

Proyecto Fin de Carrera

Proyecto Roujin : Diseño de un exobrazo
robótico de 4 grados de libertad orientado a
rehabilitación por impresión 3D

Adrián Blasco Carrillo

Director: José Jesús Guerrero Campo

Ingeniería Industrial
Automatización industrial y robótica
Escuela Universitaria de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza
Febrero 2015

Agradecimientos

Este proyecto se lo dedico a todos los que han estado a mi lado, a mis compañeros de laboratorio que me han apoyado durante todo este tiempo, a mi familia y sobre todo a mi madre que ha sido mi referencia durante tantos años.

Índice

I	Introducción	3
I.I	Objetivos del proyecto	4
I.II	Alcance	4
II	Estudio cinemático	4
II.I	Introducción	4
II.II	Configuración del exobrazo	7
II.III	Límites angulares y cinemáticos	11
II.IV	Parámetros cinemáticos y dinámicos	12
III	Estudio dinámico	14
III.I	Dinámica inversa	14
III.II	Distribución de masas e inercias	14
IV	Diseño del exobrazo	17
IV.I	Creación y desarrollo del exobrazo	17
IV.II	Diseño Paramétrico	23
IV.III	Diseño por impresión 3D	25
V	Actuadores	26
V.I	Selección de motores	26
VI	Caso de estudio	28
VII	Conclusiones	31
VIII	Trabajo futuro	31
Anexos		32
A	Definición de movimientos del cuerpo humano	32
B	Parámetros antropométricos del cuerpo humano	33
C	RoujinArm	43
D	Factores de diseño	45
E	Distribución de masas e inercias compuestas	52
F	Desarrollo DriveWorkXpress	54
G	Actuadores Dynamixel	55

I. Introducción

El accidente cerebrovascular (también conocido como ictus) es la tercera causa más común de muerte y la principal causa de discapacidad del mundo. Este tipo de ataque ocurre debido a la interrupción súbita de flujo sanguíneo en el cerebro y genera un infarto cerebral cuyas consecuencias pueden afectar el sistema locomotor. En estos casos de parálisis o hemiplejia esta demostrado que la rehabilitación es el principal tratamiento para recuperar la movilidad y uso de las extremidades afectadas.

Hoy en día se precisan de métodos cada vez más sofisticados para la atención a pacientes que requieren de rehabilitación muscular. Muchos de estos cuidados se llevan a cabo por parte de un fisioterapeuta que integra una serie de actividades y un entrenamiento que en su ejercicio profesional requieren de un esfuerzo físico y la presencia directa con el paciente.

El aumento de la esperanza de vida está acompañada de una necesidad de atención y tratamiento por parte de mano de obra cualificada y escasa; y en estos casos involucran otras deficiencias como la memoria que exigen de una dependencia externa, ya sean familiares o servicios sociales. Los programas de rehabilitación aplicados en estos casos se basan en la resolución de tareas cotidianas con el doble objetivo de una recuperación muscular y mental.

Otro tipo de lesiones o dolencias, pueden poner en riesgo la movilidad de un miembro del cuerpo, cuya recuperación médica involucra de una recuperación tanto muscular como cerebral; y profundizando en el nivel de la lesión, se precisa de un trabajo en el restablecimiento de la comunicación de nuestro cerebro con nuestro cuerpo. Las terapias pueden durar años a través de un proceso largo y laborioso cuyos recursos son a la vez costosos y a veces innaccesibles en su totalidad.

Los exoesqueletos aparecen como una herramienta de ayuda y mejora en la calidad de rehabilitación cuyo potencial aún está por explotar frente a las terapias convencionales. En este contexto, surge el proyecto **Roujin**.

El proyecto **Roujin** es una iniciativa estudiantil en la EINA cuyo objetivo es la creación de un exoesqueleto orientado a rehabilitación de pacientes de Ictus, de bajo coste, abierto y diseñado para ser controlado por señales bioeléctricas del paciente, ofreciendo un servicio a la sociedad en el ámbito de sanidad, más específicamente en rehabilitación.

El proyecto **Roujin** también implica el desarrollo de sistemas cognitivos y de razonamiento que permiten trabajar en entornos no estructurados y dinámicos. La rehabilitación cerebral es un aspecto de gran importancia en este trabajo que requiere de la definición de unos patrones para traducir la voluntad de una persona y realizar determinadas acciones.

Este proyecto de fin de carrera pretende ser el primer estudio de diseño de un exobrazo de cuatro grados de libertad de bajo coste capaz de responder a señales biológicas y establecerá la base para enfocar un sistema de comunicación entre cerebro y músculo para la consecución de objetivos planteados dentro del proyecto Roujin.

La filosofía de este proyecto se propone como una herramienta abierta, disponible al público, con un claro concepto en el que no solo se busca cubrir la necesidad antes mencionada, sino la de aplicar una serie de conocimientos a un modelo real, que puede servir a su vez como ejemplo y consulta para desarrollos futuros que aporten una utilidad social.

I.I. Objetivos del proyecto

Dentro del marco del proyecto Roujin, se pretende crear un exobrazo orientado a rehabilitación capaz de responder a las señales del cuerpo (ya sean EMG o EEG), abierto al público y propone una solución de bajo coste que puede ser también útil en otros campos. Una de las filosofías de este proyecto es hacer accesible un elemento de ayuda a discapacitados y como tal, ofrecer una solución a personas que no se pueden permitir un tratamiento.

Las tecnologías de las que disponemos hoy en día nos facilitan cada vez más la opción de personalizar y compartir nuestras propias creaciones. Las herramientas informáticas de diseño en conjunción con las nuevas tecnologías de impresión 3D nos dan la oportunidad de resolver una serie de necesidades de forma barata y dedicada.

Los objetivos que se exigen en este PFC es hacer un estudio de viabilidad y conseguir una solución de diseño para crear un prototipo de exobrazo cuyas funciones se aproximen a tareas de rehabilitación.

Este exobrazo robótico debe poseer de actuadores y de los elementos necesarios para desempeñar su función adecuadamente y a su vez crear un diseño cuyas piezas se puedan fabricar por impresión 3D y que sea de fácil montaje.

La adaptación del prototipo al tipo de paciente se hace mediante diseño paramétrico, de esta manera posibilita al usuario la definición de una serie de medidas físicas para crear el modelo a imprimir. Cada pieza será diseñada con SolidWorks y se estudiarán sus solicitudes en cada caso junto con otras herramientas de cálculo.

La selección de motores y actuadores vendrá definida por su capacidad de respuesta y solicitudes para llevar a cabo en un futuro diferentes sistemas de control orientados a rehabilitación.

I.II. Alcance

- La resolución de este PFC pretende ser una base a medio-largo plazo dentro del proyecto Roujin que cumpla con los objetivos establecidos.
- Reflejar una imagen social y establecer un concepto nuevo de diseño abierto justificándolo con una necesidad de uso en demanda.
- Ofrecer una alternativa, abierta y de menor coste en competencia con otros productos comerciales equivalentes de carácter privado.
- La integración de este PFC con futuras aplicaciones cognitivas BCI o aplicaciones de realidad virtual con las que se puede establecer una comunicación suficientemente flexible para lograr su finalidad concreta.

II. Estudio cinemático

II.I. Introducción

Para la definición de los distintos movimientos es necesario establecer una referencia de planos y ejes, que nos permita describir de forma adecuada el estudio del cuerpo humano. Para ello se recurre al **plano anatómico estándar** que establece unos planos espaciales respecto a una posición concreta del cuerpo humano (*posición anatómica estándar*) desde los cuales se pueden describir las posiciones y movimientos de los distintos miembros del cuerpo.

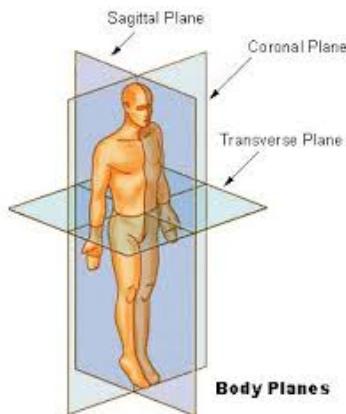


Figura 1: Planos anatómicos.

Como se puede observar en la Figura 1, la representación se compone de 3 planos ortogonales (Sagital, Frontal y Horizontal) cuya intersección define un punto situado en el centro de gravedad del cuerpo.

Excluyendo las articulaciones de los dedos de la mano, un brazo tiene un total de **9 grados de libertad** sobre estos planos anatómicos estándar.

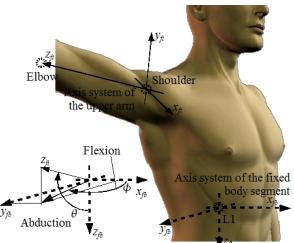
La articulación **escáculo-torácica** posee 2 grados de libertad conocidos como de **ele-vación/depresión y retracción/protracción** que son encargados de desplazar la cabeza glenohumeral.

En la articulación del hombro (**cabeza Glenohumeral**) se consideran tres grados de libertad rotacionales (rótula esférica). Estos movimientos se denominan **flexión/extensión, aducción/abducción y rotación medial/lateral** (o rotación interna/externa) del hombro.

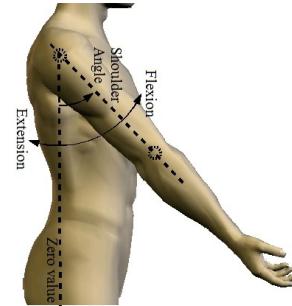
El codo dispone de 2 grados de libertad, descritos como **flexión/extensión y pronación/ supinación** del antebrazo.

Finalmente la muñeca posee 2 grados de libertad que son **flexión/extensión y la desviación radial/ulnar** que se ejecutan por desplazamiento de los huesos carpianos.

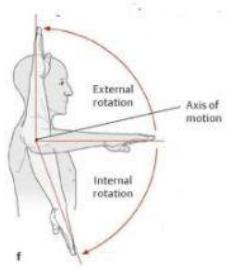
Para nuestro diseño se consideran solo cuatro de estos grados de libertad que abarcan los 3 giros de la cabeza Glenohumeral y la flexión y extensión del codo. A continuación se definen los grados de libertad en el orden en el que se ejecutará el diseño.



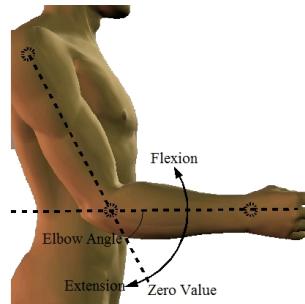
(a) Abducción-Adducción.



(b) Flexión-Extensión del hombro



(a) Rotación del brazo.



(b) Flexión-Extensión del codo

II.II. Configuración del exobrazo

La forma más utilizada en robótica para describir una serie de articulaciones es mediante el método de asignación de referencias por **Denavit-Hartenberg**. Siguiendo una serie de pasos se ha creado un sistema que define los grados de libertad y las distancias de nuestro brazo con el menor número de variables posible. Dentro de la Robotic Toolbox ya se nos ofrece una serie de funciones que nos permiten estudiar su cinemática y su dinámica y crear una simulación aproximada. A la hora de definir las referencias Denavit-Hartenberg nos encontramos con que el convenio de la Toolbox establece una primera referencia articular rotacional en el eje z. Es decir, al diseñar un brazo, la primera articulación (Abducción-Aducción), es distinta a la rotación definida en el eje vertical z; por lo que se debe rotar todo el sistema para hacerla coincidente con nuestro primer eje de giro. Por ello realizamos el diseño inverso como si la primera articulación estuviera dispuesta en el eje z. A la hora de introducirla en Matlab, hacemos un cambio de base para que ese primer giro se corresponda con el de aducción/abducción del hombro.

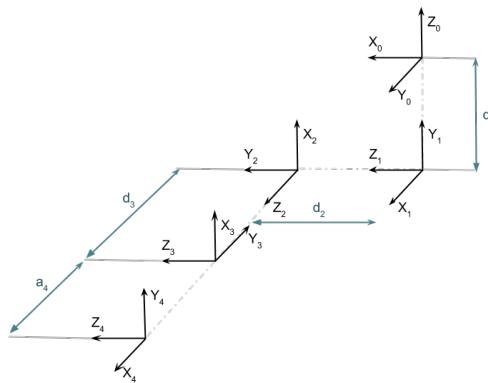


Figura 4: Referencias DH de un brazo.

Q_i	α	a_i	d_i	θ	σ
Q_1	90	0	$d_1 = 0$	0	0
Q_2	-90	0	$d_2 = 0$	90	0
Q_3	-90	0	d_3	90	0
Q_4	0	a_4	0	0	0

Las distancia a_4 y d_3 son las que se han definido como parámetros físicos que corresponden con la longitud del brazo y antebrazo respectivamente. Los valores igualados a cero d_1 y d_2 son distancias que en la simulación se consideran nulas, pero en el sistema físico real del exobrazo tendrán un valor, aunque pequeño, no despreciable. Estas referencias se han definido de esta manera, de tal manera que el giro positivo(+) de las articulaciones (por orden para este modelo) son de abducción, rotación externa y flexión para el hombro y flexión en el codo; y en sentido negativo(-), adducción, rotación interna y extensión. Esta convención se explica en detalle en el *Apéndice A* y se realizará de la misma manera para

posteriores diseños o cambios.

Por razones de diseño se ha tenido que modificar esta primera configuración para favorecer el giro de rotación del brazo ubicando la articulación de giro por medio de guías circulares en la distancia mitad del brazo tal y como se ve en la figura. En la configuración anterior este giro se alojaba en el hombro junto con los dos primeros de abducción-aducción y flexión-extensión. Esta configuración requería un motor más potente y un alojamiento mayor para la cabida de los 3 motores en el hombro. De esta nueva manera dividimos el problema haciendo que el motor soporte menor carga y alojándolo en una zona menos congestionada.

Para esta configuración se han rediseñado las referencias Denavit-Hartenberg, para que, a efectos de cálculo se puedan establecer las solicitudes de cada pieza por el método iterativo de **Newton-Euler**. Esta nueva configuración añade una articulación prismática **fija** a una distancia mitad de la longitud del brazo.

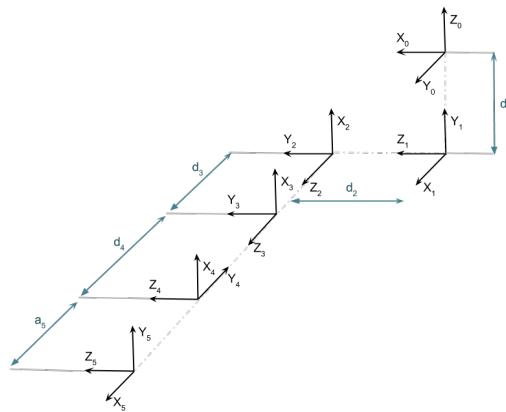


Figura 5: Nuevas referencias DH del brazo.

Q_i	α	a_i	d_i	θ	σ
Q_1	90	0	$d_1 = 0$	0	0
Q_2	-90	0	$d_2 = 0$	90	0
Q_3	0	0	d_3	0	1
Q_4	-90	0	d_4	90	0
Q_5	0	a_5	0	0	0

Estos parámetros se corresponden con la configuración cinemática del brazo. Ahora los parámetros d_3 y d_4 son la distancia mitad donde se sitúa la articulación de rotación por medio de una guía y a_5 es la longitud del antebrazo.

El exobrazo en cambio no se corresponde con las mismas medidas, ya que es un componente externo al brazo humano, pero sí que deberán de coincidir sus ejes de giro. Esto se debe a que los ejes de giro de brazo y exobrazo deben estar correctamente alineados para que su movimiento sea guiado y minimizar al máximo las molestias que pueda provocar durante su uso.

Por ello se ha creado una configuración más compleja basado en la introducción de articulaciones prismáticas fijas, en la que se tienen en cuenta parámetros de diseño para asegurar que no exista interferencia entre brazo y exobrazo.

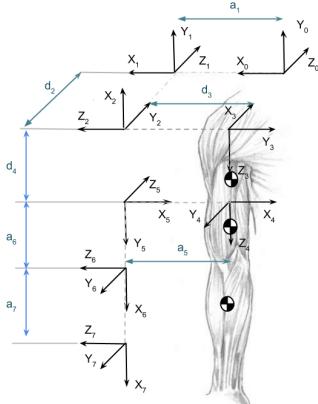
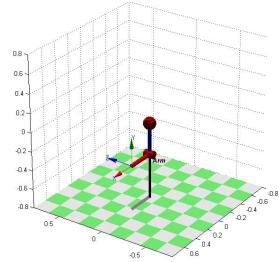


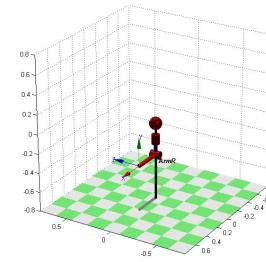
Figura 6: Nuevas referencias DH del brazo.

Q_i	α	a_i	d_i	θ	σ
Q_1	0	a_1	0	90	0
Q_2	-90	0	d_2	-90	1
Q_3	-90	0	d_3	-90	0
Q_4	0	0	d_4	90	0
Q_5	90	a_5	0	0	1
Q_6	-90	a_6	0	90	1
Q_7	0	a_7	0	0	0

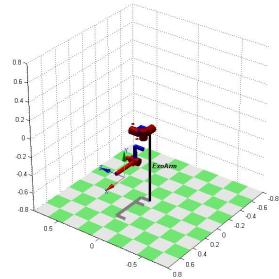
En esta nueva configuración los parámetros a_1 y d_2 son las distancias de separación del exobrazo con respecto al brazo. d_4 y a_6 son las distancias mitad del brazo superior donde se aloja el motor que permite la rotación. Por último a_7 es la distancia del antebrazo. El objetivo de hacer una configuración tan compleja es el de determinar las fuerzas y momentos en cada uno de las referencias definidas. Sobre estas referencias se encuentran las juntas de las piezas que requieren de un análisis dinámico por elementos finitos y que se analizará con SolidWorks en base a los resultados arrojados por el método de Newton-Euler de Matlab.



(a) Configuración del brazo.



(b) Configuración del brazo modificada.



