



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Propuesta de diseño de un brazo-antebrazo  
para un robot de configuración tipo SCARA  
con rodamientos magnéticos para su  
implementación en cuartos limpios**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Mecánica**

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

Renata Acevedo Costas

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Leopoldo Adrián González González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

## Agradecimientos

A todos los profesores y profesoras que estuvieron presentes en mi formación y significaron una guía para mí. Gracias por toda su dedicación y amor por la docencia.

A mi asesor, Leopoldo. Muchas gracias por ser mi profesor y mentor en este camino, por tenerme paciencia pero sobretodo por confiar en mí. Es usted para mí un ejemplo a seguir por la persona que es: comprometida, trabajadora, honesta y siempre dispuesta a hacer lo mejor por sus estudiantes.

A mi jurado, el Dr. Adrián Espinosa, el Maestro Gabriel López, el Maestro Epifanio Vargas y la Maestra Maricarmen Guillén, por otorgarme su tiempo con una lectura minuciosa y por sus valiosos comentarios y sugerencias que contribuyeron a la mejora del trabajo de tesis.

A la maestra María Teresa Peñuñuri. Por ser mi tutora y amiga durante toda la carrera, proporcionarme su ayuda y siempre escucharme y aconsejarme. Gracias por ofrecerme siempre un espacio y compartir gratos momentos.

Al Dr. Alberto Caballero Ruiz y a mis compañeros Luis Bautista, Emmanuel González y Walter Torrestiana del grupo de trabajo del Dr. Leopoldo González por haber compartido conmigo conocimientos y experiencias que aportaron a mi trabajo de tesis y a mi persona.

## Dedicatorias

A mis papás, con todo mi amor, por siempre ver por mi bienestar, educación, salud y felicidad. Infinitas gracias por siempre creer en mí y apoyarme en todo momento, y enseñarme que la mejor recompensa de un esfuerzo es la satisfacción de haberlo hecho bien.

A mis amigos de la facultad, que hicieron de ella una segunda casa. Especialmente a Dani, por siempre sacarme sonrisas y estar, aunque nuestros caminos sean distintos; a Roberto, agradezco haber compartido tantos momentos de estudio y tu amistad siempre me levantó en momentos complicados. A Mafer, Cabba, Daniella y David, por enseñarme que personas tan distintas pueden crear lazos tan fuertes. A Bere, te agradezco por la amistad tan bonita que tenemos dentro y fuera de la cancha, por siempre cuidarme, tomarme en cuenta y confiar en mí.

A la maestra Artemisa. Le estoy muy agradecida por toda su confianza y dedicación hacia mi persona, por sus enseñanzas, consejos y ejemplo a seguir; la estimo mucho.

A Arturo, gracias por dejarme ser, cuidarme y apoyarme en todo momento, y enseñarme que la vida se mide en momentos y no en tiempo. Muchos más por compartir.

A Rosa y a Cruz Sergio, por acogerme y proporcionarme un espacio para crecer. Aprecio mucho su amistad y los admiro por su solidaridad y dedicación para con nosotros los estudiantes.

# Contenido

<b>Introducción</b>	...9
<b>Capítulo 1.</b> Marco teórico	...11
1.1 Industria limpia	...11
1.2 Robots para cuartos limpios	...16
1.3 Robots tipo SCARA	...19
1.4 Rodamientos magnéticos	...28
<b>Capítulo 2.</b> Propuesta de diseño conceptual del brazo-antebrazo con articulaciones rotacionales que utilizan rodamientos magnéticos	...37
2.1 Antecedentes	...37
2.2 Sistemas	...38
2.3 Generación de conceptos	...39
2.4 Matriz morfológica	...47
2.5 Configuraciones obtenidas	...49
2.6 Evaluación de las configuraciones	...56
2.7 Propuesta de configuración final	...70
<b>Capítulo 3.</b> Diseño de detalle de la configuración del brazo - antebrazo con articulaciones rotacionales que utilizan rodamientos magnéticos	...77
3.1 Generalidades sobre el diseño	...77
3.2 Selección de la transmisión	...86
3.3 Diseño para ensamble	...93
3.4 Diseño para manufactura	...141
<b>Capítulo 4.</b> Resultados	...161
4.1 Secuencia de movimiento	...161
4.2 Simulación de análisis de cargas por elemento finito	...162
<b>Conclusiones y trabajo futuro</b>	...171
<b>Referencias</b>	...175
<b>Apéndice</b>	...187

# Introducción

El presente trabajo tiene como objetivo realizar una propuesta de diseño de un brazo-antebrazo para un robot de configuración tipo SCARA (*Selective Compliant Assembly Robot Arm* o *Selective Compliant Articulated Robot Arm*) que utiliza articulaciones rotacionales que funcionan a través de rodamientos magnéticos radiales, para su implementación en cuartos limpios.

En la industria de la fabricación de componentes electrónicos, en particular en la utilización de discos de silicio para la construcción de microcircuitos, existe una tendencia a miniaturizar los circuitos electrónicos. Las partículas existentes en el ambiente del cuarto pueden llegar a ser del mismo tamaño que las pistas de los circuitos y perjudicar su funcionamiento. Es por esto que es necesario controlar la limpieza de la sala o el cuarto donde se producen estos componentes para minimizar la existencia de estas partículas y no exista una contaminación en el cuarto limpio.

En este tipo de industria es cada vez más común el uso de robots que reemplazan las funciones del ser humano para obtener una mayor precisión y rapidez en la fabricación de los componentes, pero ello no implica aún un nivel de limpieza adecuado ya que los mecanismos que necesita el robot para su funcionamiento desprenden partículas contaminantes debido a la fricción entre sus componentes, que pueden salir del robot mismo y contaminar la sala donde se fabrican los circuitos electrónicos. Debido a esto, es necesario disminuir la cantidad de partículas generadas dentro de los robots o evitar la salida de éstas al cuarto limpio. En la actualidad existen robots que cuentan con carcasas y sellos que evitan la salida de partículas contaminantes, sistemas de vacío para la extracción de las mismas, materiales resistentes al desgaste y cableado interno; también se ha adaptado la configuración de los robots para que el disco de silicio que transporten se encuentre siempre por arriba de cualquier componente del robot.

En la presente propuesta de diseño se han contemplado todas estas características además de que se sugiere la implementación de rodamientos magnéticos radiales para evitar la generación de partículas contaminantes, para eliminar la fricción que existe al utilizar rodamientos convencionales en las articulaciones del robot. La propuesta presentada en este trabajo toma como referencia un diseño previo de un robot para transportar discos de silicio <sup>1</sup>, y su desarrollo forma parte de proyecto de un equipo de trabajo que retoma el estudio de un robot tipo SCARA para cuartos limpios con la implementación de rodamientos magnéticos. En particular, la propuesta de diseño aquí presente está centrada en el brazo y en el antebrazo.

---

<sup>1</sup>González González, L. A. (2006). *Diseño y manufactura de un robot para transportar discos de silicio y propuesta experimental para evaluar el nivel de emisión de partículas contaminantes en una de sus articulaciones rotacionales (Vol. 1)*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]

En el primer capítulo se presenta una revisión bibliográfica de la industria de los cuartos limpios, de las configuraciones y características de los robots tipo SCARA ya existentes y de los utilizados en cuartos limpios, además del principio de funcionamiento y aplicaciones de los rodamientos magnéticos.

En el segundo capítulo se realiza un análisis de diversos diseños conceptuales del brazo-antebrazo para un robot tipo SCARA contemplando la directriz de ser utilizado en la industria limpia, considerando la inserción de los rodamientos magnéticos. Para ello se utilizó como base la metodología de diseño de Ulrich y Eppinger.

En el capítulo tercero se detalla la propuesta de diseño final junto con la selección de los materiales y la sugerencia de los procesos de ensamble y manufactura considerando su aplicación en la industria limpia. El diseño se realizó tomando en cuenta los antecedentes expuestos en el primer capítulo junto con las bases expuestas en el trabajo de doctorado mencionado en el pie de página. El alcance del presente trabajo se acotó para un desarrollo más detallado, tomando en cuenta solamente uno de los sistemas analizados en el capítulo 2.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados de la secuencia de movimiento que es posible hacer con la propuesta de diseño del brazo-antebrazo; además del análisis estático lineal bajo condiciones de trabajo con el objetivo de estudiar el desplazamiento del sistema completo, específicamente en el punto del antebrazo donde se ensamble un efector para sostener la oblea de silicio.

El proyecto del que forma parte este trabajo, tiene como objetivo construir un robot tipo SCARA para cuartos limpios para la industria microelectrónica que contenga en sus articulaciones rodamientos magnéticos fabricados en el grupo de trabajo, los cuales, en la actualidad, no son viables debido a su tamaño. El alcance de este proyecto puede estar orientado, con las respectivas adaptaciones, hacia su implementación en áreas distintas a la microelectrónica que requieran un ambiente controlado en cuanto a la limpieza.

# Capítulo 1

## Marco teórico

### 1.1 Industria Limpia

*¿Qué es?*

La industria limpia se refiere al conjunto de instalaciones en las cuales, la existencia de partículas pequeñas puede afectar negativamente un proceso o las actividades que se lleven a cabo en ella. Este tipo de industria es cada vez más común en sectores de investigación o a nivel de producción, en las cuales se necesita un ambiente controlado de partículas externas, de manera que se pueda minimizar la inserción, generación o retención de éstas en el interior del cuarto o habitación donde se esté trabajando, garantizando una limpieza máxima.

Estas habitaciones son llamadas salas blancas o cuartos limpios, los cuales son instalaciones que se componen de una o varias salas con niveles de limpieza muy elevados. Esto se logra controlando variables climáticas como son temperatura, humedad, presión, flujo de aire en un espacio cerrado, además del tipo de filtros utilizados. Es necesario que los servicios, las acciones del personal y el equipo que opera dentro de estos cuartos, estén diseñados, construidos e instalados para la no generación de partículas, e inclusive, en algunos casos, a nivel biológico, cumpliendo los estándares internacionales de control sanitario que más adelante se mencionan.

Los cuartos limpios deben presentar alrededor de 20 a 60 cambios de aire por hora; a diferencia de otros lugares que igualmente deben estar ventilados, como son oficinas, almacenes, talleres de pintura, etcétera, presentando de 2 a 10 cambios de aire por hora [3]. En la figura 1.1.1 se observa un ejemplo de un cuarto limpio.



Figura 1.1.1 Cuarto limpio para industria farmacéutica. Obtenida de [2].

La cantidad de industrias que utilizan esta tecnología es diversa; a continuación, se enlistan algunas de ellas:

- Alimentaria.
- Cosmética.
- Electrónica.
- Bioseguridad.
- Química.
- Biotecnología.
- Formulación magistral de las farmacias.
- Terapia celular.
- Instalaciones de metrología.
- Laboratorios de investigación tecnológica.
- Lavanderías de vestuario de zona limpia.
- Industria aeroespacial.
- Automotriz.
- Otras.

En figura 1.1.2 se aprecia una clasificación más general y el porcentaje de cuartos limpios según la demanda de cada industria.

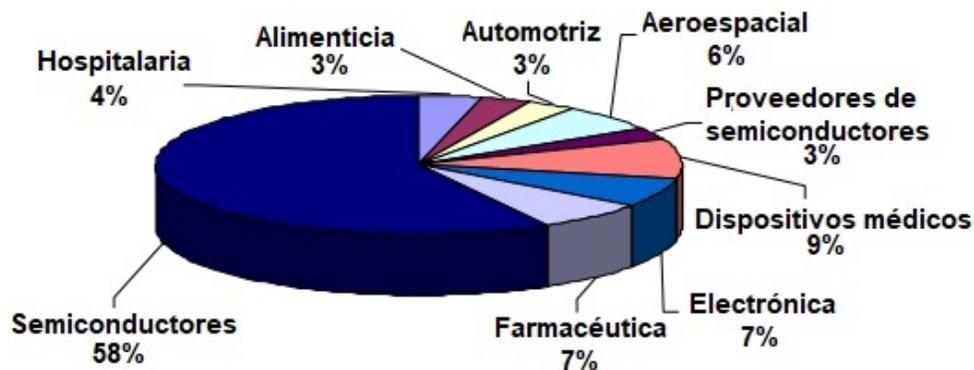


Figura 1.1.2 Distribución de cuartos limpios de acuerdo con el tipo de industria. Obtenida de [3]. Modificada para su comprensión en español.

*¿Cómo se clasifican los cuartos limpios?*

Según la *International Organization for Standardization (ISO)* y la *US Federal Standard 209E*, los cuartos limpios se clasifican según la limpieza del aire y según el tipo de flujo de aire en el interior.

Para la primera clasificación, existen tablas de las Clases ISO de cuartos limpios según el máximo número de partículas en el aire por cada metro cúbico considerando el tamaño de partículas aceptables según los requerimientos de la industria [3], y tablas según la norma US Federal Standard 209E, considerando el número de partículas en el aire por cada pie cúbico. A continuación, en la tabla 1.1.1, se desglosa el tipo de clase del cuarto

limpio según el tipo de industria, siendo la Clase 1 o ISO 3, el cuarto con mayor limpieza.

<i>Clase (ISO 14644)</i>	<i>Clase (Federal Standard 209E)</i>	<i>Tipo de industria</i>
ISO 3	1	Circuitos integrados.
ISO 4	10	Productores de semiconductores que crean circuitos integrados con anchos de líneas inferiores a 2 ( $\mu m$ ).
ISO 5	100	Manufactura de medicinas inyectables producidas de manera aséptica. También se requiere para cirugías de implante o trasplante.
ISO 6	1000	Manufactura de equipo óptico de alta calidad. Ensamble y prueba de precisión de giroscopios. Ensamble de rodamientos miniatura.
ISO 7	10000	Ensamble de equipo hidráulico o neumático, válvulas de servo-control, dispositivos de medición de tiempos y engranajes de alto grado.
ISO 8	100000	Trabajo general de óptica, ensamble de componentes electrónicos y ensamble hidráulico y neumático.

Tabla 1.1.1 Clases de cuartos limpios aplicables a la industria según US Federal Standard 209E e ISO 14644 [3] y [4].

Para la segunda clasificación (según el flujo de aire), se consideran dos tipos de cuartos:

a) Cuartos de flujo de aire unidireccional: este tipo de flujo es laminar (con velocidades de alrededor de 0.203 a 0.457m/s), y se utiliza cuando se requieren bajas concentraciones de partículas o bacterias en el aire; por ejemplo, clases 1, 10 y 100. El sentido del flujo puede ser vertical u horizontal pero siempre debe ser en una sola dirección. Esta clase de cuartos limpios, dependiendo de la industria, pueden presentar de 240 a 540 cambios de aire por hora [5].

b) Cuartos de flujo de aire turbulento o no unidireccional: las velocidades de este flujo varían y no es un flujo paralelo; presenta una circulación de múltiples pasos por lo que no es un flujo laminar. Se utiliza este tipo de flujo o ambos (mixto) para cuartos de clase 1000, 10000 y 100000, con velocidades alrededor de 0.005 a 0.203m/s. Para esta clase de cuartos limpios, dependiendo de la industria, pueden presentar de 5 a 240 cambios

de aire por hora [5].

