



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Desarrollo del diseño mecánico de  
un prototipo de un robot para  
rehabilitación de extremidades  
superiores**

**TESINA**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

René Ortega Moreno

**DIRECTOR DE TESINA**

Dr. Miguel Ángel Padilla Castañeda



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025**

## Agradecimientos

A mi hermano y mis dos padres, por ser el principal pilar en mi vida.

A mi familia, por ser también valioso soporte.

A mi tutor por la confianza para realizar este trabajo; a los colegas del Laboratorio de Bioinstrumentación por el apoyo continuo.

Agradecimientos a los proyectos SECTEI 087/2023 y DGAPA-PAPIIT IN117425 por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

# Índice

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                                               | 4  |
| Trastornos motrices y neuroplasticidad.....                                                      | 4  |
| Necesidad de dispositivos robóticos de apoyo en la labor de rehabilitación .....                 | 4  |
| Estado del arte de los dispositivos robóticos de rehabilitación de extremidades superiores ..... | 5  |
| Avances previos en el desarrollo del dispositivo.....                                            | 7  |
| Objetivo del trabajo.....                                                                        | 9  |
| Metodología de diseño .....                                                                      | 11 |
| Aspectos relevantes de diseño para el dispositivo.....                                           | 13 |
| Estándares internacionales empleados.....                                                        | 16 |
| Ejemplo del proceso de diseño aplicado a una pieza .....                                         | 16 |
| Diseño del espacio de trabajo .....                                                              | 20 |
| Configuración del mecanismo .....                                                                | 20 |
| Espacio de trabajo .....                                                                         | 22 |
| Elección de materiales .....                                                                     | 23 |
| Requerimientos de diseño.....                                                                    | 23 |
| Propiedades físicas y mecánicas .....                                                            | 24 |
| Costos .....                                                                                     | 27 |
| Diseño y configuración de los eslabones .....                                                    | 28 |
| Mecánica de los eslabones .....                                                                  | 28 |
| Mecánica de las juntas.....                                                                      | 32 |
| Elementos de rodamiento .....                                                                    | 32 |
| Dimensiones de diseño .....                                                                      | 34 |
| Tolerancias de diseño .....                                                                      | 36 |
| Diseño y configuración del sistema de transmisión de potencia .....                              | 39 |
| Mecánica de los elementos .....                                                                  | 40 |
| Elementos de transmisión .....                                                                   | 43 |

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| Tolerancias de diseño .....              | 44 |
| Ejemplos de cálculo de tolerancias ..... | 45 |
| Tolerancias generales .....              | 45 |
| Tolerancias particulares .....           | 45 |
| Conclusiones.....                        | 51 |
| Proyección a futuro .....                | 53 |
| Referencias .....                        | 56 |

# Introducción

## Trastornos motrices y neuroplasticidad

Existen condiciones de salud y eventos que pueden reducir la movilidad del cuerpo de las personas, como los derrames cerebrales, la hemiplejia, la esclerosis múltiple, entre otros. Cuando el sistema neurológico de una persona se degenera o pierde capacidades, el mismo tiene la habilidad de recuperarse por medio de ejercicios repetitivos. La repetición de los movimientos estimula la transferencia de las funciones cognitivas y motrices de la parte dañada del cerebro a una región sana; esto es la neuroplasticidad, la cual puede ayudar a que un paciente que sufre de trastornos motrices pueda recuperar parcial o totalmente la movilidad de su cuerpo. [1], [2]

## Necesidad de dispositivos robóticos de apoyo en la labor de rehabilitación

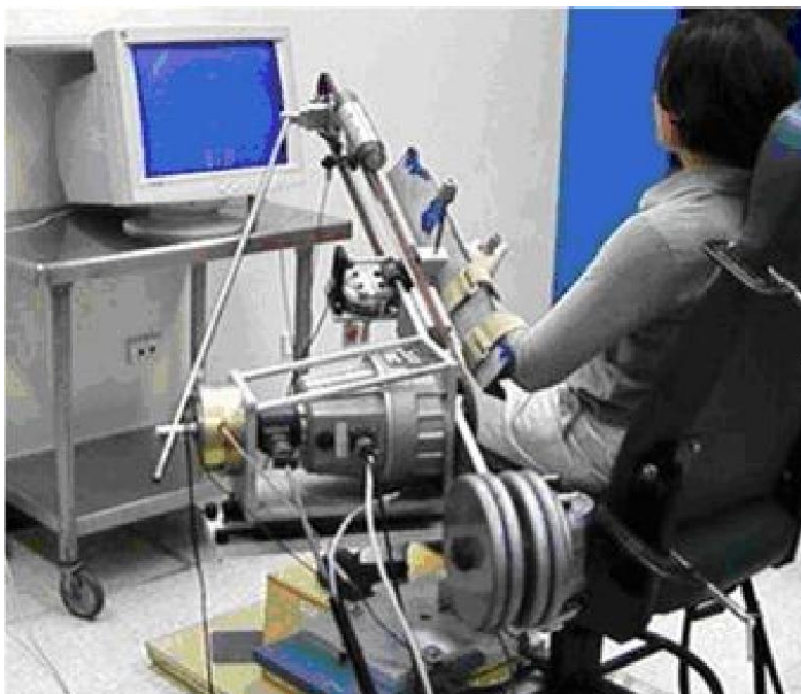
Cada día crece la demanda de programas de rehabilitación por parte de pacientes que sufren de algún trastorno motriz. Las causas de un trastorno motriz son diversas y los padecimientos y síntomas tienen distintas características. En cualquier caso, se requiere de terapeutas que lleven a cabo actividades de rehabilitación con los pacientes, ayudándoles a realizar ejercicios. La creciente demanda de terapias de rehabilitación contrasta con la cantidad de terapeutas calificados para atender a las personas en rutinas físicas que pueden ser largas y desgastantes. [1] Esta brecha en la oferta y la demanda es un factor por el cual se necesitan dispositivos de asistencia. Otra razón de similar relevancia es el costo de los programas de rehabilitación; debido a que se requiere personal capacitado y el espacio y duración en tiempo de las sesiones de terapia, el costo económico resulta elevado para quienes requieren de terapia. Más aún, se espera que crezca la demanda de dispositivos portables para realizar la terapia en el hogar. [3] Por ello, es imperativo buscar la reducción del costo de la rehabilitación para hacer más accesible la salud para las personas. Es entonces que se presenta la idea de emplear dispositivos robóticos que automaticen las labores físicas de los terapeutas y que sean económicamente accesibles y atractivos para los centros de salud y para los pacientes. El presente trabajo se enfoca en un dispositivo robótico que brinde asistencia para la rehabilitación de extremidades superiores, sin tener aún definido el padecimiento específico que se va a tratar; es decir, un robot de mesa para rehabilitación de brazos con potencial aplicación a diferentes condiciones. Sin embargo, debido a que el dispositivo no consiste en un exoesqueleto, se puede considerar que el dispositivo asista en labor de rehabilitación activa, no pasiva, y que estimule el movimiento en hombro, brazo y antebrazo.

## Estado del arte de los dispositivos robóticos de rehabilitación de extremidades superiores

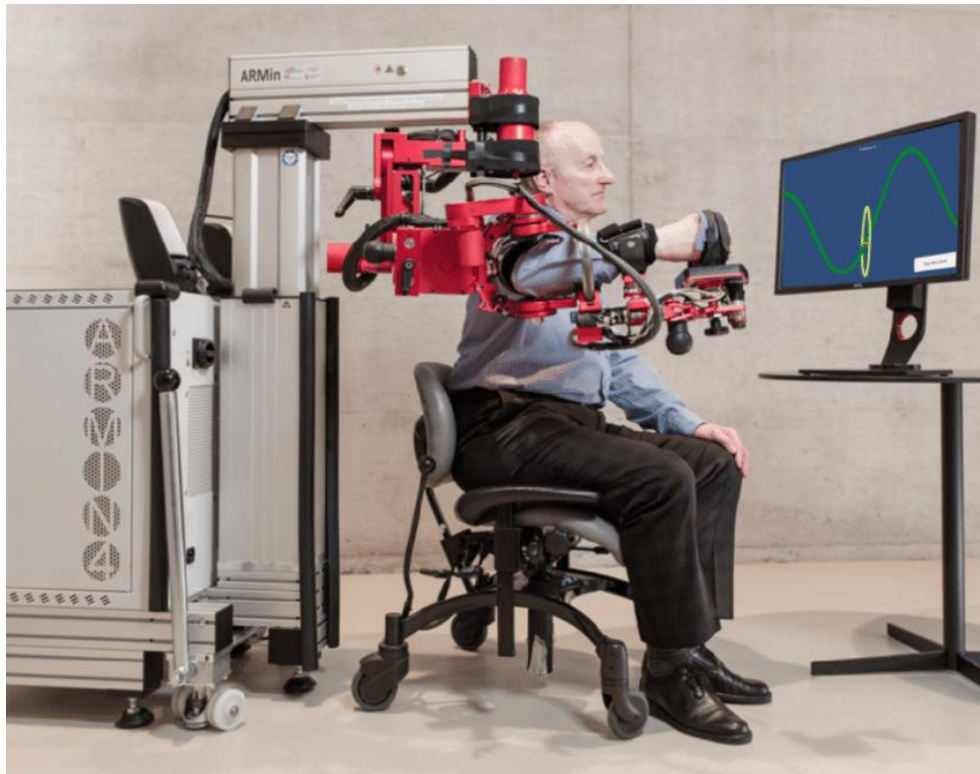
Hoy en día se han llevado a cabo esfuerzos para desarrollar herramientas de asistencia robóticas dirigidas a la rehabilitación física. Existe una variedad de dispositivos como MIT-MANUS, MIME, Assisted Rehabilitation and Measurement (ARM) Guide, ARMin, entre otros. [1] Se ha encontrado que los dispositivos deben, preferentemente, cumplir con las características de ser económicos, portátiles, cómodos, seguros, sencillos de operar. [3]



*Ilustración 1. MIT-MANUS, dispositivo de efector final. Fuente: [https://www.researchgate.net/figure/MIT-MANUS-Interactive-Motion-Technologies-Cambridge-MA\\_fig3\\_235108506](https://www.researchgate.net/figure/MIT-MANUS-Interactive-Motion-Technologies-Cambridge-MA_fig3_235108506)*



*Ilustración 2. Assisted Rehabilitation and Measurement Guide (ARM Guide). Fuente: [https://www.researchgate.net/figure/Assisted-Rehabilitation-and-Measurement-Guide-ARM-Guide\\_fig2\\_224705333](https://www.researchgate.net/figure/Assisted-Rehabilitation-and-Measurement-Guide-ARM-Guide_fig2_224705333)*

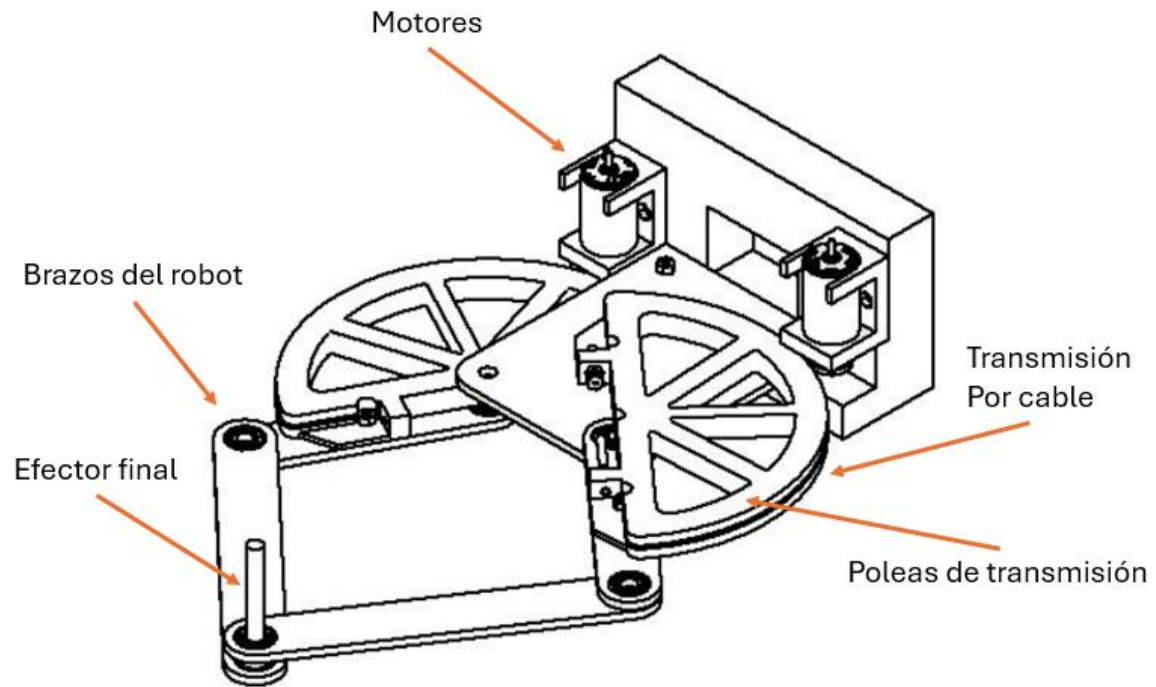


*Ilustración 3. Dispositivo tipo exoesqueleto, ARMin IV. Fuente:*

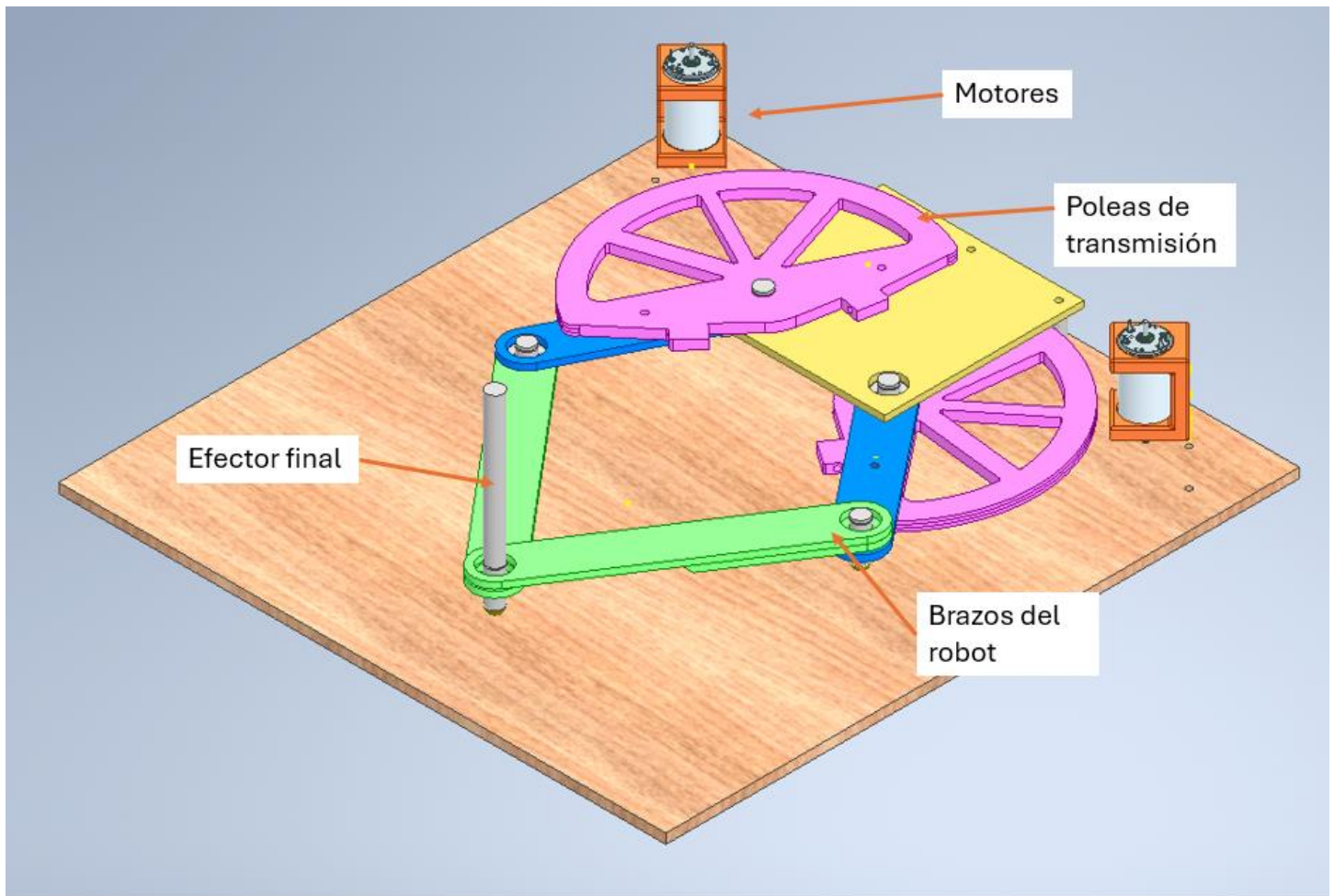
*[https://www.researchgate.net/figure/ARMin-IV-is-a-7-DoF-robotic-device-designed-for-upper-limb-rehabilitation-Nef-et-al\\_fig1\\_320227548](https://www.researchgate.net/figure/ARMin-IV-is-a-7-DoF-robotic-device-designed-for-upper-limb-rehabilitation-Nef-et-al_fig1_320227548)*

### Avances previos en el desarrollo del dispositivo

En el Laboratorio de Bioinstrumentación del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, ICAT, se cuenta con avances en el desarrollo de un dispositivo robótico para aplicación en rehabilitación para extremidades superiores. En el desarrollo se ha definido la naturaleza cinemática de un dispositivo, así como la optimización de las dimensiones del mecanismo; se ha propuesto asimismo su material estructural. [4], [5]



*Ilustración 4. Concepto original de diseño del mecanismo del robot. Tomada y modificada de Morales (2021). Figura 6-23. [5]*



*Ilustración 5. Modelo 3D conceptual original del mecanismo del robot.*

### Objetivo del trabajo

Elaborar un diseño de los elementos mecánicos de un prototipo de un robot planar de efector final para rehabilitación activa de extremidades superiores, enfocado a la rehabilitación de la región del hombro, brazo y antebrazo, que sea compacto y otorgue la movilidad para un dispositivo clínico y háptico de precisión de movimiento, de acuerdo con el diseño fundamental propuesto.

Los objetivos particulares son:

1. Diseñar las piezas del robot que cumplan con su función de ser compacto y de restringir el movimiento de los eslabones en planos horizontales paralelos, y que las piezas sean sencillas de maquinar.
2. Inspeccionar la seguridad estructural del ensamble.
3. Establecer un método para seleccionar los elementos mecánicos involucrados (rodamientos, afianzadores, seguros, etc.).

4. Elaborar los planos de fabricación de las piezas del mecanismo del robot.
5. Elaborar los planos de ensamble de las piezas del mecanismo del robot.