(a) Configuración del exobrazo en Matlab.



(b) Configuración equivalente del exobrazo en SolidWorks.

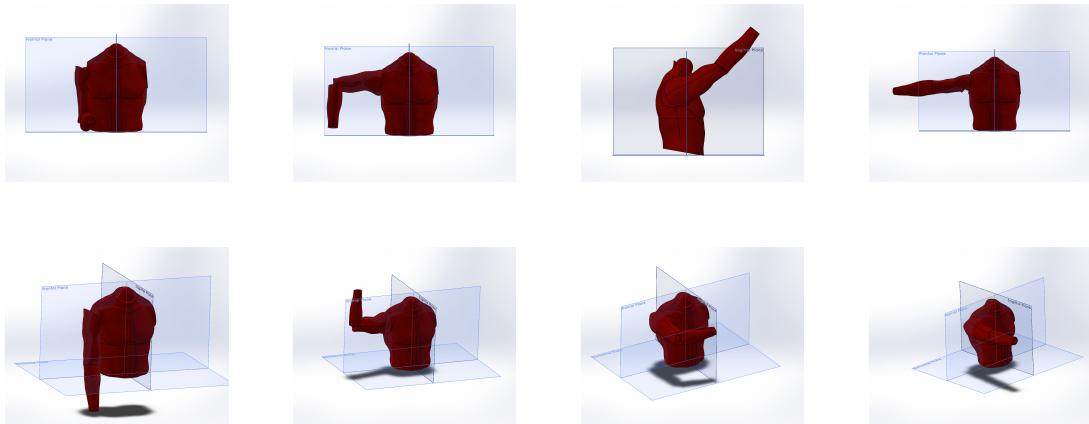
Es muy posible que la alineación de estos ejes no sea exacta, debido a que existen otros grados de libertad adicionales en el hombro o articulación sternoclavicular. Es por ello importante reducir estas desviaciones fijando una postura fija durante su uso con ayuda de unas correas de agarre y apretando correctamente la mochila que será la referencia base desde la que se mueven los motores. Un pequeño giro en la mochila en cualquiera de sus ejes puede producir molestias en el paciente a lo largo de su movimiento, sobre todo cuando el rango de giro es amplio, ya que existen grados de libertad involucrados en el movimiento que hemos desecharido.

II.III. Límites angulares y cinemáticos

Las configuraciones descritas anteriormente tienen un rango limitado de movimiento, así como de las velocidades máximas en la ejecución de tareas cotidianas o de rehabilitación. [1]. Estos límites quedan establecidos por el diseño, y así evitar posibles interferencias. Partiendo de la postura neutra representada en las primera figura se establecen las siguientes limitaciones.

Motion	q_{min}	q_{max}	Range
<i>Abduction – Adduction</i>	0°	100°	100°
<i>ShoulderFlexion – Extension</i>	-10°	130°	140°
<i>Rotation</i>	-80°	60°	140°
<i>ElbowFlexion – Extension</i>	-90°	40°	130°

En las simulaciones se establecen estos límites angulares con el fin de evitar accidentes o un excesivo esfuerzo sobre el usuario. La velocidad máxima será de $90^\circ/s$ que se considera suficiente para la ejecución de diferentes tareas. Los valores aquí establecidos se utilizarán posteriormente en la programación de los servomotores escogidos en este trabajo y que se describe detalladamente en el *Apéndice I*. Se han establecido a su vez una serie de posiciones para evaluar las cargas estáticas y establecer las solicitudes en cada una de ellas, así como la creación de trayectorias de una a otra por los métodos ofrecidos en la toolbox.



La primera figura es la posición neutra desde la que se establecen los límites angulares descritos en la tabla anterior. De todas estas posiciones se puede deducir rápidamente que la extensión completa del brazo hacia fuera requerirá un mayor par en los motores debido a la fuerza gravitacional. Por ello los motores que ejecutan los movimientos de abducción-adducción y flexión-extensión del hombro serán iguales y más potentes que el resto.

II.IV. Parámetros cinemáticos y dinámicos

Los parámetros que intervienen en los cálculos requeridos para el diseño del exobrazo y selección de motores, son esencialmente las longitudes, la masa, el centro de masas y la inercia del brazo y antebrazo. Existe una componente adicional que es el rozamiento, pero este aspecto dependerá del diseño a realizar.

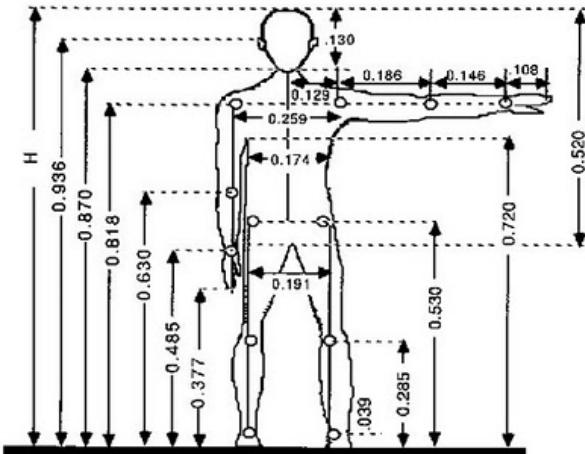


Figura 11: Medidas estándares del cuerpo humano de un adolescente.

Estos parámetros cinemáticos varían según la edad, sexo y complexión del usuario. Es de gran relevancia analizar las diferencias antropométricas entre un joven y un adulto, ya que para edades por debajo de los 18 años la longitud de sus miembros están en fase de crecimiento, a partir de esa edad una persona mantiene estos parámetros constantes. De todas maneras existen otras diferencias según la complexión y el sexo de la persona, así como la estimación de otros parámetros físicos. Por ello se han consultado diferentes fuentes para estimar estos parámetros (ver Apéndice B) y se ha creado un script en Matlab que proporciona estos resultados en función de cuatro parámetros básicos, que son: la **edad**, el **sexo**, la **altura** y el **peso**.

De forma resumida las fuentes de estudio en que se basan estas estimaciones ; avaladas por el **Digital Human Research Center**; responden a distintas categorías de personas. Para estimar las longitudes de los miembros de personas jóvenes en fase de crecimiento se han utilizado datos de **Anthrokids**, que es un estudio antropométrico con 7000 sujetos de distintas edades comprendidas entre los 2 y los 19 años en los que se establece una correlación entre las longitudes de sus miembros con su peso y altura. Los parámetros físicos de masa, centro de masas e inercia se basan en un estudio de (**T.Yokoi, K.Shibukawa, M.Ae**) en los que se establecen correlaciones distintas según el índice de masa corporal que establecen diferentes coeficientes en las ecuaciones de correlación.

Para las personas adultas se utiliza un modelo más estandarizado, desarrollado por Plagenhoef et al. [2].

Los valores de estudio que se han escogido principalmente se centran en el brazo y antebraco, aunque para el diseño completo se pueden requerir otros más precisos como la

anchura de espalda o la circunferencia del brazo.

De esta manera se ha creado una librería en la que existe un objeto “RoujinArm” con propiedades y métodos para calcular las solicitudes máximas y modela el exobrazo con las referencias Denavit-Hartenberg explicadas en la sección anterior.

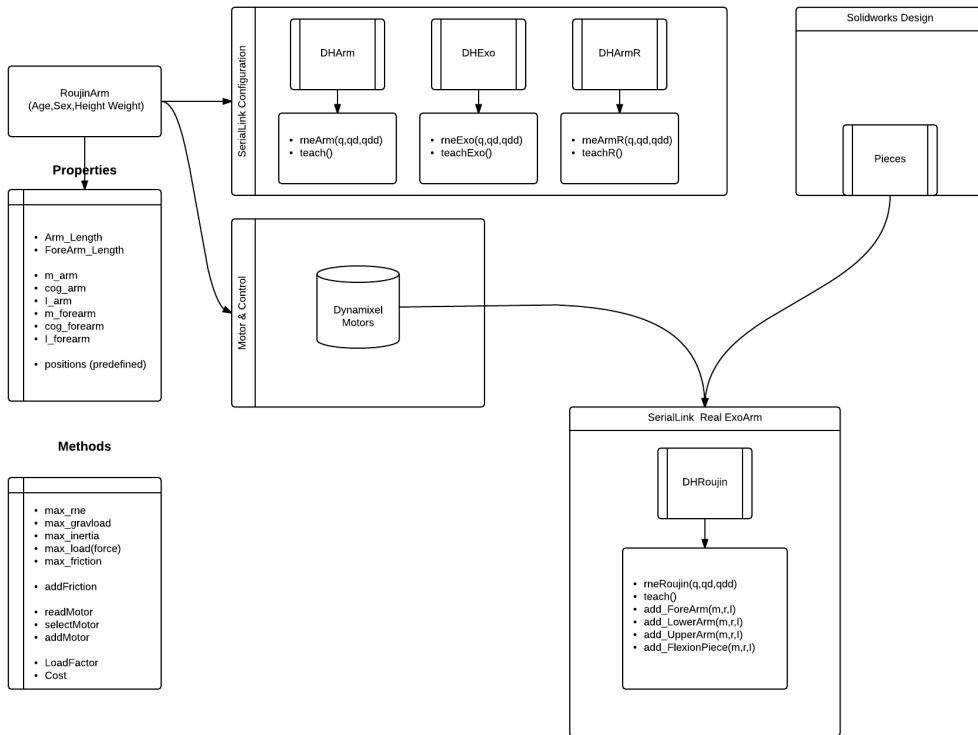


Figura 12: Objeto RoujinArm en MATLAB.

La metodología a seguir comienza definiendo el tipo de usuario. Con 4 datos que son el peso, la altura, el sexo y la edad se estima la dinámica de un brazo en condiciones normales. A través de Solidworks se puede modelar el exobrazo mediante la introducción de las longitudes de ambos miembros creando así las piezas necesarias para su montaje y se anotan las propiedades físicas proporcionadas.

Acto seguido, se introducen los parámetros dinámicos del exobrazo creados según el tipo de usuario en la simulación y se calculan los pares máximos que son necesarios para mover el exobrazo en su totalidad. Con este par, se seleccionan los motores que se habrán de utilizar y se añaden como elemento adicional en el conjunto.

Finalmente se calculan los esfuerzos y se hace un estudio de las solicitudes del exo-

brazo y se lleva a cabo un análisis de las zonas más críticas. En caso de superar el esfuerzo máximo que es capaz de aguantar el material se procede a una modificación de diseño.

III. Estudio dinámico

III.I. Dinámica inversa

Para calcular el par de cada motor en cada una de las articulaciones se utiliza la ecuación dinámica inversa del manipulador:

$$Q = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + J(q)^T g$$

donde q , \dot{q} y \ddot{q} son las componentes de posición velocidad y aceleración angular de cada una de las articulaciones respectivamente. M es la matriz de inercia, C es la matriz de acción centrípeta y de Coriolis, F es la fuerza de fricción, G es la carga por gravedad y g es una componente de carga añadida en el efecto final que se transmite entre eslabones.

Conocemos que los factores predominantes son la gravedad y la fricción. La fricción es difícil de modelar, ya que depende de la naturaleza de los motores y de otros aspectos mecánicos que implican transmisión de potencia. Las fricciones de los motores se han estimado con unos valores recogidos de otras publicaciones en los que se han caracterizado sus parámetros. Para las fricciones de transmisión de movimiento en la tercera articulación se ha supuesto que el sistema dispone de suficiente lubricación para minimizar esas pérdidas. De todas maneras, el sistema elegido contiene varios elementos cuya fricción no puede considerarse nula, por lo que en ésta tercera articulación se ha aumentado el valor con respecto a los demás motores. La fricción viscosa elegida es de $0,15[N\frac{rad}{s}]$ y la fricción de Coulomb $0,11[N]$.

Para el cálculo de los pares articulares debidos a la gravedad, sabemos que su par depende solo de la posición en la que se encuentra el manipulador. Por el diseño del mismo, se llega a la conclusión que las variables que más le afectan son los ángulos de extensión de brazo y antebrazo. Evidentemente los valores máximos para la tercera articulación se alcanzan cuando el brazo está totalmente extendido hacia fuera.

Para la solución dinámica escogemos el método de Newton-Euler para hallar las solicitudes en cada una de las articulaciones de forma iterativa. Se ha precisado la modificación de algunos de los scripts proporcionados por la toolbox utilizada, especialmente para la obtención de fuerzas y pares en cada uno de los sistemas de referencia.

III.II. Distribución de masas e inercias

Una vez que se pueden estimar los parámetros dinámicos de una persona, se procede a la incorporación de estos valores en Matlab para obtener los esfuerzos de la forma más precisa posible.

Como se ha explicado anteriormente, el giro del brazo vendrá accionado por un motor alojado en la distancia mitad del brazo con una guía circular y un sistema especial de transmisión.

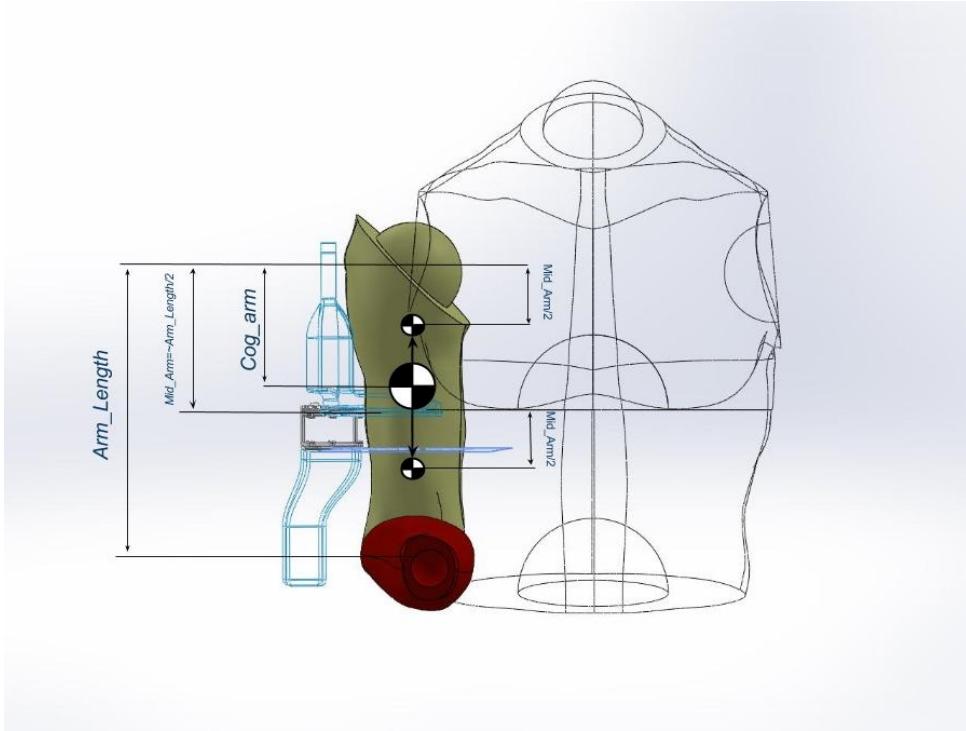


Figura 13: Distribución de masa en el brazo.

En el cálculo de la dinámica del brazo, con esta pieza se requiere realizar una distribución de masas y subdividir este eslabón en dos. Disponiendo de la masa del brazo y su centro de gravedad se pueden crear un modelo equivalente haciendo un equilibrio de momentos de las dos masas aplicando las siguientes ecuaciones.

$$M_{arm} = \sum_{i=1}^N M_i$$

$$M_{arm}x_{cog} = \sum_{i=1}^N M_i * x_i$$

Para la distribución de inercias se hace una estimación considerando el miembro del brazo como una barra longitudinal que se subdivide en otras dos.

$$I_{barra} = M * L^2 / 12$$

donde M es la masa total de la barra dispuesta en su centro y L la longitud de la misma. Como ahora se ha subdividido el brazo se considera que sus centros de masas se sitúan aproximadamente en el centro de estas dos sub-barras, cuya longitud será $L/2$.

$$I_{sub-barra} = m * (L/2)^2 / 12$$

Así pues se ve reducida la inercia de estos dos eslabones en una cuarta parte. Se aplica también el **Teorema de Steiner** para trasladar las inercias de un sistema de referencia respecto de otro entre ejes paralelos.

$$I_{eje} = I_{CM} + M * d^2$$

En este caso concreto, el teorema de Steiner no es especialmente útil, ya que las inercias de los miembros del brazo se sitúan en los mismos centros de masa, pero en la elaboración del exobrazo se crearan referencias paralelas para trasladar estas inercias según la configuración Denavit-Hartenberg diseñada en la sección anterior. Estas fórmulas también se aplican de forma inversa para establecer la dinámica de varios componentes en uno y crear un sistema equivalente. Este proceso se aplica en la estimación inicial de parámetros para el conjunto de antebrazo y mano para el cálculo del peso y centro de masas en su conjunto.

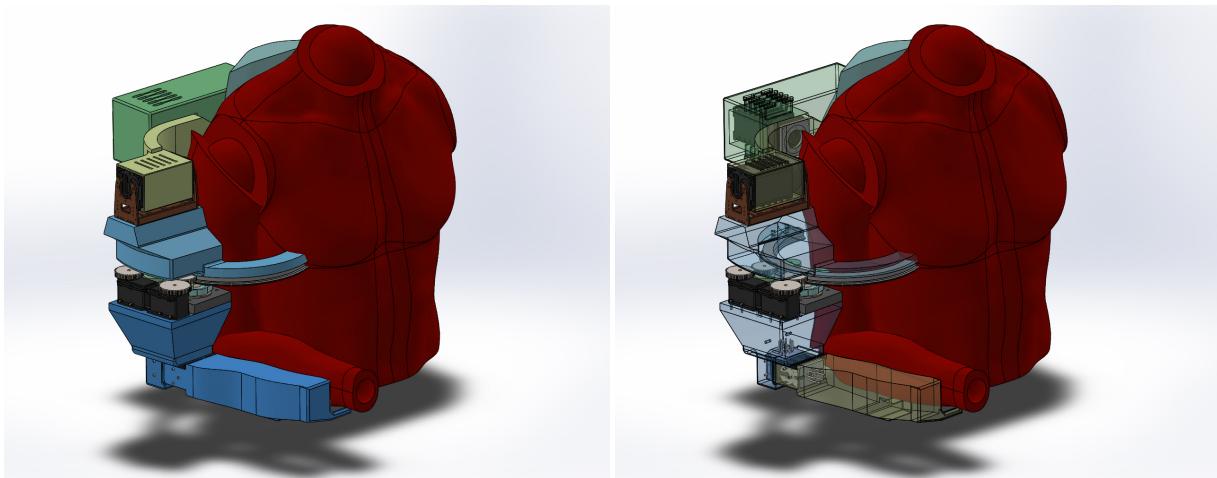
Por otra parte, existen otros parámetros dinámicos independientes de la antropometría del usuario, como son los componentes del exobrazo o los motores. Cada una de las piezas posee una masa, un centro de gravedad y una inercia que proporcionará Solidworks estableciendo previamente el material que se ha utilizado en el diseño. Estos valores se incorporan al estudio en Matlab una vez obtenidos y se procede a su cálculo más aproximado mediante la aplicación de los conceptos explicados en esta sección. En el Apéndice E se aplican estos cálculos en la unión de las piezas y componentes externas del exobrazo con los miembros equivalentes del brazo y se realizará la actualización de variables de nuestro modelo simulado.