En la figura 1.1.3 se aprecia el contraste entre el flujo laminar y uno turbulento en cuartos limpios.

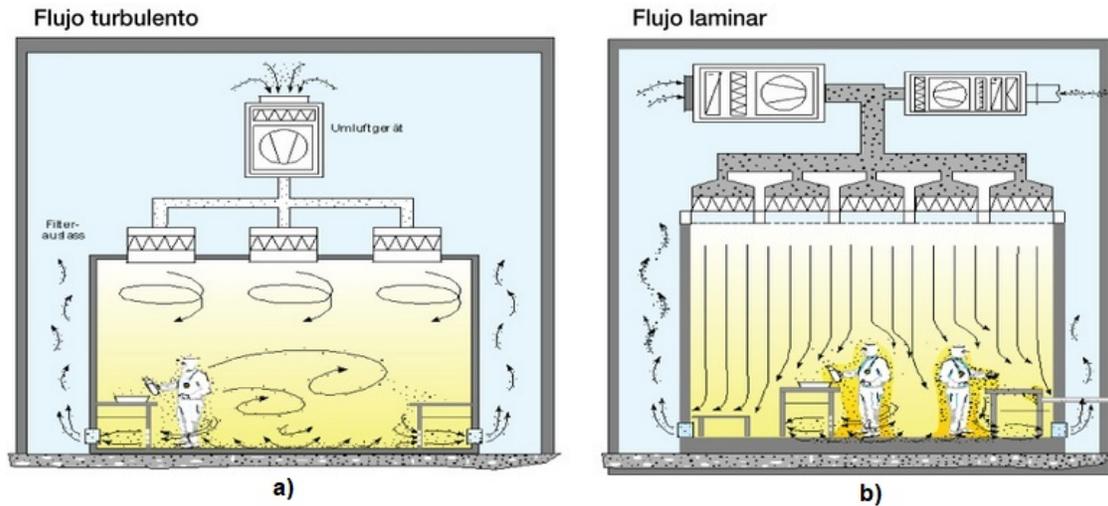


Figura 1.1.3 Líneas de flujo no unidireccional (a) y unidireccional (b) en cuartos limpios. Obtenida de [9].

En particular, la norma ISO 14644 tiene otros once estándares de cuartos limpios para un mayor detalle: ISO 14644-1 (clasificación de la limpieza del aire), ISO 14644-2 (especificaciones para los ensayos), ISO 14644-3 (métodos para evaluar y medir cuartos limpios y asociados a ambientes controlados), ISO 14644-4 (diseño y construcción), ISO 14644-5 (operaciones de salas limpias), ISO 14644-6 (términos, definiciones y unidades), ISO 14644-7 (dispositivos limpios mejorados), ISO 14644-8 (contaminación molecular), ISO 14644-9 (clasificación de la limpieza de superficies), ISO 14644-10 (contaminación química) y la ISO 14644-12 (clasificación por contaminación de nanopartículas). Para fines de este trabajo, se tomará en cuenta solamente la **ISO 14644-1**, y más adelante se especifican tamaños de partículas existentes en los cuartos usados para la industria electrónica.

El control de partículas suspendidas en el ambiente no es nuevo, ya que ha sido utilizado en quirófanos de hospitales para evitar la contaminación en laboratorios, en los pacientes y en el equipo que se utiliza. Así como las partículas pueden provocar infecciones o pueden contaminar un proceso farmacéutico, el control de partículas en líneas de ensamblaje de componentes electrónicos (fabricación de semiconductores, de discos y de pantallas, así como investigación y desarrollo de nuevos productos) es indispensable.

Los microcircuitos tienen rasgos tan pequeños que pueden llegar a medir unos cuantos nanómetros. Por la escala tan pequeña que tienen, los microcircuitos pueden ser gravemente afectados durante su fabricación y perjudicar el desempeño de todo el dispositivo debido a las partículas que se encuentran en el medio ambiente (Pedroza, 2012, pp 87-92).

Inclusive, si las partículas son del tamaño de las pistas de los circuitos impresos o más grandes, pueden llegar a hacer contacto entre dos de ellas y afectar seriamente el funcionamiento del circuito integrado.

En la figura 1.1.4 se muestra un cuarto limpio utilizado en la industria de la electrónica:



Figura 1.1.4 Cuarto limpio para la fabricación de circuitos integrados (Departamento de Microelectrónica BUAP). Obtenida de [7].

El nivel de cuartos limpios que se utilizan para la industria de la electrónica son la Clase ISO 3 y 4, que corresponden a la Clase 1 y 10 según la Federal Standard 209E.

Específicamente para las clases ISO 3 y 4, la cantidad de partículas por metro cúbico según el tamaño de partícula es la mostrada en la Tabla 1.1.2.

<i>Clase</i>	$0.1\mu m$	$0.2\mu m$	$0.3\mu m$	$0.5\mu m$	$1\mu m$
ISO 3	1,000	237	102	35	8
ISO 4	10,000	2,370	1,020	352	83

Tabla 1.1.2 Clases de limpieza dado el número de partículas en el aire (por metro cúbico) según la norma ISO 14644-1. Obtenida de [5].

Y en particular, para partículas de tamaño mayor o igual a  $0.5\mu m$ , en cuartos de clase 1, hay una partícula por cada pie cúbico, y en cuartos de clase 10, hay diez partículas por cada pie cúbico, según la norma Federal Standard 209E.

*¿Cómo funcionan los cuartos limpios o salas blancas?*

Un cuarto limpio debe tener condiciones constantes de humedad, temperatura y presión. Para garantizar esto, se utilizan sistemas especiales de ventilación y aire acondicionado.

El personal que trabaja en este tipo de cuartos debe pasar por varias exclusas, en las que se le quita el polvo del calzado y se baña en aire filtrado; además de cambiarse el calzado y colocarse el equipo de trabajo, que consta de un traje de cuerpo completo, guantes y máscara, porque una de las principales fuentes de contaminación es el maquillaje, el cabello, el perfume, e incluso células muertas de la piel. Una vez terminado el trabajo dentro del cuarto, el traje se descontamina y se esteriliza; éste está hecho de fibras sintéticas porque son más resistentes a la abrasión que las fibras naturales.

En cuanto al mobiliario dentro del cuarto, las superficies de estantes, gabinetes, mesas, sillas, armarios o equipo de trabajo, deben ser resistentes a la abrasión (no deben liberarse partículas minúsculas debido al flujo de aire proveniente de los sistemas de filtrado y ventilación). Si se utiliza equipo que tenga mecanismos con partes móviles, éstos deben estar encerrados totalmente en fundas o en carcasas que eviten la liberación de partículas.

Para estas superficies es común utilizar materiales como acero inoxidable o fibra de carbono (siempre y cuando haya sido sometida a un tratamiento térmico de grafitización); también es utilizado el polipropileno, o acero con recubrimiento de polvo epoxi, caucho con nitrilo de alta densidad, placas de acrílico, vidrio templado e inclusive revestimientos de resina de melamina, pero no se permite el recubrimiento con pinturas epóxicas para el piso. Las superficies no deben tener grietas o huecos en los que se puedan acumular partículas y posteriormente resulten en contaminación. Los equipos utilizados tampoco pueden realizar movimientos bruscos, ya que esto puede levantar partículas contaminantes que estaban en reposo o pueden afectar los patrones de flujo de aire que se tiene en la sala, sobre todo si se trata de cuartos con flujo unidireccional. La fijación de tornillos también genera partículas, así que si los equipos tienen parte móviles que se sujeten de esta manera, deben estar cubiertos. El mobiliario debe colocarse de tal manera que se prevengan espacios muertos (donde no haya flujo aéreo), por lo que el posicionamiento de los objetos dentro del cuarto debe permitir que fluya el aire alrededor de los mismos, además de tener una geometría no rebuscada para que no queden atascadas las partículas [8].

## 1.2 Robots para cuartos limpios

*¿Qué son?*

Debido a que el trabajo en un cuarto limpio implica la generación de partículas provenientes del movimiento del personal y a la entrada y salida del mismo, se han diseñado robots cuya particularidad consiste en generar un número de partículas permitido para la clase a la que pertenece el cuarto; y aunque con la utilización de robots los cuartos limpios presentan una disminución en la cantidad de partículas, el desgaste, corrosión y contacto mecánico de los elementos del robot, hacen que con el tiempo se generen partículas que pueden salir de los mecanismos y afectar la limpieza del cuarto [10]; en particular en la industria electrónica en la que los robots se utilizan básicamente para manipulación de discos de silicio y caseteras en semiconductores, el tamaño de partícu-

las generadas por estos medios puede interferir con la fabricación de los circuitos o incluso rayar las superficies conductoras.

Los robots utilizados en el sector de la industria limpia son diseñados según las necesidades de cada cuarto utilizado para realizar ciertas actividades, desde la dispensación automatizada, la alimentación de piezas, el marcado láser, el corte o incluso el empaquetado. En cuanto al funcionamiento de estos robots, no es muy distinto a los de cualquier robot convencional, excepto porque muchos tienen cubiertas selladas para evitar que las partículas se escapen del robot, y utilizan materiales como acero inoxidable, lubricantes adecuados para que no se produzcan partículas por fricción y en ocasiones, sistemas de vacío para evacuar las partículas generadas internamente [15].

Fabricantes como Yamaha Robotics y Yaskawa Electric, junto con proveedores como Panasonic, Omron, Adept Technologies, Toshiba y Universal Robotics, EPSON, Toshiba, etcétera, ven un potencial en la automatización libre de contaminantes, pero también reconocen que esto puede ser un obstáculo para todos los sectores industriales que requieren un cierto nivel de limpieza [11].

*¿Qué tipos existen?*

Dependiendo de la aplicación, los robots para cuartos limpios pueden ser cartesianos, tipo SCARA, antropomórficos o tipo delta/paralelo, pero todos deben cumplir con las certificaciones de la sala limpia. Los tipos de robots mencionados se aprecian en la figura 1.2.1.

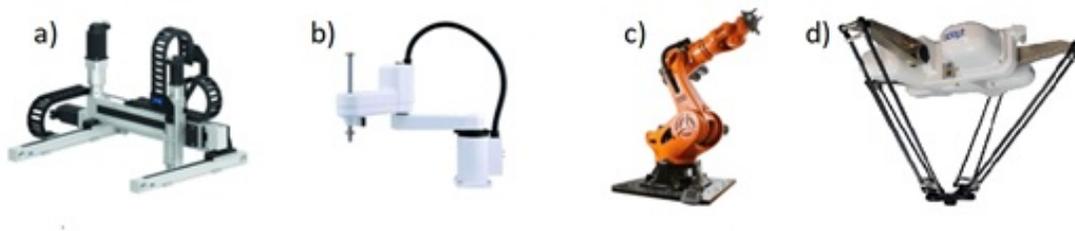


Figura 1.2.1 Algunos tipos de robots utilizados en la industria: de izquierda a derecha: a) cartesiano, b) SCARA, c) antropomórfico y d) delta. Obtenidas de [12, 13].

Los **robots cartesianos** (figura 1.2.1 a)) se utilizan principalmente en la industria de embalaje, *Pick & Place* (elegir y colocar), en el apilado de productos, corte láser, mecanizado y en grabado por su capacidad de moverse ampliamente en un plano y realizar movimientos repetitivos.

Los **robots SCARA** (Selective Compliant Articulated/Assembly Robot Arm) (figura 1.2.1 b)) que en español, significa Brazo de Robot de Montaje Selectivamente Adaptable, son robots industriales que son distensibles en el eje X-Y, además de poder elevarse en el eje Z y rotar sobre este mismo eje. Gracias a esto, este tipo de robots son perfectos para operaciones de ensamblaje vertical, mover un producto de un punto a otro, pue-

den ejecutar operaciones de atornillado, *Pick & Place*, dosificado, dispensado, apilado y clasificación de materiales; son utilizados en la industria médica (producción de lentes, implantes dentales, marcapasos y sistemas de análisis de sangre), y en la industria electrónica (fabricación de semiconductores, colocación de microprocesadores, y en la prueba de diodos y circuitos impresos) [14]. Tienen excelente repetibilidad (capacidad para volver a un punto programado las veces que sean necesarias) y son de los más rápidos en el mercado.

Los **robots antropomórficos** (figura 1.2.1 c)) tienen la versatilidad de alcanzar zonas con obstáculos pues su movimiento es adaptativo como el de un brazo humano; tienen un gran número de grados de libertad, así que son utilizados para envasado, soldadura láser, por arco y por puntos; carga y descarga de máquinas, en cuartos limpios, pintura, etcétera. Aunque tienen ventajas respecto a otros robots, su programación es compleja.

En cuanto a los **robots delta** (figura 1.2.1 d)), son robots industriales que tienen hasta cinco grados de libertad, lo cual les permite abarcar una amplia superficie de trabajo a una gran velocidad y aceleración. Su principal característica es que cuentan con brazos que distribuyen la carga del robot durante el transporte de algún objeto. Logran trabajos repetitivos. Sustituyen a los robots SCARA cuando éstos no pueden realizar ciertos trabajos de *Pick & Place* en los sectores electrónico y farmacéutico, y el embalaje y envasado en el sector alimentario.

#### *Características principales*

Así como hay estándares que los cuartos limpios deben cumplir en cuanto a la cantidad de partículas existentes en el medio, los robots que operan en cuartos limpios deben certificarse, contando el número de partículas que se generan cuando el robot está en movimiento. Para esta certificación se utilizan las normas establecidas por el NIST (National Institute of Standards and Technology), por JIS (Japanese Industrial Standard), en particular la norma B 9921 y ASTM (American Society for Testing and Materials), con la norma F 328-98 [15]. Primeramente, debe conocerse el nivel de limpieza del cuarto limpio según las actividades que se realizarán en él. El robot se diseña o se elige según estas necesidades, contemplando que la geometría de éste sea la adecuada para el flujo de aire que se tiene en la sala limpia. Es posible que se puedan utilizar robots de clases inferiores para una sala de un nivel de limpieza superior si es que la geometría del robot cambia. Por ejemplo, para el caso de la industria de los semiconductores, al manipularse obleas (discos) de silicio, si el robot opera debajo del plano de la oblea con un flujo laminar vertical que barre las partículas del producto, este robot puede funcionar, aunque esté certificado para un nivel de limpieza menor [15].