## Metodología de diseño

En el desarrollo de un proyecto de diseño mecánico existen factores que son fundamentales, ya que hay una necesidad que se busca satisfacer. Esa necesidad es, en este caso, la de elaborar los planos para la fabricación y ensamble del mecanismo de un robot que pueda asistir en la labor de rehabilitación de pacientes con trastornos motrices en extremidades superiores. Los factores que deben considerarse en el diseño mecánico son:

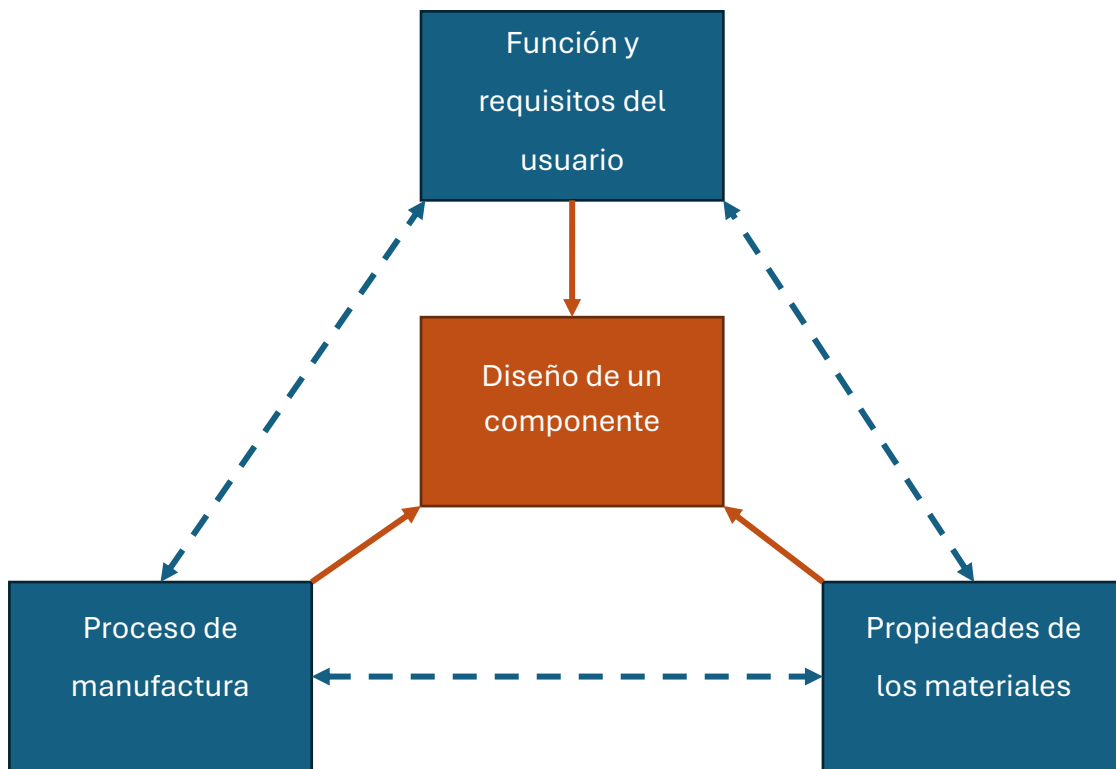


Figura 1. Factores a considerar en el diseño de componentes. Modificado de figura 1 del capítulo “Introduction and Overview of Design Considerations and Materials Selection” de Blau (1998). [6]

- Función y requisitos del usuario:
  - Capacidad
  - Tamaño
  - Peso
  - Seguridad
  - Normas de diseño
  - Vida útil

- Mantenimiento
- Facilidad de operación
- Costo inicial
- Costo de operación
- Estilización
- Factores humanos
- Ambiente de operación
- Propiedades de los materiales:
  - Resistencia
  - Ductilidad
  - Tenacidad
  - Elasticidad
  - Dureza
  - Densidad
  - Resistencia a la corrosión
  - Resistencia al desgaste
  - Coeficiente de fricción
  - Punto de fusión
  - Conductividades eléctrica y térmica
  - Reciclado
  - Procesamiento
  - Costo
  - Disponibilidad en el mercado
  - Plazo de entrega
- Proceso de manufactura:
  - Procesos disponibles
  - Precisión
  - Acabado superficial
  - Forma
  - Tamaño
  - Cantidad
  - Plazo de entrega

- Control de calidad [6]

### Aspectos relevantes de diseño para el dispositivo

El dispositivo se diseña de acuerdo con un conjunto de requisitos encontrados en la literatura. En la tabla 1 se enlistan los requisitos pertinentes en esta etapa del desarrollo del robot. Algunos de ellos fueron alcanzados en el desarrollo previo (tamaño y peso); otros se alcanzan con la conclusión del presente trabajo.

Sobre la función y requisitos del usuario, son importantes la capacidad en cuanto a potencia mecánica requerida en los actuadores para la correcta ejecución de los movimientos del robot; el tamaño o espacio del dispositivo para que sea compacto y que sea lo más ligero posible; la seguridad del aparato en el sentido de que no represente riesgos e incomodidades para el usuario; que el proceso de mantenimiento sea factible; la facilidad de ensamble para completar su manufactura y facilitar el mantenimiento; la facilidad de operación, de manera que un terapeuta y un paciente puedan aprender a usarlo sin complicaciones; el costo; la ergonomía de la interfaz de interacción con el paciente, pues se busca la comodidad y que el dispositivo sea apropiado para la tarea de rehabilitación.

De las propiedades de los materiales, interesa el esfuerzo de cedencia con vista a conocer un factor de seguridad de operación; además, la elasticidad, y la dureza para fines de manufactura; la densidad para reducir el peso; la resistencia a la corrosión que aumente la vida útil; la capacidad de procesamiento, el costo, la disponibilidad en el mercado, aspectos que influyen en la manufactura y el costo de fabricación; la conductividad térmica, dada la necesidad de disipar calor de los actuadores por medio de la carcasa. La posibilidad de ser reciclado es un beneficio más a la sociedad en cuestiones ambiental y energética.

Del proceso de manufactura, se requiere que el material sea versátil en cuanto a materia prima y procesos de manufactura a los cuales pueda someterse; que los procesos de manufactura ofrezcan precisión y buen acabado superficial; se requiere que el diseño también sea compatible con la capacidad de las máquinas y procesos de la manufactura de tamaño, peso y control de calidad. Estos requisitos cumplen e incluyen más de los que indica Maciejasz (2014).

A continuación, se presenta la tabla 1, en la cual se enlista a manera de resumen las características importantes en el proceso de diseño del dispositivo.

*Tabla 1. Requisitos del dispositivo.*

| Requisito                                             |   |
|-------------------------------------------------------|---|
| <b>Primer punto: función y requisitos del usuario</b> |   |
| Potencia de los actuadores                            |   |
| Tamaño                                                | ✓ |
| Peso                                                  | ✓ |
| Seguridad                                             |   |
| Mantenimiento                                         |   |
| Ensamble                                              |   |
| Operación                                             |   |
| Ergonomía                                             |   |
| Costo                                                 |   |
| <b>Segundo punto: propiedades de los materiales</b>   |   |
| Esfuerzo de cedencia                                  |   |
| Elasticidad                                           |   |
| Dureza                                                |   |
| Densidad                                              |   |
| Resistencia a corrosión                               |   |
| Capacidad de procesamiento                            |   |
| Disponibilidad en el mercado                          |   |
| Costo                                                 |   |
| <b>Tercer punto: proceso de manufactura</b>           |   |
| Versatilidad                                          |   |
| Compatibilidad                                        |   |
| Acabado superficial                                   |   |
| Precisión                                             |   |
| Costo                                                 |   |

Además, la metodología de diseño se basó en el análisis de diseño para manufactura y ensamble (*Design for manufacture and assembly, DFMA*), el cual sigue la siguiente ruta:

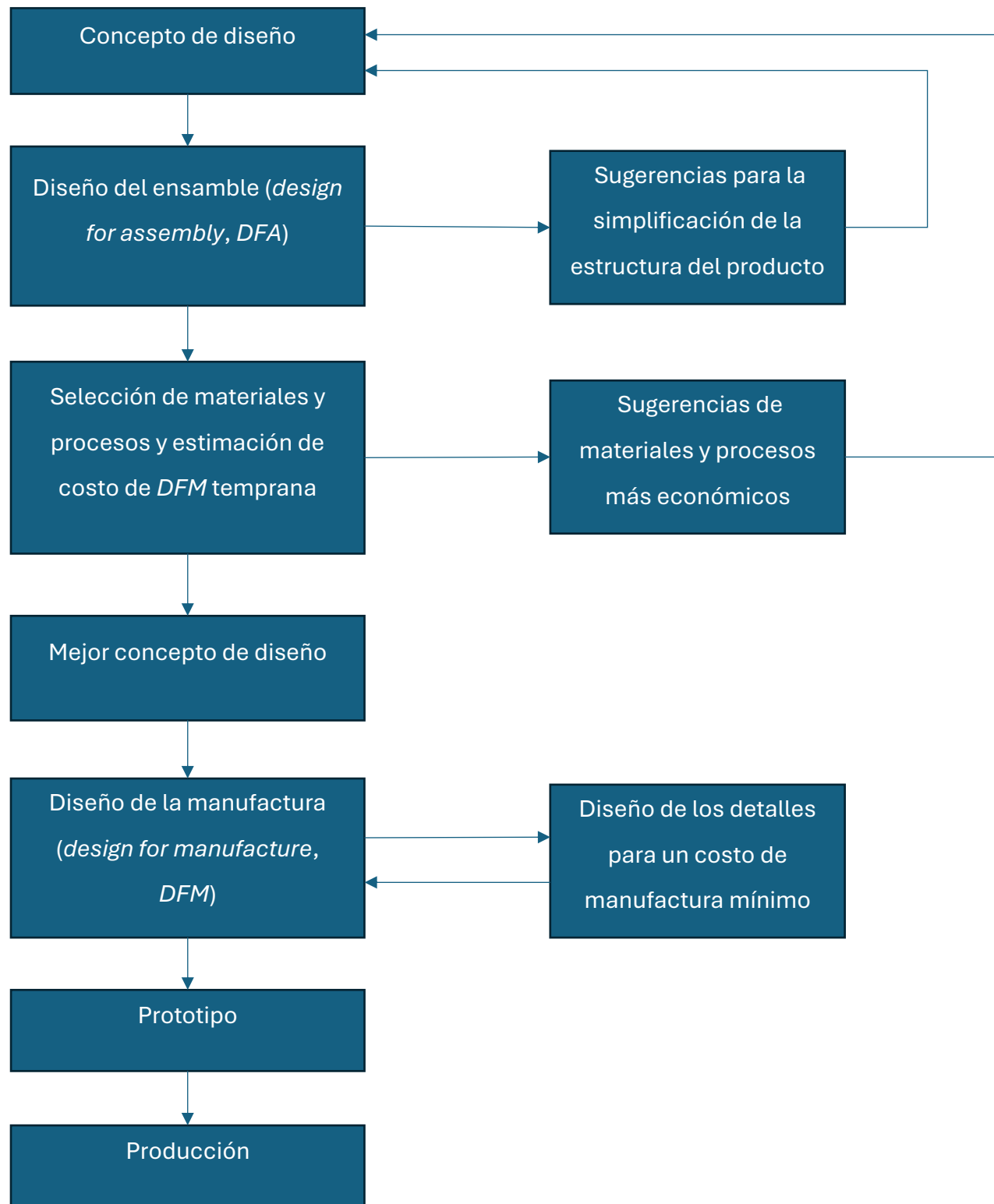


Figura 2. Ruta del análisis de diseño para manufactura y ensamble. Modificado (figura 5 del capítulo “Introducción a los factores del diseño”) de Blau (1998). [6]

## Estándares internacionales empleados

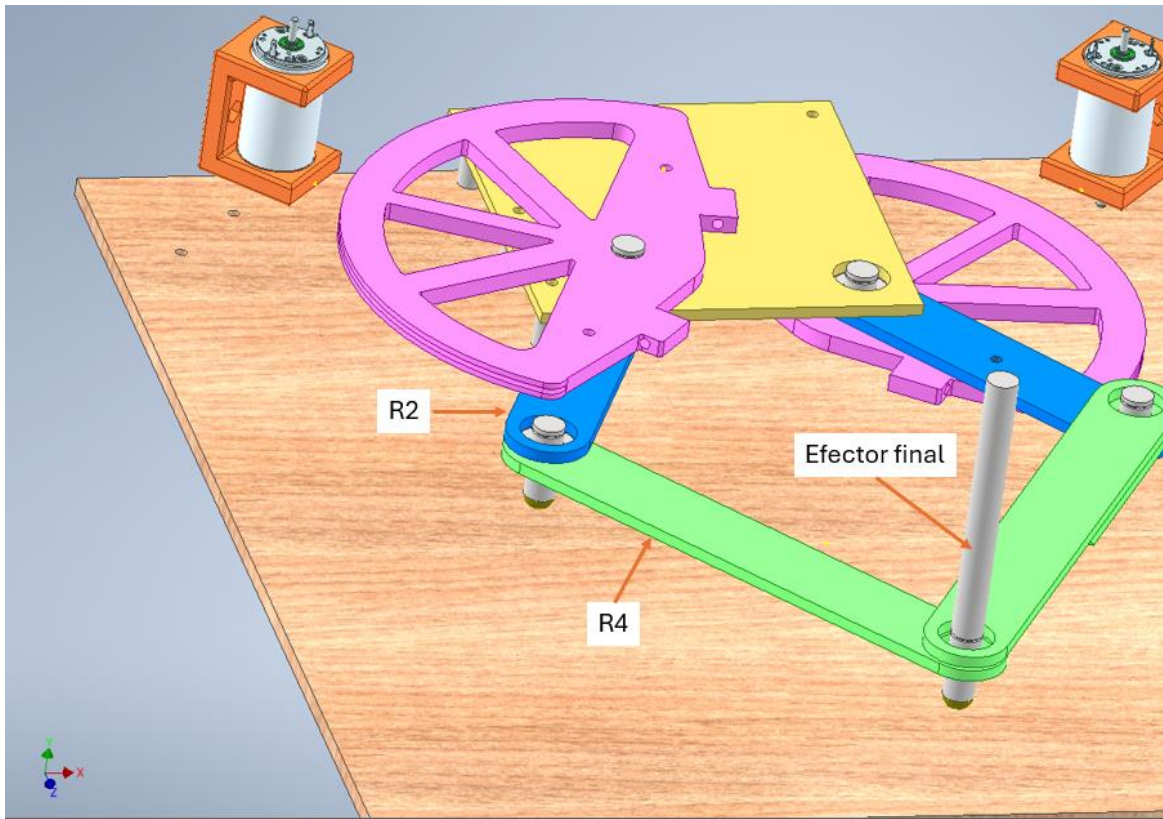
El diseño mecánico se realizó a partir de las normas americanas dadas por las organizaciones ASME (American Society of Mechanical Engineers), ANSI (American National Standards Institute), ABMA (American Bearing Manufacturers Association), se incluyen algunas normas de la ISO (International Organization for Standardization). Las dimensiones para el diseño se basan en la pulgada para aportar un puente de coherencia tanto con los estándares normativos principales empleados en el diseño y trabajo previo como con el sector de la manufactura, en el que es habitual trabajar con la unidad de la pulgada. En este sentido, se realizó la conversión y redondeo a pulgadas en las dimensiones pertinentes.

Para la elaboración de dibujos técnicos y planos, se utilizó las técnicas de *Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T)*, así como los estándares de dibujo de la ANSI y el sistema americano de proyecciones, de acuerdo con la norma ASME Y14.5. [7]

## Ejemplo del proceso de diseño aplicado a una pieza

Como ejemplo, se presenta el proceso de diseño que siguió la pieza denominada “R2”.

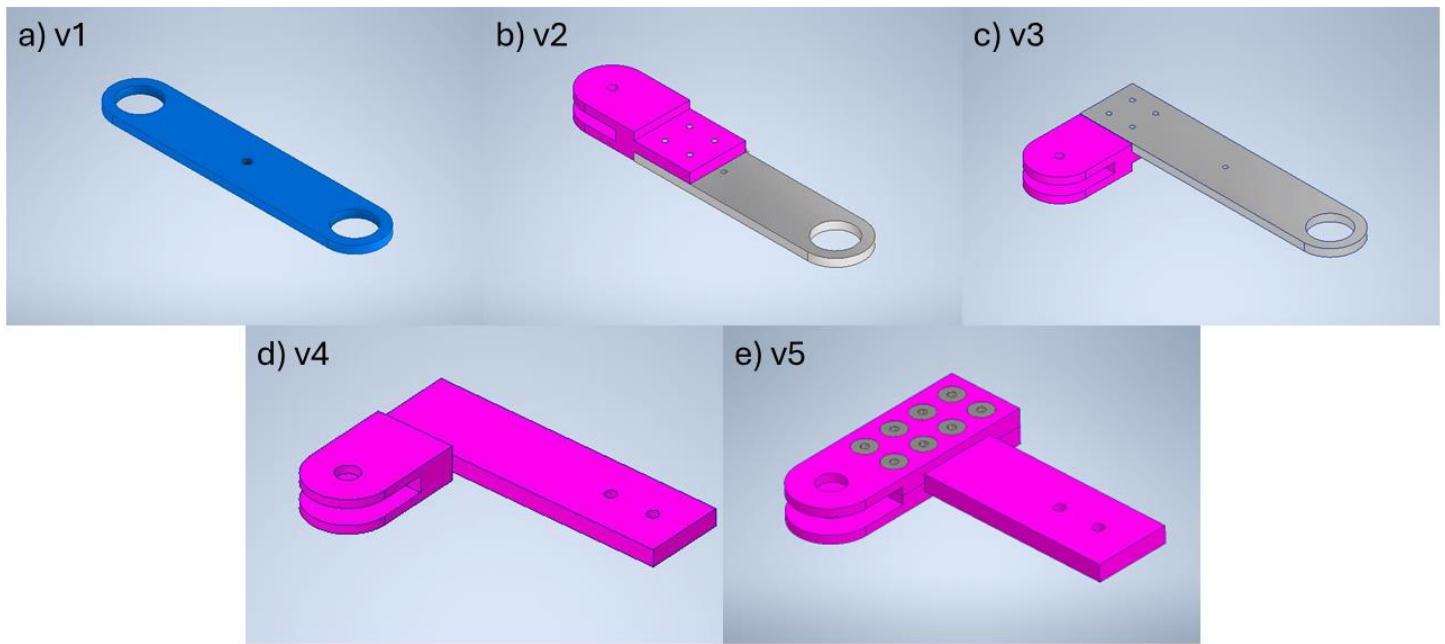
Originalmente, el ensamble de los eslabones de los brazos del mecanismo (piezas R2 y R4) se contemplaba de la siguiente manera:



*Ilustración 6. Concepto original del ensamble de las piezas. Eslabones R2 y R4 en su concepto de ensamble inicial.*

Como se observa en la ilustración 4, los eslabones R2 y R4 consisten en dos barras de terminación redonda unidas por medio de un eje y clips o seguros de retención. El problema que representa este concepto de unión es el de la poca restricción de movimiento de R4 con respecto a R2, de manera que en un prototipo construido en la realidad, estas piezas presentaban movimientos fuera del plano horizontal en el que está definida su cinemática. Es decir, idealmente, R2 y R4 rotan en planos horizontales paralelos en torno al eje que los une, habiendo en la junta un solo grado de libertad, que es una rotación. Sin embargo, esta restricción no quedaba satisfecha en el prototipo original con dicha forma de unión o junta.

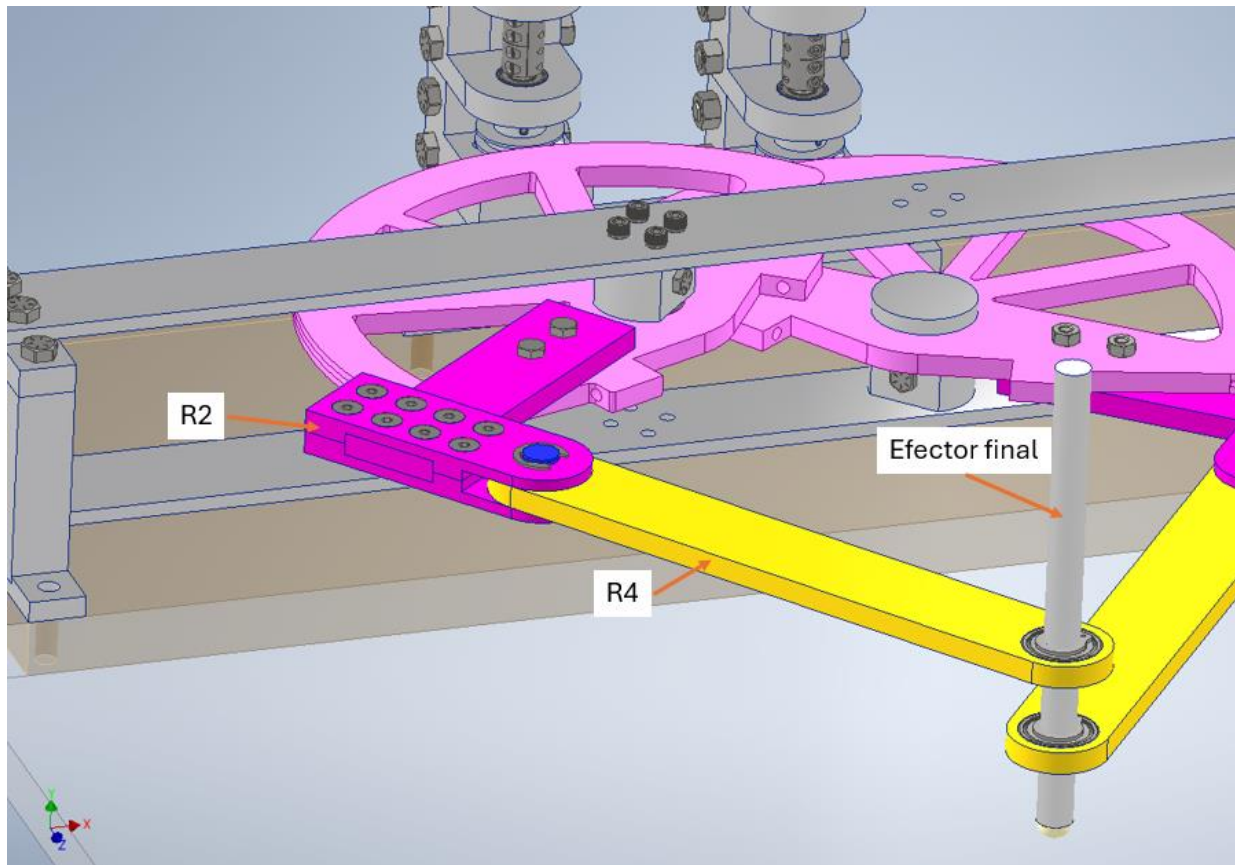
Por consiguiente, se decidió aplicar el concepto de que la pieza R2 restringiera mejor el movimiento de la pieza R4 tomando forma de horquilla en su extremo en contacto.



