

## EcoHand: la Prótesis Transradial Programable, Económica y Ecológica

*Palopoli Juan José; Bistolfi, Facundo; Segovia, Elías; Avalo, Pablo; Callapiña, Juan Guillermo*

*Universidad Nacional de la Matanza, Sede San Justo, Catedra Proyecto de Fin de Carrera,  
Titular de Catedra: Mg. Roberto Eribe*

*[juanjopalopoli@gmail.com](mailto:juanjopalopoli@gmail.com); [facundobistolfi@hotmail.com](mailto:facundobistolfi@hotmail.com); [segoviaealias92@gmail.com](mailto:segoviaealias92@gmail.com);  
[pabloavalo@outlook.com](mailto:pabloavalo@outlook.com); [guillekallap@gmail.com](mailto:guillekallap@gmail.com)*

### Resumen

*En el presente documento se explicará el proceso de diseño y construcción de una prótesis transradial. La misma, además de haber sido diseñada e impresa en 3D utilizando materiales reciclados, cuenta con un módulo Arduino que tiene como funciones principales controlar las falanges de esta, recibir y procesar las instrucciones que le envía la aplicación de celular. Dicha aplicación desarrollada para la plataforma Android permite al usuario, indicar que secuencias (conjunción de posiciones de la prótesis y eventos programables) desea ejecutar pulsando en la pantalla de la aplicación o bien mediante comandos de voz asociados a cada secuencia. Además, permite importar secuencias personalizadas, y crear grupos de secuencias favoritas. Adicionalmente, utilizando una aplicación para Windows (desktop) los usuarios podrán crear secuencias personalizadas acorde a sus necesidades. Dichas secuencias personalizadas se exportan y luego pueden ser importadas tanto por su creador, como por cualquier otro usuario del sistema, formando así una comunidad.*

### Introducción

En la actualidad, aquellas personas que padecen una amputación o reducción congénita por debajo del codo se encuentran frente a dos opciones claramente definidas: por un lado, adquirir una prótesis a un costo reducido o accesible, pero limitada en funciones, por lo que no llega a satisfacer las necesidades específicas del usuario, o bien, optar por una prótesis con un mayor número de funciones, pero a un alto costo, haciendo que sea difícil acceder a las mismas.

Esta situación, en conjunto con las limitaciones financieras que presentan quienes necesitan acceder a dichas prótesis, se ve agravado por la falta de adaptabilidad que presentan como defecto de diseño ciertas prótesis,

forzando a que sus usuarios al crecer o requerir otras funciones deban adquirir una prótesis nueva, lo cual puede resultar excesivamente costoso según diversos factores. Adicionalmente existe un desinterés presente, quizás por desconocimiento o falta de información, el cual lleva a no medir el impacto ecológico que tienen los componentes utilizados en dichas prótesis, el cual está claro, puede minimizarse.

En base a lo antes mencionado, hemos creado el proyecto EcoHand, desarrollando una prótesis que brinde mejores prestaciones a sus usuarios, buscando minimizar el costo e impacto a nivel ecológico lo más que nos sea posible.

### ¿Qué es una amputación transradial?

Se entiende por amputación transradial, a aquella amputación traumática o congénita que se presenta por debajo del codo, es decir, en el antebrazo.

La misma puede ser una amputación a diferentes niveles del antebrazo larga, media, corta o muy corta.



**Figura 1. Ilustración de una amputación transradial.**

## Composición del Sistema

EcoHand como sistema se divide en 3 componentes principales con los que el usuario interactúa: una prótesis transradial, una aplicación de celular y una aplicación de escritorio.

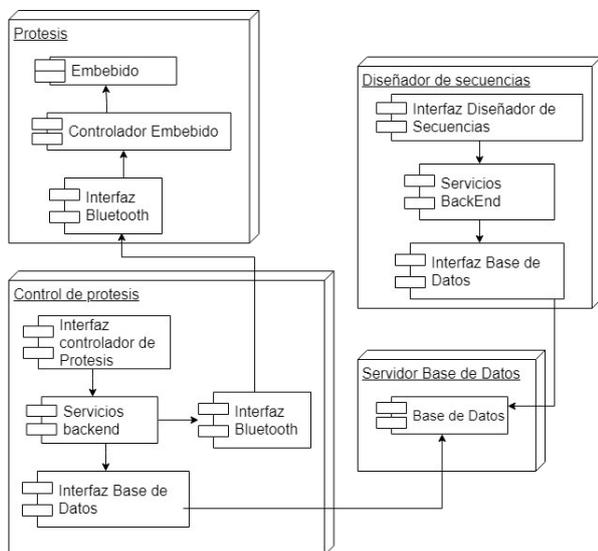


Figura 2. Diagrama de despliegue + componentes del sistema – vista general del sistema.