Para evitar que el robot mismo se vuelva una fuente de contaminación para el cuarto limpio, se toman algunas consideraciones en su diseño, las cuales se mencionan a continuación:

- Es común que el cuerpo del robot (principalmente los brazos), se coloque debajo de las piezas a manipular para que las partículas que se lleguen a generar se

depositen por debajo de las piezas y éstas no se vean afectadas.

- El cableado es interno para evitar que se enrede con el movimiento del robot y generen partículas contaminantes [16].
- Cuentan con pocas partes móviles para minimizar la generación de partículas no deseadas, pues los mismos mecanismos como son bandas, engranes, mangueras, y juntas, son una fuente de contaminación.
- En el caso de robots que cuenten con ventosas que por medio de vacío sujeten componentes electrónicos, éstas deben ser de poliéter éter cetona (PEEK), pues si se utiliza caucho, con el tiempo se gasta y deja residuos contaminantes [17].
- Algunos robots cuentan con una aspiradora en el interior del brazo, creando un vacío en las cavidades internas, evitando que las partículas generadas lleguen al exterior del robot.
- La carga estática que se genera en el producto, equipos, herramientas y superficies de trabajo puede ser una fuente de contaminación, ocasionando que las partículas que se encuentran en la ropa del personal o en el ambiente sean atraídas por estos. Las partes del robot que están en contacto con las piezas a manipular no deben ser de materiales conductores o deben estar conectadas a tierra, pues si se genera carga eléctrica por fricción y se transmite a las piezas electrónicas, éstas se pueden dañar. Algunos materiales comúnmente utilizados en los cabezales de agarre son: fibra de carbono o acero inoxidable conectado a tierra. Para prevenir las cargas electrostáticas también se utilizan materiales o recubrimientos antiestáticos, como el policarbonato antiestático ESD, polietileno de ultra alta densidad antiestático y acetal [19].

Adicionalmente a las características del diseño para cuartos limpios, estos robots deben tener alta exactitud (capacidad de un robot para llegar a la posición requerida) y repetibilidad. Para que la repetibilidad sea aceptable en un robot para operaciones de ensamblaje de piezas, se debe tener una precisión menor a 0.1 mm. Un factor que afecta la repetibilidad es el *backlash* (retroceso), que es el movimiento que tiene una máquina sin que estén operando los motores. Esto sucede cuando existe holgura entre las piezas mecánicas que interactúan, generando una disminución en la precisión y exactitud del robot. Para evitar esto, los componentes del robot deben tener un ajuste adecuado, considerando las tolerancias de la manufactura.

### 1.3 Robots tipo SCARA

*¿Qué son?*

Los robots SCARA son robots de configuración relativamente reciente, diseñados para operaciones de ensamblaje o *Pick and Place* (elegir y colocar); tienen la particularidad de tener 3 o 4 grados de libertad (GDL) con posicionamiento horizontal. Estos robots pueden realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus articulaciones rotacionales; además de realizar un movimiento lineal vertical mediante otra de sus articulaciones [20], pero no pueden realizar tareas que requieran inclinación y vuelco. Son diseñados para realizar trabajos repetitivos a gran velocidad y con mucha precisión.

Tienen excelente repetitividad y cuentan con gran capacidad de carga.

En la figura 1.3.1 se observa un esquema de la configuración mencionada con distintos grados de libertad.

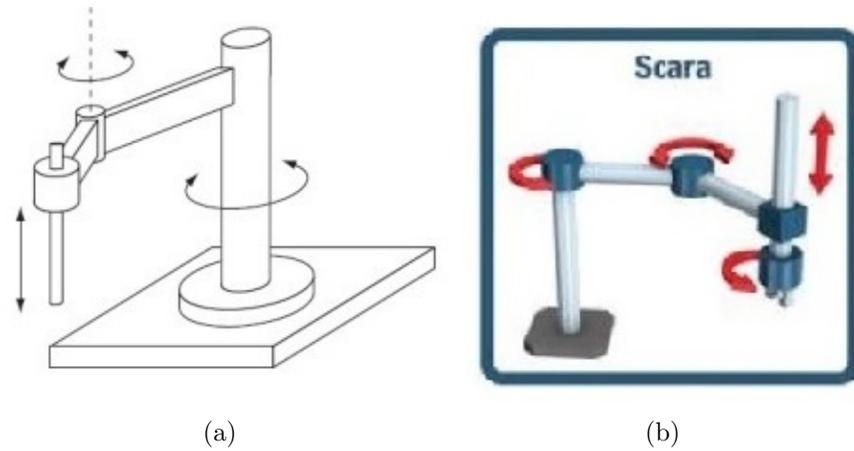


Figura 1.3.1 Configuraciones del robot SCARA, a) con 3 GDL y b) con 4 GDL. Obtenidas de [20, 21] respectivamente.

En la figura 1.3.1 se puede observar que las articulaciones **rotacionales** permiten un movimiento en un plano, y la articulación **prismática** o **traslacional** permite un movimiento vertical en un solo eje. Cabe destacar que, en ocasiones, el movimiento vertical no es causado por la articulación más alejada de la base, sino en la base misma.

Debido al tipo de movimiento que tienen estos robots, el área de trabajo que abarcan es distinta a los robots antropomórficos, delta y cartesianos. En la figura 1.3.2 se aprecia esta diferencia.

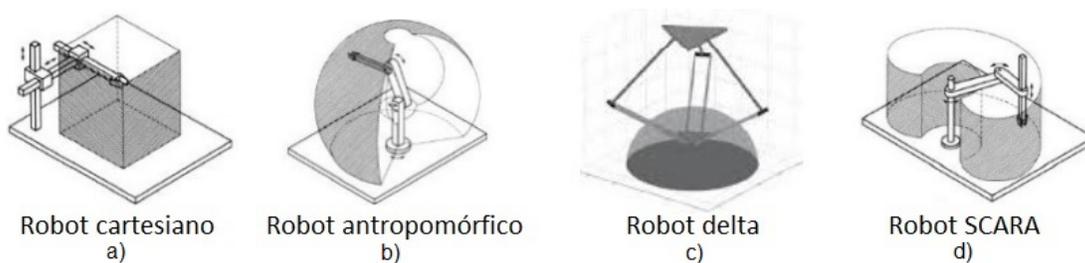


Figura 1.3.2 Comparación del espacio de trabajo de varios tipos de robots: a) cartesiano, b) antropomórfico, c) delta y d) SCARA. Obtenida de [20].

### ¿Cómo funcionan?

Los robots tipo SCARA están compuestos por eslabones y articulaciones que, en conjunto, forman una cadena cinemática abierta en la que cada eslabón se conecta con el anterior y con el siguiente mediante articulaciones, excepto el primero que suele estar fijo a la bancada o base y el último que por lo general tiene un extremo libre que se

conecta a un sujetador. Tienen por lo general, 3 eslabones y 3 articulaciones, como es el caso del robot mostrado en la figura 1.3.3 a), pero en ocasiones pueden llegar a tener 4 articulaciones si tienen rotación en el efector terminal (prismático), como se aprecia en la figura 1.3.3 b). Si este es el caso, es común que el movimiento rotacional del eslabón prismático se deba a un tornillo sinfín, que convierte el movimiento lineal en rotacional.

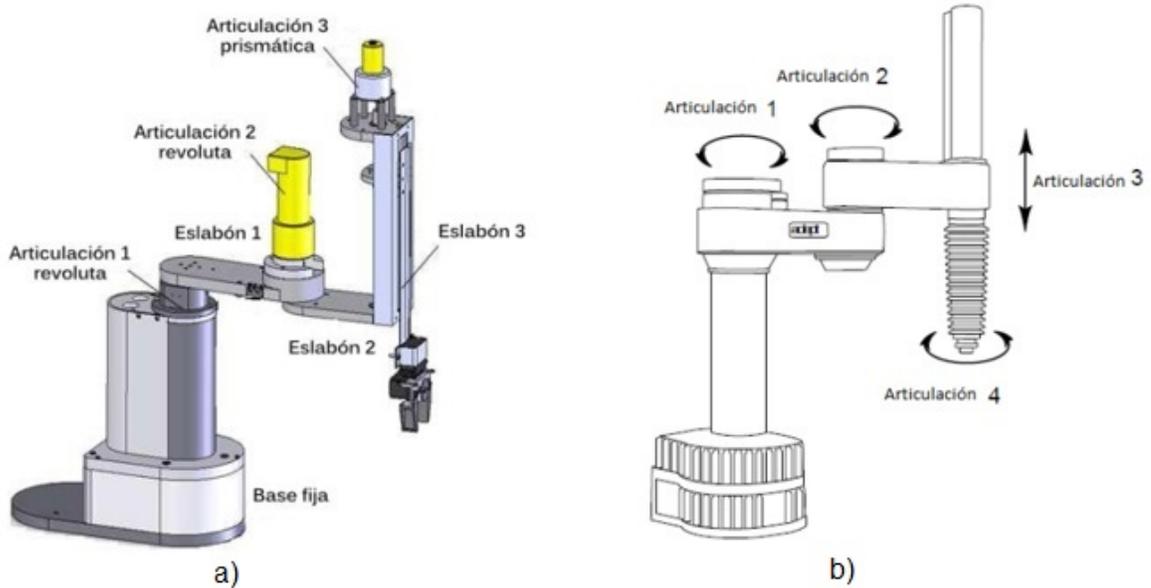


Figura 1.3.3 Diagrama de robots tipo SCARA de a) 3 GDL y b) 4 GDL. Obtenidas de [22, 23] respectivamente.

Es común nombrar a los eslabones y articulaciones como las partes del cuerpo humano dado que los movimientos que efectúa cada uno se parecen. Tomando como ejemplo el robot con 3 GDL mostrado en la figura 1.3.3 a), éste tiene 3 eslabones, de los cuales el primero suele llamarse *brazo* (unido a las articulaciones del hombro y codo), el segundo es el *antebrazo* (unido al codo y a la muñeca), y el tercero es la *mano* (suele ser un elemento sujetador, unido a la muñeca solamente).

Las articulaciones 1 y 2 determinarán el área de manipulación sobre un plano, y la articulación 3 (y la 4 si es que existe), determinarán la zona de trabajo vertical. Las longitudes totales del brazo y del antebrazo definen el diámetro de la circunferencia y el recorrido vertical define la profundidad del espacio de trabajo. Estos parámetros permitirán saber cuál es el volumen total de trabajo; el robot sólo podrá realizar acciones dentro de este espacio. Esto se observa en la figura 1.3.2. Debido a la configuración de los robots tipo SCARA, cuentan con una zona muerta o inutilizable (que se encuentra en la parte trasera y en torno a su base); debido las longitudes de sus eslabones, es imposible alcanzar diámetros tan pequeños como lo es la base. Estas zonas se aprovechan para la colocación de los cables [24].

Por cada grado de libertad que tenga el robot SCARA, existe un motor que hace posible el movimiento deseado. La disposición de los motores depende principalmente del

espacio con el que se cuenta, del tamaño y masa de éstos.

Es común que los motores se encuentren justamente en un extremo de los eslabones (en las articulaciones). De esta manera, no es necesaria una transmisión por medio de poleas y bandas o engranes pues los motores no se encuentran lejos de la articulación que deben mover. Esto se muestra en el boceto de la figura 1.3.4.

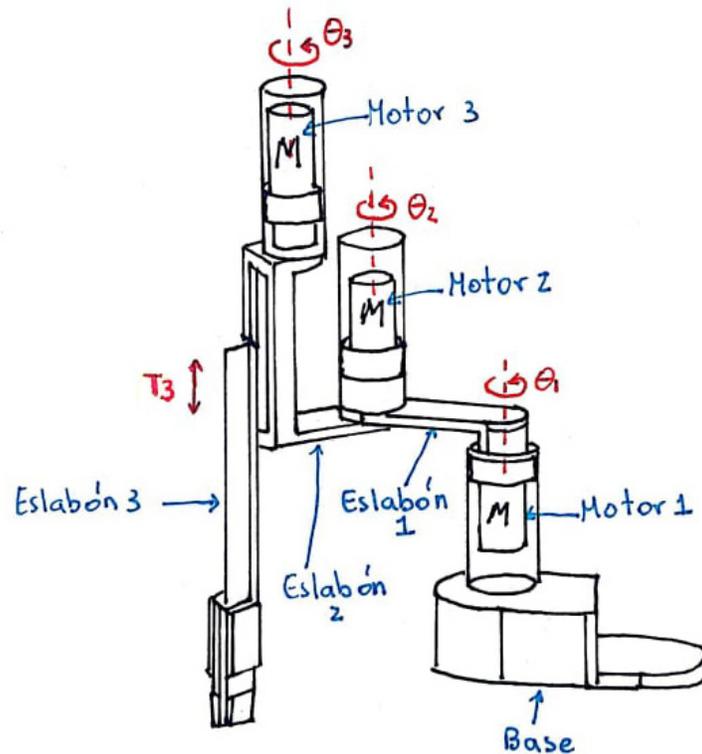


Figura 1.3.4 Configuración de un robot SCARA con 3GDL con los motores en las articulaciones. Figura creada por la autora de la tesis.

Para esta configuración y similares, dos de los motores (Motor 1 y Motor 2 según la figura 1.3.4), actúan los eslabones 1 y 2, permitiendo que tengan un movimiento rotacional ( $\theta_1$  y  $\theta_2$ ). El Motor 3 actúa el eslabón 3, permitiendo un movimiento traslacional  $T_3$  a partir de uno rotacional  $\theta_3$  (esto se puede lograr mediante una cremallera).

El inconveniente de disponer los motores en la articulación que moverán es que la masa de estos genera un peso extra a los eslabones que, a su vez, genera un momento respecto a la base del robot. Entre más alejados estén los motores de la base, mayor momento generarán, siendo esto una constante en este tipo de robots pues la configuración de eslabones horizontales uno detrás de otro genera un alcance grande en un mismo plano.

Sin embargo, existe una alternativa de no disponer los motores en las articulaciones, sino fuera de éstas, como es a la mitad de un eslabón, en la base del robot o incluso en otra plataforma extra. Esto se hace con el fin de distribuir de mejor manera la carga

que los motores representan, aunque al hacer esto, es necesario diseñar un sistema de transmisión para poder llevar el movimiento desde donde se encuentre el motor a la articulación que va a mover. En la figura 1.3.5 se observa un boceto e imagen de esta configuración. Se trata de robots SCARA de 4 GDL: 3 movimientos rotacionales: uno del brazo y del tronco principal respecto a la base ( $\theta_1$ ), otro del antebrazo respecto al brazo ( $\theta_3$ ), y por último el movimiento del sujetador ( $\theta_4$ ); y un movimiento traslacional ( $T_2$ ), en este caso no por parte del sujetador sino del cuerpo del robot. Este último movimiento lineal es transformado a partir de uno rotacional gracias a un tornillo sinfín.