*Figura 3. Cinco versiones consecutivas de la pieza “R2” tras aplicar de manera iterada el método de diseño. a) primera versión de la pieza; b) y c) nueva terminación en horquilla; d) fusión en una sola pieza; e) segmentación en tres piezas de manufactura más sencilla.*

Las cinco versiones de la pieza “R2” se obtuvieron al aplicar de manera iterada el método de diseño. a) En un inicio, se planteó el concepto de diseño y se propuso una primera forma. b) La necesidad de mantener en alineación la pieza “R4” con baja fricción hizo necesaria la introducción de una nueva terminación de uno de los extremos en forma de horquilla; se inserta como una pieza separada, unida por medio de afianzadores (tornillos y tuercas). c) La versión anterior restringe demasiado el rango de movimiento de estas piezas con las del resto del ensamble, por lo que se optó por rotar la horquilla noventa grados; de esta forma se recupera la movilidad rotacional de las piezas. d) Una nueva necesidad por mantener la rigidez en la unión de este par de piezas llevó a fusionarlas en una sola, generando otras implicaciones en la manufactura de la nueva forma. e) Segmentación de la pieza anterior en tres piezas cuya manufactura es más simple: dos mitades de la horquilla y una barra prismática en la que se soporta el ensamble por medio de afianzadores. La sujeción de la tercera pieza, “R4”, con baja fricción se logra por medio de tolerancias dimensionales estrechas en algunas regiones de la geometría.

El ensamble de dichas piezas, tras haber aplicado la metodología de diseño, queda de la siguiente manera:



*Ilustración 7. Concepto final tras aplicar de manera iterada la metodología de diseño a las piezas R2 y R4.*

## Diseño del espacio de trabajo

### Configuración del mecanismo

El mecanismo propuesto consiste en una cadena cerrada de 5 eslabones con 2 grados de libertad. La cadena cerrada de los eslabones forma un pentágono, que es simétrico desde el origen propuesto: dos brazos de dos eslabones cada uno que convergen en un nodo, que corresponde al efector final del robot.

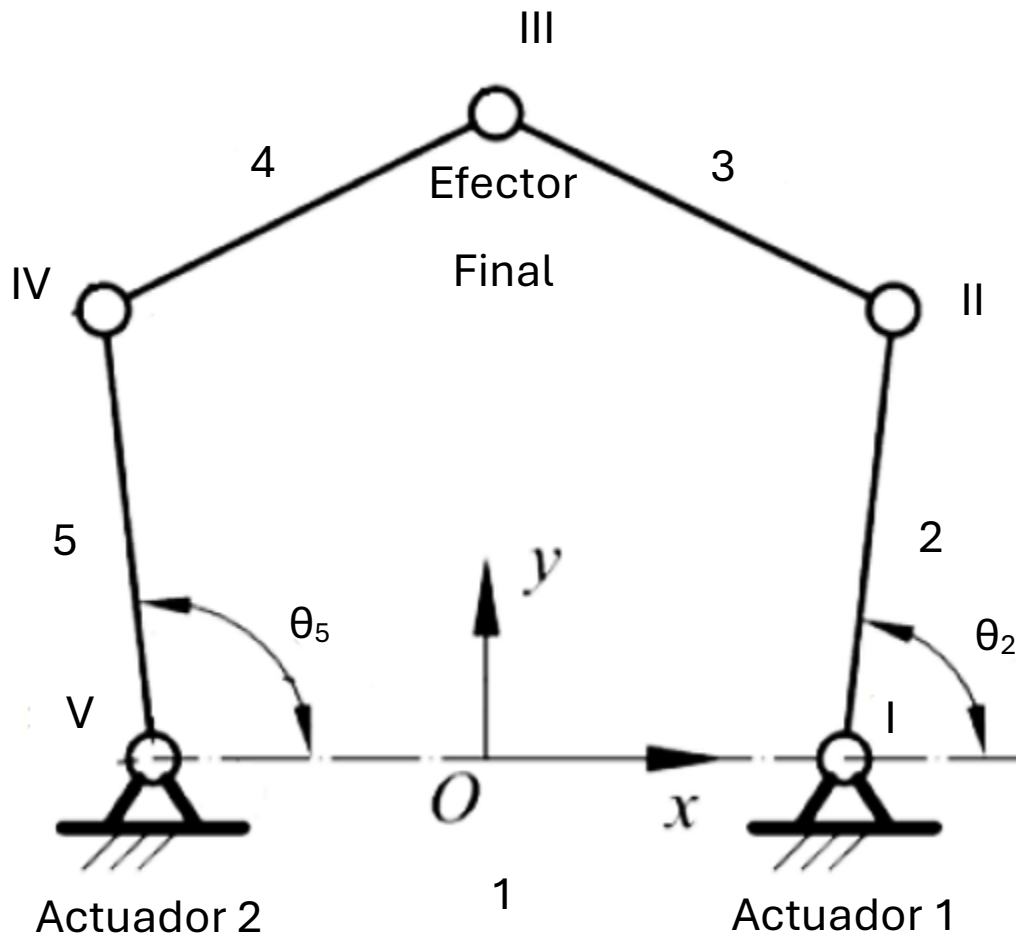


Figura 4. Diagrama del mecanismo del robot (vista superior). Modificado de Morales (2021) (figura 6-2).

[5]

Para determinar la longitud de los eslabones y reducir el número de variables, se estableció la siguiente relación entre las longitudes:

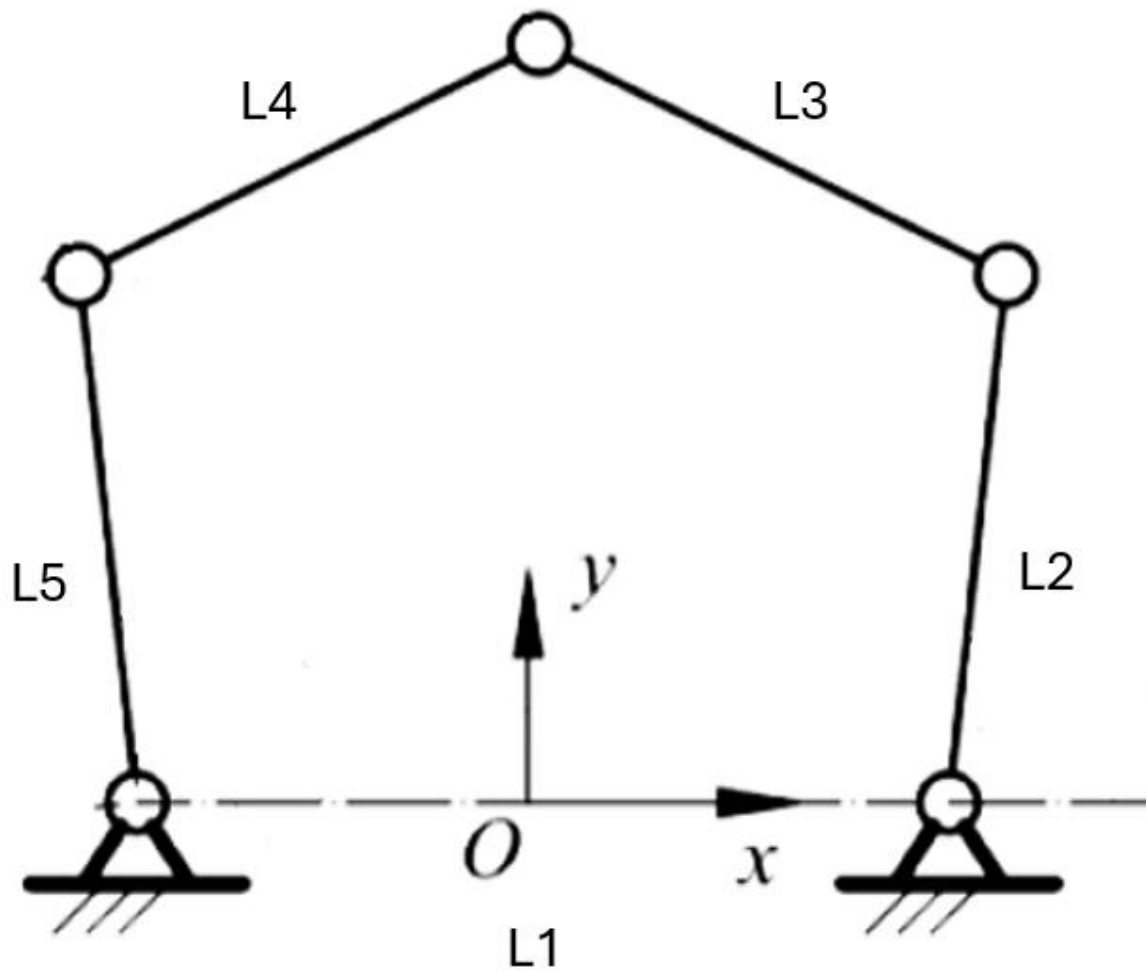


Figura 5. Longitudes de los eslabones del mecanismo. Modificada de Morales (2021) (figura 6-2). [5]

$$L4 = L3$$

$$L5 = L2$$

$$L1 = \sqrt{2}(L3 - L2)$$

Esta última relación geométrica tiene el fin de reducir las variables que deben computarse en el proceso de optimización para reducir el índice de condición local y las dimensiones de los eslabones (Morales, 2021).

A partir de estas relaciones, se realizó un análisis del índice de condición local,  $LCI$ , para diversos valores propuestos de las longitudes de los eslabones. El índice de condición local es un indicador de la destreza del mecanismo, indica cuando el mecanismo se aproxima a una singularidad, en la que el mecanismo pierde al menos un grado de libertad (Morales, 2021). Con el análisis, se obtuvo que las longitudes que mejor cumplen con las características del robot (destreza, compacto) son:

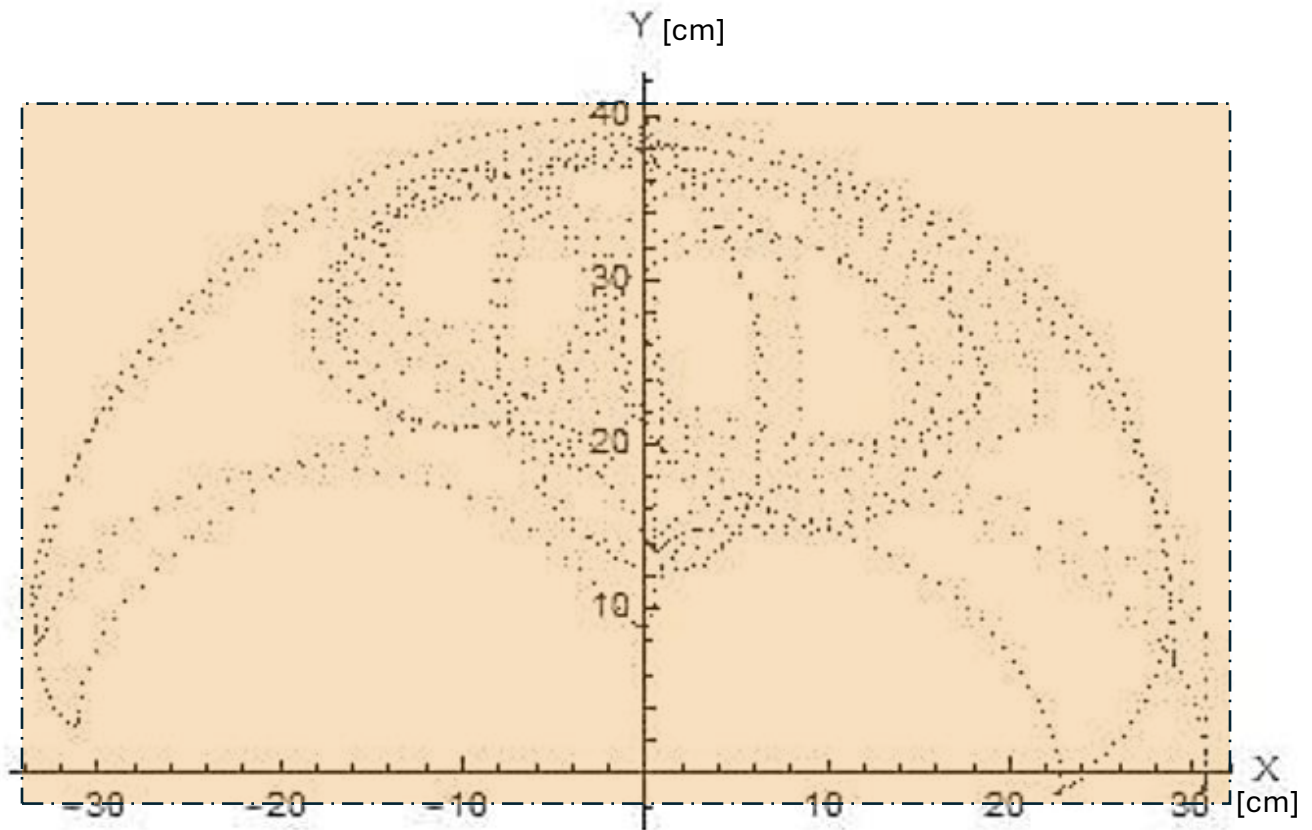
$$L4 = L3 = 27[cm]$$

$$L5 = L2 = 18[cm]$$

$$L1 = \sqrt{2}(L3 - L2) = 12.73[cm] [5]$$

### Espacio de trabajo

Con las longitudes ya determinadas, el espacio de trabajo tiene un área de las siguientes dimensiones:



*Figura 6. Espacio de trabajo aproximado por las dimensiones previamente establecidas por Morales.*

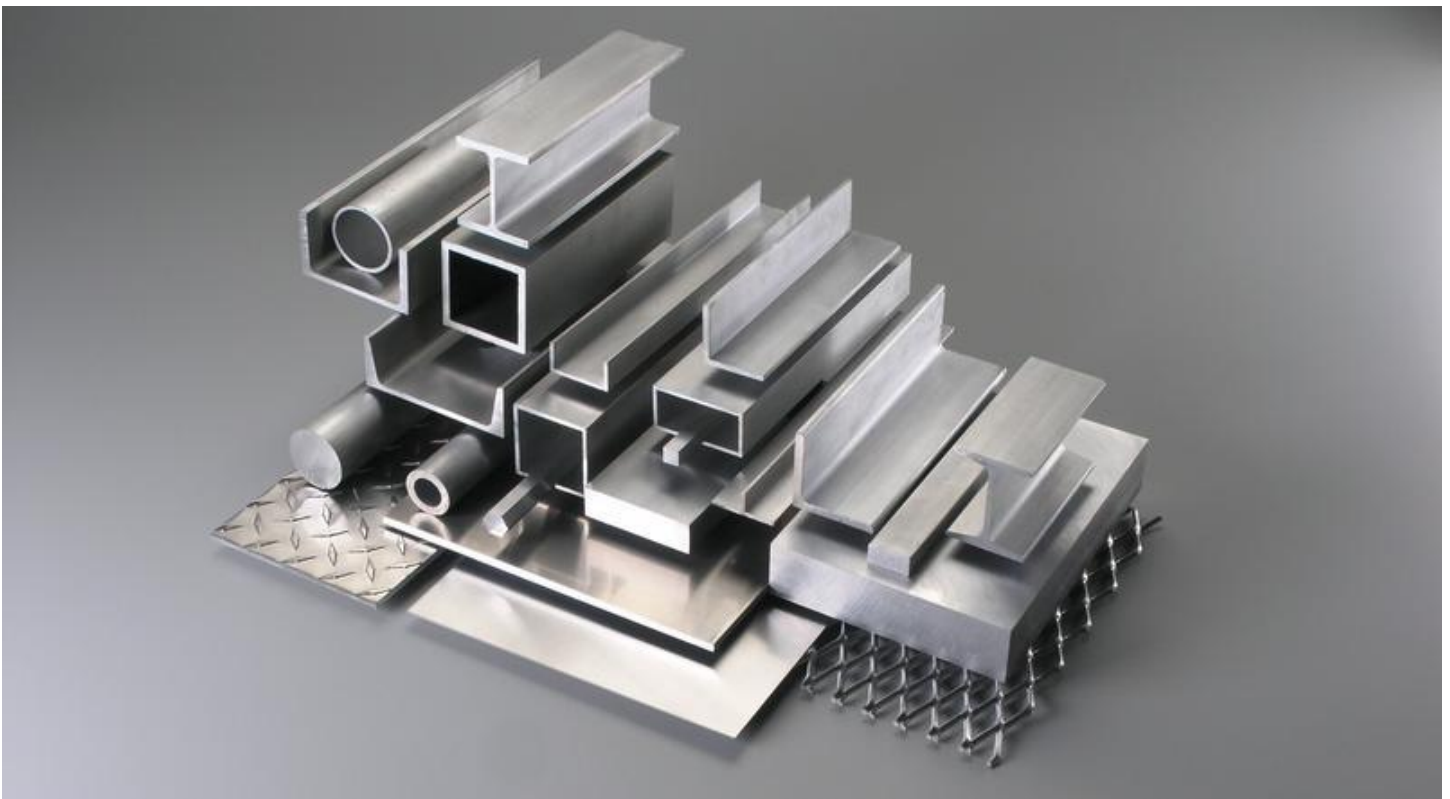
*Modificada de Morales (2021) (figura 6-9). [5]*

Se estima un área rectangular de aproximadamente 60 cm de largo por 40 cm de ancho.

## Elección de materiales

### Requerimientos de diseño

El dispositivo tiene que cumplir con las características de ser seguro, portátil y económico. La seguridad emana de la estructura, que debe ser rígida y estable. En cuanto a la portabilidad, viene implícito el peso de las piezas, así como su tamaño; en lo económico, está implícito el costo del material y el costo de la manufactura. Se espera además que las piezas tengan rigidez y dureza para soportar cargas durante el ensamble. Todos estos factores convergen en un material metálico, a la vez ligero y con buenas propiedades de maquinabilidad. El Aluminio 6061 T6 o aleaciones similares de aluminio (similares propiedades mecánicas) cumplen con las características físicas y mecánicas deseadas y su costo es accesible, es un material ampliamente usado en todo tipo de industrias. La elección de este material se analiza a mayor profundidad y se explica en las siguientes secciones de propiedades físicas y mecánicas y de costos.



*Ilustración 8. Aluminio en diversas presentaciones como materia prima. Fuente:*

*<https://www.coremarkmetals.com/metals>*

El material de los elementos accesorios o no estructurales, como los rodamientos, afianzadores y seguros, se establece como acero dulce o acero inoxidable, pues son los materiales más ampliamente utilizados, y por tanto económicos, para estos productos comerciales.