## Prótesis Transradial

El primer componente principal del que vamos a hablar es la *prótesis transradial* en cuestión.

### Características

Hay una serie de características que, en base a diversas fuentes y, conclusiones a las que hemos llegado, consideramos debe reunir la prótesis en cuestión para poder ser útil para su portador.

#### 1. Ligera

Considerando que la prótesis en cuestión será utilizada durante periodos relativamente largos, y debe mejorar la calidad de vida de su portador, se pretende que la misma sea lo más ligera posible, pero esto desencadena la primera pregunta: ¿Qué tan ligera debe ser la prótesis?

Según las conclusiones enunciadas en [2], el peso total de la prótesis debe de estar por debajo de los 500g, ya que cuanto más ligera sea, más practica y fácil de usar será para su usuario.

No obstante, hemos decidido poner como peso limite 2 Kg, ya que considerando todos los componentes que la prótesis utilizara, en particular la estructura de la mano y antebrazo impresos y los cinco Servomotores, el peso rondara 1,5 Kg. Sin embargo, el minimizar el peso sigue siendo una de las prioridades.

#### 2. Independencia entre dedos

Si bien puede parecer una característica obvia, no todas las prótesis cumplen o necesitan cumplir con esto. En el caso de EcoHand, vimos necesario incluir esta característica

puesto que, desde un principio, nuestro interés siempre fue el permitir al usuario que pueda posicionar los dedos de la mano según como desee (y dentro de las limitaciones comprendidas por el diseño en cuestión).

Por lo tanto, el no separar el mecanismo que mueve cada dedo respecto a los demás conllevaría imitar enormemente las herramientas brindadas al usuario de EcoHand.

Para poder llevar a cabo este punto, se asignó un servomotor (Ver Figura 3) para mover cada dedo (dando un total de 5 servomotores) ya que citando lo enunciado sobre este tipo de actuador en [1], los servomotores son relativamente fáciles de controlar, conectables directamente a microcontroladores, su eje puede adoptar una posición específica y no requieren de un sistema de reducción de velocidad, reduciendo en parte la complejidad del diseño.



Figura 3. Servomotor Mg 996 Digital 10-13Kg de Torque.

### 3. Dos falanges por dedo

Si hablamos de una mano anatómicamente correcta, exceptuando el dedo pulgar, cada dedo se compone por 3 falanges: proximal, medio y distal.

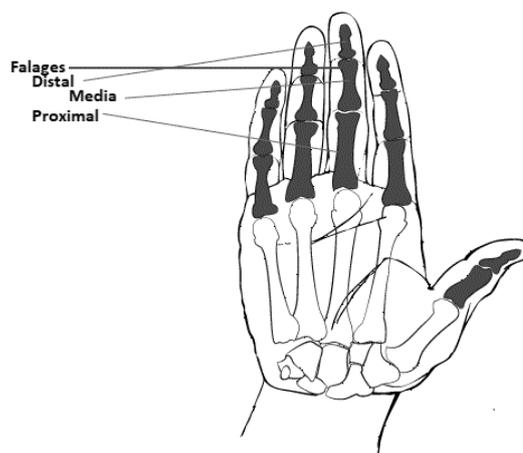
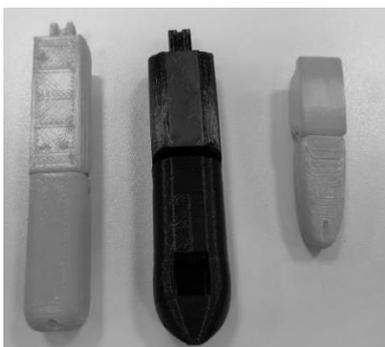


Figura 4. Ilustración de falanges de la mano.