De los motores se han de considerar la fricción viscosa, la fricción de Coulomb, las reducciones e inercias. Las reducciones se consideran igual a la unidad con la excepción de la tercera articulación, debido a que su eje no es colineal con el brazo. Los parámetros físicos están incluidos en nuestra base de datos que se pueden consultar para la selección de los actuadores.

IV. Diseño del exobrazo

IV.I. Creación y desarrollo del exobrazo

En la siguiente figura se puede apreciar el ensamblaje finalizado con las distintas piezas y motores que lo conforman. Este modelo está formado por 25 piezas, de las cuales solo 5 se imprimen mediante tecnología de impresión 3D. Contiene 4 motores con 5 piezas auxiliares de fijación. El resto son las piezas de la guía de rotación cuya selección y especificación se detalla en el apéndice D.



(a) Modelo de exobrazo en SolidWorks.

(b) Motores y guías.

Para iniciar el desarrollo de la solución de diseño se ha requerido establecer una misma metodología que la utilizada en el cálculo con Matlab y crear unas referencias comunes para facilitar la compatibilidad entre estos dos programas. Para crear un modelo sobre el que montar un primer diseño del exobrazo se han utilizado recursos de una biblioteca online de SolidWorks del cuerpo humano. Con el ensamblaje proporcionado se le han aplicado relaciones de posición a los distintos eslabones para asemejar los grados de libertad en serie de las articulaciones como los modelados en Matlab y describir los mismos movimientos para el brazo y el exobrazo. En este sentido la solución ha sido la creación de un elemento auxiliar que establece un eje de rotación definido para nuestra configuración concreta. Uno por cada movimiento de rotación definidos. De esta manera podemos crear un estudio de movimiento y asegurar la alineación de los ejes de las articulaciones en un entorno simulado. Sobre este brazo se incorporarán el resto de elementos que acompañarán a su movimiento.

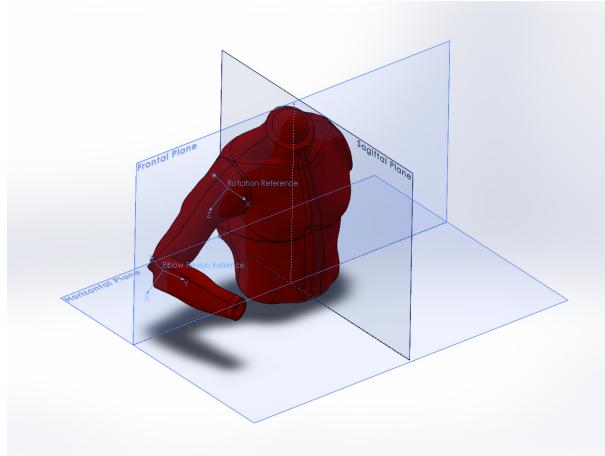


Figura 15: Referencias del brazo en SolidWorks.

Este exobrazo consta de las siguientes partes:

Comenzando desde la base, se cuenta con una mochila soporte que se considera como una base fija con respecto al usuario. Es importante apretar este elemento mediante correas, ya que sobre ella se sostiene el primer eje de movimiento y debe estar alineado con el eje de abducción del hombro del usuario. Sobre esta mochila hay un saliente que contiene el primer motor y que debe soportar la mayor carga del conjunto. Este motor está fijado mediante tornillos a la mochila base sobre unas guías para nivelar la distancia con respecto al plano sagital, de esta manera proporcionamos libertad de ajuste respecto al hombro. Una vez fijado y correctamente alineado con el primer eje de giro, se conecta el motor a la siguiente pieza mediante un frame específico para cada motor. En el ejemplo de la figura se ha utilizado un motor **Dynamixel Pro H54 200 S500 R** capaz de proporcionar **44[Nm]** y su fijación está especificada como **FRP54-I110K**.

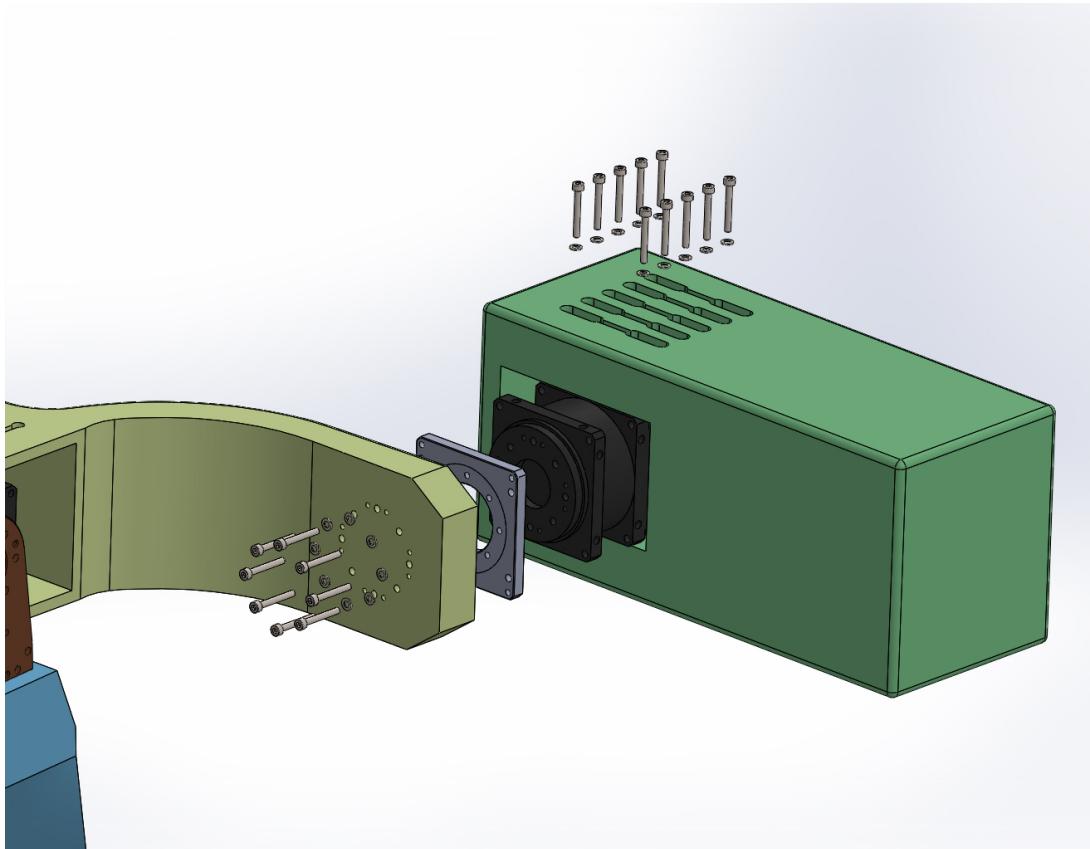


Figura 16: Ensamblaje de la primera articulación.

La siguiente pieza es la encargada de transmitir el movimiento de abducción a todo el exobrazo y debe rodear en un ángulo de 90 grados al mismo. El espacio relativo entre esta pieza y el brazo debe ser como mínimo de 5 cm para evitar problemas o rozaduras. En el apéndice D se establece un diámetro circunferencial de 255 [mm].

El segundo motor se conecta a una de las paredes de esta pieza mediante tornillería. Este motor a diferencia del anterior no tiene la misma libertad de ajuste que el anterior. Solo se debe asegurar que los dos primeros ejes de rotación se dispongan perpendicularmente.

Este articulación tiene un rango de recorrido más amplio y para favorecer este movimiento se requiere de una anclaje diseñado para tal fin, en este ejemplo se utiliza el mismo motor que el anterior, ya que sus requisitos de par serán muy próximos al primero. Este anclaje se denomina **FRP54 H120**. Su anchura es suficiente para anclar una nueva pieza con un gran área que es un aspecto conveniente para la transmisión de esfuerzos.

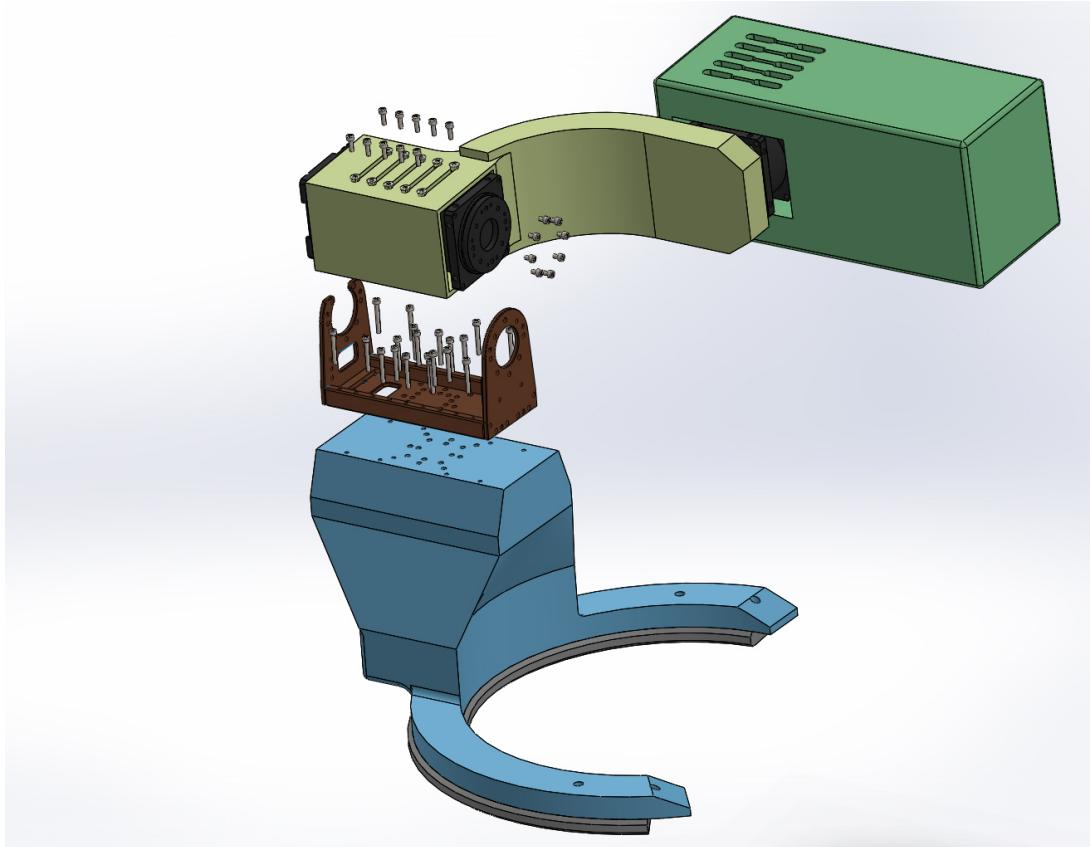


Figura 17: Ensamblaje de la segunda articulación.

La tercera articulación conlleva una dificultad que ha hecho redefinir varios aspectos de este trabajo para llegar a una solución conveniente a nuestros objetivos. Esta articulación, a diferencia de las demás no dispone de un eje colineal con el eje de rotación del brazo, debido a las dificultades que suponía en cuanto al diseño. La solución adoptada ha sido la incorporación de una guía circular conducida mediante desde la que se monta un carro que aloja los motores que ejecutan el movimiento.

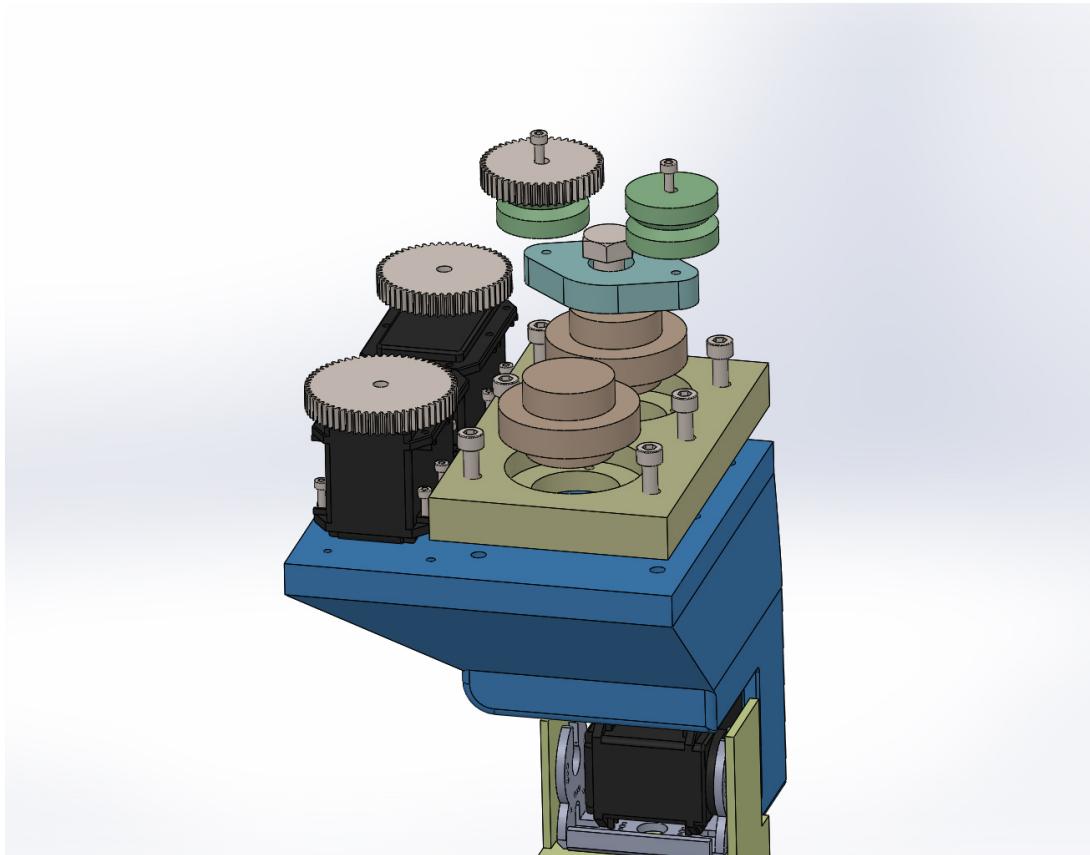


Figura 18: Carro.

La pieza superior del brazo está unida a una guía circular sobre la que se anclará otra guía de acero con un borde exterior engranado para la transmisión de movimiento y un borde en V interior para el deslizamiento de los rodamientos que van montados sobre un carro que permite el movimiento de rotación entre brazo y antebrazo. Los motores dispuestos en este ejemplo son dos **Dynamixel AX-18A** que ofrecen un menor par, pero una velocidad mayor, debido a que hay una relación de transmisión entre brazo y motor. Se puede operar con un motor en esta articulación de forma ajustada.

El cálculo y selección de los componentes necesarios para esta articulación se explican en el *apéndice D*.

Finalmente sobre el carro anterior se fija una pieza que alojará un motor encargado del movimiento de flexión y extensión del antebrazo. Este motor es más pequeño que los anteriores. En este caso el motor elegido es un **Dynamixel RX64** con 2 fijaciones **FR05-S1** con el brazo y una fijación **FR05-H1** que proporciona el giro con el antebrazo.

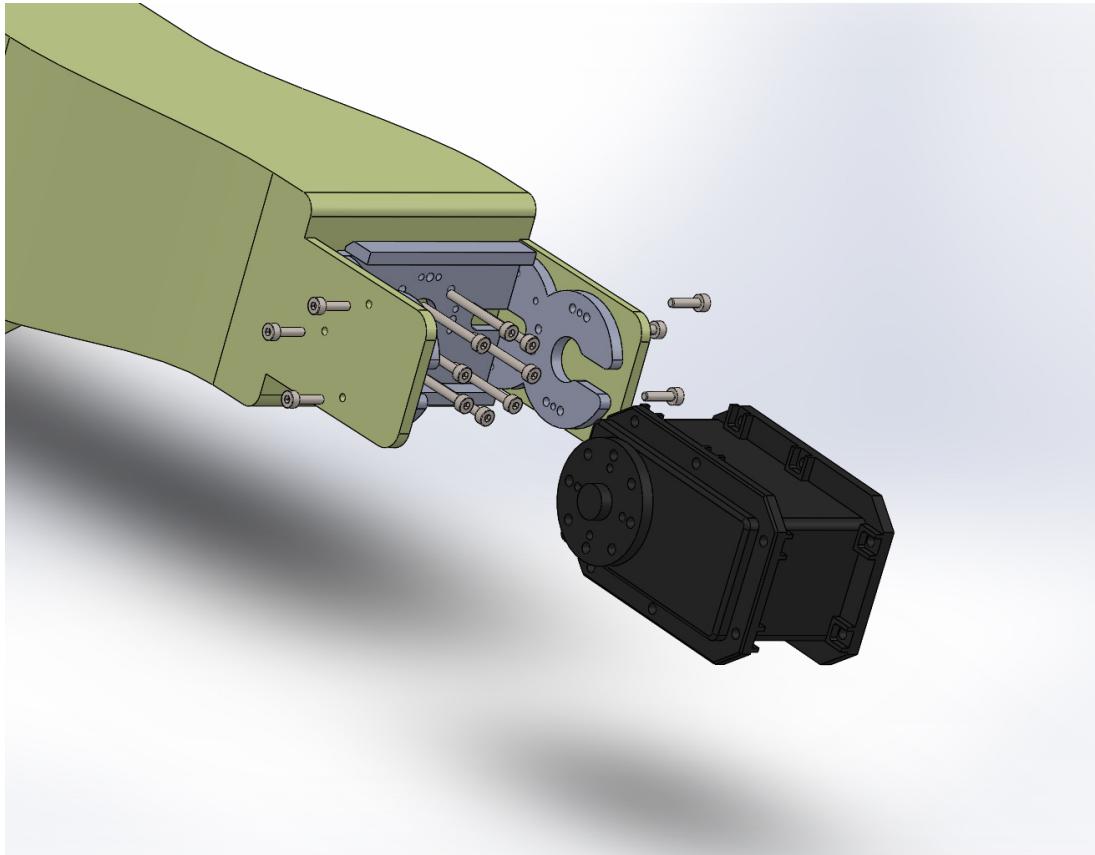


Figura 19: Ensamblaje de la articulación del antebrazo.