*Ilustración 9. Afianzadores y seguros en diversas presentaciones. Fuente:*  
<https://www.surajmetal.com/stainless-steel-nut-bolt-fasteners.html>

### Propiedades físicas y mecánicas

Los principales elementos aleantes del aluminio 6061 son el magnesio (0.80-1.20 porcentaje de peso) y el silicio (0.40-0.80 porcentaje de peso). Posee una densidad de  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , una tercera parte que el acero ( $7.83 \text{ g/cm}^3$ ). Su esfuerzo de cedencia de 275 MPa, o 40 ksi, es similar al de algunas aleaciones de hierro de bajo carbono. Esto le otorga una buena relación resistencia mecánica vs peso. [6], [8]



*Ilustración 10. Configuración de un ensayo de tensión para una probeta metálica, a partir del cual se obtienen algunas propiedades mecánicas del material. Fuente: <https://forcetechnology.com/en/services/materials/tensile-testing>*

El aluminio y sus aleaciones son versátiles a diversos procesos de manufactura para obtenerse tanto en su forma de materia prima como para fabricar piezas. Es posible procesar al aluminio por medio de fundición en molde de arena, en dado; de extrusión de impacto, de forja en dado cerrado, de sinterizado, de extrusión en caliente; de maquinado de todo tipo; de conformado en placas; entre varios otros. [6] Las tolerancias dimensionales que se pueden obtener por medio de procesos de maquinado, como fresado y torneado, y de rectificado y pulido llegan a un rango de hasta las diezmilésimas de pulgada, además del excelente acabado superficial. [6] Un indicador fundamental para cuantificar la maquinabilidad de un material es la energía específica de corte, que representa la energía consumida por unidad de volumen de material removido. Como referencia, se muestra la energía por unidad empleada para aleaciones de aluminio y productos de hierro:

Tabla 2. Energía por unidad de volumen requerida aproximada para maquinar diferentes metales y aleaciones. Modificado (tabla 8 del capítulo “Factores en la selección de materiales”) de Blau (1998). [6]

| Material                      | Dureza, HB | Energía por unidad, (W/s)/mm <sup>3</sup> |
|-------------------------------|------------|-------------------------------------------|
| <b>Aleaciones de aluminio</b> | 100-150    | 0.65                                      |
| <b>Hierro colado</b>          | 125-250    | 0.87-1.3                                  |
| <b>Aceros</b>                 | 150-400    | 1.3-3.5                                   |

El aluminio presenta asimismo excelente capacidad de soldadura por las técnicas *TIG* (Tungsten Inert Gas), *MIG* (Metal Inert Gas), arco de plasma, y demás. [6]



Ilustración 11. Manufactura sustractiva de metales; proceso de fresado de un bloque de metal. Fuente: <https://www.china-machining.com/blog/what-is-cnc-milling/>

## Costos

De todo lo anterior, deriva que la elección del aluminio como material estructural del mecanismo es la mejor elección para el prototipo, pues la relación de resistencia versus peso es muy buena, con lo cual se otorga seguridad de operación y ensamble con el peso mínimo; de la tabla 2 se observa que la energía que requiere maquinar aluminio puede ser hasta cinco veces menor que para maquinar hierro o acero, al mismo tiempo que se pueden conseguir tolerancias y acabados apropiados para sus funciones; la alta resistencia a la corrosión del metal también reduce la necesidad de mantenimiento y reemplazo de piezas. Esto convierte al aluminio en el material más económico y ventajoso para la estructura del prototipo. Por la energía requerida en el maquinado se podría adelantar que al menos el costo de la manufactura desciende en proporción comparado a si fuera otro material con las mismas características de diseño.

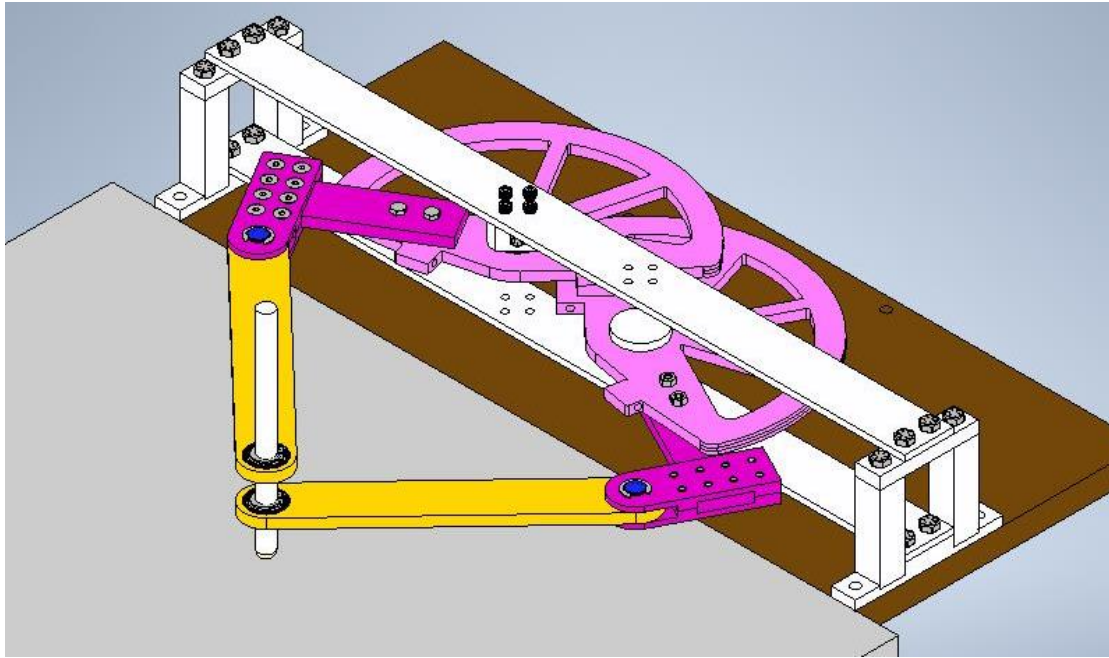
Una bloque de aluminio 6061 de 2 1/4" X 2 1/4" X 24" tiene un costo unitario de US\$118.25. Un bloque de las mismas dimensiones de acero de bajo carbono tiene un costo unitario de US\$155.73; una cantidad equivalente\* de acero inoxidable grado 304 tiene un costo de US\$354.95. De aquí se observa que el aluminio 6061 continúa a ser significativamente más barato como materia prima. [9]

En general, el aluminio es el material más económico que cumple con los requerimientos para la fabricación del prototipo, debido al costo de la materia prima, la disponibilidad, el peso, la resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y a la facilidad del maquinado.

---

\* Se cuenta el mismo volumen del bloque formado por dimensiones distintas debido a la disponibilidad de las dimensiones de la materia prima en la fuente.

## Diseño y configuración de los eslabones



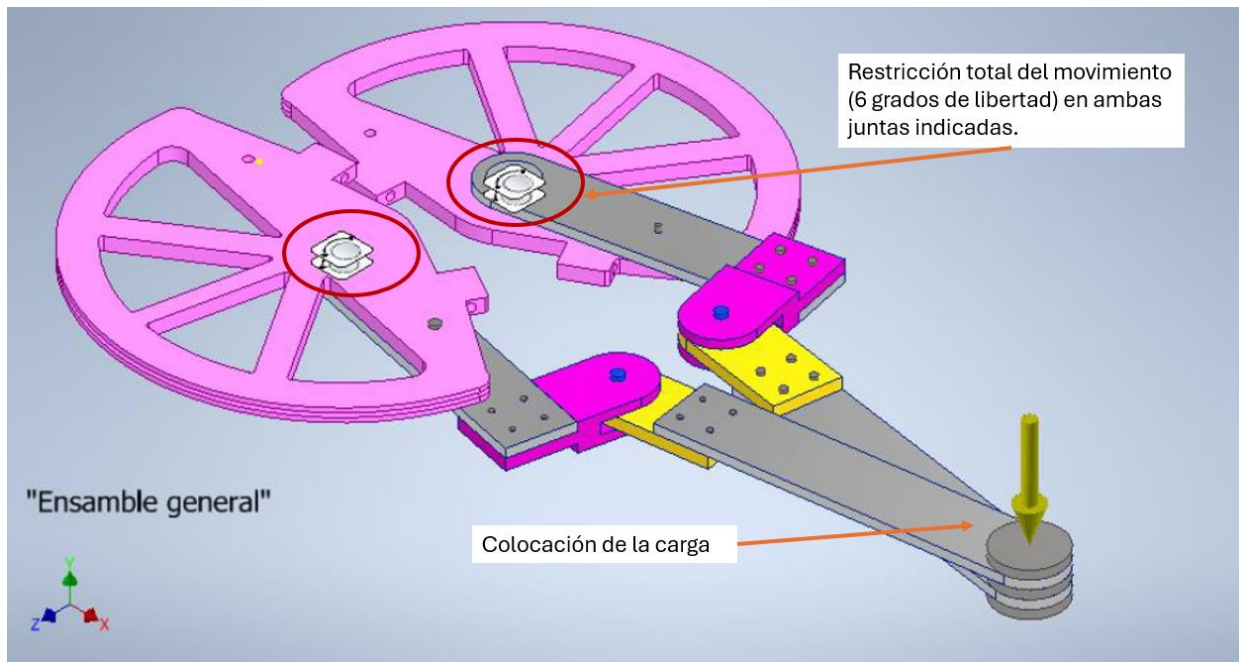
*Figura 7. Modelo 3D del ensamblaje del mecanismo del Robot.*

### Mecánica de los eslabones

Del desarrollo previo, se estableció como punto de partida la forma del pantógrafo, con una cinemática básicamente planar. Por consiguiente, los eslabones consisten principalmente en barras delgadas de material, cuyas juntas son de tipo revoluta, es decir, con un grado de libertad (una rotación). Los eslabones se superponen en planos paralelos separados, la rotación ocurre de manera normal al plano horizontal por medio de ejes y rodamientos ensamblados a los eslabones. [4], [5]

De una serie de análisis de esfuerzos realizados, se determinó que la forma y configuración de los eslabones y el mecanismo son propensos a sufrir deformaciones permanentes cuando el efector final se somete a cargas dirigidas en dirección normal a los planos de trabajo del robot (en voladizo), con cargas en torno a 10 kg o 100 N en una posición de máxima extensión; es decir, el mecanismo es propenso a dañarse si los brazos del robot se levantan o se bajan.

La restricción total del movimiento para el modelo 3D se colocó en las juntas que soportan a la estructura completa del mecanismo. La carga se coloca en la ubicación del efector final con dirección Y negativa. Las condiciones se muestran en la figura 8.



*Figura 8. Condiciones de restricción de movimiento y carga en el análisis de esfuerzos.*

La figura 9 muestra los resultados de un análisis de esfuerzos para el ensamble del mecanismo cuando éste se encuentra en una posición de máxima extensión, en la cual las cargas normales que actúan en el efector final generan mayores momentos flectores. Se restringe completamente el movimiento en las dos juntas libres posteriores y se colocan cargas en dirección normal al plano de operación en el efector final. Se encuentra que con una carga de 10 kg o 100 N actuando de esta manera, algunas regiones del material comienzan a exhibir esfuerzos muy cercanos al esfuerzo de fluencia.

En el inciso a) de la figura, se tiene una visualización de todas las piezas involucradas en el ensamble; los máximos esfuerzos se presentan en los brazos del robot, específicamente en los extremos de las barras, cerca del efector final. b) Visualización a detalle de la región más afectada por la carga antes mencionada; se presentan los esfuerzos máximos de en torno a 272.2 MPa. c) Se visualizan los efectos de la carga desactivando la visualización de los eslabones anteriores (las barras); de esta manera se puede colocar atención en las siguientes regiones más afectadas del mecanismo; la región de las juntas se ve afectada por esfuerzos de en torno a 84 MPa. d) Se visualiza únicamente los pernos de unión de las piezas en la región de las juntas, donde ocurren esfuerzos de en torno a 61 MPa.

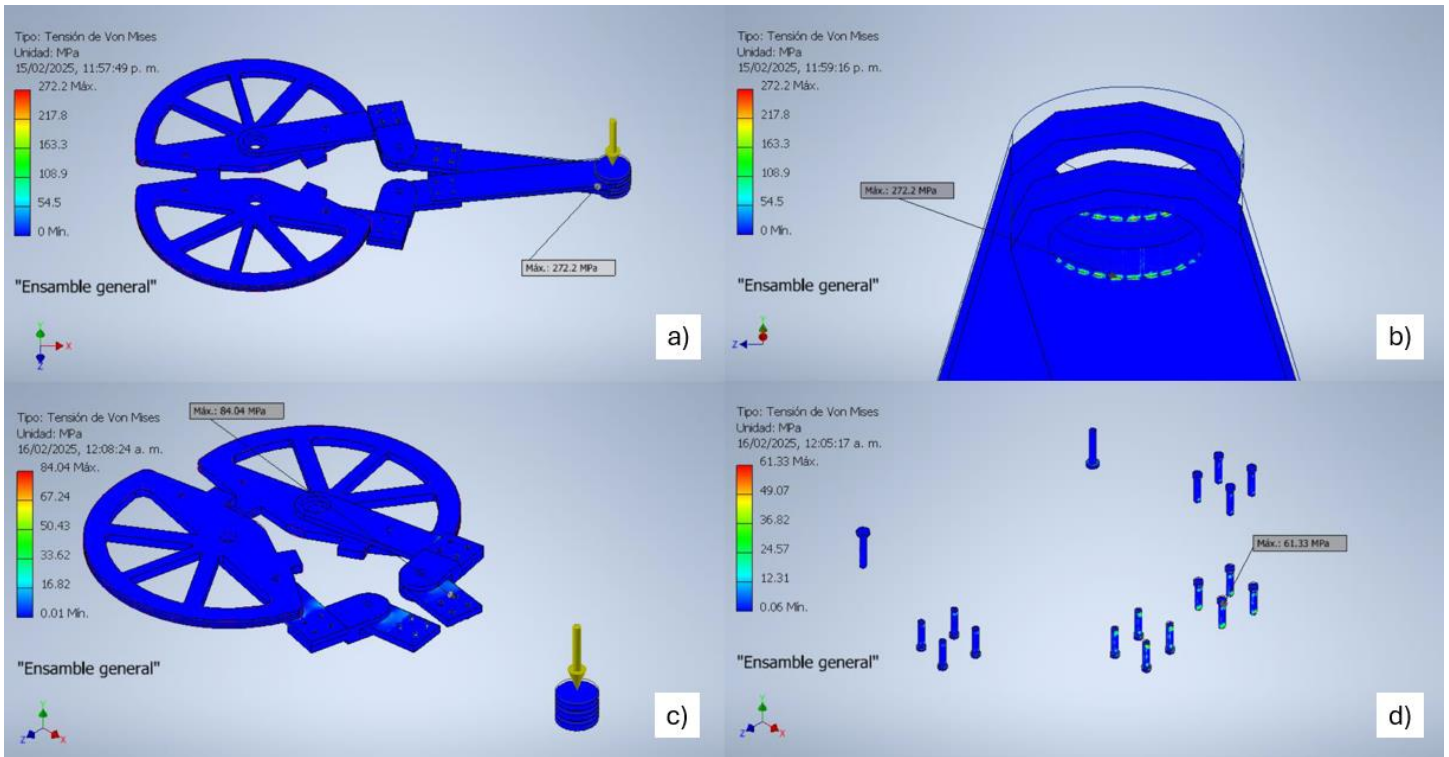


Figura 9. Análisis de esfuerzos con carga en configuración de voladizo. Debido al concepto de diseño, los eslabones son propensos a deformación permanente a partir de en torno a 10 kg. a) Visualización de todas las piezas involucradas en el ensamble; los máximos esfuerzos se presentan en los brazos del robot cerca del efector final. b) Visualización de cerca de la región más afectada por la carga; esfuerzos máximos (272.2 MPa). c) Efectos de la carga sin visualización de los eslabones anteriores; la región de las juntas se ve afectada por esfuerzos de en torno a 84 MPa. d) Los pernos de unión de las piezas en la región de las juntas muestran esfuerzos de en torno a 61 MPa.

Se hace una estimación del Factor de Seguridad (FS) en una operación en condiciones similares:

$$FS = \frac{S_Y}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

Donde  $S_Y$  es el esfuerzo de cedencia del aluminio 6061 (275 MPa), y  $\sigma_{m\acute{a}x}$  es el esfuerzo máximo exhibido en el análisis (272.2 MPa). Entonces el factor de seguridad en estas condiciones de operación es de

$$FS = \frac{275[\text{MPa}]}{272.2[\text{MPa}]}$$

$$FS \approx 1.010$$

Un factor de seguridad de esta magnitud es un valor crítico que vuelve inaceptables las condiciones de operación estudiadas. A partir de este argumento, se hace énfasis en que, para una operación segura del robot, el efector final esté apoyado a tierra en todo momento, de manera que no existan cargas en voladizo ni cargas normales a los planos de trabajo.

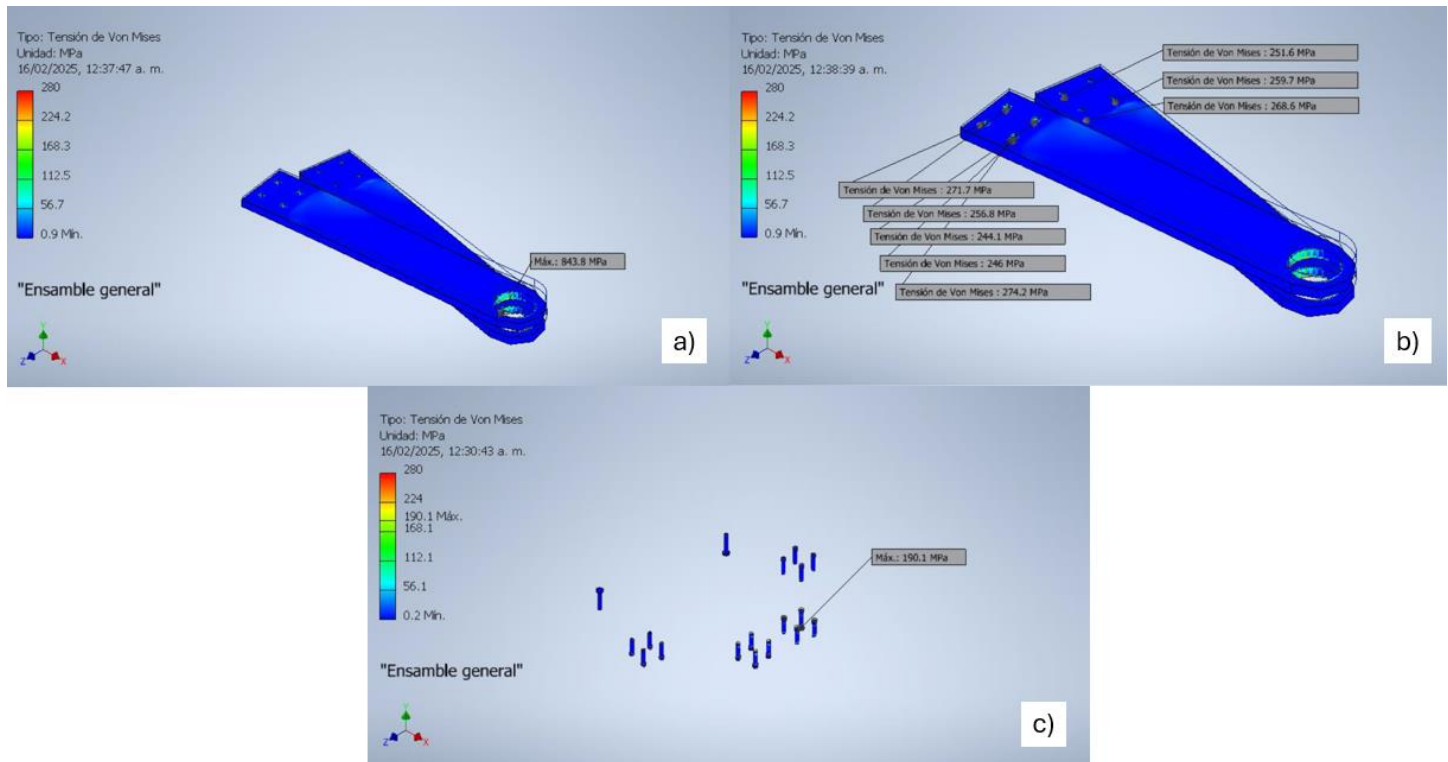


Figura 10. Al aumentar la carga, conservando las mismas condiciones para el análisis, los efectos se hacen notorios de manera crítica en algunas regiones. a) Esfuerzo máximo de 843.8 MPa en la región más afectada, alrededor del efector final. b) En las barras anteriores, es la región de las juntas donde ocurren esfuerzos en torno al de cedencia. c) Pernos de unión con esfuerzos de alrededor de 190 MPa.