Si bien consideramos innecesario utilizar una estructura de tres falanges para los dedos de la prótesis, lo que se hizo fue agrupar los falanges distales y medios. Este concepto, en conjunto con el ángulo formado al flexionar el dedo se fue refinando constantemente, buscando obtener dedos que, en lugar de ser anatómicamente correctos, fueran funcionales.

El hecho de que se busque funcionalidad antes que perfección anatómica no significa que no se busque mejorar el aspecto, sino que, en todo caso, se prioriza funcionalidad por sobre el mismo.

Ejemplos de este refinamiento antes mencionado se pueden observar en las figuras 5, 6 y 7. En las figuras 5 y 6 se evidencia como se fue adaptando el tamaño de los dedos no pulgares (Figura 5) y pulgar (Figura 6) así como también, se buscó adaptar los segmentos por los que circulan los “tendones” (de los cuales hablaremos más adelante).



**Figura 5. De izquierda a derecha, versiones I, II y III de un dedo no pulgar, vista superior.**



**Figura 6. De margen inferior a superior, versiones I y II de un dedo pulgar.**

En lo que refiere al “agarre” que permiten los diseños de los dedos que se fueron realizando, específicamente los dedos no pulgares, este aspecto también se fue refinando con las diferentes versiones.



**Figura 7. De margen inferior a superior, versión I, II y III de un dedo no pulgar, ángulo de flexión, vista lateral.**

Se puede apreciar en la Figura 7, como en la primera versión el ángulo de flexión era prácticamente a 90°. Esto se vio mejorado al agregar curvatura a cada falange y mejorar la proporción de tamaño (largo) que existe entre falange distal y falange proximal.

#### **4. Fuente inalámbrica y recargable.**

Si bien, este aspecto en parte favorece a reducir el impacto ambiental que el producto final tiene, su razón principal de ser es brindar autonomía a la prótesis, al no tener que estar conectada constantemente a una fuente.

Para esto, se utilizan baterías recargables (Ver Figura 8) y un cargador acorde a las mismas.



**Figura 8. Baterías recargables 18650 litio-ion 3.7v 2200 mA/h**

#### **5. Programable**

Normalmente, las prótesis que presentan ciertas “funciones” presentan un juego definido y fijo de las mismas, es decir, pueden realizar solo las tareas para las que fueron programadas. Al momento de crear EcoHand decidimos permitirle al usuario programar las “secuencias” que desea utilizar.

Por secuencia, entendemos un grupo ordenado de *gestos* y *eventos programables*.

Un *gesto*, es una posición que adopta la mano en un instante determinado por lo que, se compone de la posición de cada dedo. Por otro lado, *eventos*

*programables* son aquellos eventos como temporizadores y lecturas/activación de sensores que permiten regular, acorde a las necesidades del usuario, el flujo de la secuencia.

El usuario, desde la aplicación de escritorio crea las secuencias que desea utilizando gestos y eventos programables. Estas secuencias luego son “compiladas” y exportadas, hacia la aplicación de celular. Finalmente, la aplicación de celular envía la secuencia al embebido para que la ejecute.

Hablaremos más sobre este proceso al tratar la aplicación de escritorio.

## Estructura

La estructura de la prótesis en líneas generales está conformada de la siguiente manera:

### 1. Modelos 3D

La prótesis presenta una serie de modelos 3D que forman la estructura básica de la prótesis: dedos no pulgares (Ver Figura 5 o 7) dedo pulgar (Ver Figura 6) la mano y el antebrazo.

Si bien, los modelos antes mencionados se subdividen en más modelos (ej.: un dedo no pulgar se divide en 2 falanges, uno proximal y uno distal) a los fines de la explicación es indistinto.

### 2. Arduino

El módulo Arduino Nano incluido en la prótesis (Ver Figura 9) tiene como finalidad controlar los sensores y actuadores conectados al mismo, así como también, comunicarse con el control de la prótesis (aplicación de celular) e interpretar las ordenes que llegan desde dicho control, y ejecutarlas.



Figura 9. Arduino Nano Atmega328 Ch340.