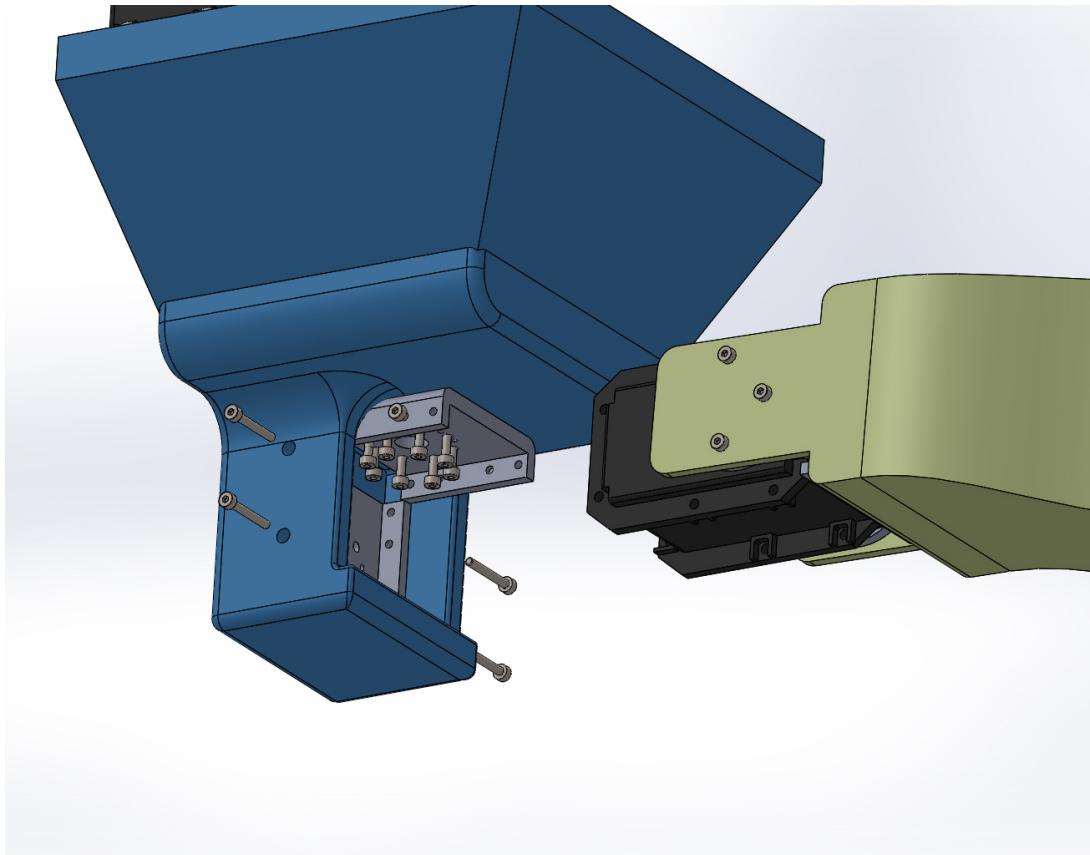


Figura 20: Ensamblaje del alojamiento del motor.

Los tornillos son de cabeza hexagonal hueca y se han de aplicar arandelas en todos aquellos puntos que sean necesarios para evitar una concentración de tensiones. Los alojamientos de los tornillos en las piezas de plástico se han hecho lo más profundo posible para mantener bien cohesionadas las piezas.

IV.II. Diseño Paramétrico

Una de las mayores ventajas de utilizar un programa de diseño paramétrico es que se pueden establecer relaciones entre las cotas que definen los croquis de las piezas y establecer una dependencia entre ellas de tal manera que las piezas se adaptan con unos pocos parámetros de entrada. **SolidWorks** nos ofrece una manera rápida de establecer este tipo de relaciones mediante un complemento denominado **DriveWorkxpress**. En nuestro ejemplo adaptamos la creación de nuestro modelo en función de dos parámetros que son las distancias de brazo y antebrazo.

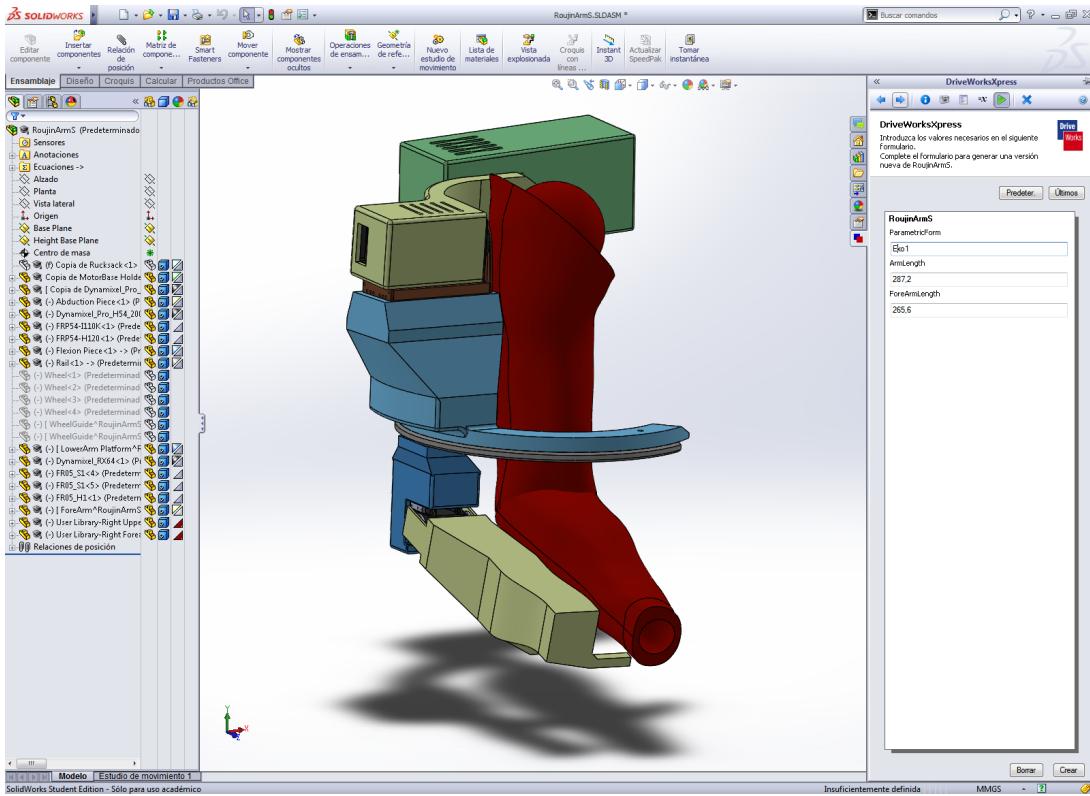


Figura 21: Introducción de datos en DriveWorkXpress.

En este apartado la dificultad reside en establecer una metodología de creación de sólidos que se basa en el orden de ejecución de las operaciones que construyen el modelo de cada una de las piezas. Es tarea del diseñador implementar un sistema robusto de configuraciones para la adaptación de las piezas al usuario. Los fallos en la creación del prototipo por este método son comunes e integra una dificultad que solo se soluciona con experiencia y práctica. Una vez que se introducen los datos, se crean piezas nuevas con las dependencias establecidas y así, exportar el archivo del sólido en formato .STL que se requiere para impresión 3D. En este modelo las piezas a imprimir son las siguientes:

- Shoulder Abduction Piece.
- Shoulder Flexion Piece.
- UpperArm Piece.
- LowerArm Piece.
- ForeArm Piece.

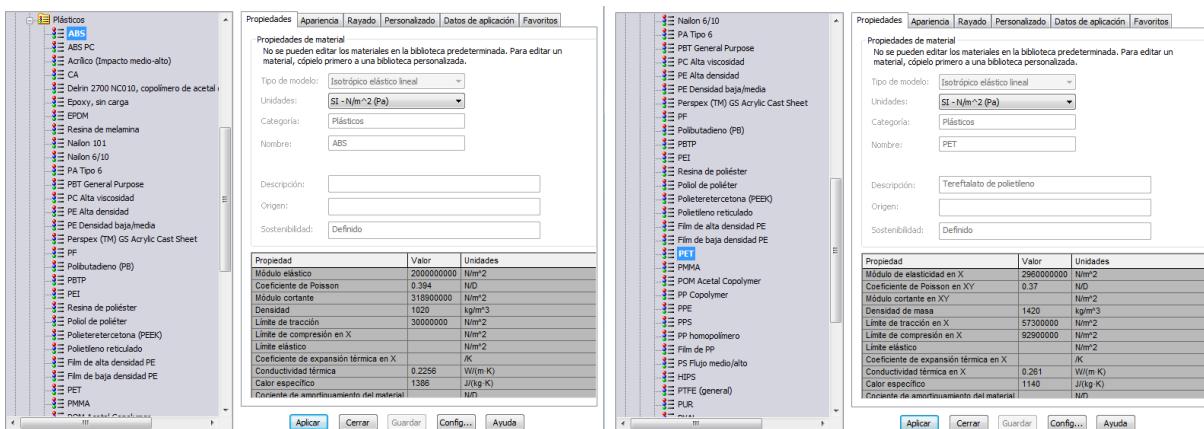
IV.III. Diseño por impresión 3D

La impresión 3D es una tecnología que actualmente tiene gran relevancia dentro de la comunidad de diseñadores y la comunidad Maker y ofrece una vía de bajo coste para llevar a cabo creaciones propias sin requerir los servicios de una empresa externa dedicada a la manufactura. Existen diferentes técnicas de impresión 3D:

La más utilizada es la de fabricación por deposición fundida. No solo por ser el método más utilizado por particulares, sino por los materiales que se requieren y en el que vamos a basar nuestro estudio. El resto de técnicas de impresión son de ámbito industrial de gran coste. Se orienta de esta manera para un prototipado rápido del producto y atender a posibles modificaciones, así como de la adaptación de algunas de las piezas a las medidas del usuario.

Los plásticos de mayor uso con esta técnica en impresión 3D son

- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y ABS-PC (Policarbonato - Acrilonitrilo Butadieno Estireno).
- PLA (Policáido Láctico). Dentro de la lista de materiales de SolidWorks utilizaremos el PET (tereftalato de polietileno) cuyas propiedades son semejantes al PLA.



(a) Propiedades físicas del ABS.

(b) Propiedades físicas del PET.

Una de las propiedades para proceder en el análisis dinámico es la determinación del límite elástico, que para estos plásticos se sitúa entre 18,5 y 50 MPa. Aunque la definición de límite elástico no se suele aplicar a estos materiales ya que la fluencia del material ocurre en muchas otras condiciones.

Con estos métodos de impresión hay que tener especial cuidado en operaciones de taladro o cavidades, ya que el proceso de impresión no favorece la isotropía del sólido. Es por ello que la inclusión de piezas auxiliares de sujeción resultan de vital importancia para transmitir los esfuerzos de los motores con un área efectiva muy pequeña en comparación con el área requerida de las piezas para evitar concentración de esfuerzos.

Existen otros plásticos o resinas que se pueden utilizar por otros usos de aplicación y que se caracterizan por poseer otras propiedades que puede mejorar la calidad de la

pieza. Por ejemplo el caso del FilaFlex o Filamento Flexible que tiene una gran capacidad amortiguadora por su flexibilidad y se utiliza como elemento auxiliar en las uniones de piezas distintas.

Las impresoras juegan con una serie de parámetros configurables para la creación de los modelos y que definen algunas características tanto geométricas como mecánicas de los mismos. Aunque los programas de impresión 3D ofrecen muchas configuraciones que afectarán al resultado final de la pieza no nos detendremos demasiado en realizar un estudio detallado para conseguir una calidad óptima. Algunos de los parámetros que pueden afectar a la calidad de las piezas, son el tipo de material, la velocidad de deposición, el diámetro del inyector, la segmentación de las capas, entre otros que afectan a la volumetría y sobre todo el relleno de la pieza. En nuestra simulación consideramos un factor de relleno de 1, ya que el material utilizado es ligero y requerimos de un sólido compacto capaz de aguantar las solicitudes para evitar su rotura.

El objetivo concreto de utilizar impresión 3D es la flexibilidad en la construcción de piezas de distintos tamaños. Por lo que el papel fundamental de estas piezas es la de transmitir el movimiento como un sólido rígido capaz de aguantar las solicitudes que se la aplican.

V. Actuadores

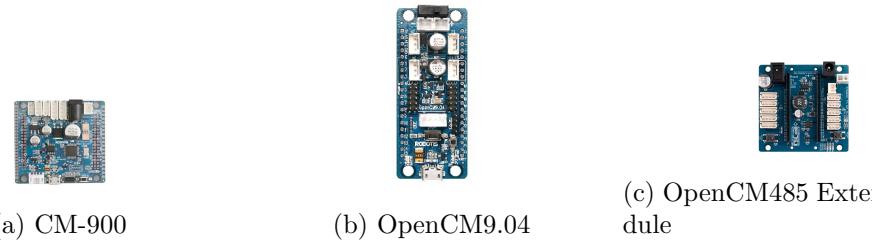
V.I. Selección de motores

La elección de unos actuadores u otros vendrá definida por la facilidad de incorporación a nuestro diseño y a la solución para hacer frente a los distintas acciones que disminuyan el par necesario. Las fuerzas a vencer que requieren más par son en primer lugar las de gravedad y en segundo lugar las fuerzas de rozamiento.

Como primera aproximación ya hemos estimado los esfuerzos en función del usuario, pero el cálculo se complica en la incorporación de piezas con el diseño completo en Solid-works.

Aún no existen actuadores que ofrezcan un elevado ratio de potencia-masa y un tiempo de respuesta en frecuencia que sea capaz de responder rápidamente a los deseos del usuario. Los PMA, actuadores neumáticos o músculos actuadores tiene un alto ratio potencia-masa pero su coste es alto y su instalación demasiado compleja en conflicto con los objetivos de este diseño.

Como solución se usarán servomotores **Dynamixel** que proporcionan un alto par y evitan la necesidad de incorporar reductores que aumenten la fricción. Estos motores son muy ligeros y sus dimensiones son suficientemente asequibles para incorporarlos a nuestro diseño (*Apéndice H*). Estos servomotores tienen un rango de posición entre 0 y 300 grados, pero se pueden configurar para efectuar su movimiento como motor de rotación continua y que es el que se dispondrá en la tercera articulación de este trabajo. Además de todo esto proporcionan variables de control programables a través del uso de placas de software abierto como la **OpenCM 9.04** entre otras, con un interfaz muy similar al de la conocida Arduino.



La selección de los motores dependerá del cálculo de par estimado con la formula antes comentada de dinámica inversa y aplicaremos su coste asociado y la incorporación de éste al diseño con las medidas establecidas. Para ello se ha creado una pequeña base de datos en una hoja excel, y el mismo script de Matlab selecciona los motores de las cuatro articulaciones según nuestro criterio. Dentro de esta base de datos se encuentra la información de estos motores como el peso, el tamaño, el coste, alimentación, centros de masas e inercias que se añaden en el cálculo de esfuerzos. Otra de las ventajas de estos motores es que cuentan con un modo de comunicación half duplex que permite el envío de información de manera bidireccional y así evitar cableado adicional conectando los motores en red.