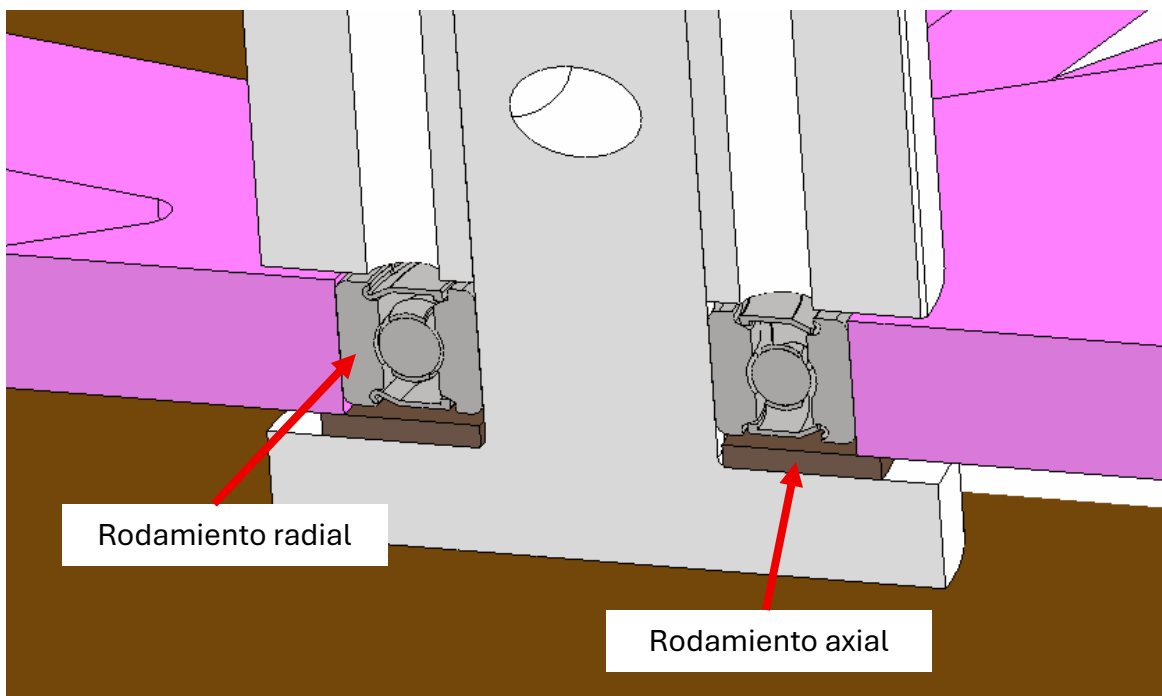
En la figura 10, se observa la magnitud de los efectos en ciertas regiones al incrementar la carga de 100 N a 310 N. Se observa entonces que, a cargas mayores de 100 N, el mecanismo puede sufrir fallas en el material debido a los esfuerzos que se presentan en ciertas regiones. Estas mismas regiones es importante tomarlas en cuenta, ya que demuestran ser las más vulnerables a este tipo de cargas.

Si bien al incrementar el peralte o espesor de los eslabones se incrementa también su resistencia a la flexión, se da prioridad a la reducción del espacio que otorga el diseño esbelto. La aplicación del dispositivo está proyectada para que el efector final operara apoyado a tierra, además de que el dispositivo también está pensado para aplicaciones de rehabilitación activa, en la que el paciente tiene la capacidad de mover por sí mismo el aparato y no requiere tanta fuerza para moverse de parte del robot

como un paciente en rehabilitación pasiva. Con este análisis de esfuerzos queda justificado, por tanto, un uso casi exclusivo a rehabilitación activa y en el que el efector final se encuentre apoyado a tierra. Una aplicación que requiera un diseño físicamente más robusto requiere un rediseño general del mecanismo.

### Mecánica de las juntas

Todas las juntas del mecanismo son de tipo revoluta, en la que cada par de eslabones puede rotar en una sola dirección uno con respecto al otro en torno a un eje común. Para disminuir la fricción, se emplean rodamientos radiales de una hilera de bolas. Se utilizan rodamientos axiales solamente en la región de interacción entre las Lunas y las superficies de soporte. Los rodamientos axiales disminuyen la fricción donde hay cargas axiales entre componentes, como es el caso; los rodamientos axiales delgados (en forma similar a una arandela) pueden estar compuestos de cobre o materiales poliméricos o cerámicos y contener lubricación con grafito o aceites.

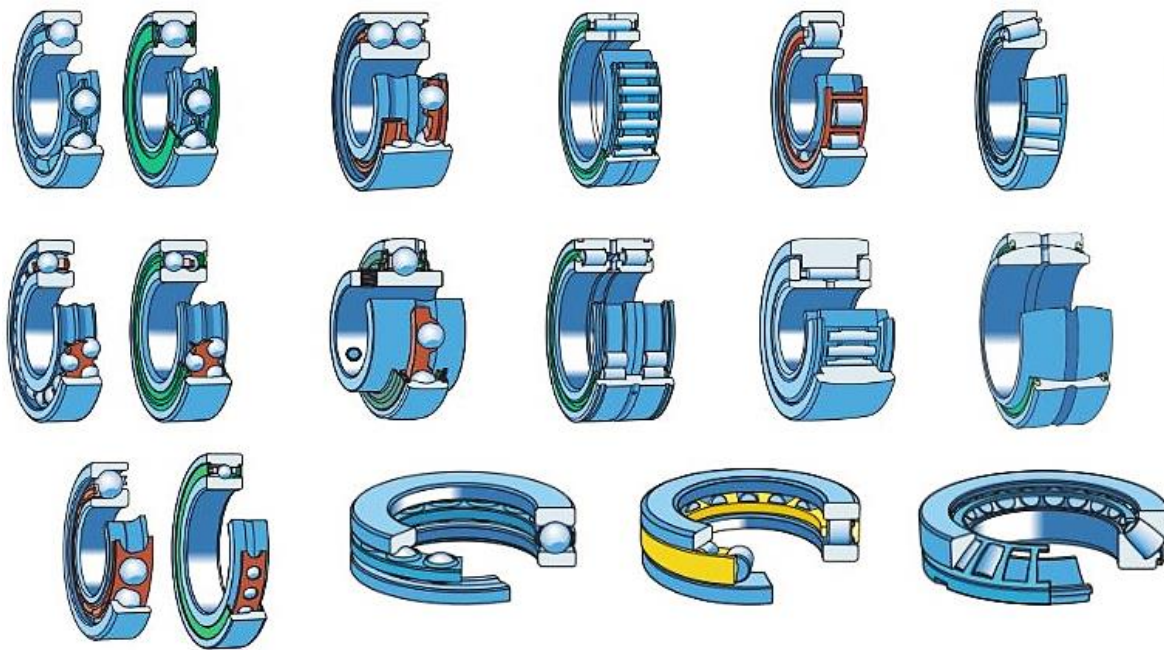


*Ilustración 12. Rodamientos en operación en las juntas del mecanismo. Detalle de vista seccionada de la junta de la Luna (polea mayor).*

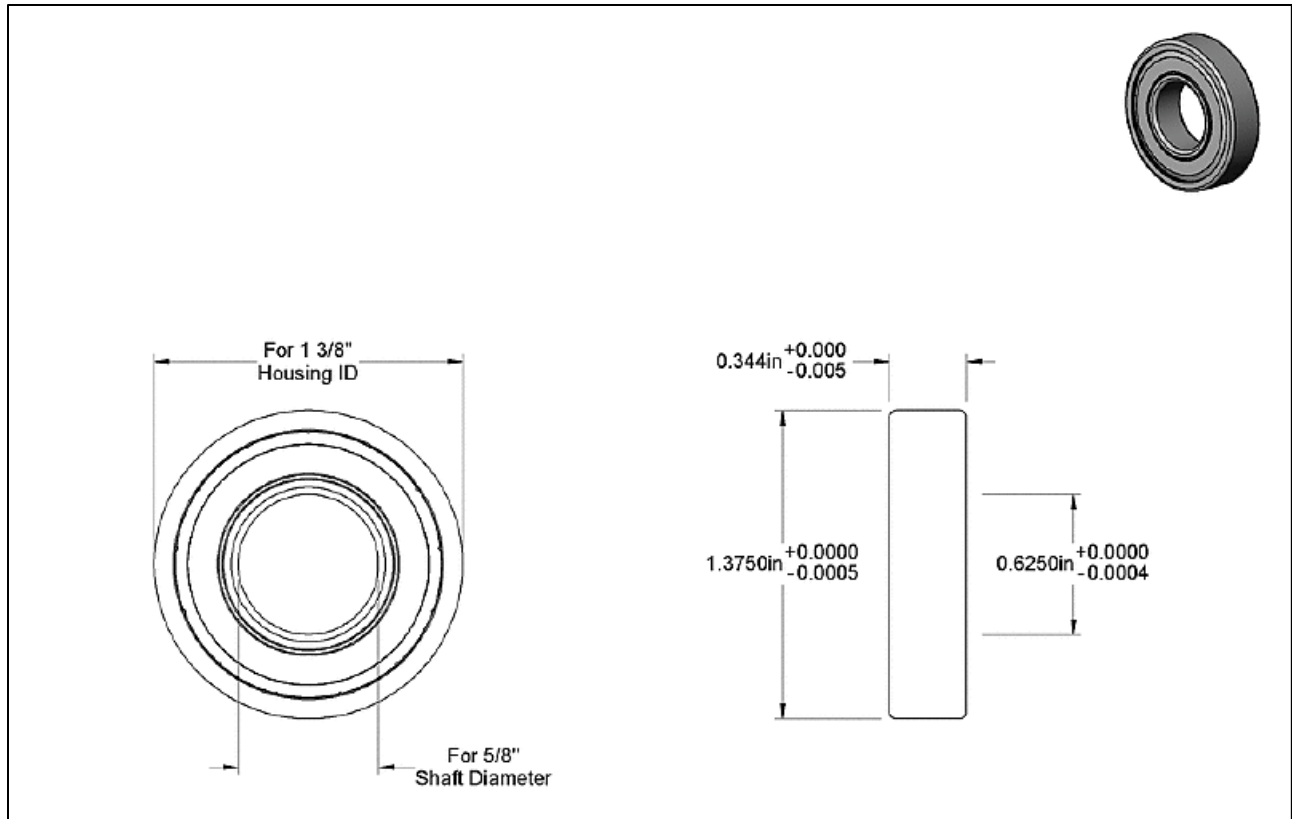
### Elementos de rodamiento

Los elementos seleccionados para reducir la fricción en las juntas responden a las necesidades del prototipo: espacio reducido y bajo costo. Se eligieron rodamientos radiales de una hilera de bolas de

medidas comerciales accesibles, además de rodamientos axiales delgados. Todas las juntas del robot poseen asientos para colocar los rodamientos y cuentan con un eje en torno al cual giran. Los rodamientos seleccionados son 6 rodamientos radiales de 5/8" X 1 3/8" X 11/32", y 2 rodamientos axiales de 5/8" X 1 1/2" X 1/16". Los rodamientos radiales cumplen con la clasificación ABEC-1 de la ABMA, la cual los clasifica como rodamientos de precisión (en manufactura) y les otorga tolerancias específicas de diseño para poder ser adaptados al asiento y eje donde se ensamblan, o viceversa. En este caso, los detalles y tolerancias del diseño de las piezas de aluminio se basan en el diseño de los rodamientos disponibles comercialmente.



*Ilustración 13. Tipos de rodamientos para cargas radiales y axiales. Fuente: <https://www.bearingtips.com/how-do-i-determine-which-bearing-to-use/>*



*Ilustración 14. Ilustración técnica de un rodamiento radial que indica tolerancias de fabricación comerciales ABEC-1. Fuente: <https://www.mcmaster.com/60355K295/>*

### Dimensiones de diseño

Las dimensiones para un mecanismo compacto, establecidas por Morales (2021), se traducen de centímetros a pulgadas por dos motivos. El primero es para otorgar uniformidad en el diseño con los componentes comerciales disponibles en el mercado, incluyendo rodamientos, afianzadores y seguros. El segundo motivo es el de facilitar la manufactura en talleres que utilizan el sistema imperial. Por tanto, las dimensiones finales de los eslabones, de nodo a nodo (centro geométrico de juntas), quedan como:<sup>†</sup>

$$L4 = L3 = 10.64[in]$$

<sup>†</sup> Compárese con las dimensiones de los eslabones establecidas anteriormente en centímetros para ver que son básicamente las mismas:

| Eslabón | Dimensión propuesta (centímetros) | Dimensión para diseño y manufactura (pulgadas) |
|---------|-----------------------------------|------------------------------------------------|
| L1      | 12.73                             | 5                                              |
| L2 y L5 | 18                                | 7.5                                            |
| L3 y L4 | 27                                | 10.64                                          |

Debido a la geometría de las piezas, el eslabón 2 y 5, tienen las siguientes dimensiones en el plano:

$$L2_{largo} = 3.54 + 3.16 + 0.38$$

$$L2_{largo} = 7.08[in]$$

$$L2_{ancho} = 4.14 - 0.80 - 0.88$$

$$L2_{ancho} = 2.46[in]$$

Entonces,

$$L5 = L2 = \sqrt{(7.08)^2 + (2.46)^2}$$

$$L5 = L2 \cong 7.5[in]$$

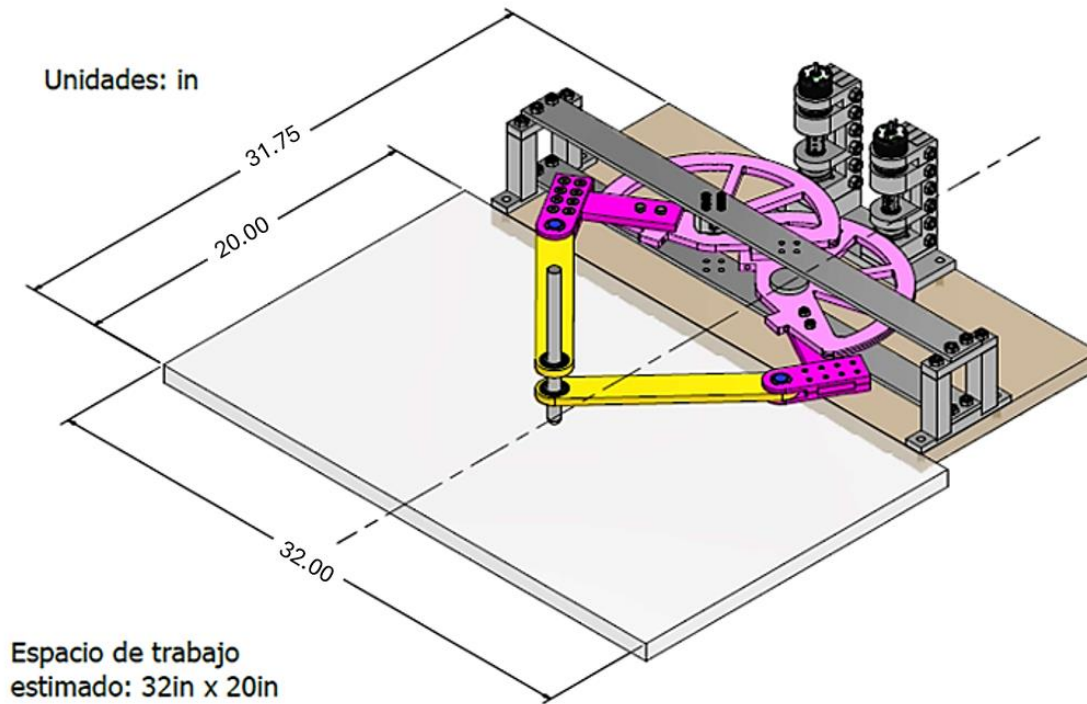
Y, finalmente,

$$L1 = 5[in]$$

El espacio de trabajo se estima de 32 in de largo por 20 in de ancho.<sup>‡</sup>

---

<sup>‡</sup> El espacio de trabajo de 60 cm por 40 cm pasa a tener 32 in por 20 in, que es un poco más grande.



*Ilustración 15. Espacio de trabajo estimado para el efector final.*

Es pertinente mencionar que la conversión de unidades de diseño a unidades de pulgada respeta las dimensiones originales dadas en centímetros y milímetros, haciendo redondeos o pequeños ajustes en las unidades de pulgada para obtener números con menos decimales donde fue necesario simplificar los números. Especialmente se hizo un redondeo para tener, como máximo, centésimas de pulgada y evitar fracciones más pequeñas. Esta práctica minimiza alteraciones en la cinemática del dispositivo.

### Tolerancias de diseño

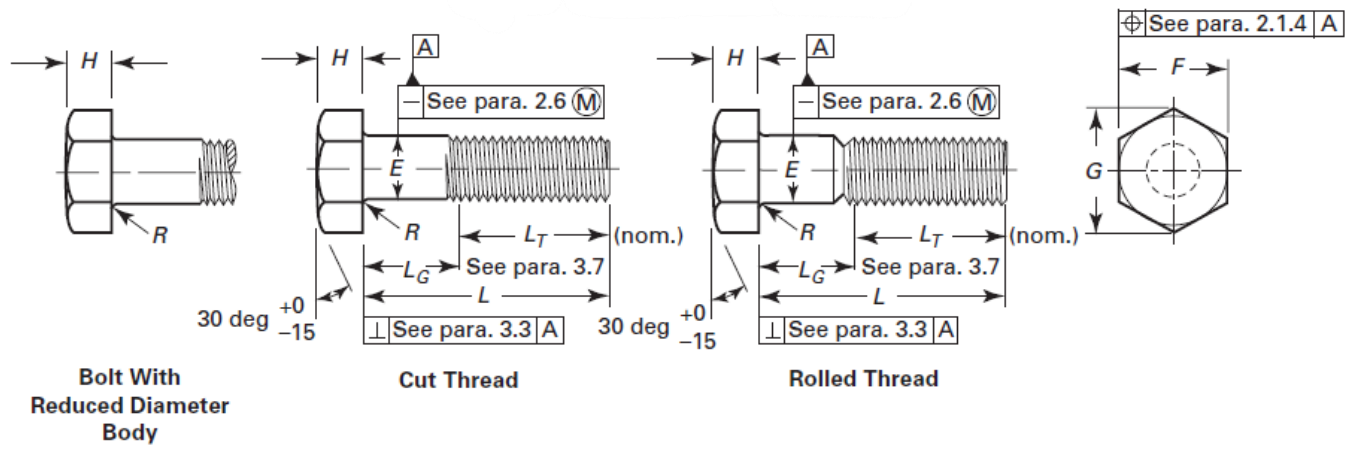
Las tolerancias generales de diseño para los eslabones son una adaptación a pulgadas de las tolerancias dimensionales dadas por la Organización Internacional de Estándares, ISO, en la norma ISO 2768-1. Se empleó las tolerancias de grado fino de la norma. [10] Esta decisión se basó en dar continuidad al diseño original adaptando al mismo tiempo el diseño a las nuevas unidades.

Las tolerancias para las piezas que se ensamblan entre sí se basan en la norma ANSI B4.1, la cual indica, en el orden de magnitud de las diezmilésimas de pulgada, las tolerancias dimensionales de los ajustes entre piezas, como el ajuste de juego, ajuste de interferencia y el ajuste de transición, para una diversidad de intervalos dimensionales y grados de ajuste. [11]

Por ejemplo, los rodamientos tienen 1 3/8" de diámetro exterior nominal y requieren un ajuste de interferencia o apriete ligero en los asientos, por lo que las tolerancias según la norma deben generar un grado de interferencia de -0.3 a -1.3 milésimas de pulgada. En decir, en la condición de mínimo material de ambas superficies (interferencia más pequeña) debe haber 0.3 milésimas de pulgada de interferencia entre las piezas; mientras que en la condición de máximo material de las superficies (interferencia más grande) debe haber 1.3 milésimas de pulgada de interferencia. Los rodamientos son comerciales y ya tienen un intervalo de tolerancias establecido, por lo que las tolerancias del asiento deben ser tales que se genere el grado de interferencia buscado en conjunto con las tolerancias del anillo exterior del rodamiento. Haciendo los cálculos, se obtiene que las tolerancias del asiento deben ser de -0.8 a -1.3 milésimas de pulgada sobre la dimensión nominal de 1.375[in], es decir, en ambas condiciones el asiento debe ser ligeramente más pequeño que la dimensión nominal en ese grado para asegurar que exista interferencia y apriete entre el asiento y el anillo exterior del rodamiento, de manera que el rodamiento se mantenga ensamblado de manera fija y segura en posición. Por otra parte, se recomienda que mientras un ajuste, en este caso el exterior, sea de interferencia, el otro ajuste, del anillo interno con el eje, sea orientado a un ajuste de juego, [12] por lo que debe seguirse el mismo procedimiento para generar un ajuste de juego del rodamiento con el eje de giro. Más adelante se presentan algunos ejemplos para el cálculo de tolerancias entre las piezas del mecanismo.