Estas configuraciones tienen los motores en una posición alejada de las articulaciones, por lo que es necesario el uso de un sistema de transmisión (en ambos casos bandas y poleas) para lograr el movimiento deseado [26] y [27].

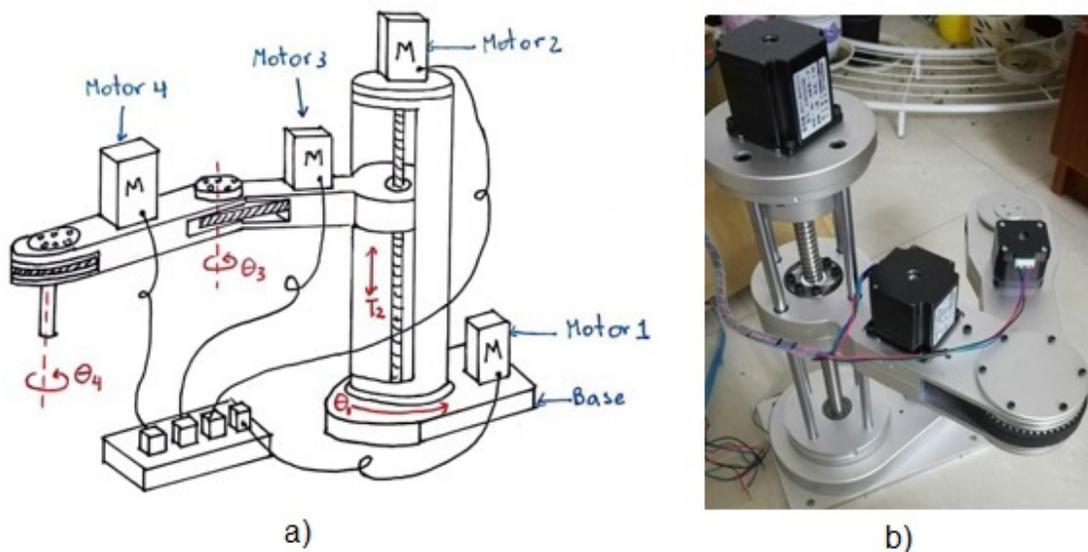


Figura 1.3.5 Configuración de un robot SCARA con 4 GDL con los motores fuera de las articulaciones. a) Boceto propio de la autora generado a partir de la imagen en b), esta última obtenida de [28].

En ambas disposiciones de los motores, es común que éstos estén orientados con su eje de manera vertical hacia abajo o hacia arriba, esto únicamente dependerá del espacio que se tenga para colocar el motor o dependiendo de la acción que realice el robot, ya que puede requerir que esté posicionado de manera invertida para realizar un trabajo de atornillado o ensamble. Justamente la posición y orientación del motor determinará por dónde pasarán los cables que conectan cada motor con una fuente de energía. Es común que los robots SCARA no cuenten con cableado interno, en este caso, los cables de alimentación se encuentran dentro de tubos flexibles que aseguran que no estén expuestos y que se mantengan siempre en una posición cuando el robot esté ejecutando movimientos. Existen modelos de robots con brazos encapsulados sin cables externos, lo que los puede hacer aptos para uso en ambientes limpios. En la figura 1.3.6 se observan dos modelos de robots SCARA, el primero con cableado externo y el segundo con cableado interno.



Figura 1.3.6 a) Robot Yamaha con cableado externo, b) robot Stäubli TS2-40 con cableado interno. Imágenes obtenidas de [29, 30] respectivamente.

### *Usos y aplicaciones*

Los robots SCARA son utilizados principalmente en industrias como la farmacéutica (producción de lentes de contacto, anteojos, instrumental odontológico, implantes dentales, audífonos, marcapasos, sistemas de análisis de sangre, etcétera); en la industria aeroespacial, alimenticia, electrónica (manipulación y colocación de microprocesadores, prueba de diodos de láser, circuitos impresos, interconexión de circuitos, etcétera) [14]; para realizar tareas de soldadura, pulido, atornillado, clasificación de productos, fabricación de productos de electrónica, actividades de ensamblaje, aplicación de adhesivos y manipulación de materiales, siendo todas estas tareas repetitivas y que requieren grandes velocidades de trabajo. Empresas como Yamaha Robotics, Yaskawa Electric, Kawasaki, Omron, Stäubli, ABB, Fanuc, EPSON, IAI, Denso, ente otras, se dedican a producir series de robots SCARA para diversos trabajos industriales. Cada uno de los modelos de robots cuenta con parámetros que definen las características del robot mismo [31, 32], por ejemplo:

- Número de ejes, necesidad de rotación en el eje o pinza eléctrica incorporada.
- Alcance horizontal del brazo respecto de la base.
- Recorrido vertical del eje Z.
- Velocidades de proceso.
- Capacidad de carga: masas a manipular por el eje: nominal (la masa permanentemente instalada) y máxima (la suma de todas las masas a desplazar, incluyendo instrumental y piezas).
- Entorno: aptitud para sala blanca o resistencia frente a agentes tales como salpicaduras o polvo.
- Ensamblaje al suelo, techo o pared.
- Libertad en el eje Z estándar (zona libre de movimiento de masa hacia abajo) o invertido (zona libre con masa hacia arriba).
- Repetibilidad: capacidad para volver a un punto programado las veces que sean necesarias.
- Área de trabajo: zonas de trabajo y zonas inalcanzables para el robot. Medidas de rotación y desplazamiento.

- Huella: espacio donde se monta el robot, estará definida por el tamaño de los motores y de su base.

A continuación, en la tabla 1.3.1 se muestran los detalles técnicos de algunas marcas de robots SCARA, junto con sus aplicaciones y fotografía.

<i>Marca-Modelo</i>	<i>Características técnicas</i>	<i>Aplicaciones</i>	<i>Apariencia</i>
Robot SCARA SR-3iA - Fanuc	<ul style="list-style-type: none"> <li>– No. Ejes: 4.</li> <li>– Capacidad de carga: 3kg.</li> <li>– Alcance horizontal: 400mm.</li> <li>– Alcance vertical: 200mm.</li> <li>– Área de trabajo: 360°.</li> </ul>	<i>Pick &amp; Place</i> , inspección y embalaje.	 <p>Obtenida de [33]</p>
Robots Scara de 4 ejes de montaje a pared y eje invertido IX-UNN3015[H] - IAI	<ul style="list-style-type: none"> <li>– No. Ejes: 4.</li> <li>– Capacidad de carga: 3kg.</li> <li>– Alcance horizontal: 300mm.</li> <li>– Alcance vertical: 150mm.</li> <li>– Área de trabajo: 360°.</li> <li>– Par máximo: 1.9Nm.</li> <li>– Repetibilidad: <math>\pm 0.01</math>mm (vertical), <math>\pm 0.005</math>mm (rotacional).</li> <li>– Velocidad máxima: 1106mm/s (vertical), 1600°/s (rotacional).</li> <li>– Tiempo de ciclo: 0.41s.</li> </ul>	Atornillado y ensamble.	 <p>Obtenida de [34]</p>
eCobra 600 Standard-Omron	<ul style="list-style-type: none"> <li>– No. Ejes: 4.</li> <li>– Capacidad de carga: 5.5kg.</li> <li>– Alcance horizontal: 600mm.</li> <li>– Alcance vertical: 210mm.</li> <li>– Área de trabajo: 360°.</li> <li>– Repetibilidad: <math>\pm 0.017</math>mm (plano XY), <math>\pm 0.003</math>mm (Z), <math>\pm 0.019^\circ</math> (rotacional).</li> <li>– Velocidad máxima: 386°/s (junta 1), 720°/s (junta 2), 1100mm/s (junta 3), 1200°/s (junta 4).</li> <li>– Tiempo de ciclo: 0.55s.</li> <li>– Clase de cuarto limpio: 10.</li> </ul>	Manipulación de materiales y montaje de precisión.	 <p>Obtenida de [35]</p>

Tabla 1.3.1 Detalles técnicos de robots SCARA de diversas marcas.

<i>Marca-Modelo</i>	<i>Características técnicas</i>	<i>Aplicaciones</i>	<i>Apariencia</i>
Robot SCARA TS2-40- Stäubli.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– No. Ejes: 4.</li> <li>– Capacidad de carga: 8.4kg.</li> <li>– Alcance horizontal: 460mm.</li> <li>– Alcance vertical: 200mm.</li> <li>– Área de trabajo: 180° (junta 1).</li> <li>– Repetibilidad: <math>\pm 0.01\text{mm}</math> (plano XY), <math>\pm 0.004\text{mm}</math> (Z), <math>\pm 0.002^\circ</math> (rotacional).</li> <li>– Tiempo de ciclo: 0.25s.</li> <li>– Clase de cuarto limpio: clase A según las Buenas prácticas de manufactura (GMP), ISO 5 según la Organización Internacional de Normalización y Clase 100 según la US Federal Standard 209E.</li> </ul>	Producción farmacéutica, manipulación de componentes electrónicos.	 <p>Obtenida de [37]</p>

Tabla 1.3.1 Continuación.

#### *Características de los robots SCARA utilizados en cuartos limpios*

Los robots SCARA utilizados para cuartos limpios, como los dos últimos mostrados en la tabla 1.3.1, tienen un diseño particular que impide que las partículas que se generen internamente puedan afectar la limpieza del cuarto. Son sistemas encapsulados, sin cables externos, o si no es posible esto, tienen un único cable por fuera que llevará todas las conexiones necesarias al interior del robot; aún siendo esta medida una fuente de contaminación cuando el cable se mueve con el movimiento del robot. Están fabricados con materiales que evitan cargas electroestáticas, y su diseño es aerodinámico (se observan redondeos, filetes y chaflanes para evitar cambios bruscos en la geometría) para no perturbar el flujo de aire del cuarto limpio. Algunos cuentan con succión interna desde la parte posterior o en el costado de la base del robot, así se retiran las partículas del interior de éste, siendo un filtro más que ayuda a que la sala mantenga su limpieza. Existen robots que están cubiertos en la ranura del eje Z por muelles que emiten menos partículas, y otras partes deslizantes están completamente selladas. En la figura 1.3.7 se aprecia un plano de un robot tipo SCARA con muelles y succión interna.

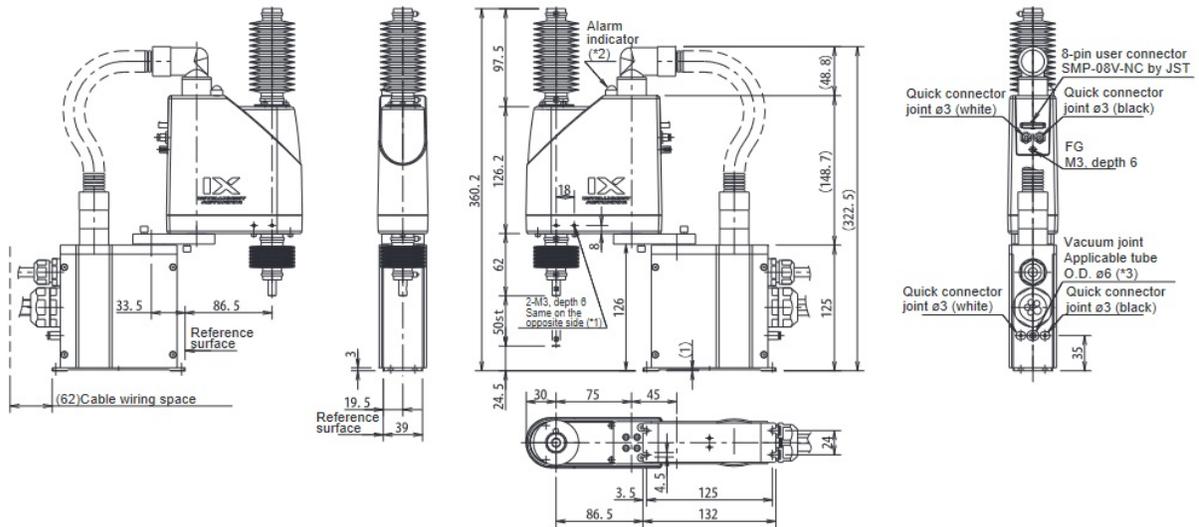


Figura 1.3.7 Robot para cuartos limpios tipo SCARA marca IAI con muelle en la ranura del eje Z y con una junta de vacío en la parte posterior. Imagen obtenida de [38].

Sin embargo, aunque los robots para estos cuartos cuentan con todas estas medidas, algunas de ellas no son las más adecuadas pues generan partículas, aunque sea en mínima cantidad. En la figura 1.3.8 se resaltan las características que son fuente de contaminación en este tipo de robots, ya sea si son o no para cuartos limpios.

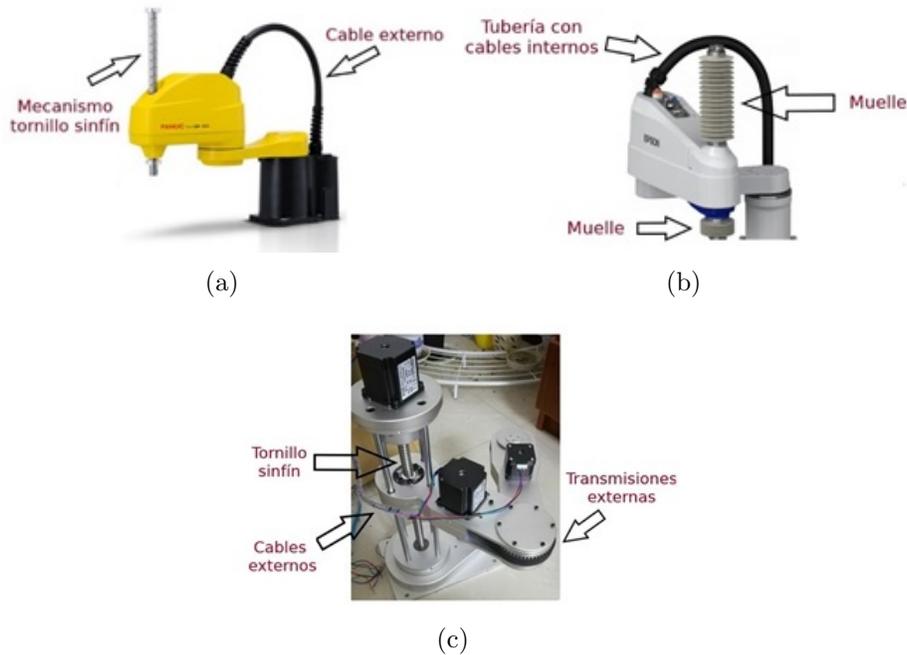


Figura 1.3.8. Fuentes de contaminación en robots SCARA, que afectan la limpieza de un cuarto limpio. Los robots en a) y b) tienen mecanismos y cables externos que generan partículas por fricción, en el caso del robot en c), hay ausencia de una carcasa protectora para la transmisión, por lo que de los tres, es el robot más contaminante. Imágenes obtenidas de [33, 39, 28] respectivamente. Las imágenes fueron modificadas para un mayor entendimiento.