### 3. Sensores y Actuadores

De entre los sensores y actuadores conectados al Arduino, se destacan:

- Servomotores: Como hemos mencionado previamente, se utilizan 5 servomotores, uno por cada dedo, los cuales tienen entre 10 y 13 kilogramos de Torque (Ver Figura 3). Si bien, podríamos haber optado por Servos de menor tamaño, la reducción de dicho tamaño sería poca en relación con el Torque que tienen dichos servos, lo cual sería

contraproducente, en particular, al querer agarrar objetos.

- Modulo Bluetooth: Se decidió utilizar un HC-05 (Ver Figura 10) por la experiencia que tenemos utilizando dicho modulo.
- Sensor Muscular: Utilizamos un sensor muscular, EMG (Electromiograma) V3, con la intención de que el usuario en caso de programar una secuencia para que tome lecturas de este, pueda utilizarlo como “alternador” entre un gesto y otro, con un simple movimiento de su brazo. Para tener una noción de como se ve este sensor, ver Figura 11.
- Sensor de Fuerza Resistivo (SFR): Comúnmente nombrado FSR (Force Sensing Resistor) es un sensor que, como puede apreciar en la Figura 12, presenta una resistencia en el extremo superior, la cual, varía según la fuerza aplicada sobre la misma. Al medir las variaciones entre los extremos se puede determinar “cuanta fuerza” se aplica lo cual resulta muy útil para regular cuando se debe dejar de presionar un objeto, para evitar romperlo, y adicionalmente, para no forzar los servos al intentar cerrar los dedos “indefinidamente”.

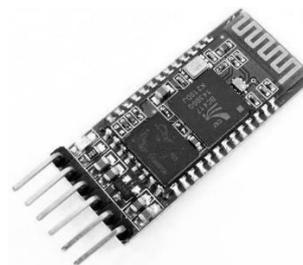


Figura 10. Modulo Bluetooth HC-05



Figura 11. Modulo sensor electro muscular EMG V3, junto con sus conectores y electrodos.



Figura 12. Sensor de fuerza resistivo

#### 4. Tendones

Si bien el nombre puede ser confuso, se utiliza un elemento extensible y parcialmente rígido para simular los tendones, como puede ser un hilo multifilamento, por ejemplo. El mismo, hace las veces de “tendones”.

El mecanismo consiste en utilizar 2 hilos por par servomotor-dedo, y según cual hilo se tensione, el dedo se acerca o aleja de la palma.

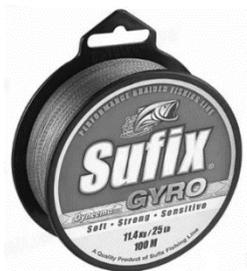


Figura 13. Hilo multifilamento 0.4 mm utilizado para el mecanismo de “tendones”.

#### Control de la prótesis (Aplicación de celular)

El segundo componente principal del que vamos a hablar es el *control de la prótesis*, la aplicación de celular en cuestión.

#### Plataforma

Si bien, nuestra intención al momento de desarrollar EcoHand fue incluir todas las plataformas posibles, por limitaciones de tiempo nos vimos obligados a optar por Android.

Dentro de Android, existe una amplia gama de versiones, a lo cual recurrimos a las estadísticas de uso de cada versión a nivel mundial (del periodo de la segunda mitad de 2018) para decidir qué versión de Android sería la mínima requerida. Finalmente, acorde a lo que se puede observar en la Figura 14 (información completa en [3]) optamos por utilizar la versión 4.4 como versión mínima requerida.

2H '18

• Oreo 8.1	5.8%
• Oreo 8.0	13.4%
• Nougat 7.1	10.3%
• Nougat 7.0	1.9%
• Marshmallow 6.0	21.6%
• Lollipop 5.1	14.7%
• Lollipop 5.0	3.6%
• KitKat 4.4	7.8%
• Jelly Bean 4.3	0.5%
• Jelly Bean 4.2.x	1.6%
• Jelly Bean 4.1.x	1.1%
• Ice Cream Sandwich 4.0.3 - 4.0.4	0.3%

Figura 14. statista.com - Estadísticas de uso por versión de Android – segunda mitad de 2018

#### Funcionalidades principales

A continuación, daremos un vistazo general por las funciones principales que esta presenta. Es de notar que, para acceder a dichas funcionalidades, los usuarios deben acceder previamente al sistema (se registran e inician sesión).