VI. Caso de estudio

En este apéndice se presenta la aplicación de este modelo aplicado a una persona joven de 13 años, de un metro cuarenta y 47 kilos de peso.

```
>girl=RoujinArm(13,'Female',140,47)
```

Age: 13

Sex: 'Female'

Arm_Length: 0.2906

ForeArm_Length: 0.2250

m_arm: 1.1750

cog_arm: 0.1575

I_arm: [0.2872 0.2704 0.0351]

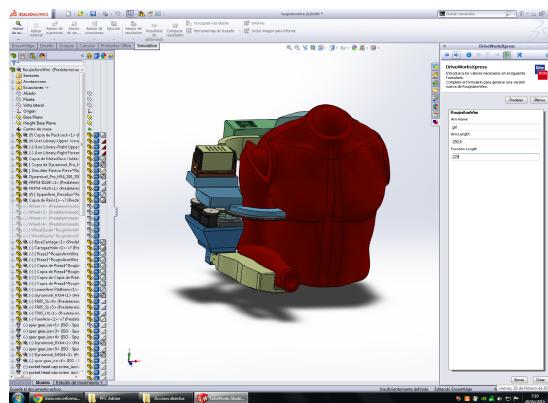
m_forearm: 0.9400

cog_forearm: 0.2058

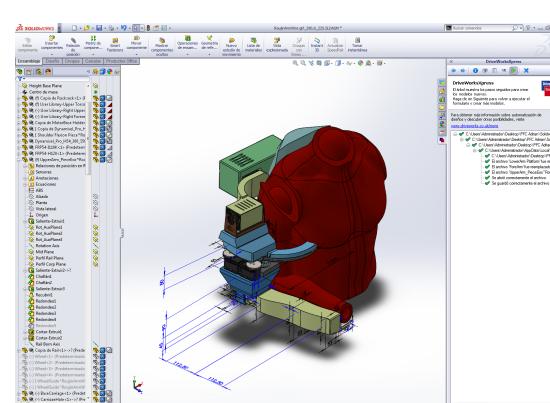
I_forearm: [0.3134 0.3224 0.0429]

```
>tau=girl.maxrne(3)
tau = [ 8.9481 7.8124 5.9097 5.2032 ]
>[name,cost,m]=girl.selectMotor(3)
name=['EX-106+' 'EX 106+' 'AX-18F' 'MX-64R']
cost=[435 435 170 285]
m = [0.154 0.154 0.158 0.126]
```

Los motores de la tercera articulación están situados en la periferia de la guía circular y tienen un ratio de giro, por lo que tienen menos par y más velocidad. Se alojan dos motores de ese tipo que están añadidos en la función de costes. Con estos datos crearemos el modelo en SolidWorks mediante el módulo preparado para este fin y obtendremos los datos



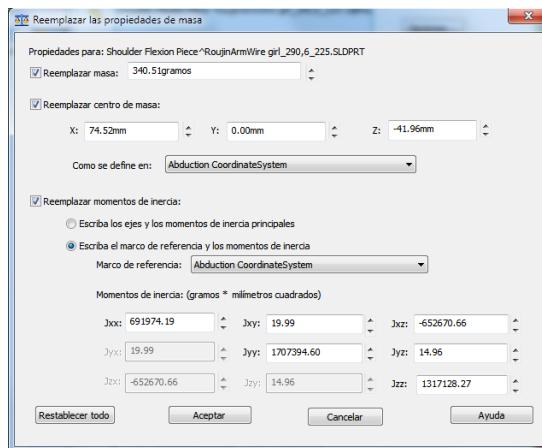
(a) Formulario de diseño



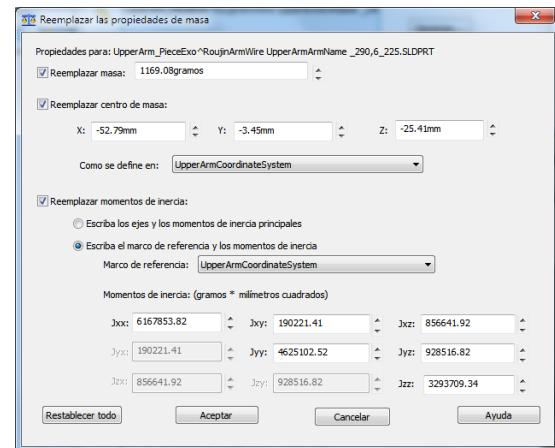
(b) Conversión del modelo a medida

Una vez que obtenemos las configuraciones procedemos a añadir los distintos elementos

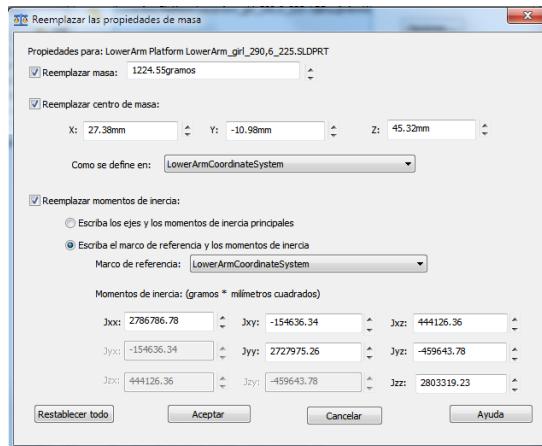
que se han creado dentro de nuestra simulación.



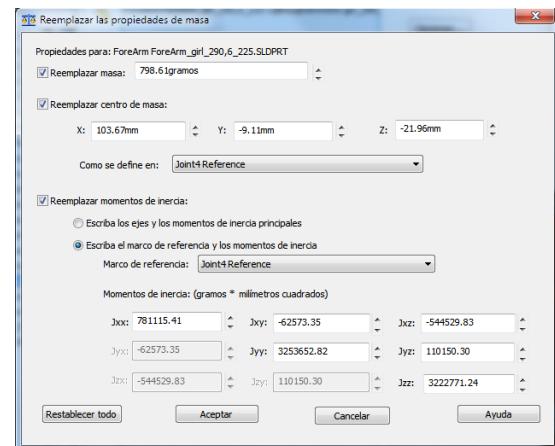
(a) Propiedades físicas de la pieza de abducción



(b) Propiedades físicas de la pieza superior del brazo



(a) Propiedades físicas de la pieza inferior del brazo



(b) Propiedades físicas de la pieza del antebrazo

Una vez que obtenemos las configuraciones procedemos a añadir los distintos elementos que se han creado dentro de nuestra simulación. La guía circular se estima que tiene un peso de 1.2 Kg y el carro 0.5 Kg. Se vuelve a realizar un análisis del par necesario y se calculan los motores a añadir.

```

»girl=RoujinArm(13,'Female',140,47)
»girl.addForeArm_Piece(m1,r1,I1);
»girl.addLowerArm_Piece(m2,r2,I2);
»girl.addUpperArm_Piece(m3,r3,I3);
»girl.addAbduction_Piece(m4,r4,I4);
»girl,addrail();
»[tau,efforts]=girl.maxrne(3);

```

```
tau=[ 21.4998 20.1586 10.8011 6.1626]
efforts= 81.4291 80.4766 38.7539 21.7476
84.8971 81.4291 35.6638 17.2641
16.9983 84.8698 35.8672 19.5832
20.1586 19.5762 5.5562 6.4052
17.0182 20.1586 5.2534 4.3941
21.4998 10.2213 11.0457 6.1626
»girl.selectMotor(3);
name = ['H54-100-S500-R' 'H54-100-S500-R' 'AX-18F' 'MX-106T']
cost =[ 2300 2300 170 430]
m =[ 0.7320 0.7320 0.158 0.158]
```

De las componentes que aparecen en los esfuerzos, las tres primeras filas se corresponden con las fuerzas en las referencias donde se une cada pieza, y las tres últimas filas son los momentos que se han utilizado para el análisis dinámico sobre el material que se va a utilizar. Estos datos se han obtenido aplicando la formulación de Newton-Euler.

Finalmente se volvería a hacer el cálculo para añadir las masas de los motores. El coste de los motores son **5200€** a los que hay que sumarle el coste de la guía que se estima en **200€**, las piezas imprimibles no supondrían un coste mucho mayor. Por lo que en una sobreestimación situamos el coste en **6000€**.

A posteriori se realizaría el análisis dinámico de las piezas y en el caso de una gran solicitud se procedería a el rediseño de las piezas para que tuvieran un mayor área.

VII. Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto se han aplicado conceptos de mecánica, robótica y diseño con el objetivo de adaptar diferentes sistemas de control ya sean para rehabilitación u otros fines. La adaptación del modelo, aunque a priori está limitado para personas de más de 100 kilos (Apéndice G), se puede utilizar para todo rango de edades con la sustitución de unas pocas piezas. El establecimiento de esta metodología de diseño se ha realizado con el objetivo de aportar una mayor flexibilidad para aquellos que en un futuro lo utilicen y se pueda seguir desarrollando.

El precio final de este exobrazo no supera los 6000 €, 5 veces menor que los modelos a la venta en el mercado y lo hace accesible para otros campos como es el de la investigación y la rehabilitación. Una de las primeras motivaciones en la creación de este desarrollo es la comunicación humano-maquina mediante señales corporales con el objetivo de crear modelos de obtención de movimiento. Los motores seleccionados permiten este tipo de aplicaciones que con otros habría sido difícil de implementar. El acceso libre de esta información cumplirá con la filosofía del proyecto Roujin como base para que otras personas puedan desarrollar, modificar y mejorar este dispositivo para otros usos.

VIII. Trabajo futuro

- El montaje del sistema real para el desarrollo de objetivos posteriores.
- La creación de una plataforma web desde la que se puede acceder a toda la información del proyecto Roujin para la creación de un exobrazo robótico.
- El desarrollo de modelos de movimiento en función de señales corporales EMG que potencien la recuperación muscular.
- Decodificar los ritmos del EEG asociados al movimiento del brazo para que el sistema pueda interpretarlos y actuar en consecuencia.
- Desarrollar diferentes modelos de control para investigación y uso docente que aporten resultados para la mejora de las aplicaciones del exobrazo.
- La aplicación de sistemas de control orientados a rehabilitación basado en la caracterización muscular del usuario para la ejecución de tareas cotidianas con el mínimo esfuerzo. [3]
- La parametrización de distintos modelos adaptados a diferentes tipos de motor que no requieran tanto par y abaratar los costes.
- Ofrecer una vía de trabajo a estudiantes de diferentes carreras de ingeniería con un sistema real.

Anexos

A. Definición de movimientos del cuerpo humano

- **Abducción/Aducción:** Movimientos fundamentales en el plano frontal
 - **Abducción:** Se define como el movimiento de alejamiento desde la linea media del cuerpo.
 - **Aducción:** Movimiento de acercamiento hacia la linea media del cuerpo.
- **Flexión/Extensión del hombro:** Movimientos fundamentales en el plano sagital.
 - **Extensión:** Se define como el incremento del ángulo formado por los huesos de una articulación.
 - **Flexión:** Se define como el decrecimiento del ángulo formado por los huesos de una articulación.
- **Rotación externa(lateral)/interna(medial):** Movimientos fundamentales en el plano horizontal.
 - **Rotación externa (lateral):** Cuando la superficie anterior del miembro superior o inferior se aleja de la linea media del cuerpo.
 - **Rotación interna (medial):** Cuando la superficie anterior del miembro superior o inferior se acerca a la linea media del cuerpo.
- **Flexión/Extensión del codo:** Movimientos fundamentales en el plano sagital.
 - **Extensión:** Se define como el incremento del ángulo formado por los huesos de una articulación.
 - **Flexión:** Se define como el decrecimiento del ángulo formado por los huesos de una articulación.

Pronación: Se refiere a la rotación de un miembro desde su posición anatómica hacia el cuerpo. (Existe pronación del antebrazo y en el pie)

Supinación: Se refiere a la rotación de un miembro cuando inicia un alejamiento respecto del cuerpo

Desviación Ulnar (Aducción Ulnar): Es el movimiento lateral de la muñeca en dirección a la ulna.

Desviación Radial (Abducción Radial): Es el movimiento lateral de la muñeca en dirección al radio.

B. Parámetros antropométricos del cuerpo humano

En este apéndice se explican detalladamente las fuentes y las fórmulas aplicadas para el cálculo de los valores antropométricos de una persona.

El Digital Human Research Center puso en marcha un consorcio formado por 8 universidades, 2 institutos y 13 compañías con el objetivo de crear una base de datos para crear modelos musculoesqueléticos. Estos datos sirven para evaluar la carga y el confort durante los movimientos, así como de analizar el comportamiento de estos modelos ante situaciones no reproducibles.

Existen varios estudios antropométricos disponibles para investigadores en antropología y biomecánica, entre otras ciencias como la computación gráfica y la robótica. De estos estudios se pueden estimar parámetros como las dimensiones corporales en correlación con variables conocidas como son la altura y el peso. Además proporcionan datos dinámicos como son ,la masa, el centro de gravedad, e inercias entre otros.

Para la selección entre diferentes fuentes de información se han desecharado principalmente las de pago como CAESAR y otras cuya información solo está disponible en japones. De la misma manera también se han desecharado otras fuentes que nos permitían estimar los valores dinámicos que no hacen diferenciación por edades ni por sexo como V.Zatsiorsky entre otros. Para nuestro objetivo de adaptación del diseño a diferentes sujetos se ha elegido **Anthrokids** para la adquisición de dimensiones corporales para niños en fase de crecimiento complementando los aspectos dinámicos con el estudio de **T.Yokoi, K.Shibukawa,M.Ae.**

Anthrokids es un estudio realizado en 1977 en diferentes áreas de Estados Unidos con 4000 sujetos, de edades comprendidas entre los 2 y 19 años de edad diferenciados por sexos. A partir de los 19 años los sujetos se consideran adultos y las proporciones de sus extremidades permanecen constantes.

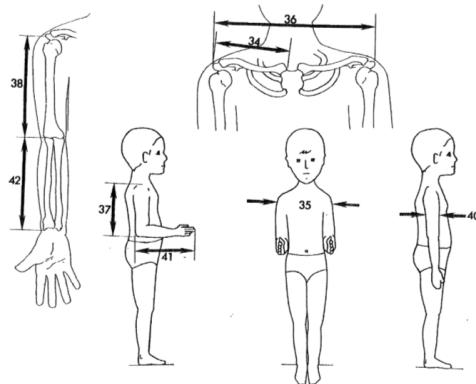
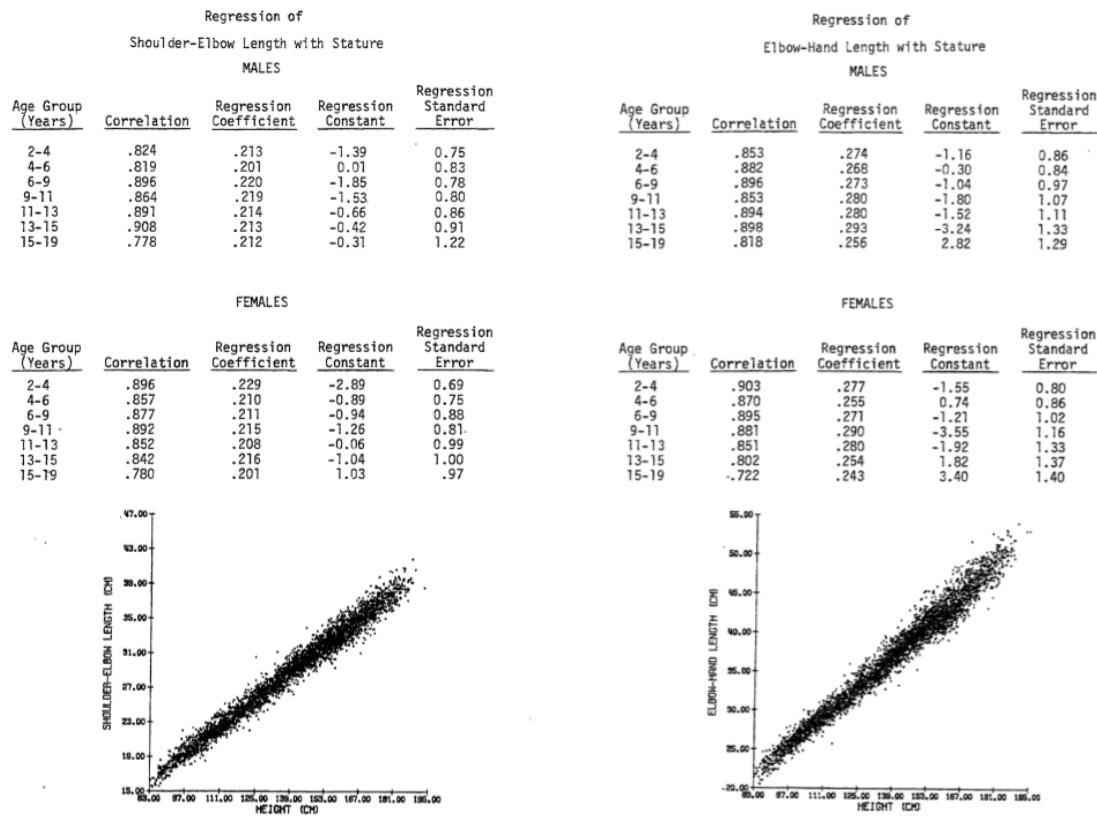


Figura 27: Medidas de brazo.

Los datos utilizados en nuestro modelo de regresión se han obtenido del documento proporcionado por este estudio.



(a) Parámetros de regresión del brazo en función de la estatura. (b) Parámetros de regresión del antebrazo en función de la estatura.

Para la estimación de los parámetros dinámicos de brazo y antebrazo se utilizan las tablas proporcionadas por **T.Yokoi, K.Shibukawa,M.Ae** en *Body segment parameters of Japanese children*. Estas proporciones vienen relacionadas con el índice de masa corporal (kaup s index) que establece diferentes grupos.

Age	Sex	Kaup's index(g/cm ²)	Group
3~5	-	~1.513	1
		1.513~1.629	2
		1.629~	3
6~8	-	~1.419	4
		1.419~1.634	5
		1.634~	6
9~11	male	~1.641	7
		1.641~1.867	8
		1.867~	9
	female	~1.609	10
		1.609~1.862	11
		1.862~	12
12~15	male	~1.767	13
		1.767~1.979	14
		1.979~	15
	female	~1.757	16
		1.757~2.031	17
		2.031~	18

Figura 29: Agrupación de individuos por índice de masa corporal.