El uso del mecanismo de tornillo sinfín para generar un movimiento vertical en el caso de la figura 1.3.8 (a) y (c), genera partículas que contaminan el cuarto limpio si es que el mecanismo no está encapsulado. Una forma de reducir la contaminación por esta fuente es cubrir el mecanismo con un muelle, como se observa en (b) en la misma figura. Sin embargo, los muelles tienen el inconveniente de generar partículas externamente si es que están hechos de caucho o algún otro polímero blando, además de que representan zonas muertas (no permite un flujo libre de aire que arrastre las partículas hacia abajo) por la geometría tan rebuscada que tienen.

El uso de cables externos genera partículas contaminantes porque estos se moverán cuando el robot efectúe movimientos, y aunque se encuentren dentro de una tubería flexible (figura 1.3.8 (b)), la tubería misma con el movimiento puede generar partículas.

Para asegurar un diseño adecuado para el tipo de sala y aplicación del robot requeridas, se deben considerar todos estos aspectos mencionados.

## 1.4 Rodamientos magnéticos

*¿Qué son?*

“Los rodamientos magnéticos son sistemas de suspensión magnética que pueden regular los desplazamientos de un eje rotatorio sin necesidad de contacto mecánico, reduciendo el mantenimiento necesario y aumentando la eficiencia de la máquina rotativa” [40], por lo que este tipo de rodamientos reemplazan a los convencionales utilizando el principio de levitación magnética, lo cual hace que se eliminen pérdidas por fricción. Son ideales para aplicaciones que exigen altas velocidades de rotación y bajas vibraciones. En la figura 1.4.1 se aprecia un rodamiento magnético y uno convencional.



Figura 1.4.1 Rodamiento magnético (izquierda) y convencional (derecha). Obtenidas de [41, 42] respectivamente.

## Funcionamiento

La atracción magnética por medio de imanes es el principio por el cual se logra la levitación del eje o del rotor. El funcionamiento de un rodamiento magnético es muy similar al de un motor eléctrico. Se compone de actuadores (electroimanes y amplificadores operacionales), sensores de posición, procesadores digitales y controladores junto con algoritmos de control [43] y [44]. En el caso de un motor eléctrico, estos componentes actúan en conjunto para producir un par, mientras que, en los rodamientos magnéticos, la disposición de los componentes produce una fuerza electromagnética para hacer levitar un eje (rotor) que debe ser de un material ferromagnético.

Los rodamientos magnéticos se pueden clasificar dependiendo del tipo de imanes con los que estén diseñados, pueden utilizar imanes permanentes, electroimanes, o ambos. Si se elige la primera opción, se dice que son rodamientos **pasivos**, ya que los imanes no requieren de una excitación eléctrica. Al no ser esto necesario, tienen un ahorro en energía eléctrica, pero significa que son de lazo abierto (cuentan con un sistema de control robusto sin retroalimentación para modificar una variable deseada mientras están en funcionamiento). Sin embargo, los rodamientos **activos** se componen por electroimanes en los cuales se controla la corriente eléctrica en función del desplazamiento que tenga el rotor que se quiere hacer levitar. Por lo tanto, los rodamientos activos trabajan con un sistema de control que puede ser de lazo abierto o cerrado pero cuenta con retroalimentación o mecanismos de reconfiguración [45]. El poder controlar variables a lo largo del funcionamiento, como lo es el desplazamiento antes mencionado, tiene el beneficio de eliminar perturbaciones en el sistema, siendo el modelado del sistema de control más complicado entre mayor estabilidad se requiera. Existe una tercera clasificación de los rodamientos magnéticos: los **híbridos**, siendo la fusión de los activos y los pasivos; se utilizan los rodamientos pasivos para una referencia estática de la posición del rotor, y los activos para un control final mientras el sistema tiene perturbaciones [43]. El presente trabajo estará centrado en la utilización de los rodamientos magnéticos activos (AMB por sus siglas en inglés).

En la figura 1.4.2 se observan los elementos que componen un sistema de levitación magnética como principio de funcionamiento de un rodamiento magnético activo.

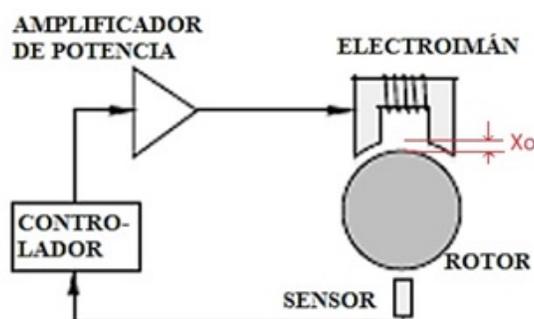


Figura 1.4.2 Esquema del principio de funcionamiento de la suspensión electromagnética activa. Obtenida de [46]. La imagen fue modificada para un mayor entendimiento.

El rotor levita libremente a una distancia  $X_0$  del electroimán que se encuentra en la base del rodamiento magnético. Un sensor de posición mide constantemente la desviación (o desplazamiento) entre la posición deseada (valor de referencia) y la posición real del rotor, y alimenta con esta información al controlador, teniendo como objetivo mantener la posición del rotor en un valor deseado. Para lograr esto, el controlador deriva una señal de comando a un amplificador de potencia, que transforma esta señal en una corriente eléctrica que circula a través del embobinado del electroimán, generando un campo magnético, dando como resultado fuerzas magnéticas que se oponen a la fuerza gravitacional u otras fuerzas externas, manteniendo al rotor concéntrico al soporte en una posición estacionaria. Este proceso se está repitiendo constantemente dado que el giro del rotor provocado por un motor, o las fuerzas producidas debido al trabajo que realice la máquina en donde se utilice, por ejemplo, operaciones de mecanizado, generan vibraciones que deben ser anuladas para obtener un movimiento exento de fricción entre el rotor y el estator (soporte). Ya que la distancia mínima promedio entre el rotor y el resto de la máquina puede ser de algunas décimas de milímetro, es necesario utilizar un controlador complejo que dé resultados precisos.

Existen rodamientos magnéticos activos con sustentación **radial** o **axial**; el primero hace que el rotor se mantenga concéntrico al estator, y en este tipo de rodamientos se centrará el presente trabajo. Los rodamientos con control axial mantienen el rotor estático con respecto a su eje longitudinal; la diferencia entre cada uno radica en la disposición de las bobinas del electroimán, pues dependiendo de su orientación, será la del campo magnético y por lo tanto la dirección de las fuerzas electromagnéticas que mantienen al rotor levitando.

En la figura 1.4.3 se aprecian los componentes antes mencionados que forman parte de un rodamiento magnético activo con sustentación radial.

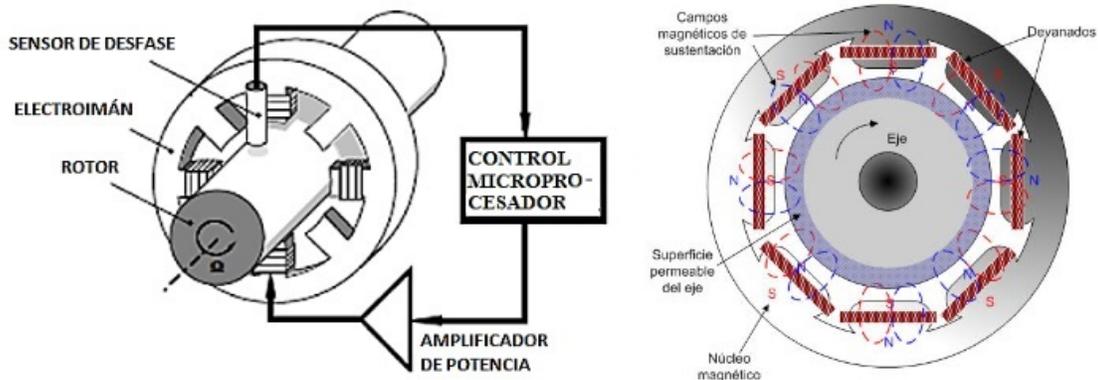


Figura 1.4.3 Esquemas de un rodamiento con sustentación radial. Obtenidas de [46, 47] respectivamente.

“El campo magnético generado por las bobinas de los cojinetes debe actuar sólo sobre la superficie del eje en rotación, esta superficie debe poseer características particulares. Esta superficie debe tener una permeabilidad tal que los campos magnéticos generados por las bobinas no atraviesen la sección del eje, solo deben actuar sobre la superficie y de manera local en las adyacencias del campo formado por la bobina y la superficie, su efecto de magnetización debe desaparecer instantáneamente” [47].

### *Características*

Los rodamientos magnéticos presentan varias ventajas respecto a los rodamientos mecánicos, gracias a las cuales, han cobrado gran importancia en los últimos años. A continuación, se enlistan algunas de ellas:

- La única forma de eliminar la fricción entre los componentes mecánicos en un rodamiento magnético es por medio de la levitación; si se elimina el contacto entre superficies, no se generarán partículas contaminantes que interfieran en procesos limpios. “Cuando un cojinete funciona sin lubricante y a pesar de esto no produce partículas de desgaste, eso es limpio. Y cuando el sistema integrado de acondicionamiento del cojinete elimina la necesidad de un mantenimiento rutinario, eso es un buen rendimiento” [44, 47].
- El mantenimiento que se les debe dar a este tipo de rodamientos es mínimo en comparación de los convencionales, pues en estos últimos sí existen partes móviles que limpiar, lubricar y en algunos casos cambiar como lo son los elementos rodantes.
- La eliminación de la fricción hace que se pueda reducir la potencia del motor que hace girar el rotor, logrando una mayor eficiencia.
- En este tipo de rodamientos, la velocidad de operación que se puede alcanzar es de hasta 30,000 rpm sin ninguna dificultad gracias a que no existe fricción entre componentes y por ende no hay un calentamiento entre las piezas que impida lograr esas velocidades y no se necesitan equipos de refrigeración [48].
- El espacio libre entre el rotor y el estator permite aislar la vibración además del ruido. Inclusive, este espacio puede utilizarse en aplicaciones en donde se requiera la circulación de fluidos [47].
- Tienen una vida útil prolongada. Los rodamientos convencionales tienden a desgastarse con el tiempo por la fricción que existe en sus componentes, cosa que no sucede con los AMB.

Las altas velocidades a las que puede llegar una máquina que utiliza este tipo de rodamientos permite que las aplicaciones de éstos sean variadas. Por ejemplo, en husillos avanzados para máquinas herramientas o máquinas que funcionan en entornos de vacío y no se permite el uso de lubricantes. Se utilizan también en equipos giratorios de alta velocidad, trenes de levitación magnética *Maglev*, dispositivos de almacenamiento de energía basados en volantes de inercia y bombas cardíacas artificiales [43, 47].

Al no haber contacto entre los componentes mecánicos y por ende, no hay desgaste ni desprendimiento de partículas contaminantes y hay ausencia de lubricación, este

tipo de rodamientos se pueden utilizar en equipos que se encuentran en cuartos limpios y estériles para la industria electrónica, la de fabricación de alimentos o quirófanos.

Como ya se mencionó en el apartado 1.2 *Robots para cuartos limpios*, las partes móviles internas en las articulaciones de un robot generan partículas no deseadas que son fuente de contaminación para una sala blanca o limpia (como lo es el caso de la industria electrónica, en la cual se centra el presente trabajo). Es por esto, que se utilizan los rodamientos magnéticos activos para tareas como la transferencia de discos de silicio para formar dispositivos semiconductores dentro de esta industria donde, además, se necesita mover el sujetador del robot con un control de posicionamiento de alta precisión [43, 49], situación que se puede resolver con un AMB.

Es importante mencionar también que, este tipo de rodamientos presentan algunas desventajas respecto a los convencionales: “la rigidez de la conexión del rodamiento magnético es generalmente más débil que el de los rodamientos convencionales, y la precisión de posicionamiento resultante se daña más fácilmente por cualquier perturbación en el sistema” [50]. Es por esto que un controlador avanzado se diseña para compensar los efectos de las fuerzas de reacción generadas por el mismo movimiento del robot, pero esto implica una mayor complejidad de diseño y encarecimiento de las instalaciones del rodamiento debido a la utilización de sensores. También estos rodamientos ocupan un mayor volumen que un rodamiento convencional para la misma capacidad de carga [49]. Sin embargo, se han hecho investigaciones sobre la utilización de este tipo de rodamientos en articulaciones diseñadas para cuartos limpios junto con bancos de pruebas como fundamento de los resultados obtenidos [51, 52, 54].

Estos bancos de prueba consisten en distintas configuraciones de rodamientos magnéticos dependiendo del objetivo del estudio. A continuación, se muestran algunos de ellos:

- *Linz Center of Mechatronics GmbH* muestra en [51] las velocidades a las que se puede llegar en una unidad de motor con rodamientos magnéticos. La configuración consiste en un rotor de disco con un estator sin ranuras y un sistema de embobinado de 5 fases en forma de toroide. Este sistema se encuentra fijo, orientado de tal manera que el eje del estator esté vertical, y por lo tanto el rotor entra en el centro del rodamiento con su eje también orientado verticalmente. La configuración de las bobinas e imanes permanentes permite una levitación radial y axial junto con el accionamiento eléctrico que da el torque al rotor. En la figura 1.4.4 se puede observar un esquema de la configuración de este rodamiento con el rotor a sostener junto con una fotografía de todo el sistema.

Esta configuración es interesante pues el hecho de que el rotor esté vertical y tenga una levitación radial, se puede aplicar en una articulación de un brazo de un robot tipo SCARA, ya que todos los ejes de rotación de las articulaciones son verticales.