##### 1. Listado de secuencias

Los usuarios tienen acceso a un listado de secuencias creadas tanto por ellos mismos, como por otros usuarios. Pueden filtrar dicho listado por autor, fecha de creación y otros parámetros, y eventualmente descargar las secuencias que sean de su interés. Ver Figura 16.

##### 2. Grupos de secuencias

Los usuarios del sistema tienen a su disposición el poder crear uno o varios grupos de secuencias donde reunir aquellas secuencias que le resulten más útiles o de interés. Pueden incluir una misma secuencia en varios grupos.

##### 3. Ejecución de secuencias

Los usuarios, al haber seleccionado y descargado una secuencia, se obtiene una versión “compilada” de la misma que puede ser enviada a la prótesis. Cuando el usuario presiona sobre la secuencia que desea ejecutar o utiliza el comando de voz asociado a la misma (ver reconocimiento de voz) se inicia el proceso de ejecución de la secuencia entre el control de la prótesis y la prótesis en cuestión, indicándole cual es la secuencia y que la ejecute. Ver Figura 17 como referencia de esto.

##### 4. Pausar/Continuar ejecución

Cuando se encuentre en ejecución una secuencia, el usuario podrá pausar la misma si así lo deseara y continuar con dicha ejecución cuando lo considere conveniente.

### 5. Reconocimiento de voz

Con la intención de reducir la frecuencia con la que los usuarios deben interactuar manualmente con la aplicación, se decidió incorporar una palabra clave asociada a cada secuencia, y reconocimiento de voz. Mientras el mismo este activo (ya que no es obligatorio utilizarlo) las palabras que el usuario pronuncie se interpretan y comparan contra la palabra clave de cada secuencia, y en caso de coincidir con alguna, la ejecuta.

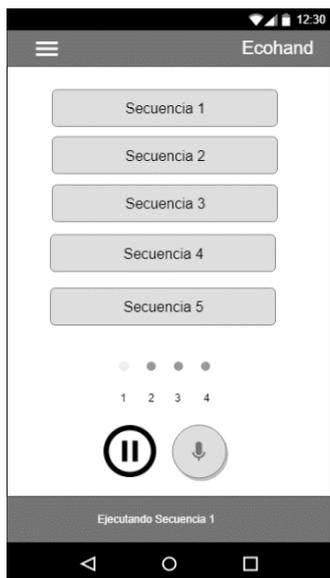


Figura 15. Wireframe - app mobile - menú principal.



Figura 16. Wireframe – app mobile – consultar secuencias

### Diseñador de Secuencias (Aplicación de escritorio)

El ultimo componente principal del que vamos a hablar es el *diseñador de secuencias*, la aplicación de escritorio en cuestión.

#### Plataforma

Al igual que sucede con la aplicación de celular, a raíz de las limitaciones de tiempo dispuestas, decidimos optar por el sistema operativo que presentara el mayor porcentaje de usuarios.

En el ámbito de escritorio se puede observar que, a finales del año 2018 [4], un 76% de los usuarios de PC utilizan sistemas operativos Windows.

Dec '18	
Windows	76.17%
MacOS X	12.33%
Linux	1.69%
Chrome OS	1.35%
Others/unknown*	8.47%

Figura 17. statista.com - Estadísticas de uso de sistemas operativos desktop – diciembre 2018.

### Funcionalidades principales

Al igual que con la aplicación de celular, daremos un vistazo general por las funciones principales que esta presenta. Es de notar que, para acceder a dichas funcionalidades, los usuarios deben acceder previamente al sistema (se registran e inician sesión).

#### 1. Diseñador de gestos

Si bien, los usuarios podrían optar por utilizar gestos existentes (creados por otros usuarios o ellos mismos) pueden, en caso de precisararlo, crear, modificar o eliminar gestos.

Repasemos el concepto de “gesto” enunciado antes: un gesto es una posición que adopta la mano en un momento determinado. Dicha posición está compuesta entonces por la posición de cada uno de sus dedos.