	Group 1 (N=28)						Group 2 (N=30)				
	Radius of gyration						Radius of gyration				
	segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)
Head	17.2	73.2	45	43.3	35.9		16.4	73.4	44.9	43.3	36.2
Torso	47.7	50.6	35.1	36.2	18		47.3	52.3	35.3	36.3	18.3
Upper arm	2.4	53.1	27	26.8	10.5		2.4	54.1	27	26.7	11
Forearm	1.5	43.9	28.2	28.8	12		1.5	44	28.7	28.6	12.6
Hand	0.7	81.9	32.1	33.2	14.8		0.7	81.6	33.4	34.7	16.6
Thigh	7.6	48.6	27.2	26.9	13.6		8	49.8	26.8	26.5	14.5
Calf	3.7	43.6	28.6	28.5	10.7		3.9	43.6	29.1	29.1	11.5
Foot	1.6	59	15.2	8.9	14.9		1.7	55.8	16.3	9.3	16.2
	Group 3 (N=28)						Group 4 (N=17)				
	Radius of gyration						Radius of gyration				
	segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)
Head	15.6	73.1	44.9	43	35.9		14.3	75.3	44.3	42.6	33.3
Torso	47.5	51.9	35.3	36.3	18.9		46.2	50.7	34.2	35.2	16.8
Upper arm	2.4	53.9	26.7	26.3	11.4		2.3	53	26.8	26.5	9.3
Forearm	1.6	43.2	29.2	29.1	13.1		1.4	42.5	32	28.6	10.6
Hand	0.7	81.1	32.9	34.2	16.6		0.9	81.3	27.3	32.9	13
Thigh	8.1	49.2	26.9	26.5	15.1		9.1	48.5	29.3	26.9	12.7
Calf	4	43.5	29.1	29	11.9		4.2	43.2	15.7	29.2	10.2
Foot	1.6	58.3	16.1	9.5	16.2		1.7	54.1	16.3	8.3	15.9
	Group 5 (N=22)						Group 6 (N=16)				
	Radius of gyration						Radius of gyration				
	segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)
Head	14	75.7	45.6	44	35.6		11.7	76.6	45.6	43.9	35.1
Torso	45	51.1	34.7	35.6	17.7		46	51.9	34.8	35.7	18.4
Upper arm	2.4	53.1	26.7	26.4	9.8		2.5	54.4	26.7	26.3	10.3
Forearm	1.4	42.9	28.7	28.6	10.9		1.5	42.7	28.3	28.2	11
Hand	0.9	82.3	33.4	34.5	16.5		0.9	83.8	38.3	33.7	21.2
Thigh	9.5	48.9	27.5	27.2	13.2		10.3	47.9	27.3	27	13.7
Calf	4.2	42.7	28.7	28.6	10.7		4.3	42.2	29.1	29	11
Foot	2	54.1	15.6	8.3	15.7		1.8	55	15.1	8	15.2

Figura 30: Grupos 1 a 7.

Group 7 (N=7)							Group 8 (N=8)						
		Radius of gyration							Radius of gyration				
	segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		
Head	11.8	74.9	44.4	42.8	33.7		11	76.3	44.8	43.2	33.5		
Torso	44.8	50.6	34.3	35.8	17.2		45.6	51.1	34.8	35.7	17.5		
Upper urm	2.3	52.4	26.7	26.4	9.2		2.4	54.1	27.1	26.6	10.4		
Forearm	1.5	40.7	28.3	28.2	9.7		1.4	42.4	27.7	27.4	11		
Hand	0.9	82.2	29.9	30.6	10.5		0.9	84	30.6	31.3	10.9		
Thigh	10.7	48.3	26.9	26.6	11.6		10.7	48	27.4	27	12.7		
Calf	4.4	42.3	29.3	29.2	9.8		4.4	42.5	29.2	29.1	10.5		
Foot	1.9	56.7	14.8	7.9	14.9		1.8	53.5	16.1	8.4	16.6		
Group 9 (N=6)							Group 10 (N=8)						
		Radius of gyration							Radius of gyration				
	segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		
Head	9.3	76.2	44.9	43.3	34.3		12.1	76.7	45.7	43.8	34.2		
Torso	49.1	51.8	34.5	35.6	18.9		44.2	51.4	34.8	35.8	16.9		
Upper urm	2.7	53.4	27.4	26.8	11		2.4	53.9	27.2	26.8	8.9		
Forearm	1.4	42.6	28	27.8	10.9		1.4	44.5	28	28.8	9.9		
Hand	0.7	79.1	30.2	30.8	12.8		0.9	86.9	31.5	32.3	13.5		
Thigh	10.7	47.8	27.4	27	13		10.8	47.4	27.1	26.8	11.7		
Calf	4.2	43.4	30.2	30.1	10.9		4.5	43.8	29.4	29.2	9.6		
Foot	1.4	52.6	15.8	7.2	16.3		1.9	55.6	14.9	7.8	15		
Group 11 (N=11)							Group 12 (N=6)						
		Radius of gyration							Radius of gyration				
	segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		
Head	10.1	75.8	44.7	42.9	33.4		9.1	78.5	46	44.1	33.9		
Torso	45.9	51.9	35.2	36.3	17.5		47.8	52.7	34.6	35.6	19.4		
Upper urm	2.4	53.8	26.2	25.9	9		2.6	54	26.1	25.5	10.7		
Forearm	1.4	42.2	28.9	28.8	10.5		1.4	42.4	28.7	28.5	12.4		
Hand	0.8	86.5	31.9	33.1	14.2		0.7	84.6	32.5	34.4	17		
Thigh	11	47.5	26.9	26.5	12.9		10.7	47.3	27.1	26.6	15.4		
Calf	4.5	41.2	28	27.7	9.9		4.2	40.3	28.3	28.2	10.8		
Foot	1.8	53.5	16.9	8.5	16.2		1.7	53.8	15.8	7.9	15.8		

Figura 31: Grupos 8 a 12.

Group 13 (N=11)							Group 14 (N=16)						
		Radius of gyration							Radius of gyration				
	segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		
Head	9.5	75.6	45.6	43.4	33.8		8.4	77.6	46.8	45	34.1		
Torso	46.2	50.5	35.1	36.2	16.1		46.8	50.3	34.6	35.7	16.7		
Upper urm	2.3	52.6	27.3	27	9		2.4	53.4	27	26.6	9.5		
Forearm	1.4	42.4	28.5	28.4	9.7		1.5	42	28.1	27.7	10.6		
Hand	0.9	84.4	28.7	29.1	10.1		0.9	83.3	29	29.5	9.9		
Thigh	10.6	48.1	26.9	26.6	12.1		10.7	48.5	27.2	26.9	12.9		
Calf	5	41.3	28.4	28.3	9.5		5.1	41.3	28	27.8	10		
Foot	2	54.9	16	8.2	16.1		1.9	53.6	17	8.7	17.1		
<hr/>													
Group 15 (N=10)							Group 16 (N=11)						
		Radius of gyration							Radius of gyration				
	segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		
Head	8.6	76.3	46.4	44.6	35		9.4	77	46.5	44.4	35.6		
Torso	47.2	50.8	34.6	35.8	17.5		46	51.2	34.9	36	16.5		
Upper urm	2.4	53.3	26	25.4	10.7		2.3	52	26.6	26.1	9.4		
Forearm	1.6	40.8	28.1	27.7	11.1		1.4	41.3	28.5	28.5	10.4		
Hand	0.8	84.2	30.1	30.7	10.7		0.9	88.5	29.1	29.5	9.5		
Thigh	10.9	47.7	27.1	26.7	14		11.2	47	27.3	27	12.5		
Calf	4.9	41.1	28.1	28	10.5		4.7	41.4	27.5	27.5	9.8		
Foot	1.6	54.8	15.9	8.3	16.2		1.8	53.3	16.7	8.4	16.4		
<hr/>													
Group 17 (N=15)							Group 18 (N=7)						
		Radius of gyration							Radius of gyration				
	segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		segment mass	COG	kx(%)	ky(%)	kz(%)		
Head	8.4	77.5	47.2	44.3	37.7		7.8	79	48.2	44.4	35.6		
Torso	45.2	50.6	34.6	35.6	16.8		47.2	51.3	34.5	36	16.5		
Upper urm	2.3	52.5	26.7	26.2	10		2.5	54.2	26.9	26.1	9.4		
Forearm	1.5	41	27.7	27.6	10.8		1.3	41.5	28.1	28.5	10.4		
Hand	0.8	79.3	27.2	27.6	8.8		0.7	82.2	27.7	29.5	9.5		
Thigh	11.6	46.4	27.2	26.8	13.8		11.6	47	27.6	27	12.5		
Calf	5.3	40.2	27.4	27.3	10.2		4.8	40.5	27.7	27.5	9.8		
Foot	1.6	54.6	16	8.1	15.7		1.6	54.5	15.6	8.4	16.4		

Figura 32: Grupos 13 a 18.

La interpretación de estos valores viene documentada de la siguiente manera:

- *La proporción de la masa de sus miembros es un porcentaje respecto al peso total.*
- *El centro de gravedad es calculado como el porcentaje de la longitud del miembro medido desde el extremo proximal; es decir desde la articulación más cercana al cuerpo. Se considera que el centro de masas se sitúa en la dirección longitudinal del brazo por lo que solo se considera una componente mientras que las otras dos se suponen despreciables por simetría.*
- *El radio de giro se calcula como porcentaje de la longitud del miembro.*
- *El origen del sistema de referencia de cada miembro es el centro de gravedad del mismo. Suponiendo la posición neutra.*
- *El eje X se define como eje frontal y su dirección positiva es la dirección que va hacia delante del cuerpo. El eje Y se define como eje sagital y su dirección positiva es la que se sitúa en el lado izquierdo del cuerpo. El eje Z se define como eje horizontal y su dirección positiva es la que va señala en dirección a la cabeza. Tal y como se ve en la siguiente figura.*

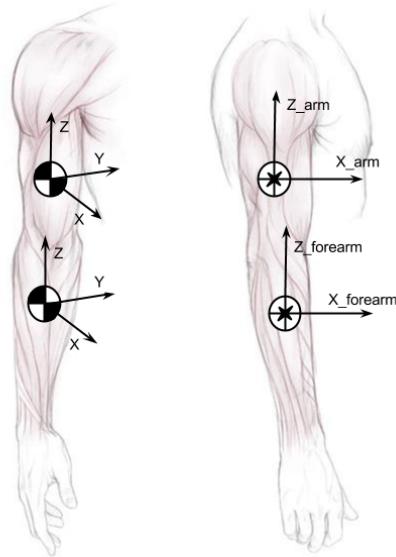


Figura 33: Sistema de referencia de brazo y antebrazo.

El radio de giro de la masa describe la forma en la que su masa se distribuye alrededor de su eje y viene dado por la siguiente fórmula. $r_g = \sqrt{I/m}$

Despejando la inercia de la ecuación anterior, se pueden calcular los elementos diagonales (I_{xx} , I_{yy} , I_{zz}) del tensor de inercia de nuestro brazo.

Para calcular los parámetros dinámicos de un sujeto adulto nos basaremos en el estudio de **Plagenhoef et al** (1983). Al igual que de la forma anterior hacemos uso de tablas que nos proporcionan la información que requerimos correlados con la altura y el peso.

Segment Lengths as a Percentage of Body Height		
Segment	Males	Females
head and neck	10.75	10.75
trunk	30.00	29.00
upper arm	17.20	17.30
forearm	15.70	16.00
hand	5.75	5.75
thigh	23.20	24.90
lower leg	24.70	25.70
ankle-to-floor height	4.25	4.25
foot length*	14.84	14.59

Figura 34: Parámetros de longitud en función de la altura total del sujeto en %.

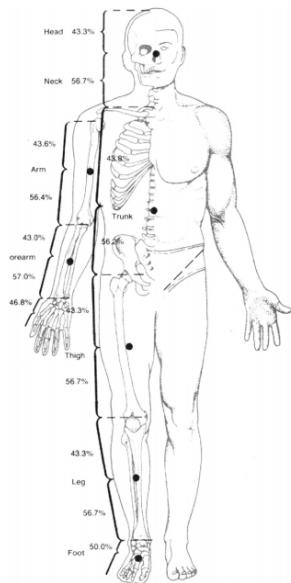
Segment Weights as a Percentage of Body Weight		
Segment	Males	Females
head and neck	8.26	8.20
trunk	46.84	45.00
upper arm	3.25	2.90
forearm	1.87	1.57
hand	0.65	0.50
thigh	10.50	11.75
lower leg	4.75	5.35
foot	1.43	1.33

Figura 35: Peso de los miembros del cuerpo en función del peso total en %.

Appendix D. continued**Segment Center of Gravity as a Percentage of Segment Length (from the proximal end)**

Segment	Males	Females
head and neck	56.7	56.7
trunk	56.2	56.9
upper arm	43.6	45.8
forearm	43.0	43.4
hand	46.8	46.8
thigh	43.3	42.8
lower leg	43.4	41.9
foot	50.0	50.0
whole body (from ground)	56.0	54.3

Figura 36: Centro de gravedad de cada miembro en % de la longitud del miembro desde el extremo proximal.



Segment Radii of Gyration as a Percentage of Segment Length

Segment	Males		Females	
	Proximal r_p	Distal r_d	Proximal r_p	Distal r_d
upper arm	54.2	64.5	56.4	62.3
forearm	52.6	54.7	53.0	64.3
hand	54.9	54.9	54.9	54.9
thigh	54.0	65.3	53.5	65.8
lower leg	52.9	64.2	51.4	65.7
foot	69.0	69.0	69.0	69.0

Figura 37: Valores de radio de giro de cada miembro en % de la longitud del miembro desde el extremo proximal.

Para calcular los momentos de inercia alrededor de los ejes de las articulaciones, se han de usar las siguientes ecuaciones.

$$I_p = mr_p^2 \quad I_d = mr_d^2$$

donde r_p es el radio de giro referido al extremo proximal y r_d es el radio de giro referido al extremo distal. Ambos r_p y r_d deben tener las unidades de longitud en [m]. El valor más significativo es $I_{xx} = I_{yy}$, ya que se asume un cilindro o elipsoide como formas aproximadas de los miembros del cuerpo humano e I_{zz} se considera despreciable por simetría y situarse en la dirección longitudinal de cada miembro. El momento de inercia alrededor del centro de masas se calcula usando el teorema de ejes paralelos.

$$\begin{aligned} I_p &= I_{CG} + mr_{CG}^2 & I_d &= I_{CG} + m(L - r_{CG})^2 \\ I_{CG} &= I_p - mr_{CG}^2 & I_{CG} &= I_d - m(L - r_{CG})^2 \end{aligned}$$

donde r_{CG} es la longitud del segmento proximal a el centro de gravedad y L es la longitud del segmento. Ambas fórmulas nos dan el mismo resultado. I_{CG} es siempre un número positivo y es necesario que se cumpla que:

$$r_p > r_{CG} \quad r_d > L - r_{CG}$$

C. RoujinArm

En este anexo se explicará el uso del script de Matlab en el que se definen los parámetros y se crean los modelos de brazo y exobrazo, así como la selección de los motores.

Objeto RoujinArm

La introducción del usuario suele definirse por 4 datos de entrada: Edad, Sexo (“Male” “Female”), altura, peso. También se pueden introducir los 3 primeros y hace una estimación del peso en correlación con la altura. El objeto establece una serie de fórmulas con las tablas explicadas en la sección anterior y devuelve los valores para las longitudes de brazo y antebrazo y sus parámetros físicos asociados. Dentro del objeto se destacan 4 configuraciones creadas de la toolbox de robótica.

- **DHArm** - Configuración básica. Se obtienen los pares que ha de realizar el usuario para mover sus miembros.
- **DHArmR** - Configuración básica con subdivisión del brazo. En esta configuración se aplica el desplazamiento de su centro de gravedad y la subdivisión de masas.
- **ExoArm** - Configuración del exobrazo sin ninguna dinámica añadida.
- **DHRealArm** - Configuración de exobrazo sobre la que se aplican la adición de motores, componentes y aplica el desplazamiento de centros de masas e inercias en sus referencias definidas.

Cada una de estas configuraciones tiene un método propio para la representación de su posición y su movimiento. Los ángulos quedan limitados por los rangos de movimiento definidos y dentro del objeto están guardadas una serie de posiciones para pruebas básicas. Las fricciones se añaden posteriormente. Estos parámetros de fricción han sido proporcionados por otro estudio en el que se han caracterizado este tipo de motores en función de su respuesta. Se han establecido los mismos valores para todos los motores y se ha comprobado el aumento de par debido a fricción.

`obj.addFriction`

Para la obtención de fuerzas y momentos por el método de Newton-Euler ha sido necesaria la modificación de algunos parámetros para establecer su correcta aplicación con esta configuración, ya que no estaba diseñada para ofrecer esa información de forma directa. Cada configuración tiene una función respectiva que calcula las fuerzas y momentos dada una posición o definiendo una trayectoria. En las siguientes funciones se calculan los valores máximos de las fuerzas y momentos de cada caso haciendo un recorrido por las posiciones más solicitadas. Se aplican en los cálculos de esfuerzos sobre las piezas y el cálculo de la guía de rotación.

`obj.maxrne`
`obj.max_load`
`obj.max_inertia`
`obj.max_gravload`

`obj.max_friction`

Una vez que se hallan los pares, se ha creado una hoja excel para recoger información de los motores que se van a utilizar y aplicar sus dinámicas al brazo. Los motores no requieren de un desplazamiento de centros de gravedad, por ello solo requieren la masa y la inercia como parámetros de entrada

`raw=obj.readmotor` Lista de motores en la salida de la función.
`obj.selectMotor` Selecciona un motor en cada articulación en función de su capacidad y su bajo coste
`Obj.addMotor(ref,m,I)` Añade el motor en su ubicación concreta para aplicar el peso y la inercia

Las siguientes funciones son las encargadas de disponer en la simulación los datos dinámicos exportados de SolidWorks. Se encargan de añadir el peso, reubicar el centro de gravedad y añadir las inercias al sistema.

`obj.addForeArm_Piece(m,r,I)`
`obj.addLowerArm_Piece(m,r,I)`
`obj.addUpperArm_Piece(m,r,I)`
`obj.addFlexion_Piece(m,r,I)`

Se ha diseñado una función propia para calcular el factor de carga de la guía circular y buscar así una limitación del tipo de usuario que puede utilizar el exobrazo. `obj.LoadFactor`

Por último se hace una evaluación de costes con la información recogida en todo el proceso. El coste de los motores se obtienen de la base de datos una vez han sido seleccionados. La guia circular supone un coste constante, ya que no se pretende alterar el sistema de rotación y el resto de componentes se calcula como un porcentaje añadido del coste total. `obj.Cost`

D. Factores de diseño

- Cálculo y selección de guía.

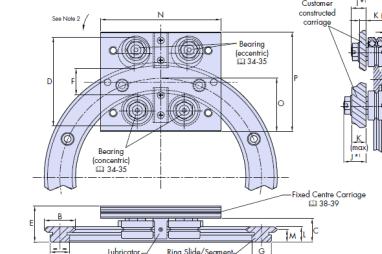
Los sistemas **PRT** (Precision Ring Slide and Track System) son unos sistemas de rotación que abarcan multitud de aplicaciones en la industria. Para este trabajo se ha buscado una solución para obtener un sistema de rotación guiado, externo al brazo. Este dispositivo está formado por un riel circular engranado exteriormente sobre el que se desliza un carro que esta acoplado con el antebrazo y accionado por unos motores dispuestos en su periferia.



