muy elevado, por lo que el usuario no podría hacerse cargo de dicho coste, el autor del proyecto asume realizar este trabajo de manera gratuita, suponiéndole al individuo, únicamente, el coste de la suma de los presupuestos de material y de producción.

Tabla 5. Coste total del proyecto.

CONCEPTO	COSTES TOTALES (€)
Materiales	8,16
Producción	1.500
<b>COSTES FINAL DEL PROYECTO</b>	<b>1.508,16</b>

## 9- Conclusiones

A modo de conclusiones, se puede resumir que se ha superado el objetivo con creces, ya que todo lo pretendido, tanto en los objetivos generales de este proyecto, como en las especificaciones o requerimientos del *Briefing*, se han cumplido.

Resumiendo, se ha obtenido un proyecto que comprende los siguientes puntos:

- Diseño de una prótesis funcional articulada.
- Integración de un valor añadido de reloj inteligente, con su respectiva aplicación móvil.
- Se ha conseguido trabajar con éxito con la tecnología de fabricación aditiva.
- Buena transpiración de la piel del usuario.
- Prótesis con módulos intercambiables, con tal de facilitar el mantenimiento de la prótesis.
- Prótesis con estética moderna e incluso, futurista.

Pese a que este proyecto ha resultado ser un gran reto, el hecho de tratar de conseguir todos estos objetivos y conseguirlo, se puede concluir que ha sido un éxito, no únicamente por los resultados obtenidos, sino que también, por todos los conocimientos, herramientas y técnicas aprendidas por parte del autor a lo largo del proyecto, dejando ver que este sector, el protésico, es muy interesante y que tiene, todavía, mucho margen de mejora.

## 10- Referencias

Design Thinking – Joaquín López Lérída y Félix de León Molinari (Fundación Persán).

Síndrome de Poland. Revisión de 38 casos - J. Minguella-Solá y M. Cabrera-González.

Síndrome de Poland: descripción de dos casos familiares – L. Sierra Santos y M<sup>a</sup>. P. González Rodríguez (Centro de Salud Manzanares el Real y Centro de Salud Barrio del Pilar)

Diseño de una prótesis articulada de brazo y mano de bajo coste – E. Escrivá Noguera (Universitat Politècnica de València).

Diseño y simulación de un prototipo de prótesis de mano bioinspirada con cinco grados de libertad – Jair Leopoldo Loaiza-Bernal (Universidad Nacional de Colombia).

Diseño de prótesis de mano servoactuada y fabricación de prototipo con técnicas de impresión 3D – María Jimena López Morillo (Universidad Nacional de Cuyo).

Desarrollo y diseño de una prótesis de brazo en código abierto impresa en 3D – Cristina Molina Moreno (Universidad de Málaga).