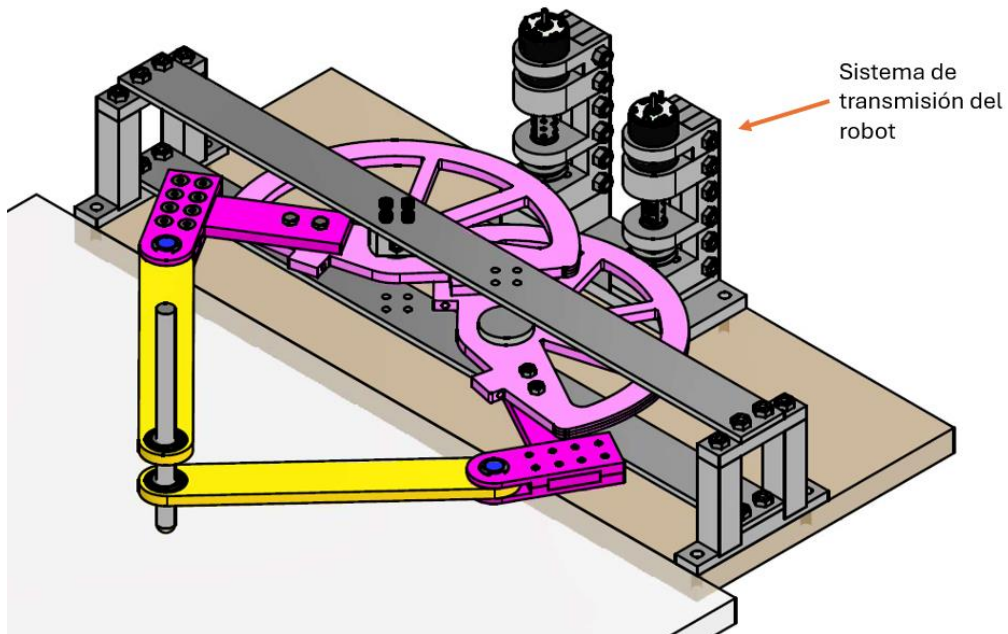
De manera similar se hace con los ajustes entre las piezas fabricadas que requieran ensamblarse entre sí, dependiendo de la función de las piezas y el grado de rigidez o juego en el ensamble que se pueda permitir.

Esta misma lógica se sigue para los afianzadores, que también poseen tolerancias de fabricación comerciales establecidas por las normas de fabricación ASME B18.

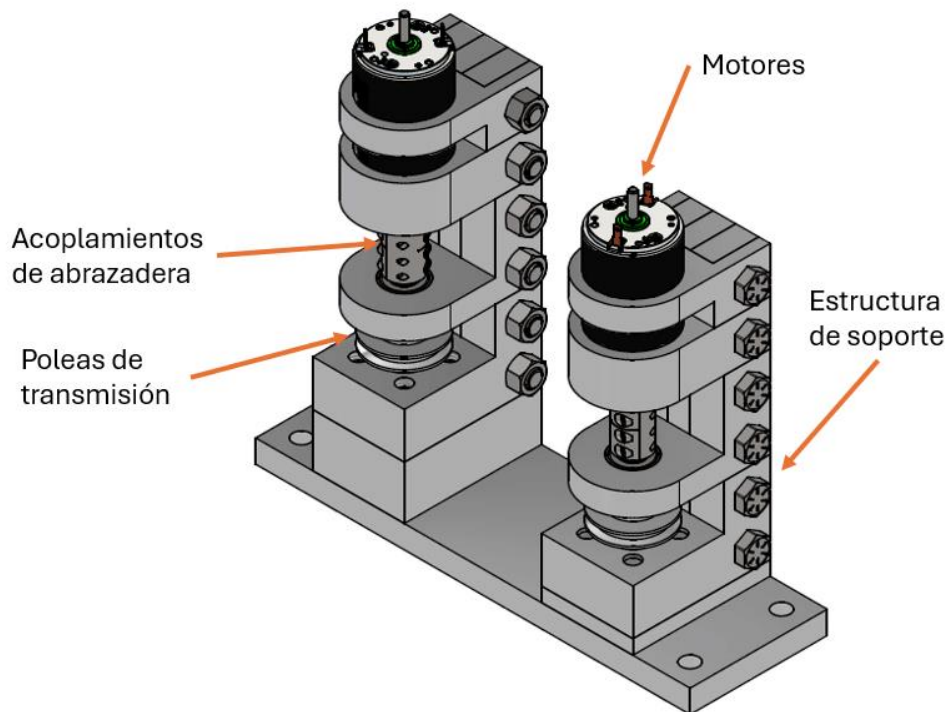


*Ilustración 16. Ilustraciones técnicas que indican las tolerancias de fabricación comerciales de los tornillos de cabeza hexagonal, según la norma ASME B18.2.1-2010. Modificado (Ilustración de la tabla 2 de la norma referida). [13]*

## Diseño y configuración del sistema de transmisión de potencia



*Ilustración 17. Ubicación del sistema de transmisión del robot.*

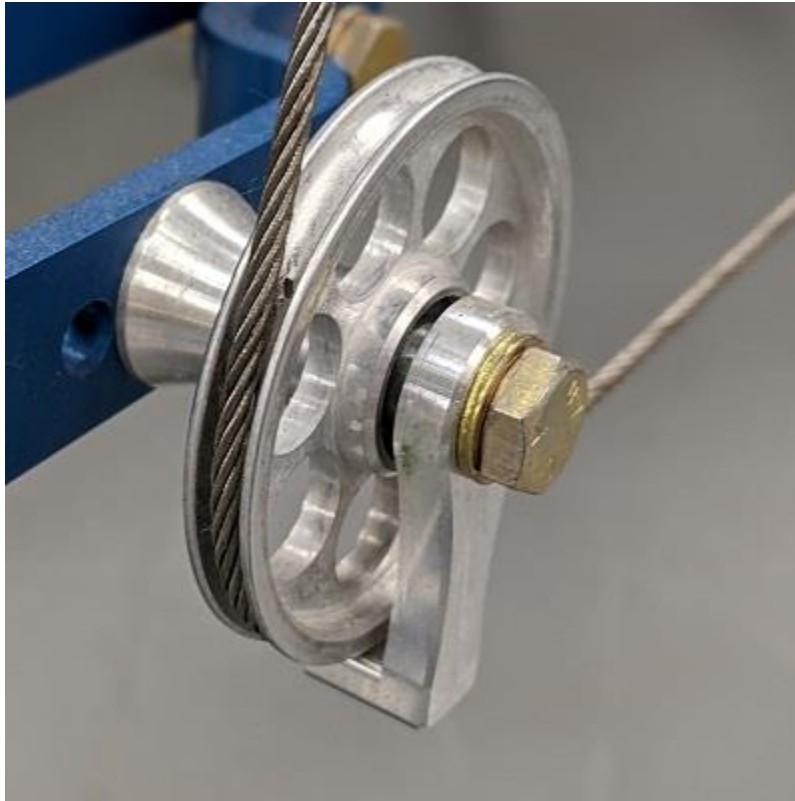


*Ilustración 18. Sistema de transmisión de potencia.*

## Mecánica de los elementos

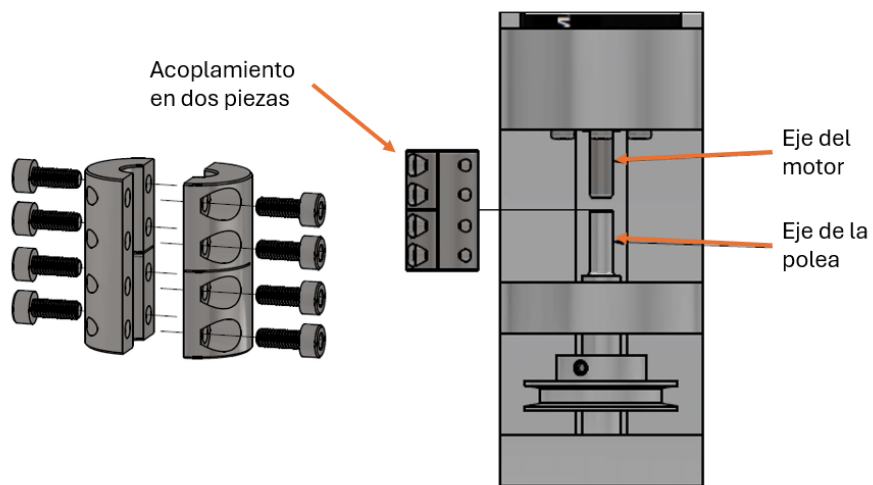
El tipo de motor empleado es un motor perteneciente a la marca Maxon, de la serie RE 40, de 150 W de potencia, 24 V de alimentación en corriente continua, velocidad en vacío de 7580 rpm y par mecánico nominal de 177 mNm. [5]

La elección de elementos para el sistema de transmisión tiene como objeto otorgar rigidez y fluidez de movimiento al mecanismo, por lo que se optó con el concepto de transmisión por cable de acero de 2 mm entre las poleas conectadas a los motores y las Lunas que forman parte de los brazos del robot.

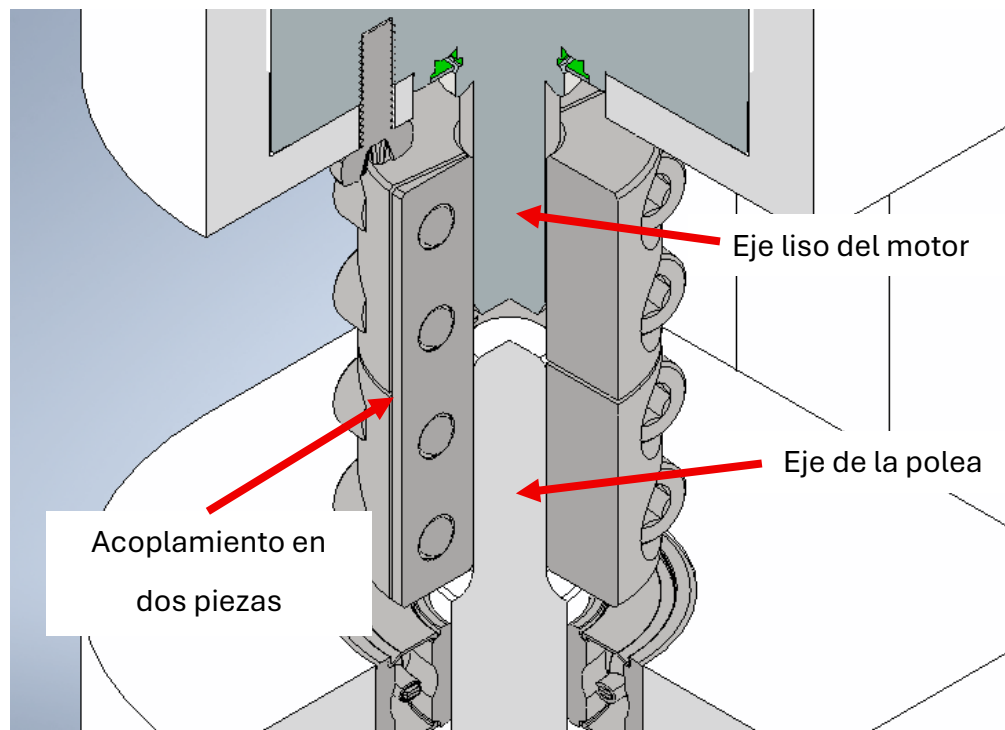


*Ilustración 19. Ejemplo de transmisión por cable metálico. Fuente: <https://gyrotechnic.com/shop/cable-pulley-assembly/>*

El tipo de acoplamiento se basa en la naturaleza del eje del componente más caro, que son los motores, por lo que, al tener un eje liso (sin chaveta o muesca), se necesita un tipo de acoplamiento por presión o de abrazadera, en una o dos piezas. Por consiguiente, el eje al que van ensambladas las poleas se diseña también liso para simplificar la compatibilidad del diseño y ensamble con el acoplador.

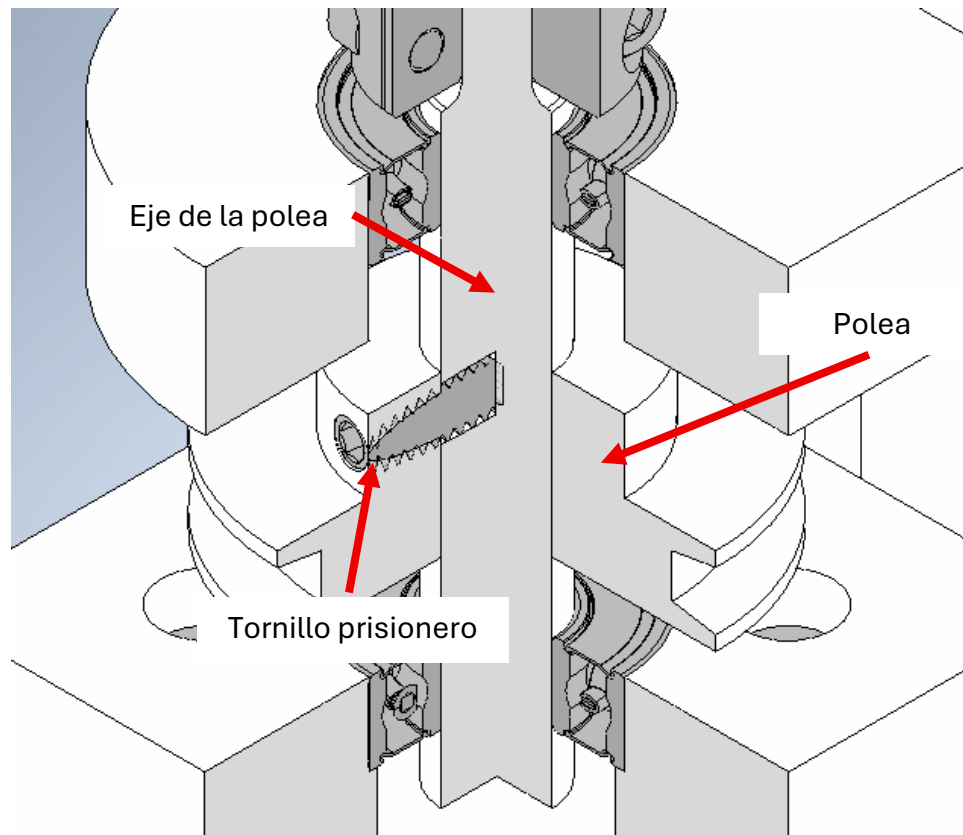


*Ilustración 20. Acoplamiento de los ejes en el sistema de transmisión.*



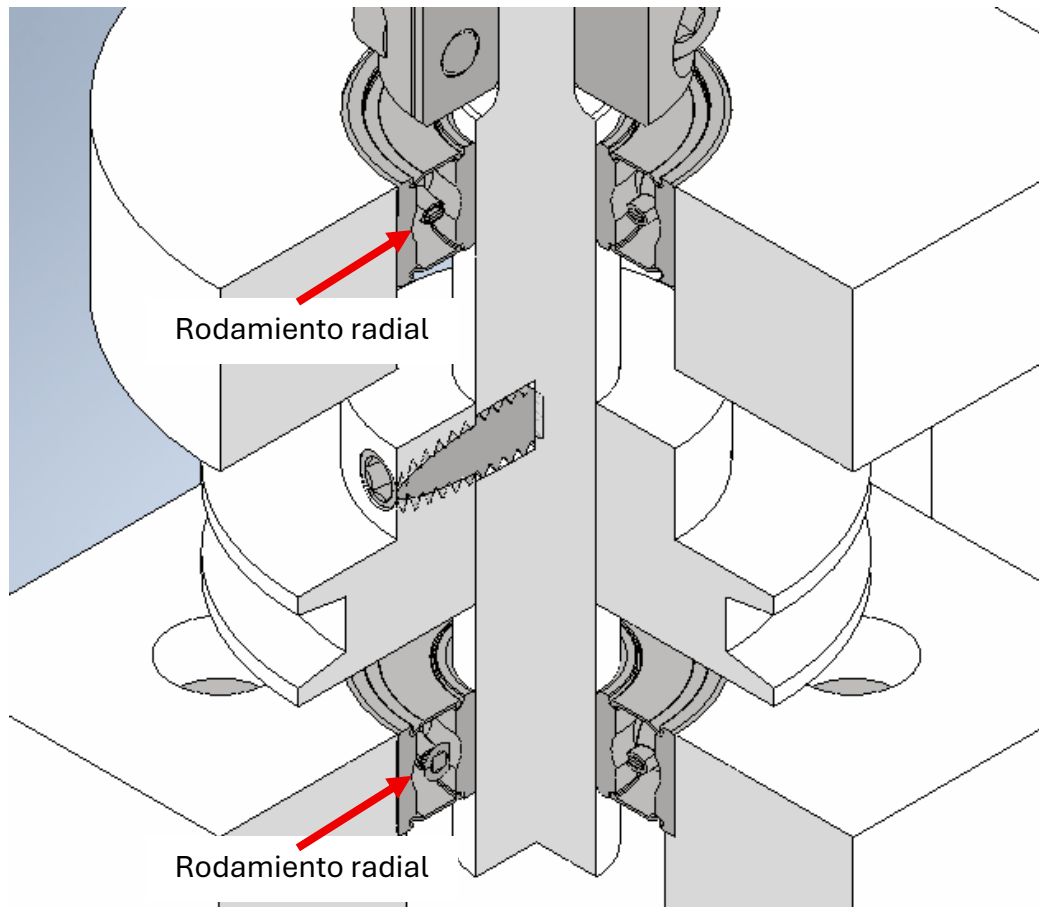
*Ilustración 21. Ensamble del acoplamiento.*

La polea se ensambla al eje acoplado al motor por medio de un chavetero que se diseña para el eje para hospedar un tornillo prisionero que mantiene la polea fija en su posición.



*Ilustración 22. Ensamble de la polea.*

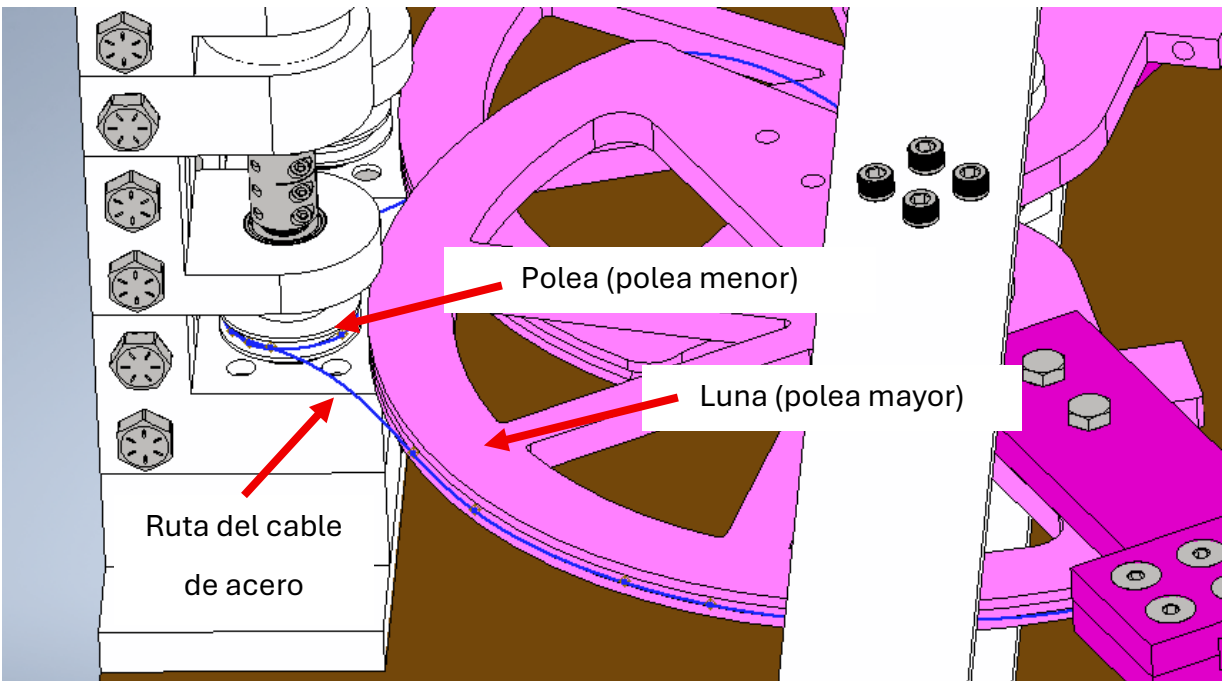
Para mantener la alineación de los ejes actuados, se utilizan dos rodamientos radiales, uno por encima y otro por debajo de la polea. Además de mantener la alineación de los ejes de las poleas con lo de los motores, se protege a los motores de posibles deflexiones y cargas radiales importantes generadas durante el ensamble o la operación del dispositivo.