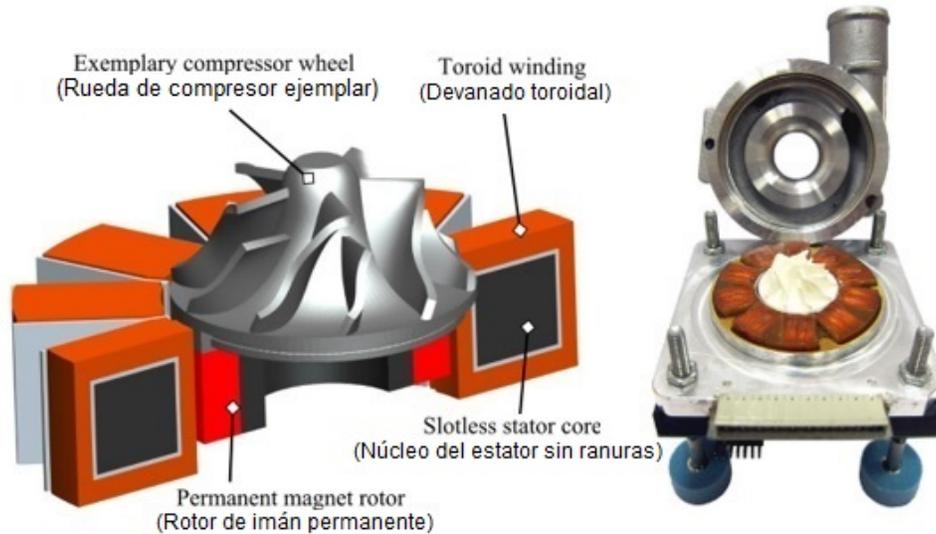


Figura 1.4.4 Esquema de la configuración del rodamiento y el rotor (izquierda) y montaje en un impulsor para demostración (derecha). Obtenidas de [51]. Modificada para su comprensión en español.

- La empresa *Waukesha* presenta una simulación de cómo es el montaje de un eje en un sistema de rodamientos magnéticos (uno axial y uno radial), junto con sensores y rodamientos auxiliares, siendo el rodamiento radial el de interés.

En la figura 1.4.5 se aprecia la típica geometría del montaje de un rodamiento magnético axial y uno radial en una carcasa permitiendo que un rotor gire sin contacto mecánico. En esta misma figura (a), el rodamiento radial posiciona el rotor radialmente usando cuatro electroimanes, compuestos cada uno por un componente de estator atornillado a la carcasa y un componente de rotor que es un manguito montado en el eje y asegurado contra la rotación o el movimiento axial. El rodamiento axial no permite el movimiento del rotor en dirección longitudinal gracias a las fuerzas electromagnéticas que se oponen al disco que está asegurado al rotor; los electroimanes están situados a ambos lados del disco y atornillados a la carcasa, la cual debe ser lo más rígida posible para eliminar perturbaciones. Es importante mencionar que cuando la máquina se encuentra en estado estacionario, debe existir un mecanismo que permita que el rotor descansa manteniéndose centrado, esta acción la hacen los rodamientos auxiliares mecánicos fijados a la carcasa, que también brindan soporte en caso de sobrecarga o falla de los rodamientos magnéticos [53]; cuando sucede esto, se pierde la levitación del rotor, y estos rodamientos deben ser capaces de soportar las cargas dinámicas en estos casos. Estos rodamientos pueden ser de bolas o cilindros y se colocan uno en cada extremo del rotor en una posición posterior a los rodamientos magnéticos que se utilicen.

El sensor de posición proporciona retroalimentación instantánea de la posición radial y axial del rotor. También existe un espacio de entrehierro nominal que es el espacio libre entre el rotor y el estator (la distancia de levitación), también llamado *gap*. En la figura 1.4.5 (b) se observa también el espaciamiento de los componentes y su colocación en una carcasa.

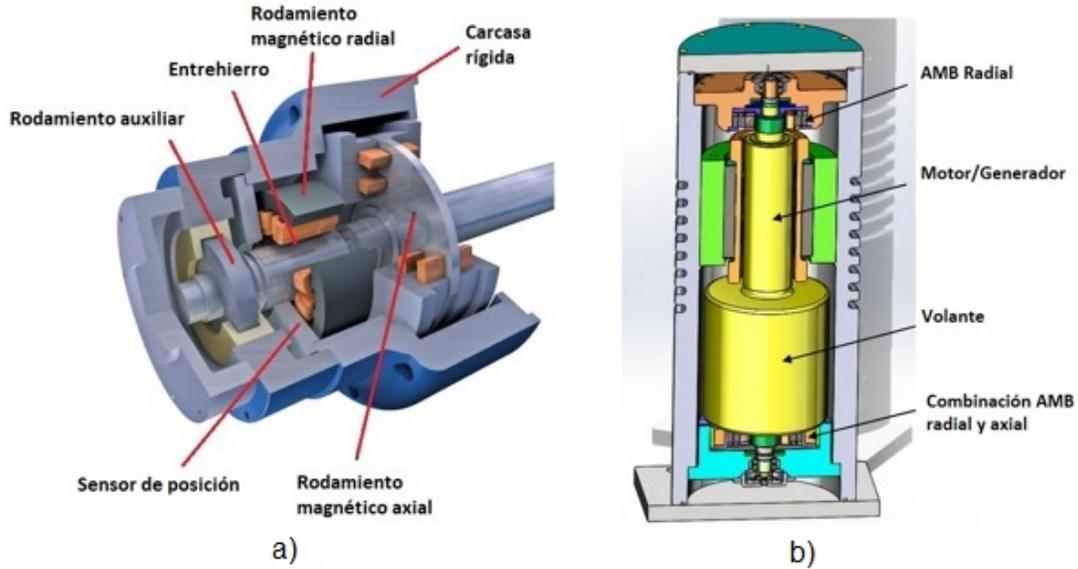


Figura 1.4.5 Componentes de un sistema de rodamientos magnéticos activos. a) Simulación de la empresa *Waukesha* y b) configuración en un banco de pruebas expuesto en la revista *Actuators*. Obtenidas de [52, 54] respectivamente. Las imágenes fueron modificadas para un mayor entendimiento.

La mayoría de los rodamientos magnéticos radiales tienen la característica de ser cilíndricos debido al arreglo circular de los electroimanes para mantener centrado el rotor en dirección radial. Por lo tanto, el espacio para colocar el rodamiento en una carcasa debe tener forma cilíndrica o forma de varios cilindros apilados con distintos diámetros (dependiendo de si el control está incluido en el rodamiento o es externo). En este último caso, se deben tomar en cuenta espacios para el cableado que conecta los sensores de posición con el controlador y un espacio para este mismo. No existe una limitante en cuanto al tamaño del rodamiento magnético, pues puede ser adaptado para una carga deseada, conociendo las condiciones de trabajo como son velocidad de trabajo, diámetro y longitud del rotor.

En la figura 1.4.6 se aprecia un esquema de la sección transversal de un arreglo de rodamientos magnéticos únicamente radiales para darle soporte a un sistema de transmisión por polea en una configuración horizontal. Los rodamientos tanto auxiliares como magnéticos deben estar sujetos a la carcasa, así como el motor. Cabe destacar que para un mayor soporte se coloca un par de rodamientos magnéticos y un par de rodamientos auxiliares (que solamente actúan en caso de falla), ambos tipos de rodamientos colocados antes y después de la polea que genera un par de torsión. Si el sistema tuviera una configuración vertical, los rodamientos auxiliares no serían necesarios, pero sí lo es un elemento mecánico que sostenga al eje en dirección vertical mientras éste permanezca estático para que no exista desplazamiento vertical debido a la fuerza de gravedad.

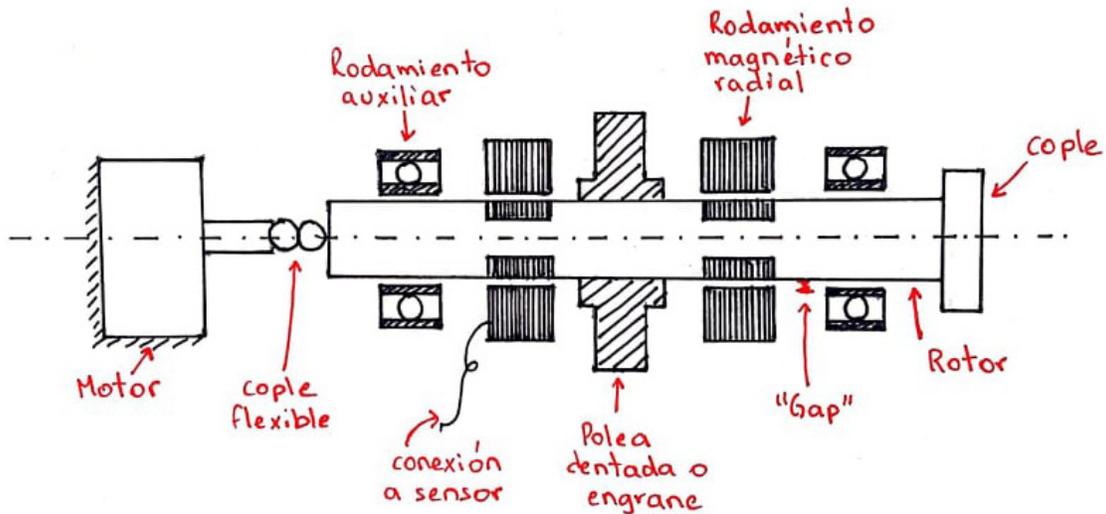


Figura 1.4.6 Esquema de la sección transversal de un arreglo de rodamientos magnéticos radiales en un sistema de transmisión horizontal.

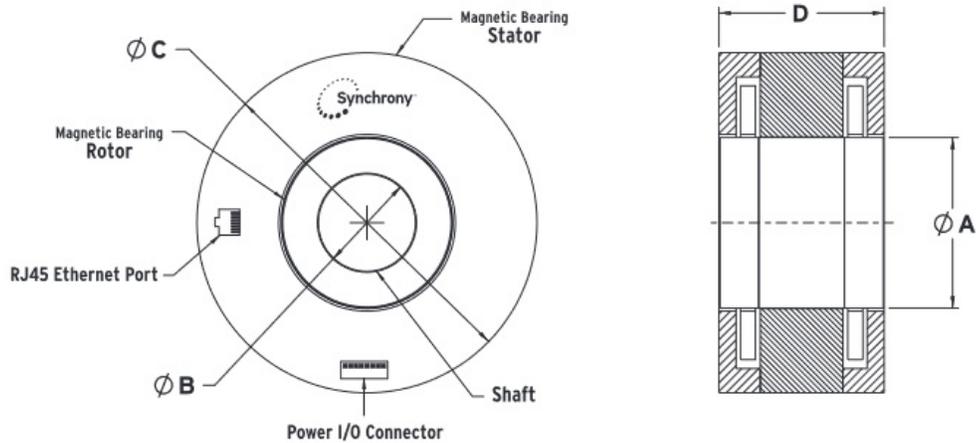
#### *Rodamientos comerciales*

En los bancos de prueba mostrados anteriormente, el control de los rodamientos se encuentra en una zona externa al rodamiento en sí, pero en el mercado se encuentran rodamientos magnéticos con el sistema de control dentro de la estructura real del rodamiento además de sistemas de monitoreo de vibración y del estado de las bobinas y amplificadores; el rodamiento cuenta con barrenos para sujetarlo a la carcasa junto con los conectores necesarios para la electrónica. *Fusion* es un ejemplo de una marca de rodamientos comerciales (mostrados en la figura 1.4.7). Estos están disponibles en varios tamaños de bastidor, tanto en configuración radial como axial, según el tamaño del rotor y del espacio para el estator, la capacidad de carga y la velocidad de operación.



Figura 1.4.7 Ejemplo de rodamientos magnéticos comerciales. Obtenida de [55].

Los parámetros antes mencionados están incluidos en la hoja de especificaciones como la que se observa en la figura 1.4.8 para poder seleccionar un rodamiento magnético radial según las necesidades de diseño.



Fusion® Radial Bearing Size Chart						
Model Number	Dimensions Load Capacity (lb)	A Rotor OD (in)	B Max. Shaft OD (in)	C Stator OD (in)	D Overall Length (in)	Max. Operating Speed (rpm)
FR 35-10	424	3.5	2.2	7.0	3.8	34,000
FR 35-20	849	3.5	2.2	7.0	5.5	34,000
FR 50-10	778	5.0	3.3	9.0	4.6	24,000
FR 50-20	1,556	5.0	3.3	9.0	7.1	24,000
FR 60-10	1,167	6.0	3.9	10.5	5.0	20,000
FR 60-20	2,334	6.0	3.9	10.5	7.9	20,000
FR 70-10	1,584	7.0	4.6	12.0	5.5	17,000
FR 70-20	3,168	7.0	4.6	12.0	8.9	17,000
FR 80-10	2,206	8.0	5.2	13.5	6.2	15,000
FR 80-20	4,412	8.0	5.2	13.5	10.1	15,000
FR 90-10	3,026	9.0	5.8	15.0	7.0	13,000
FR 90-20	6,053	9.0	5.8	15.0	11.7	13,000

Figura 1.4.8 Ejemplo de hoja de especificaciones para rodamientos magnéticos radiales de la marca *Fusion* distribuidos por el proveedor *Synchrony*. Obtenida de [55].

Cabe señalar que los rodamientos magnéticos pueden llegar a costar alrededor de US\$45,000 más que un sistema de cojinetes hidrodinámicos lubricados con aceite en una bomba industrial grande, por ejemplo [55].

## Capítulo 2

# Propuesta de diseño conceptual del brazo-antebrazo con articulaciones rotacionales que utilizan rodamientos magnéticos

### 2.1 Antecedentes

Como se mencionó en la *Introducción*, la propuesta presentada toma como referencia un diseño previo de un robot para transportar discos de silicio con la finalidad de evaluar el nivel de partículas contaminantes en una de sus articulaciones rotacionales. El diseño conceptual en este capítulo parte del modelo físico de este robot, del cual se tomaron algunos antecedentes en cuanto a su funcionamiento y morfología [56]. El robot mencionado consta de un brazo, un antebrazo y un efector final para tomar los discos de silicio, y los motores que generan el movimiento de las articulaciones son servomotores. En la figura 2.1.1 se observan fotografías del robot.

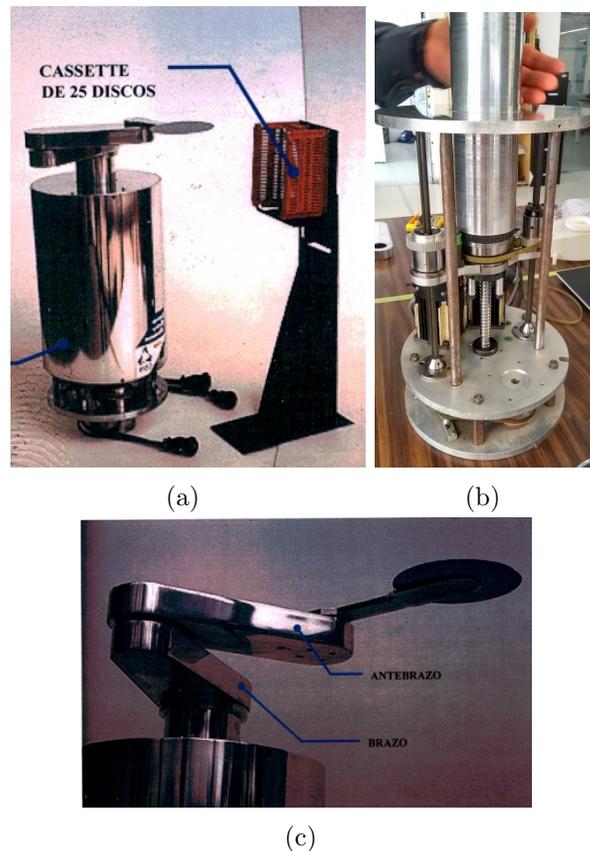


Figura 2.1.1 Fotografías del robot que se tomó como antecedente. a) y c) Fotografías obtenidas de [56], b) fotografía actual del mismo robot.