Éste es un producto de **HepcoMotion** y los cálculos y referencias se basan en la información facilitada por el suministrador. La capacidad de carga y vida de estos productos está determinada por muchos factores como el tamaño de anillo, el tipo y número de rodamientos, la presencia de lubricante, la magnitud y dirección de las cargas. En este caso de uso existen fuerzas y momentos en todas las direcciones del espacio y se ha de proceder a una estimación de los esfuerzos máximos y una serie de consideraciones iniciales. En primera instancia se limita el diámetro del riel entre los 200 y 400 mm y se escogen rodamientos de doble fila (DR) que permiten soportar cargas tanto axialmente como perpendicularmente.

Assembled Double Edge Ring System

The HippoMotion Double Edge ring system with carriage assembly is used in either complete ring form or with segments. It can also be combined with a fixed centre carriage block as shown below. Rings may also be encircled by bearings either externally and/or internally with either ring or bearings being the moving element (see page opposite). The HippoMotion RT2 eccentric bearings are of double eccentric design with sufficient throw to enable disengagement of the carriage or encircled ring, without further disassembly.



Ring Ref No	A	B	C	D	E	F	G	H	I ¹	J ¹	K
	For use with carriage	Ref No							Max	Min	
R12 92	J13	93	12	11.67	34.7	19.0	0.1	8.6	5.8	9.5	6.7 2.2
R12 127	J13	127	12	11.67	34.7	19.0	0.1	8.6	1.5	5.8	9.5 6.7 2.2
R20 142	J18	143	20	14.75	52.5	24.75	16.3	12.4	2.4	7.4	14 10 2.4
R20 210	J18	210	20	14.75	52.5	24.75	16.3	12.4	2.4	7.4	14 10 2.4
R25 159	J25	159	25	19	71.2	30.5	20.9	15.4	2.4	9.8	19 13 2.2
R25 255	J25	255	25	19	71.2	30.5	20.9	15.4	2.4	9.8	19 13 2.2
R25 351	J25	351	25	19	71.2	30.5	20.9	15.4	2.4	9.8	19 13 2.2
R26 408	J34	408	44	24	100.0	38.5	37.8	26	2.7	13.8	42.0 32.0 2.2
S44 615	J34	615	42	24	100.0	38.5	37.8	26	2.7	13.8	42.0 32.0 2.2
S76 799	J34	799	76	38.5	172.8	58.5	64.4	50.5	3.8	178	30 20 4.5 5.7
S76 1033	J34	1033	76	38.5	172.8	58.5	64.4	50.5	3.8	178	30 20 4.5 5.7
S76 1267	J34	1267	76	38.5	172.8	58.5	64.4	50.5	3.8	178	30 20 4.5 5.7
S76 1501	J34	1501	76	38.5	172.8	58.5	64.4	50.5	3.8	178	30 20 4.5 5.7

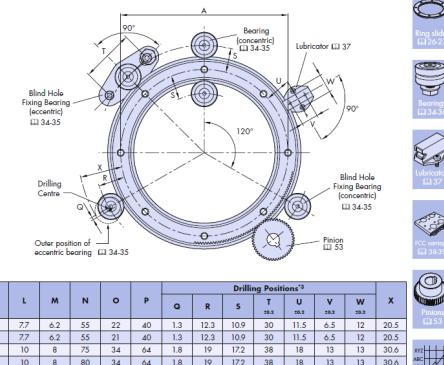
Notes:
1. Two lengths of stud are available for each size of bearing □ 34.35. Choose according to required carriage thickness.
2. Offset holes in carriage for eccentric bearings necessitate adjustment in direction of arrow shown see □ 58
3. Eccentric radii have been given for 'Q', 'R' and 'T'. Positional accuracy of dimension 'S' will determine the axis of the ring.
Positional accuracy for dimensions 'Q' and 'T' are not normally critical. Holes for bearing studs should be reamed to tolerance F6 for a sliding fit.

22

Assembled Double Edge Ring System

When using HippoMotion Double Edge Ring Slides encircled by bearings as shown below it is recommended that two concentric bearings should be placed 120° apart in order to provide a datum reference. The other bearings should be the eccentric type. All eccentricities may be used where positional adjustment of the ring is required.

One or more lubricators may be fitted at convenient positions to take advantage of the increased load/life afforded by lubrication □ 55-57.



L	M	N	O	P	Drilling Positions ²								
					Q	R	S	T	U	V	W	X	
7.7	6.2	55	22	40	1.3	12.3	10.9	30	11.5	6.5	12	20.5	
7.7	6.2	55	21	40	1.3	12.3	10.9	30	11.5	6.5	12	20.5	
10	8	75	34	64	1.8	19	17.2	38	18	13	13	30.6	
10	8	80	34	64	1.8	19	17.2	38	18	13	13	30.6	
12.25	10	95	43	80	1.9	24.9	23.0	50	22.5	16	18	40.2	
12.25	10	105	42	80	1.9	24.9	23.0	50	22.5	16	18	40.2	
12.25	10	105	40	80	1.9	24.9	23.0	50	22.5	16	18	40.2	
15.5	12.5	116	2.5	38.5	3.5	35.9	30	34.5	22	25	59.1		
15.5	12.5	145	61	116	2.5	38.5	3.5	35.9	30	34.5	22	25	59.1
24	19.5	190	96	185	3.9	63.1	59.2	89.5	57	33	38	95.6	
24	19.5	210	96	185	3.9	63.1	59.2	89.5	57	33	38	95.6	
24	19.5	250	97	185	3.9	63.1	59.2	89.5	57	33	38	95.6	
24	19.5	270	97	185	3.9	63.1	59.2	89.5	57	33	38	95.6	

Ordering details: Simply list the components required and if relevant bracket those you wish to be factory assembled.

Example: Assembled { 1 x R25 159 R180 + 1 x FCC 25 159 + 1 x R25 255 R215 P N + Fixed centre carriage □ 38-39

23

Figura 39: Selección de riel de doble rodadura.

De la tabla anterior se escoge un anillo con un espacio de 255[mm] o 351[mm] de diámetro con respecto al brazo. La primera opción estará menos solicitada, pero puede ser incómodo para el usuario pudiendo causar molestias o rozaduras. Se establecerá la primera opción por defecto, pero según la complejidad del usuario podrá aumentarse a la segunda. Se precisara de un actuador externo que produzca el giro, por ello el borde externo deberá engranar con dos piñones que moveran el carro. Hay que prestar atención en que el diámetro determina el ratio de giro y este parámetro es decisivo si se requiere de un control preciso.

Determinamos que el ensamblaje está formado por un riel **R25 255 R215**, un carro **FCC 25 255** y rodamientos **J25**. La denominación oficial de esta guía será : **R25 255 R215 P N**.

Para determinar la capacidad de la guía para soportar los esfuerzos que requiere el exobrazo se realiza una simulación previa de las solicitudes en el peor de los casos. Para ello establecemos un ejemplo de usuario grande y corpulento, y posteriormente se añadirán los pesos adicionales de las piezas del exobrazo que ha de soportar la articulación.

»ExoArm=RoujinArm(45,'Male',190,120)

Age: 45

Sex: 'Male'

Arm_Length: 0.3268

ForeArm_Length: 0.2983

```

m_arm: 3.9000
cog_arm: 0.1425
I_arm: [0.0151 0.0151 0]
m_forearm: 1.55255
cog_forearm: 3.0240
I_forearm: [-0.0106 -0.0106]
»maxtau=ExoArm.maxrne();
maxtau = [22.5603 21.2811 5.5966 5.8191]
»[name,cost,m]=ExoArm.selectMotor(3)
'H54-200-S500-R' 'H54-100-S500-R' 'MX-106T' 'MX-106T' Motores Dynamixel

```

Se necesita como mínimo para las dos últimas articulaciones un par de aproximadamente **6 Nm**. La función que calcula el tipo de motor está diseñada para que proporcione un par adicional para los casos en los que se requiera levantar peso.

Se requieren 2 motores “**H54-100-S500-R**” iguales en la primera y segunda articulación y 2 motores “**MX-106T**” en la tercera y cuarta articulación. Pero aún no se han añadido los pesos efectivos de las piezas de brazo y antebrazo que se añadirán con unos valores estimados y los pesos de los motores con las siguientes funciones. Se calculan de nuevo los pares necesarios en los motores y hallamos las solicitudes máximas en la tercera articulación del brazo.

```

% Se introducen solo los valores de las masas del motor con la siguiente función.
»ExoArm.addMotor(3,m(3))
»ExoArm.addMotor(4,m(4))
»m1=0.8; %[Kg]
»r1=[0.12867 0 0]; %[m]
»ExoArm.addForeArm_Piece(m1,r1) ;
»m2=0.4; %[Kg]
»r2=[0 -0.05 0]; %[m]
»ExoArm.addLowerArm_Piece(m2,r2);
»[maxtau,efforts]=ExoArm.maxrne(3);
maxg = [30.6093 26.7635 8.1032 7.3032]
efforts(:,3)= [ 68.9231 69.1281 92.9557 21.9538 7.2653 13.8230]

```

Con estos resultados se pueden observar las solicitudes máximas , en las que las tres primeras componentes son las fuerzas y los tres últimos los momentos en la referencia sobre la que se dispone la guía. Estas solicitudes han de estar proyectadas de la manera en que definíamos la articulación 5, de tal manera, las fuerzas y momentos son los siguientes:

$$\begin{aligned}
L1 &= 69,1281[N] \\
L2 &= 68,9231[N] \\
M &= 21,9538[Nm] \\
Mv &= 7,2653[Nm]
\end{aligned}$$

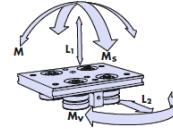
$$Ms = 13,823[Nm]$$

Full Size Illustrations For Initial Selection										
Bearing	Load	Speed	Smoothness	Tolerance of Misalignment	Ridgity	Tolerance of Debris	Price	L1(max)	L2(max)	M(max)
Twin Bearing										
Double Row Bearing										
Floating Bearing										
Lubrication Method	Load	Lubrication interval	Friction	Life	Price					
None										
Hogie Lubricator										
Hogon Blend Lubricator	Automatic lube frequency possible									

(a) Hoja informativa de condiciones iniciales.

Systems with carriages

When calculating the life, first the load on each carriage should be resolved into the direct load components L_1 and L_2 and moment load components M_v , M_v and M_s .



Carriage Load Capacities

Capacities are shown for both 'dry' and 'lubricated' conditions - this refers to the bearing and slide 'V' contact, since all bearings are lubricated internally for life. Values are based on shock-free duty.

Carriage Part Number	Dry System (Twin or DR Type Bearings)						Lubricated System (Twin Type Bearings)						Lubricated System (DR Type Bearings)					
	L _{1(max)}	L _{2(max)}	M _{v(max)}	M _{s(max)}	M _(max)	L _{1(max)}	L _{2(max)}	M _{v(max)}	M _{s(max)}	M _(max)	L _{1(max)}	L _{2(max)}	M _{v(max)}	M _{s(max)}	M _(max)			
FCC 12 93	90	90	0.5	1	1	240	240	1.3	2.7	2.7	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
FCC 12 127	90	90	0.5	1	1	240	240	1.3	2.6	2.6	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
FCC 20 143	180	180	1.6	2.5	2.5	500	490	4.5	5.5	7	740	1200	7	16	10	10	10	
FCC 20 210	180	180	1.6	2.7	2.7	500	490	4.5	6	7.5	740	1200	7	18	11	11	11	
FCC 25 159	400	400	4.5	8.5	8.5	1280	1200	14	25	27	1600	3000	18	64	33	33	33	
FCC 25 255	400	400	4.5	8	8	1280	1200	14	23	25	1600	3000	18	60	31	31	31	
FCC 25 351	400	400	4.5	8.5	8.5	1280	1200	14	24	27	1600	3000	18	63	33	33	33	
BCP 25	400	400	4.5	15	15	1280 ^a	1200 ^a	14 ^a	45 ^a	48 ^a	1600 ^a	3000 ^a	18 ^a	110 ^a	60 ^a	60 ^a	60 ^a	
FCC 44 468	800	800	16	28	28	3200	2800	64	95	110	3600	6000	73	210	120	120	120	
FCC 44 612	800	800	16	29	29	3200	2800	64	106	115	3600	6000	73	220	130	130	130	
BCP 44	800	800	16	40	40	3200 ^a	2800 ^a	64 ^a	140 ^a	160 ^a	3600 ^a	6000 ^a	73 ^a	300 ^a	180 ^a	180 ^a	180 ^a	
FCC 76 799	1800	1800	64	85	85	7200	6400	250	300	340	10000	10000	360	470	470	470	470	
FCC 76 1033	1800	1800	64	105	105	7200	6400	250	360	410	10000	10000	360	570	570	570	570	
FCC 76 1267	1800	1800	64	120	120	7200	6400	250	420	480	10000	10000	360	670	670	670	670	
FCC 76 1501	1800	1800	64	140	140	7200	6400	250	480	550	10000	10000	360	770	770	770	770	
BCP 76	1800	1800	64	115	115	7200 ^a	6400 ^a	250 ^a	415 ^a	460 ^a	10000 ^a	10000 ^a	360 ^a	650 ^a	650 ^a	650 ^a	650 ^a	

The L_1 & M_v load capacities for carriages using floating bearings (§ 36 are the same as is shown above for DR bearings. The L_1 & M_s load capacities for carriages using floating bearings are zero (they are free to float in these directions). Please note that bogie carriages (BCP) are not available with floating bearings.

(b) Tabla de capacidad de carga sobre el carro.

Los factores determinantes para la elección del carro son los momentos aplicados en la articulación. Consideramos el uso de rodamientos **DR (Double Row Bearings)** y lubricación para disminuir las cargas sobre el sistema de rotación.

El factor de carga del sistema se establece con la siguiente ecuación

$$L_f = \frac{L_1}{L_{1(max)}} + \frac{L_2}{L_{2(max)}} + \frac{M_s}{M_{s(max)}} + \frac{M_v}{M_{v(max)}} + \frac{M}{M_{(max)}} < 1 \text{ or } 0.8 \text{ for stainless steel}$$

Para el carro seleccionado anteriormente FCC (Fixed Centre Carriage) se obtiene un valor que supera la unidad, por ello se utilizará un carro **BCP25 (Boagie Carriage)** y se ha creado una función que calcula este factor de carga para este carro concreto.

```
>ExoArm.LoadFactor()
LoadFactor = 1.21
```

Al ser este valor mayor de 1 para los componentes seleccionados de acero, establecemos un límite de uso para el que se garantiza el buen funcionamiento de esta articulación. Se ha de recordar que los cálculos se han hecho con un aumento de par de 3Nm por si se requieren ejercicios que exijan levantamiento de peso, por lo que el sistema puede funcionar en vacío con usuarios de mayor peso.

Para cumplir con los requisitos de este factor de carga y cumplir con el correcto funcionamiento del carro sobre la guía, se establece el límite con guías de acero para personas de 1,75 m de altura y 110 kilos de peso.

```
>ExoArm=RoujinArm(45,'Male',175,100);
```

»ExoArm.LoadFactor()

LoadFactor = 0.9495

Technical

Calculating System Life

With L_F determined for either a 4 bearing carriage 54 or for a ring system 55, the life in km can be calculated using one of the two equations below. In these equations, the Basic Life is taken from the table on the right in respect of the bearings and the lubrication condition applicable.

For dry systems use equation [3]:

$$[3] \quad \text{System life (km)} = \frac{B_L}{(0.03 + 0.97L_F)^2}$$

For lubricated systems use equation [4]:

$$[4] \quad \text{System life (km)} = \frac{B_L}{(0.03 + 0.97L_F)^3}$$

Example load-life calculations for PRT2 systems are available online. Please visit www.HepcoMotion.com/PRT2datauk and select datasheet No. 3 Load Life Calculations.

Bearings	Basic Life Dry	Basic Life Lubricated
...J13...	40	40
SS...J13...	30	30
...J18...	50	60
SS...J18...	35	45
...J18DR...	50	60
SS...J18DR...	35	45
...J25...	70	40
SS...J25...	40	25
...J25DR...	70	45
SS...J25DR...	40	35
...J34...	100	70
SS...J34...	60	50
...J34DR...	100	160
SS...J34DR...	60	120
...J54...	150	150
SS...J54...	100	110
...J54DR...	150	280
SS...J54DR...	100	220

The above data assumes that steel bearings run on steel rings, and that stainless steel bearings run on stainless steel rings.

Figura 41: Vida útil del sistema.

Con este tipo de guía se escogen rodamientos **J25DR**, con el que se obtiene el parámetro **B_L=35** para rodadura con lubricación . Aplicando la siguiente fórmula se halla la vida útil del sistema que nos proporciona un desplazamiento máximo para factores de carga unidad de **33 [Km]** en el sistema de rodadura.

$$\text{System life(km)} = B_L / (0,03 + 0,97L_F)^2$$

Por último se han de escoger los piñones a los que irán anclados los actuadores y proporcionarán el movimiento efectivo de rotación. Por disponer de una guía se escogen unos piñones **SS P08 W6 T48 BK**. Estos piñones tienen un módulo de 0.8 y 48 dientes.