*Ilustración 23. Sistema de alineación del eje de la polea.*

### Elementos de transmisión

El diseño de los elementos de transmisión responde a las necesidades del concepto del robot y a los motores que serán usados. En primer lugar, el diseño de las primeras piezas actuadas del robot lo conforma una forma de semicírculo de 9.5 mm de espesor, con un canal a lo largo del perímetro que alberga y alinea a un cable de acero de 2 mm de diámetro, de acuerdo con los avances previos del diseño del dispositivo. La elección de transmisión por cable de acero satisface la necesidad de que la transmisión sea rígida y continua desde los motores hasta el efector final. En segundo lugar, los motores requieren un acoplamiento de abrazadera por causa del diseño de los ejes de los motores, que son completamente lisos y no poseen chavetero. Se recomienda, por facilidad de ensamble, utilizar un acoplamiento en dos piezas. En seguida, el acoplamiento sujeta a un eje con polea, los cuales van unidos con un asiento y un tornillo prisionero. El cable de acero que conecta la polea con la Luna va embobinado en la polea, consiguiendo la rigidez a través de la fricción.



*Ilustración 24. Ensamble del cable de acero (azul) en las poleas de transmisión.*

### Tolerancias de diseño

Las tolerancias de diseño se aplican principalmente en los ejes de las poleas y en las poleas, por el requerimiento de la rigidez de la transmisión. La tolerancia de los ejes replica la tolerancia de diseño de los ejes del motor, por lo que es un calco traducido a pulgadas. A partir de ésta, se establece la tolerancia del asiento de la polea que alberga al eje, buscando un ajuste de transición que otorgue rigidez y facilidad de ensamble; la rigidez principalmente proviene del tornillo prisionero, sin embargo, el ajuste de transición aporta un intervalo de tolerancias que virtualmente no permite juego.

En la siguiente sección, se presentan algunos ejemplos del cálculo de tolerancias generales y particulares.

## Ejemplos de cálculo de tolerancias

### Tolerancias generales

Para el caso de las tolerancias generales, se hizo una traducción de la norma ISO 2768-1 de las tolerancias de grado fino (*f*), de milímetros a decimales de pulgada (hasta las milésimas).

*Tabla 3. Adaptación de las tolerancias generales de la norma ISO 2768-1 (mitad izquierda) a unidades de pulgada (mitad derecha). [10]*

| Valor nominal [mm] |                    | Tolerancia [mm] | Valor nominal [in] |                    | Tolerancia [in] |
|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| De (mayor a)       | Hasta (incluyendo) | <i>f</i>        | De (mayor a)       | Hasta (incluyendo) | <i>f</i>        |
| 0.5                | 3                  | ±0.05           | 0.020              | 0.118              | ±0.002          |
| 3                  | 6                  | ±0.05           | 0.118              | 0.236              | ±0.002          |
| 6                  | 30                 | ±0.1            | 0.236              | 1.181              | ±0.004          |
| 30                 | 120                | ±0.15           | 1.181              | 4.724              | ±0.006          |
| 120                | 400                | ±0.2            | 4.724              | 15.748             | ±0.008          |
| 400                | 1000               | ±0.3            | 15.748             | 39.370             | ±0.012          |

### Tolerancias particulares

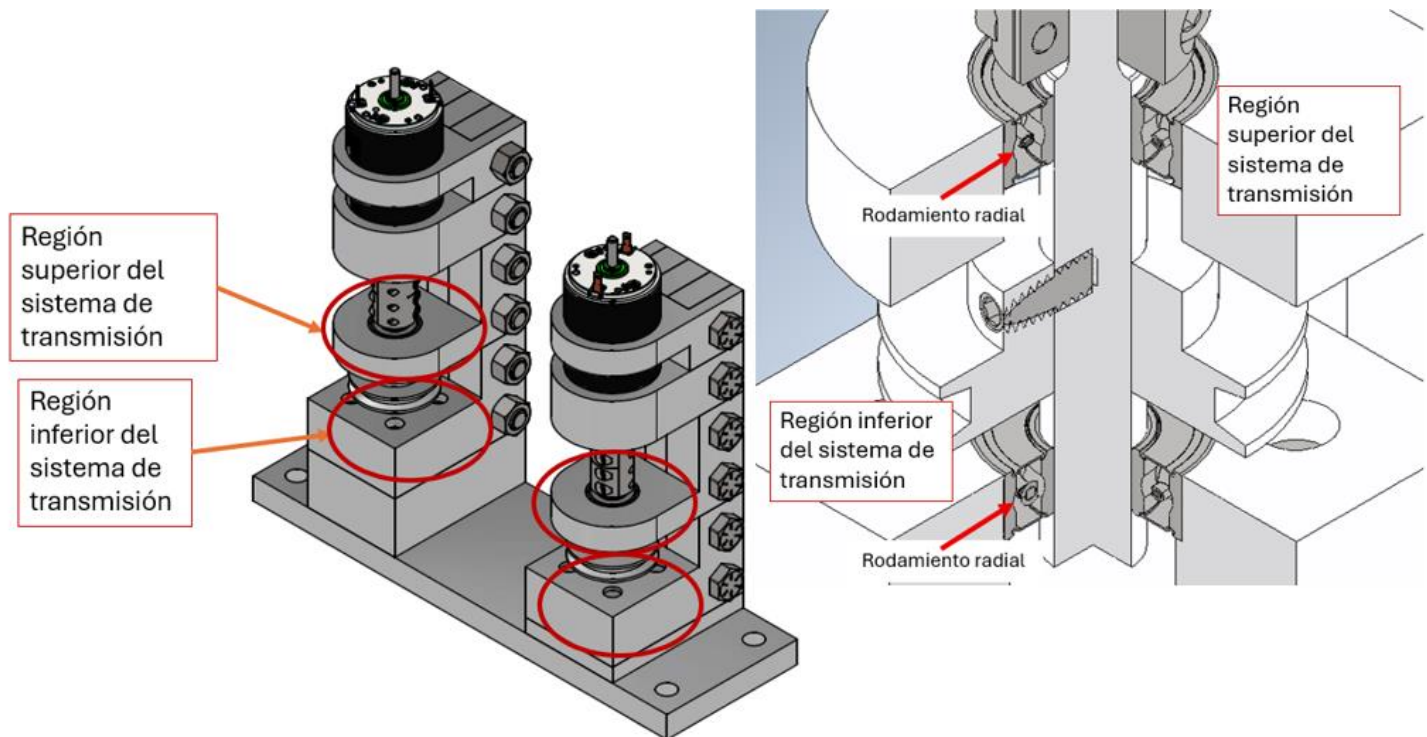
Asignar tolerancias particulares a las piezas es un proceso en el que intervienen tanto la función de los elementos ensamblados como el proceso de ensamble. Por ejemplo, los asientos y los ejes que interactúan con un rodamiento.

La norma ANSI/ABMA 7-1995 da lineamientos para elegir el tipo de ajuste que requiere un rodamiento en su asiento como en su eje. A veces, por motivos de facilidad de ensamble, se omiten los lineamientos, siempre y cuando la función y rendimiento del rodamiento no se vean comprometidos. En este sentido, se asignan los tipos de ajustes a las piezas en las regiones en las que interactúan las piezas y materiales, de acuerdo con la norma ANSI B4.1-1967. Los ajustes pueden ser de tipo de juego holgado (*running clearance fits*, RC) hasta ajustes de poca o mucha interferencia (*drive fits* o *force fits*, FN), o ajustes intermedios de transición entre juego e interferencia (*locational transition fits*, LT).

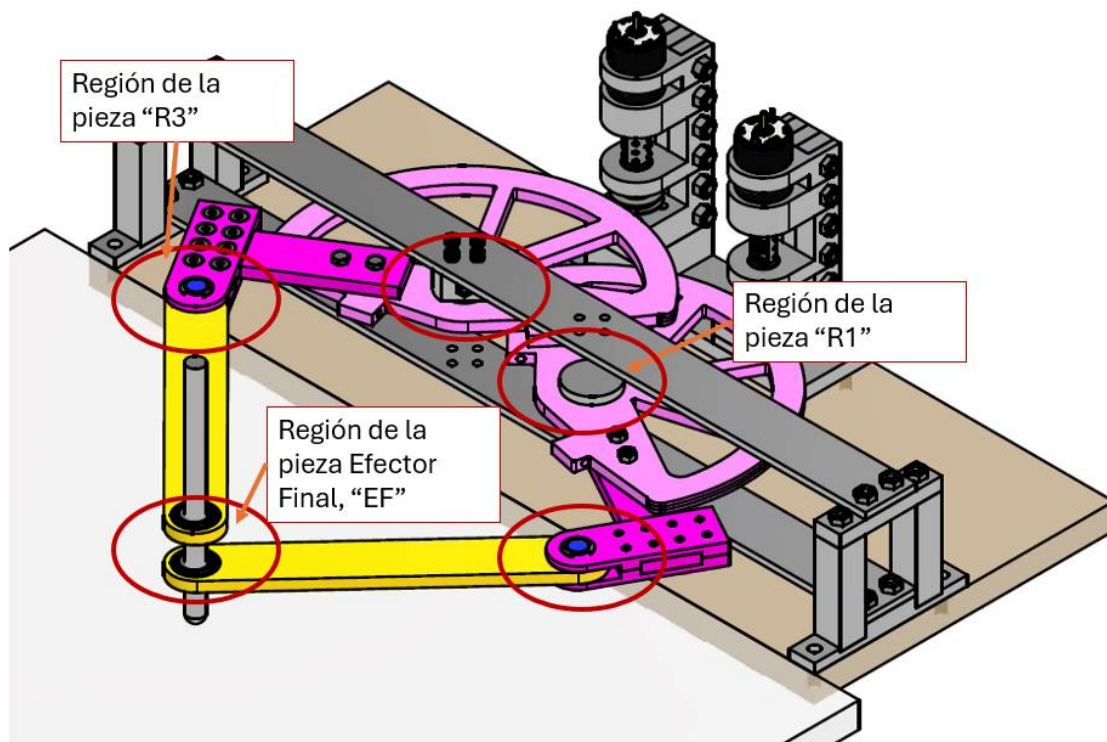
Cuando es necesario, como en este caso, los ajustes y límites se adaptan no a las necesidades de operación, las cuales no son particularmente importantes en este diseño ya que las cargas y velocidades no son elevadas y el riesgo de fatiga y desgaste es bajo, sino a las necesidades del proceso de ensamble, como la necesidad de que un componente se mantenga en posición por medio del ajuste y la fricción. Esta necesidad surge en los asientos donde un ajuste más holgado provocaría deslizamiento o desensamble no deseado, como en los asientos de la barra más larga del mecanismo.

Como ejemplo, a pesar de que las juntas de las piezas R1, R3 y EF son muy similares tanto en dimensiones como en funcionamiento operativo, el ensamble de las juntas y sus respectivos rodamientos involucra más piezas en la región de las juntas R1 y por tanto es más complicado el ensamble de múltiples piezas con necesidades distintas. Por esta razón, en la tabla 4 se observa que las juntas de la pieza R1 tienen ajustes diferentes (de menos fuerza necesaria para aplicarse) a las de las juntas de las piezas R3 y EF. Esto facilita el ensamble de algunas piezas y componentes cuando no resulta sencillo aplicar las fuerzas necesarias para su ensamble y ajuste.

A continuación, se indican las regiones donde fueron aplicados los ajustes referidos en las tablas 4 y 5.



*Ilustración 25. Regiones referidas en las tablas de definición de ajustes y tolerancias 4 y 5 del sistema de transmisión.*



*Ilustración 26. Regiones referidas en las tablas de definición de ajustes y tolerancias 4 y 5 del mecanismo del robot.*

Tabla 4. Definición de ajustes para algunos componentes del mecanismo.

| Localización<br>(región)            | Valor<br>corresponde a | Tipo de ajuste | Diámetro nominal | Límites de ajuste (milésimas<br>de pulgada) |                 |                      |
|-------------------------------------|------------------------|----------------|------------------|---------------------------------------------|-----------------|----------------------|
|                                     |                        |                |                  | +: juego<br>-: interferencia                |                 |                      |
|                                     |                        |                |                  | Más<br>positivo                             | Más<br>negativo | Diferencia<br>total* |
| Transmisión<br>(región<br>inferior) | Ejes                   | LC1            | .375             | +.65                                        | +0              | .65                  |
|                                     | Asientos               | LN1            | .875             | -0                                          | -1.0            | 1.0                  |
| Transmisión<br>(región<br>superior) | Ejes                   | LC1            | .375             | +.65                                        | +0              | .65                  |
|                                     | Asientos               | FN1            | .875             | -.2                                         | -1.1            | .9                   |
| R1 (juntas)                         | Ejes                   | LT5**          | .625             | +.2                                         | -.9             | 1.1                  |
|                                     | Asientos               | LC1**          | 1.375            | +1.0                                        | +0              | 1.0                  |
| R3 (juntas)                         | Ejes                   | LT3            | .625             | +.6                                         | -.5             | 1.1                  |
|                                     | Asientos               | FN1**          | 1.375            | -.3                                         | -1.3            | 1.0                  |
| EF (juntas)                         | Ejes                   | LT3            | .625             | +.6                                         | -.5             | 1.1                  |
|                                     | Asientos               | FN1**          | 1.375            | -.3                                         | -1.3            | 1.0                  |

Tabla 5. Límites de las tolerancias dimensionales de las piezas para los ajustes definidos.

| Color | Significado                           |
|-------|---------------------------------------|
|       | Juego ( <i>clearance</i> )            |
|       | Interferencia ( <i>interference</i> ) |
|       | Condición de mínimo material          |
|       | Condición de máximo material          |

\* Los límites de las tolerancias pueden ser desplazados hacia arriba o hacia abajo en igual cantidad para lograr el mismo tipo de ajuste, de acuerdo con la norma ANSI B4.1-1967.

\*\* Siguen los lineamientos de diseño de la norma ANSI/ABMA 7-1995. Los valores que no siguen estos lineamientos es por necesidades específicas del ensamble.

| Subsistema<br>o región    | Pieza                | Diámetro<br>nominal | Límites<br>tolerancias de<br>rodamiento<br>ABEC-1<br>(milésimas de<br>pulgada) |          | Límites de ajuste<br>(milésimas de<br>pulgada)<br>+: juego<br>-: interferencia |                 | Límites reales de<br>pieza<br>(milésimas de<br>pulgada) |             |
|---------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------|-------------|
|                           |                      |                     | Superior                                                                       | Inferior | Más<br>positivo                                                                | Más<br>negativo | Superior                                                | Inferior    |
| Transmisión<br>(inferior) | (Ejes) P_1           | <b>.375</b>         | +0.0                                                                           | -0.3     | +0.65                                                                          | +0.0            | <b>-0.3</b>                                             | <b>-0.7</b> |
|                           | (Asientos)<br>S2_2_2 | <b>.875</b>         | +0.0                                                                           | -0.4     | -0.0                                                                           | -1.0            | <b>-0.4</b>                                             | <b>-1.0</b> |
| Transmisión<br>(superior) | (Ejes) P_1           | <b>.375</b>         | +0.0                                                                           | -0.3     | +0.65                                                                          | +0.0            | <b>-0.3</b>                                             | <b>-0.7</b> |
|                           | (Asientos)<br>S2_3   | <b>.875</b>         | +0.0                                                                           | -0.4     | -0.2                                                                           | -1.1            | <b>-0.6</b>                                             | <b>-1.1</b> |
| R1                        | (Ejes)<br>S1_5       | <b>.625</b>         | +0.0                                                                           | -0.4     | +0.2                                                                           | -0.9            | <b>+0.5</b>                                             | <b>-0.2</b> |
|                           | (Asientos)<br>R1     | <b>1.375</b>        | +0.0                                                                           | -0.5     | +1.0                                                                           | +0.0            | <b>+0.5</b>                                             | <b>+0.0</b> |
| R3                        | (Ejes) R3            | <b>.625</b>         | +0.0                                                                           | -0.4     | +0.6                                                                           | -0.5            | <b>+0.1</b>                                             | <b>-0.6</b> |
|                           | (Asientos)<br>R4     | <b>1.375</b>        | +0.0                                                                           | -0.5     | -0.3                                                                           | -1.3            | <b>-0.8</b>                                             | <b>-1.3</b> |
| EF                        | (Ejes)<br>EF_1       | <b>.625</b>         | +0.0                                                                           | -0.4     | +0.6                                                                           | -0.5            | <b>+0.1</b>                                             | <b>-0.6</b> |
|                           | (Asientos)<br>R4     | <b>1.375</b>        | +0.0                                                                           | -0.5     | -0.3                                                                           | -1.3            | <b>-0.8</b>                                             | <b>-1.3</b> |

Como se puede observar en la tabla 4, el cálculo de los límites de las tolerancias se basa en las tolerancias comerciales de la clasificación de rodamientos radiales ABEC-1, a partir de las cuales se definen las tolerancias de fabricación de los asientos y los ejes para lograr los ajustes definidos con anterioridad.

La indicación de las tolerancias, a partir de los límites reales calculados, se realiza de la siguiente forma en los dibujos técnicos elaborados para su fabricación e inspección:

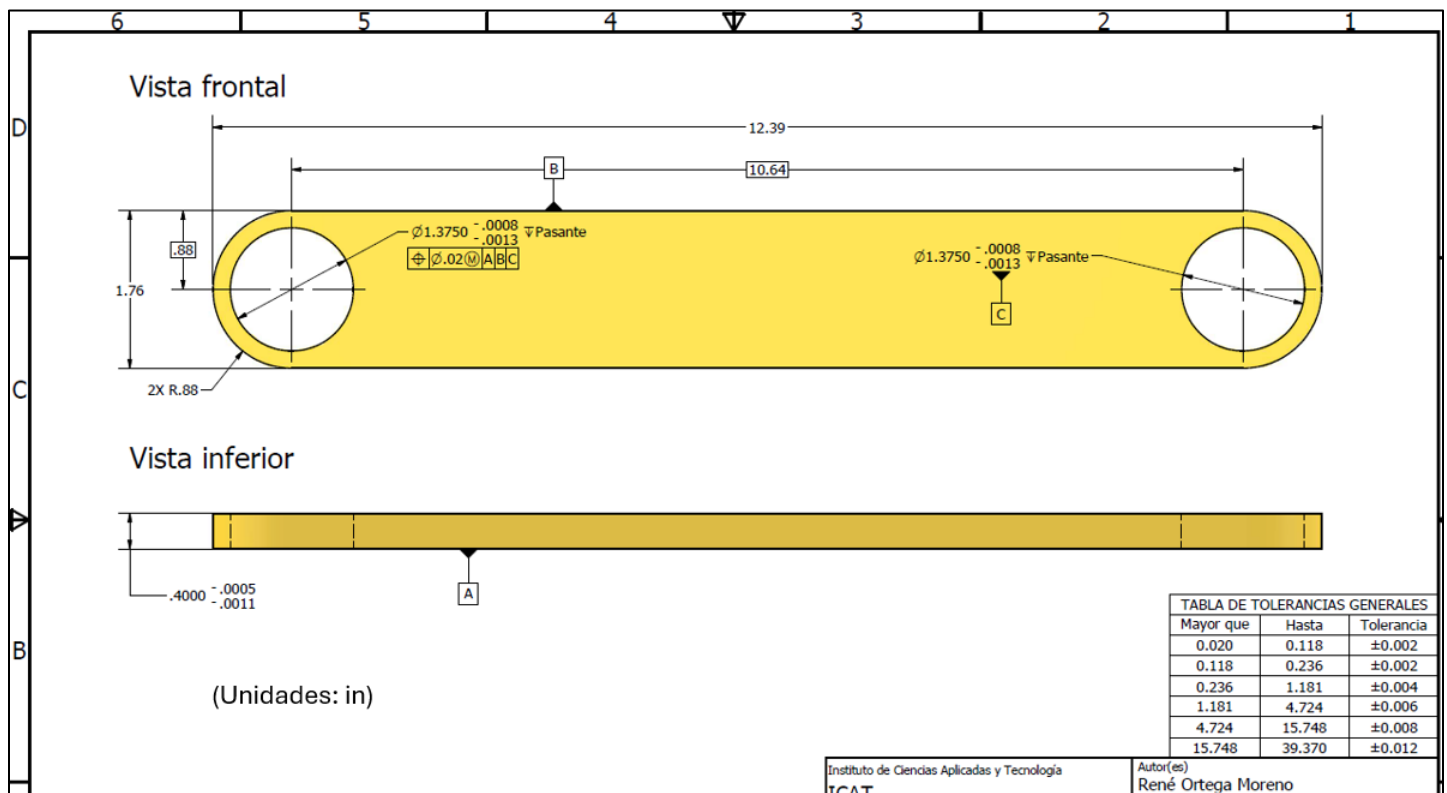


Figura 11. Ejemplo de la indicación de dimensiones y tolerancias en los dibujos técnicos de las piezas.  
Segmento del plano de fabricación de la pieza “R4”. Unidades en pulgadas.