En la figura 2.1.1 b), se observan tres discos metálicos que están unidos entre sí mediante postes verticales que sostienen lo que es la base cilíndrica del robot (ver cilindro

de metal de la figura 2.1.1 a)). También se aprecia en el centro, un tornillo sinfín o de bolas recirculantes, el cual se encarga de realizar el movimiento vertical (de subida y bajada) del conjunto brazo-antebrazo-efector final. El disco de enmedio y el de arriba, junto con este tornillo, componen lo que se puede llamar una **estructura principal** del robot. La forma de esta estructura se representa de manera simplificada en cada uno de los conceptos de solución presentados más adelante, pues es la base en la que se puede colocar encima el brazo y el antebrazo, en los cuales se enfoca el presente trabajo. Los cambios que se lleguen a realizar sobre la estructura principal forman parte de las opciones de solución para mover al brazo.

Para la realización de la propuesta de diseño, se tomó como base la metodología de diseño de Ulrich y Eppinger. Tomando en cuenta los antecedentes expuestos en el capítulo 1, en los que se plasman las necesidades y requerimientos para el funcionamiento de un robot SCARA en un ambiente limpio, en este capítulo se realiza el diseño conceptual partiendo de la realización de un diagrama funcional con los sistemas involucrados en el problema a resolver, posteriormente se lleva a cabo la generación de conceptos de solución para los sistemas anteriores. Los conceptos se plasman en una matriz morfológica para ilustrar qué combinaciones de conceptos pueden realizarse para obtener distintas configuraciones para los sistemas. Se procedió a evaluarlas tomando en cuenta los criterios de diseño/selección que deben cumplir para satisfacer las necesidades y requerimientos.

## 2.2 Sistemas

En la Figura 2.2.1 se aprecia un diagrama funcional con los sistemas que componen un robot SCARA, tomando en cuenta solamente el brazo y el antebrazo; cada uno por separado, implican un sistema motriz (**motriz 1** y **motriz 2** respectivamente) que tendrán movimiento propio e independiente a través de un sistema de **transmisión** que funciona a partir de la señal de un controlador. El resultado de los movimientos generados por el sistema motriz 1 y el sistema motriz 2 es un posicionamiento espacial del brazo-antebrazo y por lo tanto del efector final.

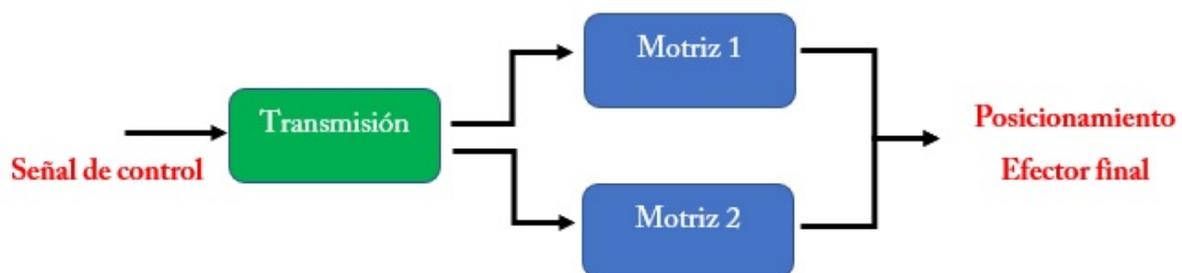


Figura 2.2.1 Diagrama funcional para el funcionamiento de un brazo-antebrazo de un robot SCARA

- Sistema Motriz 1: es el encargado de darle movimiento rotacional al **brazo**.
- Sistema Motriz 2: es el encargado de darle movimiento rotacional al **antebrazo**.
- Sistema de Transmisión: no es un sistema independiente de los anteriores, gracias a éste se puede transmitir el par motriz de un motor hacia la articulación del hombro y de otro motor hacia la articulación del codo para poder generar los movimientos del brazo y del antebrazo respectivamente.

En la evaluación de los conceptos, se considerará aparte la transmisión para evaluarla como un sistema y determinar cuál es la mejor opción para transmitir el movimiento a los sistemas motriz 1 y motriz 2.

## 2.3 Generación de conceptos

Ya que se han identificado los distintos sistemas anteriores, es necesario conceptualizar cómo será cada uno de ellos y qué opciones de solución se pueden considerar. Para esto, se han generado bocetos a mano alzada sobre cada concepto, y en algunos casos, se han adjuntado imágenes para un mayor entendimiento. A continuación, se exponen los conceptos para cada sistema identificado junto con una explicación detallada.

En las figuras 2.3.1(a-d), se observan los distintos conceptos para el Sistema Motriz 1, en las figuras 2.3.2(a-d) para el Sistema Motriz 2 y en las figuras 2.3.3(a-c) para el Sistema de Transmisión. Estos conceptos se realizaron a mano, más adelante en el capítulo 3 para el diseño de detalle, se utilizará un programa de dibujo asistido por computadora.

## Sistema Motriz 1 (Brazo):

**Concepto 1 y 2** (figuras 2.3.1 a) y b) respectivamente): partiendo del hecho de que la *estructura principal* que mueve al robot SCARA cuenta con un *tornillo sinfín* colineal al motor que lo mueve, y se encuentra debajo de la *Base inferior 2* (la cual representa el primer disco de abajo hacia arriba de la estructura principal mostrada en la figura 2.1.1 b)), es posible adaptar el sistema Motriz 1 de forma que también se localice en la parte inferior del robot de tal manera que el movimiento del *brazo* provenga desde la parte inferior; es decir, toda la *estructura principal* rote junto con el *brazo* que se encuentra en la parte superior. Para esto, se plantea la idea de crear el movimiento desde una *Base inferior 2*, que debajo tiene anclada una *polea hueca*, y que es movida por una transmisión a partir del movimiento de un motor. Es necesario aclarar que tanto la *polea hueca* como la *Base inferior 2* cuentan con un orificio que deja pasar el *tornillo sinfín*, de tal manera que el movimiento de éste no se ve afectado. Para el caso del concepto 1, esta transmisión se da por una *banda y poleas*; para el concepto 2, el movimiento se genera con una transmisión por *engranes*. La transmisión mencionada para efectuar el movimiento del brazo, es la misma que se menciona en el diagrama funcional.

Los motores podrían estar encapsulados (envueltos) en una carcasa ya que no están muy alejados uno del otro.

**Concepto 3 y 4** (figuras 2.3.1 c) y d) respectivamente): estos conceptos parten de la idea de que el motor que moverá al *brazo* está colocado en el *brazo* mismo. En el concepto 3, el motor se encuentra alojado en un extremo del *brazo*, que es contrario a donde se encontraría el *antebrazo*, generando un contrapeso. El motor está orientado con el eje vertical hacia arriba, y la transmisión del par motriz se da por medio de una *banda* hasta una *polea* que está unida al *brazo* mismo, pero gira libremente en un *rodamiento magnético* que se encuentra en la *Base superior* de la *estructura principal*; por lo que esta última no gira. La idea es la misma para el concepto 4, con la diferencia de que el motor se encuentra alojado encima de la *estructura principal* y no como contrapeso. Dada la cercanía del motor con el eje de rotación de la *polea* que gira libremente en un *rodamiento magnético* que se encuentra en la *Base superior*, es posible transmitir el movimiento del motor mediante *engranes* y no una *banda*. De igual manera, el *brazo* girará, pero la *estructura principal* no.

Como se mencionó al inicio del presente trabajo, el diseño contempla la utilización de rodamientos magnéticos, pero en los bocetos generados para cada concepto, se representan como rodamientos convencionales para una mayor simplicidad en el dibujo.

Concepto 1

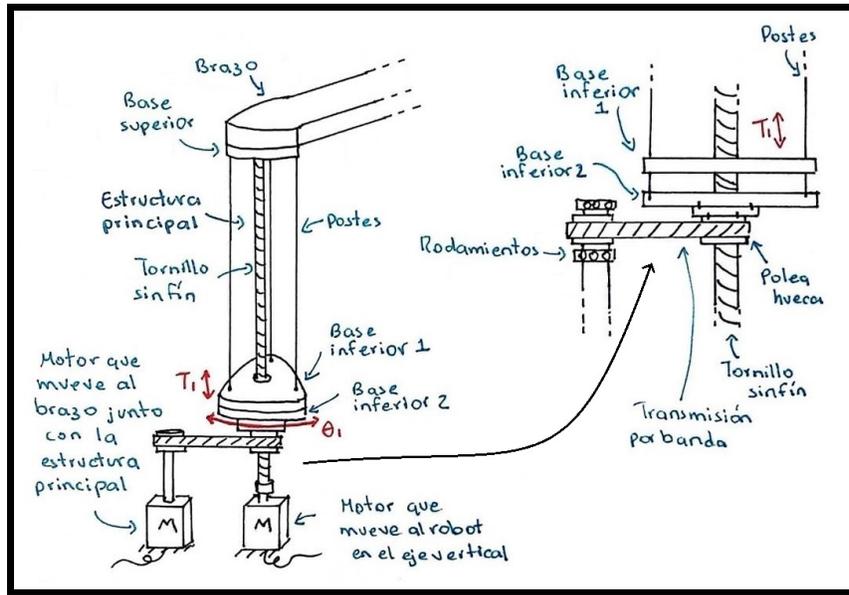


Figura 2.3.1(a) Concepto 1 de solución para el Sistema Motriz 1 (Brazo).

Concepto 2

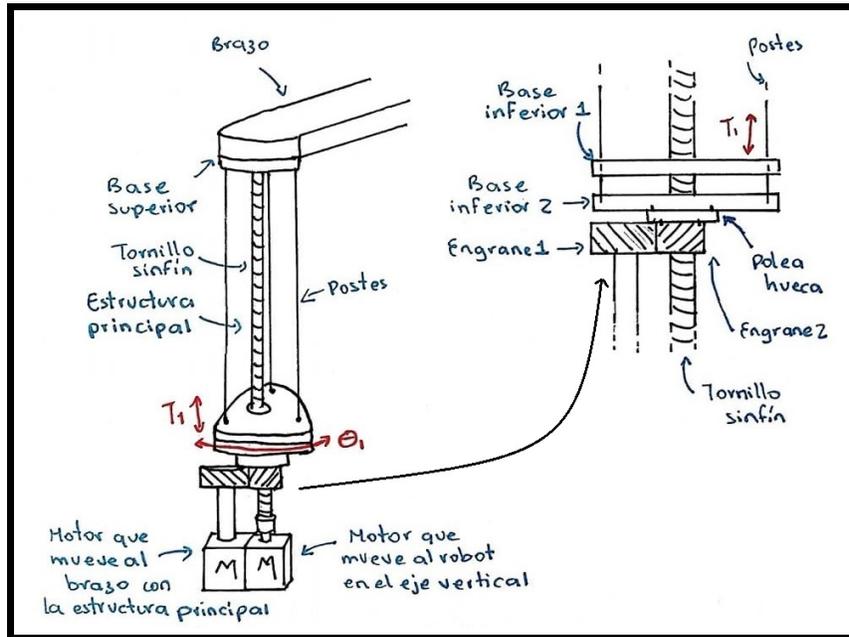


Figura 2.3.1(b) Concepto 2 de solución para el Sistema Motriz 1 (Brazo).

Concepto 3

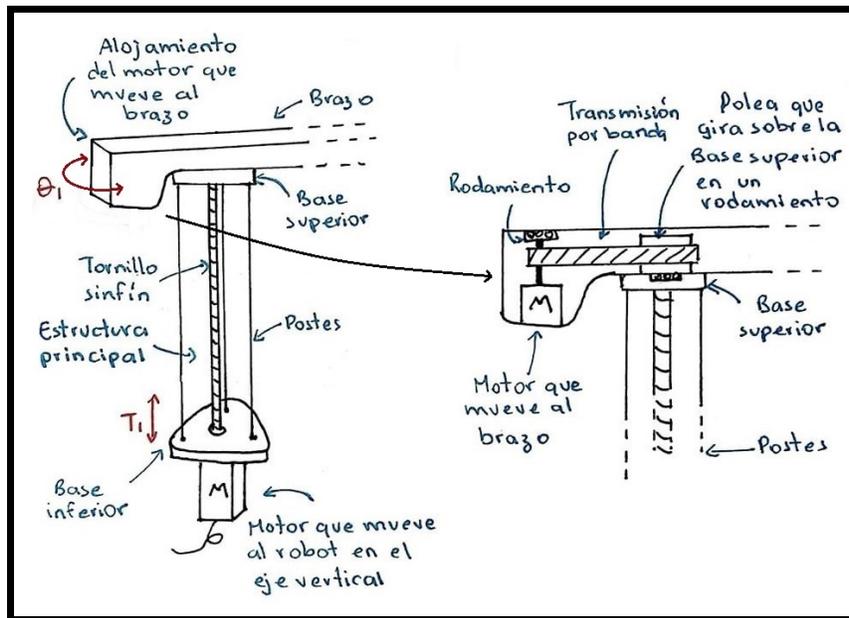


Figura 2.3.1(c) Concepto 3 de solución para el Sistema Motriz 1 (Brazo).

Concepto 4

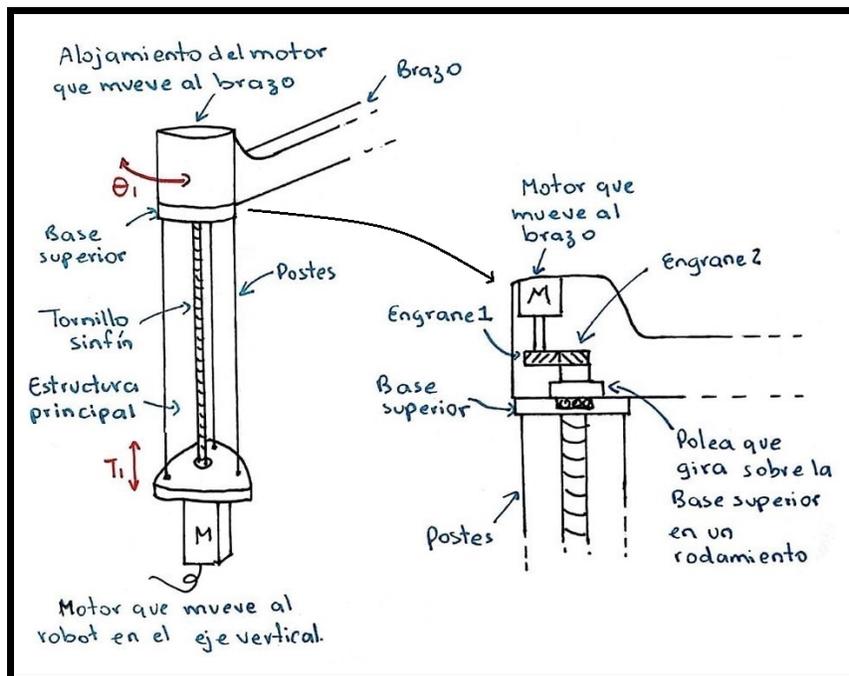


Figura 2.3.1(d) Concepto 4 de solución para el Sistema Motriz 1 (Brazo).