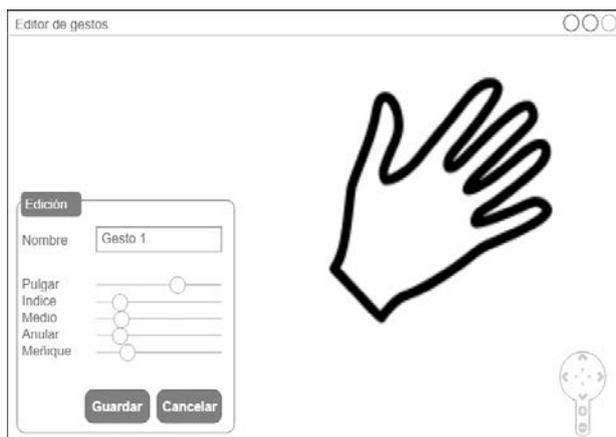


Figura 18. wireframe – app desktop – editar gesto

## 2. Diseñador de secuencias

Como bien lo indica su nombre, es la función central de la aplicación de escritorio.

Repasemos el concepto de secuencia que enunciamos antes: es un conjunto ordenado de gestos y eventos programables, que se estructura como una serie de pasos (un programa). Esos eventos programables pueden ser: Pausa (esperar un tiempo determinado) Saltar según la entrada de un sensor o una entrada de usuario como un botón (0 falso, 1 verdadero) o bien, un salto incondicional.

Queda claro entonces que el usuario debe crear previamente los gestos que necesita para componer la secuencia.

El usuario visualiza, crea y modifica dichas secuencias como si se tratara de un diagrama de actividad, presentando siempre un elemento inicial, transiciones y los elementos antes mencionados: gestos y eventos programables, que el usuario encuentre necesarios para componer su secuencia.



Figura 19. Fragmento de wireframe – app desktop – editar secuencias.

Cuando el usuario decide guardar la secuencia (o las modificaciones realizadas a la misma) se realiza un proceso de “Análisis y Compilación” para transformarla en una serie de instrucciones que luego el sistema embebido de la prótesis podrá interpretar cuando los reciba desde el control. Hablaremos un poco más de este proceso en la siguiente sección.

## 3. Exportación e Importación

Todos los gestos y secuencias que los usuarios crean y modifican se guardan en una base de datos, asociados a su correspondiente autor, garantizando la persistencia de estos, y permitiendo, en el caso de las secuencias, que los usuarios del *Control de la Prótesis* puedan Importarlas, ya sean propias de otro usuario.

## Circuito de una Secuencia

A continuación, vamos a explicar el circuito de una secuencia en el sistema, desde su creación hasta su ejecución, para que además sirva como una síntesis del proceso en cuestión.

### Creación de una secuencia

El usuario utiliza los gestos y eventos programables que precisa para formar la secuencia que desea y la guarda. En ese momento, el diseñador de secuencias debe traducirla, previo a enviarla a la base de datos para que sea accesible para todos los usuarios del sistema.

### De secuencias a instrucciones

Uno de los aspectos críticos que tuvimos que definir sobre el sistema fue en que “formato” transferir la secuencia al Arduino de la prótesis. Si bien, para el usuario es práctica la presentación en forma de diagrama, se necesitaba un formato que fuera claro y relativamente rápido tanto en su transferencia como en su procesamiento.

Para esto se definió un juego de instrucciones hacia el cual traducir las secuencias. Dichas instrucciones presentan 2 características clave.

### Tamaño fijo de instrucción y valor

Se utilizan 4 caracteres para componer cada instrucción, de los cuales 2 se destinan al nombre de instrucción y uno al valor, por ejemplo: D1 A0.

### Valores hexadecimales

Para poder conservar el rango de valores de 0 a 255, y no tener variaciones en el tamaño de cada instrucción se decidió utilizar valores hexadecimales.

Si bien, cada instrucción maneja su propio rango de valores, con 2 caracteres para el valor se dispone del rango 00 a FF, es decir, 0 a 255 en decimal.