## Conclusiones

Se alcanzaron los objetivos del trabajo al finalizar la elaboración de los planos tanto de fabricación como de ensamble, con lo que se concretan las fases de diseño mecánico y documentación del diseño bajo las normas aplicables.

Del primer punto, función y requisitos de usuario, se hizo el diseño de las piezas para satisfacer las necesidades de movilidad del dispositivo (parte de la función). Se realizó el diseño para manufactura y ensamble, con lo que al mismo tiempo se definió y documentó el material de fabricación, se redujo el peso de la estructura y del mecanismo a través del diseño geométrico y del material, su tamaño con el análisis hecho por Morales (2021), se redujo la necesidad de mantenimiento y el diseño considera la facilidad del ensamblaje. Se realizaron pruebas de análisis de esfuerzos para obtener una estimación de la naturaleza de las cargas que es posible soportar durante la operación del dispositivo, a partir de lo cual se calculó un factor de seguridad de 1.010 que indica que el efector final debe estar apoyado a tierra con tal de evitar cargas normales a los planos de trabajo que podrían dañar el dispositivo. En caso de requerir mayor resistencia mecánica, se debe pensar en un rediseño y otra configuración de los eslabones. De manera paralela, es necesario definir, con ayuda de profesionales en rehabilitación, las trayectorias de los ejercicios y sus parámetros (posiciones, velocidades, potencia, cargas) para la caracterización de la potencia mecánica involucrada, las cargas efectivas en la operación, además de definir las características antropométricas y ergonómicas del

Tabla 6. Lista de requisitos satisfechos tras la realización de este trabajo. Aquellos marcados con asterisco requieren desarrollo ulterior.

| Requisito                                      |   |
|------------------------------------------------|---|
| Primer punto: función y requisitos del usuario |   |
| Potencia de los actuadores                     |   |
| Tamaño                                         | ✓ |
| Peso                                           | ✓ |
| Seguridad                                      | * |
| Mantenimiento                                  | ✓ |
| Ensamble                                       | ✓ |
| Operación                                      | * |
| Ergonomía                                      | * |
| Costo                                          |   |
| Segundo punto: propiedades de los materiales   |   |
| Esfuerzo de cedencia                           | ✓ |
| Elasticidad                                    | ✓ |
| Dureza                                         | ✓ |
| Densidad                                       | ✓ |
| Resistencia a corrosión                        | ✓ |
| Capacidad de procesamiento                     | ✓ |
| Disponibilidad en el mercado                   | ✓ |
| Costo                                          | ✓ |
| Tercer punto: proceso de manufactura           |   |
| Versatilidad                                   | ✓ |
| Compatibilidad                                 | ✓ |
| Acabado superficial                            | ✓ |
| Precisión                                      | ✓ |
| Costo                                          | ✓ |

efector final y en general del dispositivo. Una vez que se definan las características del proceso de rehabilitación y la antropometría, se podrá estimar una presentación final del producto y proyectar un costo de fabricación final, incluyendo los actuadores y la interfaz del paciente.

Del segundo punto, quedó caracterizado el material estructural y el material de los elementos de unión, se determinó que los materiales son apropiados para el dispositivo y se presentó una evaluación de los costos del aluminio contra aleaciones de hierro.

Del tercer punto, se concluye que el aluminio seleccionado es muy versátil en los procesos de manufactura, por lo que se vuelve conveniente para procesar las piezas. Esto deja lugar a una mayor personalización y adaptación de los elementos del dispositivo, pudiendo aplicar virtualmente todos los procesos de manufactura para conseguir objetivos específicos de operación.

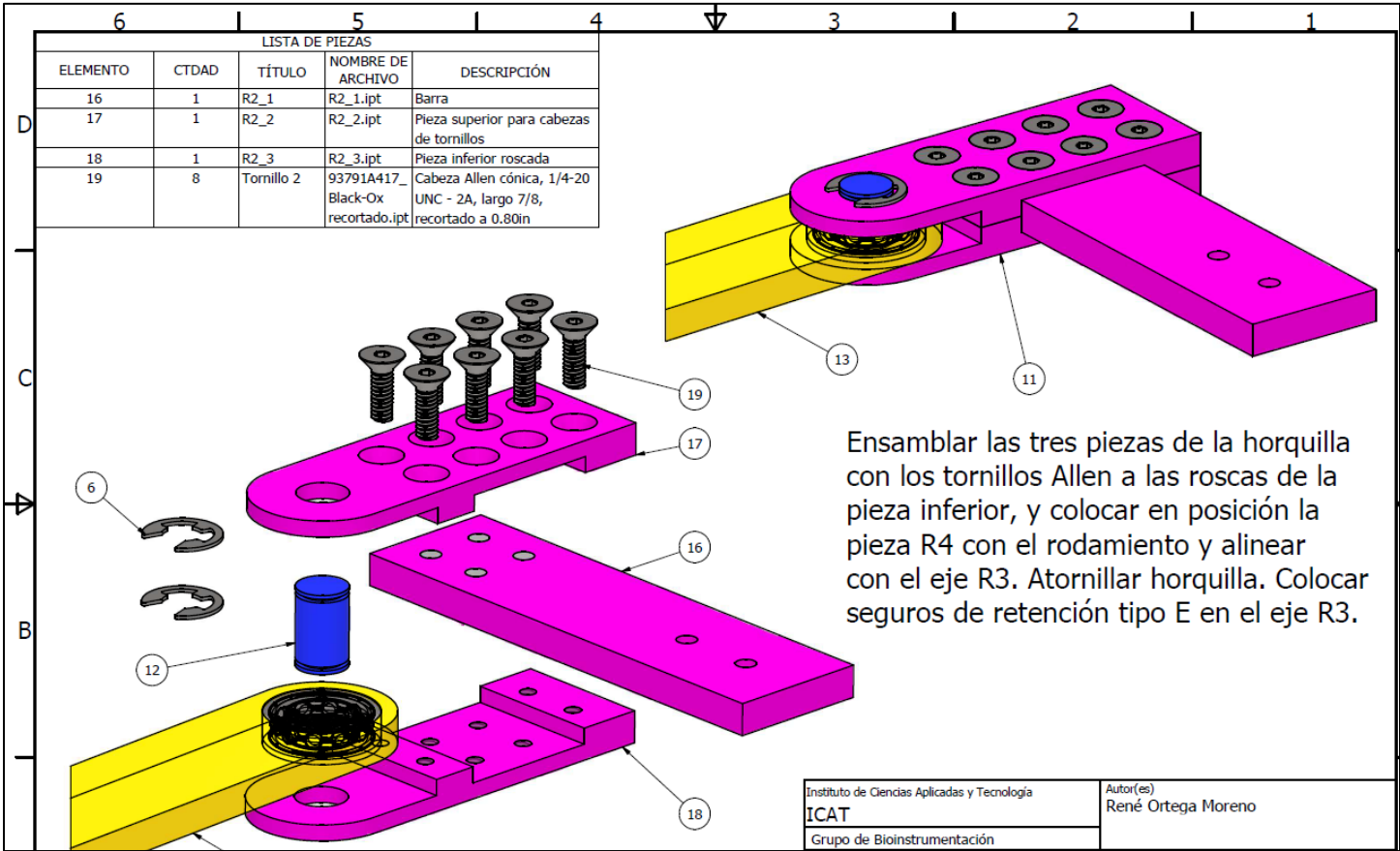


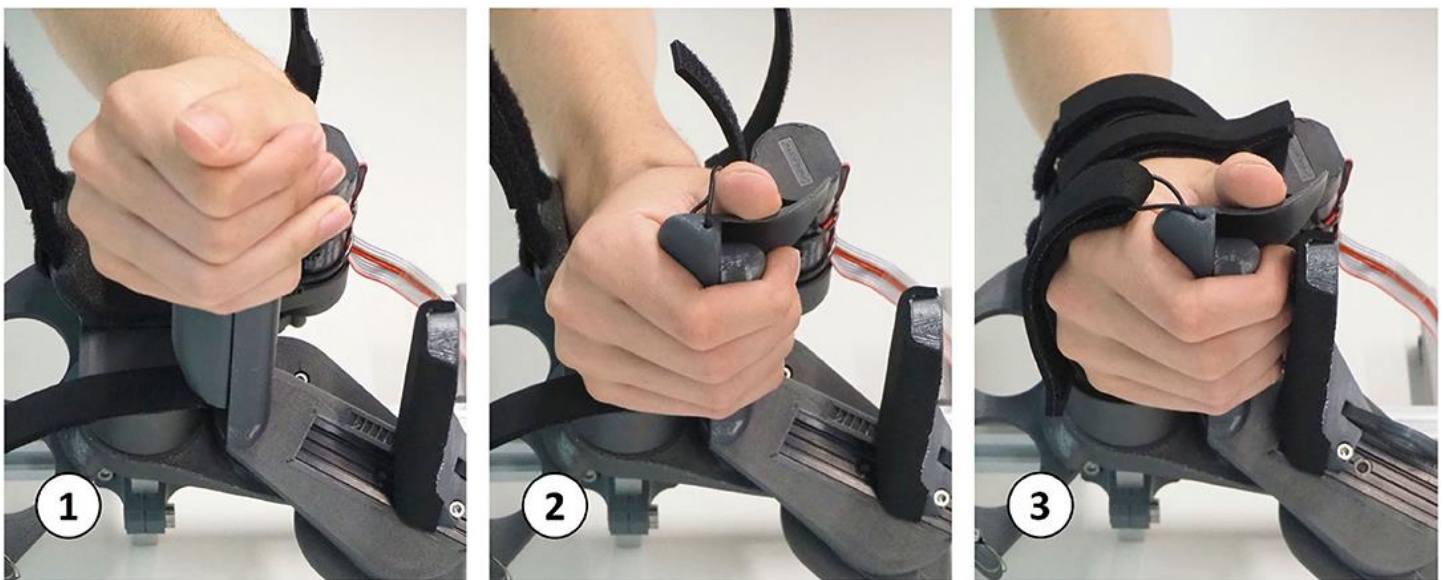
Figura 12. Ejemplo de la indicación de directrices de ensamble en los dibujos técnicos. Segmento de un plano de ensamble de algunas piezas del mecanismo del robot.

## Proyección a futuro

Con el trabajo realizado, se puede proceder a la manufactura e inspección de las piezas del robot y al ensamble. Posteriormente, es posible continuar con la implementación de los componentes electrónicos que desempeñan la función de sensado y control del dispositivo y el desarrollo de un entorno virtual.

Maciejasz (2014) indica que una de las áreas que necesita particular atención es la de sensado y control del aparato, pues los actuadores deben realizar lecturas y ejercer las cargas apropiadas durante el ejercicio del paciente. [3]

Es necesario que se conozca con exactitud el tipo de condición motriz que se va a atender por medio del dispositivo. Debe conocerse las necesidades antropométricas y ergonómicas del paciente, así como las trayectorias, velocidades y aceleraciones apropiadas que los pacientes junto con el dispositivo recorren en los ejercicios de rehabilitación. Se recomienda hacer mediciones similares a las hechas por Miguel (2019) y Morales (2021), y que se incluya en las mediciones la lectura del tiempo en cada punto recorrido, de manera que puedan conocerse las velocidades y las aceleraciones de los ejercicios, lo que llevaría a conocer más exactamente la cantidad y la naturaleza de la potencia requerida en los actuadores. Para el diseño de la interfaz del paciente con el dispositivo, es necesaria la participación de profesionales en medicina, rehabilitación, fisioterapia y diseño ergonómico y antropométrico.



*Ilustración 27. Imágenes puramente demostrativas de la forma de un mango o agarradera que forma parte de un efector final de un dispositivo de rehabilitación. De la imagen 1 a 3 se observa la colocación de la mano en torno a la agarradera y la sujeción de la mano, muñeca y antebrazo al dispositivo. Figura*

*12 de Rätz (2021). [14]*

Para la automatización del robot es necesario el trabajo de ingenieros mecánicos, mecatrónicos, eléctricos y en electrónica, en computación, profesionales de rehabilitación, que desarrollen la caracterización mecánica en cuanto a potencia requerida, el sistema de sensado y control, la programación de los algoritmos de operación del robot, etc.

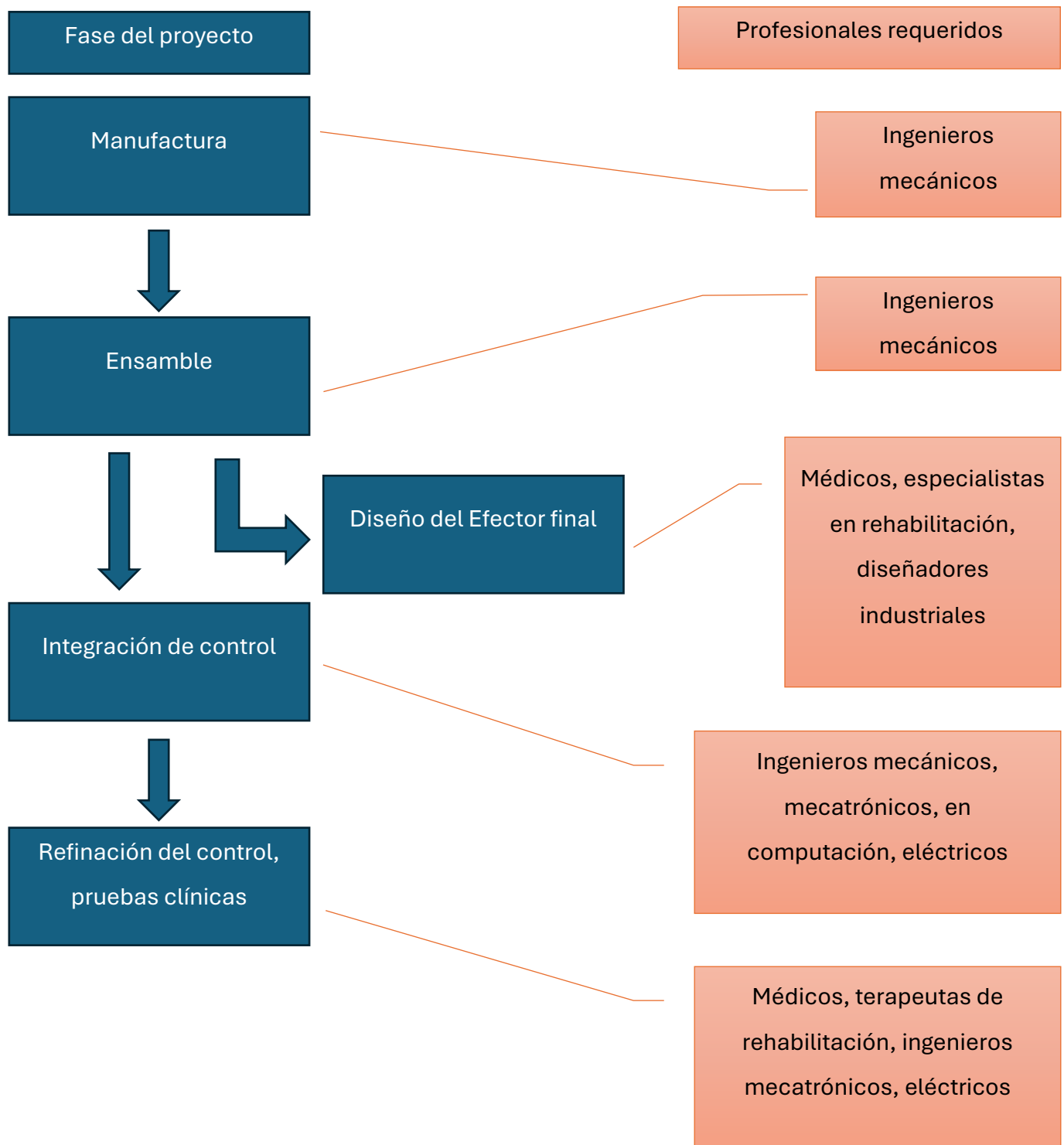


Figura 13. Fases subsecuentes del proyecto y profesionales requeridos.



## Referencias

- [1] H. M. Qassim y W. Z. Wan Hasan, “A review on upper limb rehabilitation robots”, el 1 de octubre de 2020, *MDPI AG*. doi: <https://doi.org/10.3390/app10196976>.
- [2] R. Bertani, C. Melegari, y M. C. De Cola, “Effects of Robot-Assisted Upper Limb Rehabilitation in Stroke Patients: A Systematic Review with Meta-Analysis”, *Neurological Sciences*, vol. 38, pp. 1561–1569, may 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s10072-017-2995-5>.
- [3] P. Maciejasz, J. Eschweiler, y K. Gerlach-Hahn, “A Survey on Robotic Devices for Upper Limb Rehabilitation”, *J Neuroeng Rehabil*, vol. 11, ene. 2014, doi: <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-3>.
- [4] G. Miguel Lucario, “Diseño de una Interfaz Háptica Planar tipo Pantógrafo para Interacción en Ambientes Virtuales con Aplicaciones en Biomedicina”, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México, 2019.
- [5] L. A. Morales Bautista, “Desarrollo de un Mecanismo Paralelo de un Robot de Dos Grados de Libertad para Rehabilitación de Extremidades Superiores”, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México, 2021.
- [6] P. J. Blau *et al.*, *Metals Handbook*, Segunda edición. ASM International, 1998.
- [7] ASME, “ASME Y14.5-2009: Dimensioning and Tolerancing”, mar. 2009.
- [8] R. Nunes, J. H. Adams, y J. C. Bean, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, vol. 2. ASM International, 1990.
- [9] McMaster-Carr, “Raw Materials”. Consultado: el 16 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mcmaster.com/products/metals/>
- [10] ISO, “ISO 2768-1: General Tolerances - Part 1: Tolerances for Linear and Angular Dimensions without Individual Tolerance Indications”, nov. 1989.
- [11] ASME, “ANSI B4.1-1967: Preferred Limits and Fits for Cylindrical Parts”, Nueva York, sep. 1967.
- [12] ANSI y ABMA, “ANSI/ABMA Std. 7-1995: Shaft and Housing Fits for Metric Radial Ball and Roller Bearings (Except Tapered Roller Bearings) Conforming to Basic Boundary Plan”, 1995.
- [13] ASME, “ASME B18.2.1-2010: Square, Hex, Heavy Hex, and Askew Head Bolts and Hex, Heavy Hex, Hex Flange, Lobed Head, and Lag Screws (Inch Series)”, 2010.

- [14] R. Rätz, F. Conti, R. M. Müri, y L. Marchal-Crespo, “A Novel Clinical-Driven Design for Robotic Hand Rehabilitation: Combining Sensory Training, Effortless Setup, and Large Range of Motion in a Palmar Device”, *Front Neurorobot*, vol. 15, dic. 2021, doi: <https://doi.org/10.3389/fnbot.2021.748196>.