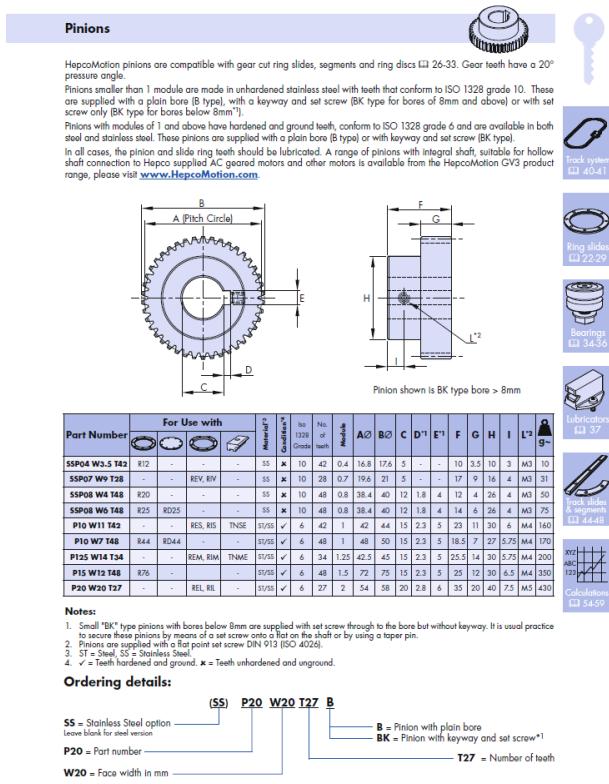


Figura 42: Tabla de piñones de transmisión.

■ Sistema de transmisión de rotación del exobrazo.

El sistema de rotación del brazo se dispone en el radio exterior de la guía circular. Los motores alojados aquí no proporcionan el par necesario para la rotación del brazo, sino que se produce una reducción por el sistema de engranajes diseñado para tal fin. En este caso se requiere un motor con mayor velocidad y menos par. Si se consulta la tabla de motores de la sección I, se observa que los motores que necesitamos pueden ser el AX-12W, RX-24F o incluso el AX-18F que ofrecen una velocidad de 470, 126 y 97 rpm y un par de 0.5, 2.6 y 1.8 Nm respectivamente.

Tanto los pares como la velocidad de un sistema de engranajes se pueden calcular por su relación de transmisión que es el cociente entre sus radios o número de dientes. Se sabe que todos los engranajes utilizados tienen un módulo de 0.8.

$$\frac{w_s}{w_e} = \frac{\tau_e}{\tau_s} = \frac{r_e}{r_s} = \frac{Z_e}{Z_s}$$

El radio de entrada será el que proporciona la guía, que para el modelo se ha elegido un diámetro de 255 [mm]. Esta guía engrana con un piñón de 48 dientes, con un diámetro de 38,4 mm y este a su vez es accionado por el engranaje del motor que podemos elegir

con relativa libertad. Para no disponer tan lejos los motores se ha elegido un piñón de 65 dientes.

De esta manera obtendremos una relación de transmisión total formada por ruedas conducidas y ruedas conductoras. En este caso la rueda conductora será la del motor, y las otras dos serán conducidas.

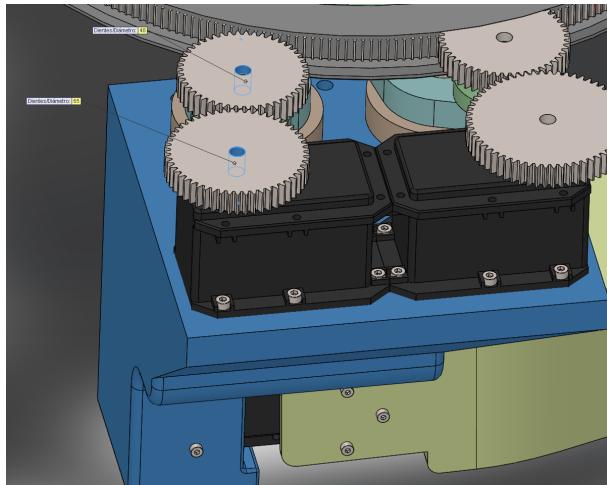


Figura 43: Relación de transmisión.

$$\frac{n_{engranaje}}{n_{motor}} = \frac{65}{48} = 1,3541$$

$$\frac{n_{rail}}{n_{engranaje}} = \frac{38.4}{255} = 0,1505$$

$$\frac{n_{rail}}{n_{motor}} = \frac{n_{rail}}{n_{engranaje}} * \frac{n_{engranaje}}{n_{motor}} = 0,204$$

Con este parámetro podemos determinar el par máximo que requeriremos del motor que estimando un valor de 8 Nm como par máximo en la articulación de rotación podemos determinar :

$$\tau_{motor} = 0,204 * \tau_{rotacion} = 1,632[Nm]$$

Para la tercera articulación se disponen dos tipos de motor, el **AX-18F** o el **RX-24F**, que se caracterizan por su bajo par y alta velocidad angular. El motor AX-18F se usará para usuarios jóvenes o de complexión delgada, mientras que los motores RX-24F se implementarán para personas adultas. Estos motores se pueden disponer más lejos si conviene, pero este diseño no permite un número menor de transmisión. hay que prestar especial atención en programar convenientemente el motor con la relación de transmisión exacta para no producir errores de posición.

E. Distribución de masas e inercias compuestas

La distribución de masas e inercias en este trabajo se lleva a cabo con el fin de crear un modelo lo más fiel posible al sistema real. Con ello se busca definir en la medida de lo posible una estimación de parámetros que pueden ser de utilidad en la configuración de posteriores sistemas de control.

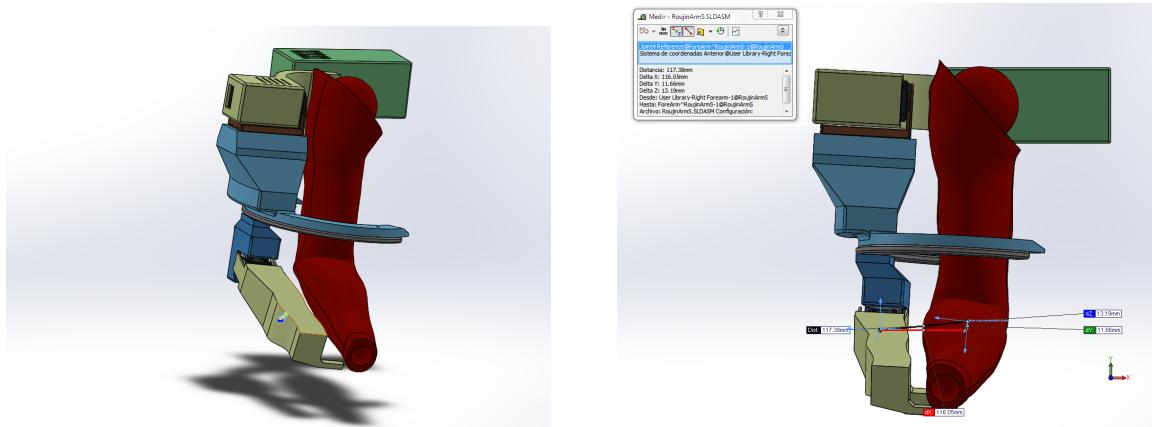
La dificultad de este trabajo reside en la composición de sólidos del sistema formado por un conjunto de piezas externas que se consideran conductoras de un componente que ya hemos definido anteriormente; que es nuestro brazo. Ésta es una de las grandes diferencias entre una prótesis o brazo robótico con la creación de un exobrazo.

De forma añadida, el diseño paramétrico adoptado en el desarrollo de estos modelos no permite establecer unos valores fijos en la especificación de masas, centros de gravedad e inercias. Por ello, es necesario adoptar una metodología que nos permita establecer estos valores dependientes del usuario final.

Al incorporar los datos de las longitudes cada uno de los miembros del brazo mediante la herramienta SolidWorks DriveWorkXpress se crean nuevas piezas concorde a las longitudes definidas. Estas piezas están definidas con un material, en este caso se ha escogido plástico ABS y sus características físicas están definidas en la siguiente figura.

La creación de una nueva pieza parametrizada tiene un peso, una distribución de masas y una inercia dependiente del diseño que a priori es desconocida. Una vez creadas mediante la herramienta anteriormente comentada, Solidworks nos permite calcular estos valores respecto de un sistema de coordenadas que podemos definir libremente.

Con esta información se aplica la distribución de masas e inercias entre estos sistemas referenciados y para facilitar esta tarea se ha creado un método dentro de nuestro script de Matlab que actualiza los valores dinámicos de nuestro brazo considerándolo como un solo componente.



(a) Centro de gravedad de el antebrazo del exobrazo (b) Distancias relativas entre sistemas de referencia.

Con esta información se introducen los datos en nuestro modelo simplemente añadiendo el peso de la masa correspondiente al elemento del exobrazo. Se distribuyen los centros de masa en cada eje. Este factor varía en la dirección longitudinal de sus miembros en mayor

medida que las otras dos. Finalmente las inercias se pueden distribuir fácilmente mediante el teorema de Steiner. Esta es la razón por la que medimos las inercias con respecto a un sistema de referencia paralelo al centro de gravedad. Como se puede ver en la figura, las inercias se miden en [$gr * mm^2$], y se introducen en nuestro sistema en [$Kg * m^2$], realmente las inercias toman valores pequeños que no afectan demasiado en los cálculos finales.

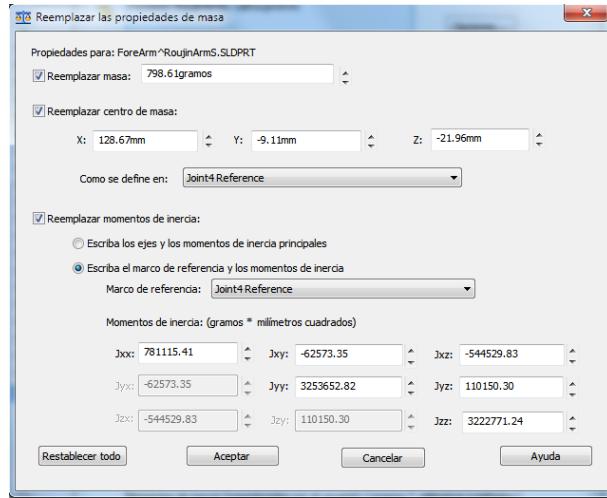


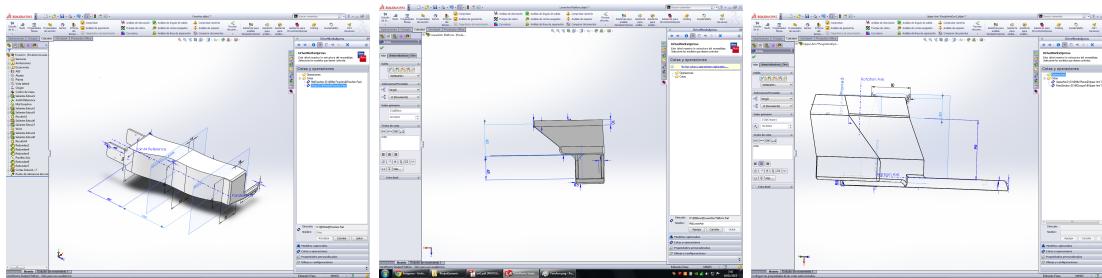
Figura 45: Parámetros dinámicos de la pieza del antebrazo respecto al sistema de coordenadas definido

F. Desarrollo DriveWorkXpress

Como ya se ha dicho, la implementación de este módulo permite modificar las piezas estableciendo una serie de reglas. Solidworks permite introducir ecuaciones para las cotas y operaciones. También permite crear configuraciones distintas cuando los modelos son totalmente distintos y no comparten parte de la definición del sistema.

Utilizar DriveWorkXpress se ajusta más al uso de ecuaciones, pero con la única ventaja de presentar un formulario en el que el usuario solo tiene que introducir los parámetros despreocupándose de cómo se ha llevado a cabo.

En las siguientes imágenes se observan las cotas elegidas para aplicar los cambios en función de los parámetros de entrada que serán la longitud de los miembros del brazo y del antebrazo.



(a) Antebrazo.

(b) Parte baja del brazo.

(c) Parte alta del brazo.

En las siguientes figuras se ofrecen dos modelos distintos por este método en el que se configura el exobrazo. El primero corresponde con las medidas de una persona adulta, mientras que el segundo es el de una persona joven. El modelo humano es el mismo en los dos para apreciar las diferencias.

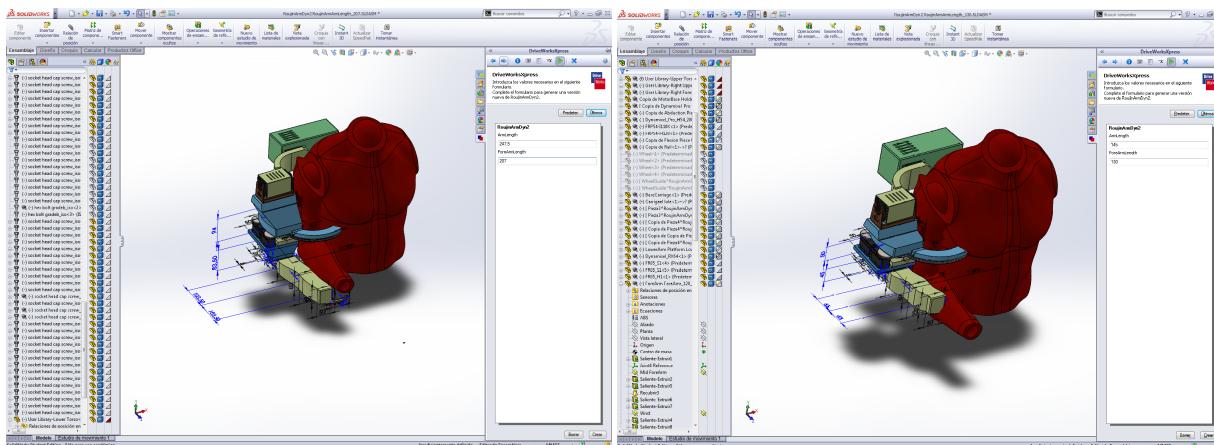


Figura 47: Modelo en SolidWorks.

El mayor problema de este complemento es la dificultad para crear un sistema robusto que no derive en un fallo. Existen muchos errores de creación de sólidos, contornos abiertos,

restricciones, etc... que impiden la correcta aplicación de este método. Con práctica, la mejor manera de llevar a cabo esta solución ha sido la de crear geometrías de referencia como planos, ejes o sistemas de coordenadas que no impliquen una cota integrada en un croquis. Otro tipo de operaciones pueden ser llevadas a cabo con este sistema como es la selección de motores, modificación del tipo de engranajes, o el ensanchamiento de algunos sólidos para favorecer su robustez ante tensiones muy grandes.

G. Actuadores Dynamixel

Los actuadores Dynamixel son una familia de servomotores de gama alta que ofrecen muchas ventajas frente a otro tipo de motores existentes en el mercado. Una de las grandes ventajas que caracterizan este tipo de motores es su alto par sin necesidad de añadir reductores que aumenten la fricción, pudiendo llegar a ofrecer hasta **44[Nm]**.

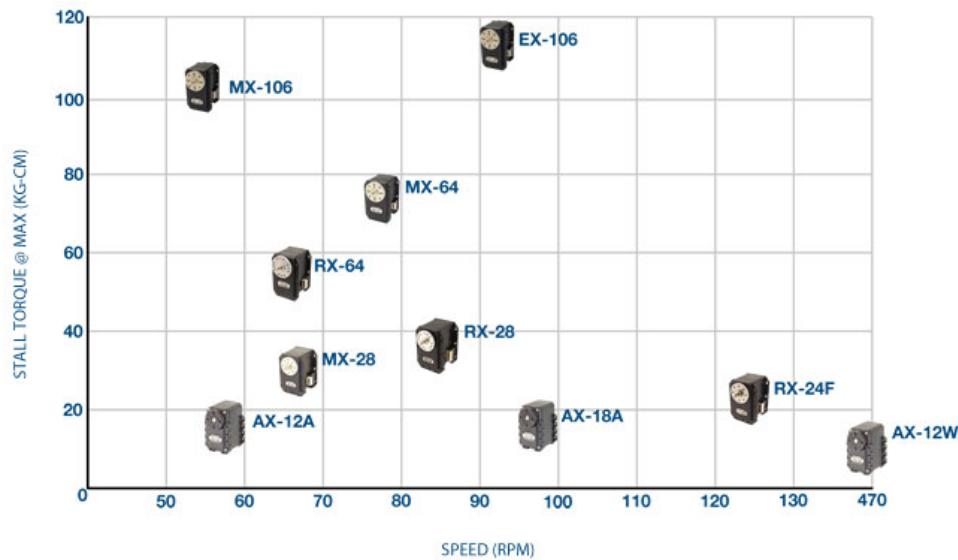


Figura 48: Relación de par y velocidad de motores Dynamixel.

En comparación con otro tipo de motores su bajo peso permite reducir las fuerzas por gravedad adicionales y sus dimensiones permiten introducirlos en el diseño.

Con la documentación que se dispone de estos motores se ha creado una hoja Excel (“DynamixelMotors.xlsx”) con toda la información necesaria acerca de estos motores a la que se accede a través de una de las funciones del objeto “RoujinArm” en Matlab y que automatiza la selección de estos motores según nuestras necesidades.

Existen 2 categorías diferenciadas que son las series de bajo par (AX,RX,EX,MX). Estos motores se utilizarán en la tercera y cuarta articulación, puesto que no superarán los 10[Nm]. La segunda categoría son los motores **Dynamixel Pro** que proporcionan un par mayor y que según el caso utilizaríamos en la primera y segunda articulación.



Figura 49: Motores Dynamixel.

Algo que tienen en común todos estos motores es que poseen un microcontrolador que proporciona la información necesaria para su control sin necesidad de depender de dispositivos externos. Además se pueden configuración para limitar el rango de movimiento, el par y la corriente. La diferencia es que las series más baratas como la AX, RX y EX no poseen algunas funciones que el resto sí tienen, como es un controlador PID integrado cuyos valores se pueden especificar según nuestras necesidades.

Referencias

- [1] M. Rahman, M. Saad, J. Kenne, and P. Archambault, “Modeling and control of a 7dof exoskeleton robot for arm movements,” in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 245–250, Dec. 2009.
- [2] S. Plagenhoef, F. G. Evans, and T. Abdelnour, “Anatomical data for analyzing human motion,” *Research Quarterly for Exercise and Sport*, vol. 54, pp. 169–178, June 1983.
- [3] O. Khatib, E. Demircan, V. De Sario, L. Sentis, T. Besier, and S. Delp, “Robotics-based synthesis of human motion,” *Journal of Physiology, Paris*, vol. 103, pp. 211–219, Dec. 2009.