**Tabla 1. Instrucciones existentes.**

Instrucción	Valor	Descripción
D1, D2, D3, D4 y D5	Hexadecimal sin signo, de 0 a 255.	Posiciona el dedo en un ángulo específico. Si el valor se sale del rango entre 0 - 180 se asigna un extremo de este rango.
A1, A2, A3, A4, A5	Hexadecimal con signo, de -128 a 127	Suma o resta el valor dado a la posición actual del dedo.
I0, I1	Hexadecimal sin signo, de 0 a 255	Condición de salto que depende de la entrada del usuario a través de un botón (0 falso, 1 verdadero). El valor indica a qué instrucción se saltará (La primera instrucción es la número 0).
S0 - SF - S?	Hexadecimal sin signo, de 0 a 255	Condición de salto que depende de la entrada de un sensor. Se utilizarán pares de instrucciones para cada sensor, por lo que las instrucciones S0 y S1 serán para el primero, S2 y S3 para el segundo y así sucesivamente (par falso, impar verdadero).
TT	Hexadecimal sin signo, de 0 a 255	Tiempo de espera para la siguiente instrucción. El tiempo estará dado por una relación entre el valor y el tiempo real en milisegundos.
XX	Hexadecimal sin signo, de 0 a 255	Salto incondicional a la posición dada.

### Exportación de la secuencia

Una vez se genera el código asociado a la secuencia, se exporta la misma junto con su código, gestos utilizados y otra información asociada (autor, descripción si la hubiera, etc.).

### Importación de la secuencia

Desde el control de la prótesis, el usuario importa dicha secuencia, agregándola al grupo de secuencias de su interés.

### Ejecución de la secuencia

Cuando indica que desea ejecutarla se envía el código correspondiente (las instrucciones que conforman esa secuencia) al Arduino mediante la conexión Bluetooth, y esta procesa dichas instrucciones una por una hasta que esta llega a su fin.

## Mejoras a Futuro

Consideramos que, a raíz de limitaciones de tiempo y recursos, hay presente una serie de aspectos a mejorar, como el incluir soporte para más sistemas operativos en las aplicaciones de celular y escritorio, refinar la manera en que se obtienen mediciones con el sensor muscular (EMG) el uso de sensores o actuadores que pudieran ser más adecuados o afines y el diseño de los componentes 3D utilizados en la prótesis, entre otros aspectos a mejorar.

## Conclusión

Hemos observado entonces que el diseño y la construcción de una prótesis programable, económica y ecológica es posible en vista de que el costo de adquisición de los componentes y material de impresión ronda los 8600 pesos argentinos, a la fecha del 4 de septiembre de 2019.

Concluimos entonces que, el proyecto en cuestión puede ser llevado a cabo y además mejorado, siempre y cuando se disponga del tiempo y recursos necesarios.

## Agradecimientos

Queremos dedicar esta sección del documento a nuestros tutores de la asignatura Proyecto de Fin de Carrera, por guiarnos a lo largo del año, a Circo Studio S.R.L por brindarnos el tiempo y el equipamiento para realizar las impresiones 3D y a Martin Bistolfi por ayudarnos en todo lo que refiere a Electrónica.

## Referencias

- [1] Diaz Montes Julio César y Dorador González Jesús Manuel. Universidad Autónoma de México (UNAM). Mecanismos de transmisión y actuadores utilizados en prótesis de mano. 2009:335–345. [https://www.academia.edu/1217698/MECANISMOS\\_DE\\_TRANSMISION\\_Y\\_ACTUADORES\\_UTILIZADOS\\_EN\\_PR%3%93TESIS\\_DE\\_MANO](https://www.academia.edu/1217698/MECANISMOS_DE_TRANSMISION_Y_ACTUADORES_UTILIZADOS_EN_PR%3%93TESIS_DE_MANO)
- [2] Belter JT, Segil JL, Dollar AM, Weir RF. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review. J Rehabil Res Dev. 2013;50(5):599–618. <https://www.rehab.research.va.gov/jour/2013/505/page599.html>
- [3] Arne Holst. Android operating system share worldwide by OS version from 2013 to 2019. Statista. Mayo, 2019. <https://www.statista.com/statistics/271774/share-of-android-platforms-on-mobile-devices-with-android-os/>
- [4] Shanhong Liu. Global market share held by operating systems for desktop PCs, from January 2013 to January 2019. Statista. Agosto, 2019. <https://www.statista.com/statistics/218089/global-market-share-of-windows-7/>