## Sistema Motriz 2 (Antebrazo):

**Concepto 1** (figura 2.3.2 a)): este concepto parte de la idea de alojar el motor que moverá al *antebrazo* en la misma articulación del brazo-antebrazo (codo); en este caso, en un extremo del *brazo*. El motor está orientado con el eje vertical hacia arriba, y éste llega hasta el *antebrazo*, en el cual está anclado, logrando que cuando el *eje* gire, el *antebrazo* también lo haga. Dado que el motor se encuentra en la articulación misma, es necesaria una transmisión directa.

**Concepto 2** (figura 2.3.2 b)): en esta disposición, el motor que mueve al *antebrazo* ya no se encuentra en la articulación del codo, sino que se aloja encima de la *estructura principal*, con el eje vertical hacia abajo, y por medio de una transmisión por *banda* es posible mover un *eje* que está anclado en el antebrazo, por lo que cuando el eje gira, el antebrazo también lo hace. Dada la lejanía del motor con la articulación, sí es necesaria una transmisión no directa.

**Concepto 3** (figura 2.3.2 c)): en este caso, el motor que se encarga de mover al *antebrazo* está lejos de la articulación del codo; se encuentra alojado en la *estructura principal*, específicamente debajo de la *Base superior*, con el eje orientado verticalmente hacia arriba. Para transmitir el movimiento, es necesaria una transmisión por *banda*, y ésta se encuentra a lo largo del *brazo*, hacia un *eje* que está anclado en el *antebrazo*, por lo que cuando el *eje* gira, el *antebrazo* también lo hace. Este concepto es muy parecido al anterior en cuanto a la idea de la colocación de la transmisión y del funcionamiento, solamente cambia el alojamiento del motor que genera este movimiento.

**Concepto 4** (figura 2.3.2 d)): en este concepto, el motor que moverá al *antebrazo* se encuentra alojado en un extremo del *brazo*, que es contrario a donde se sujeta el *antebrazo*, generando un contrapeso. El motor está orientado con el eje vertical y hacia arriba, y la transmisión del par motriz se da por medio de una *banda* a lo largo del brazo, hasta un *eje* que está anclado en el *antebrazo*; si gira el *eje*, el *antebrazo* también lo hace.

Concepto 1

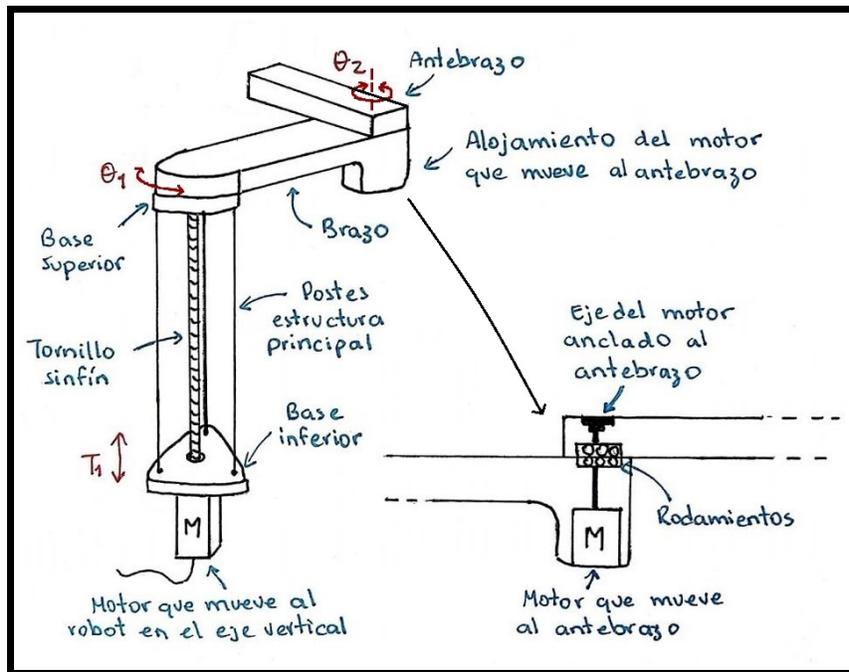


Figura 2.3.2(a) Concepto 1 de solución para el Sistema Motriz 2 (Antebrazo).

Concepto 2

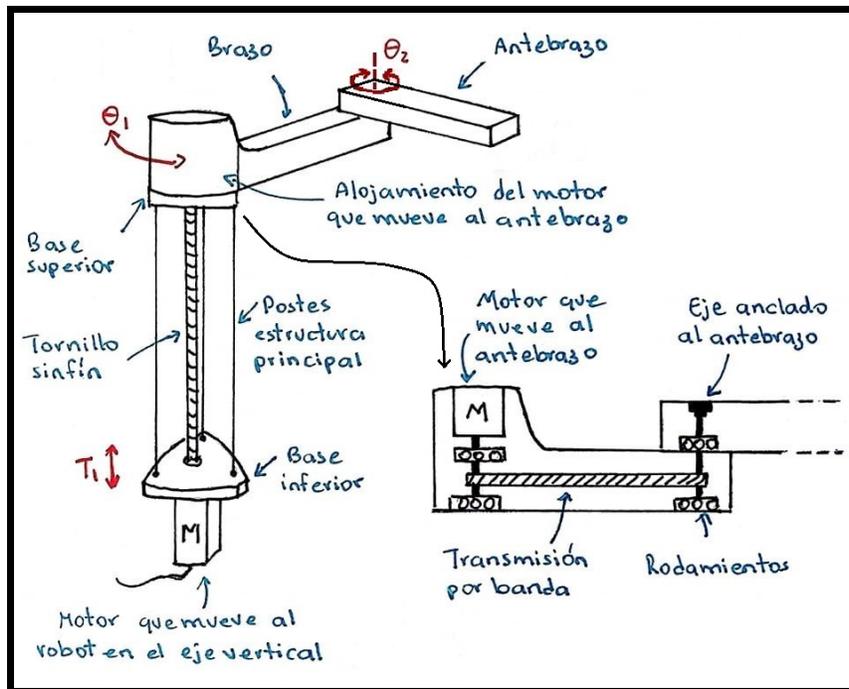


Figura 2.3.2(b) Concepto 2 de solución para el Sistema Motriz 2 (Antebrazo).

Concepto 3

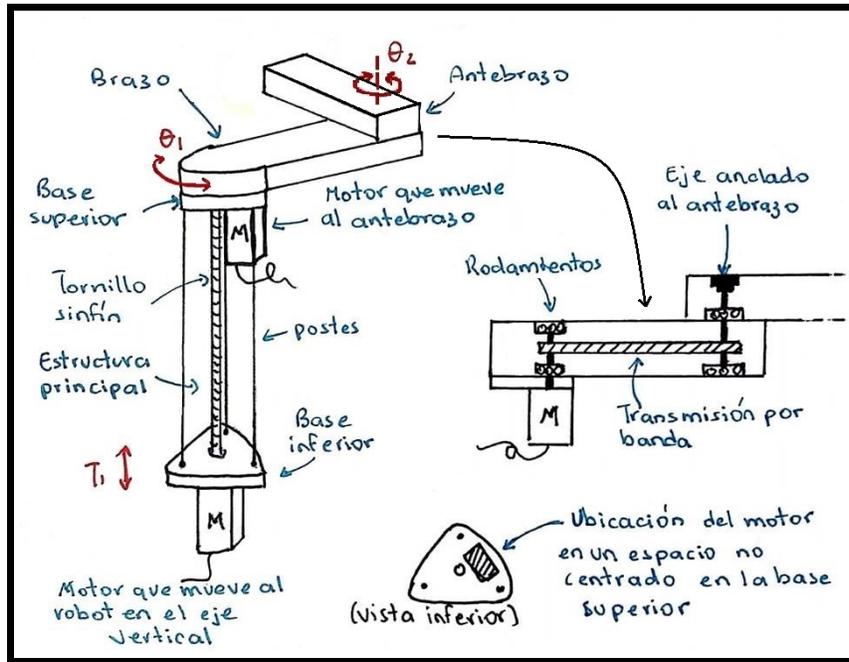


Figura 2.3.2(c) Concepto 3 de solución para el Sistema Motriz 2 (Antebrazo).

Concepto 4

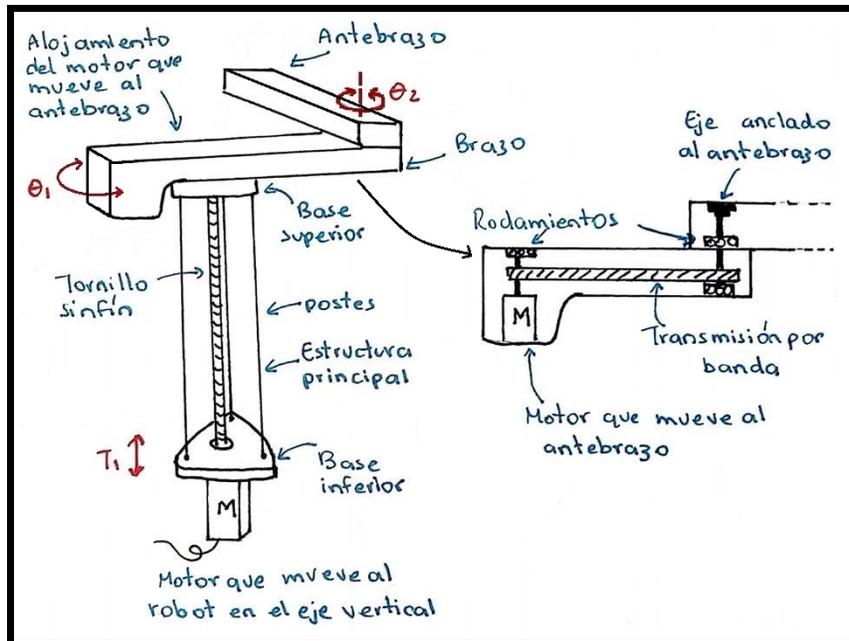


Figura 2.3.2(d) Concepto 4 de solución para el Sistema Motriz 2 (Antebrazo).

## Sistema de Transmisión:

Los conceptos mostrados a continuación son opciones de solución para transmitir el movimiento al sistema motriz 1 y al sistema motriz 2, es decir, al brazo y al antebrazo directamente.

**Concepto 1** (figura 2.3.3 a): este concepto hace referencia a una transmisión por poleas y banda dentada, utilizada para transmitir potencia entre dos ejes que están separados por una distancia que no puede cubrir un sistema de engranes simples.

**Concepto 2** (figura 2.3.3 b): la idea de este concepto fue obtenida del mecanismo utilizado en la patente *Robot Handling Apparatus*, No. 5,765,983 [57], en la que se describe una configuración de robot SCARA que manipula obleas de silicio. La forma de transmitir el movimiento desde el eje de un motor hacia otro eje en una articulación del robot es mediante el uso de un sistema de biela-manivela. En este caso, un eje genera la rotación de otro eje gracias a la unión de ambos por una barra rígida que tiene un movimiento en plano general. Este mecanismo se utiliza cuando los ejes están a una distancia que no puede cubrir un sistema de engranes simples.

**Concepto 3** (figura 2.3.3 c): a diferencia de los otros dos conceptos, éste hace referencia a una transmisión por engranes, utilizado en mecanismos con distancias pequeñas entre ejes. La potencia mecánica se transmite desde un piñón (engrane conductor) a un engrane conducido gracias al contacto que hay entre sus dientes.

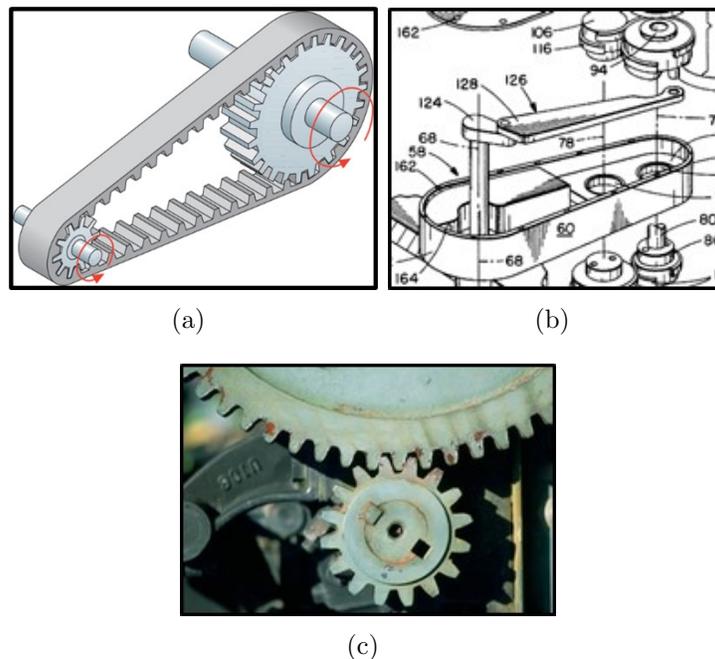


Figura 2.3.3. Conceptos de solución para el Sistema de Transmisión. a) Por poleas y banda, b) por mecanismo biela-manivela, c) por engranes. Las imágenes de estos conceptos fueron obtenidas de [57, 58 y 59] respectivamente.

El brazo y el antebrazo tendrían aproximadamente 35 cm y 25 cm de largo entre centro y centro) respectivamente y 7-10 cm de ancho para ambos. Esto se tomó como base del modelo físico del robot [56] para mantener el espacio de trabajo que ya se ha contemplado en ese diseño previo. En el caso de la profundidad, dependerá de la configuración final seleccionada y de los componentes que contenga.

Un ejemplo de los motores a utilizar es el que se observa en la figura 2.3.4, en la cual se especifican las dimensiones que son importantes a considerar para su implementación. Este servomotor es el utilizado en [56] para el modelo físico del robot.

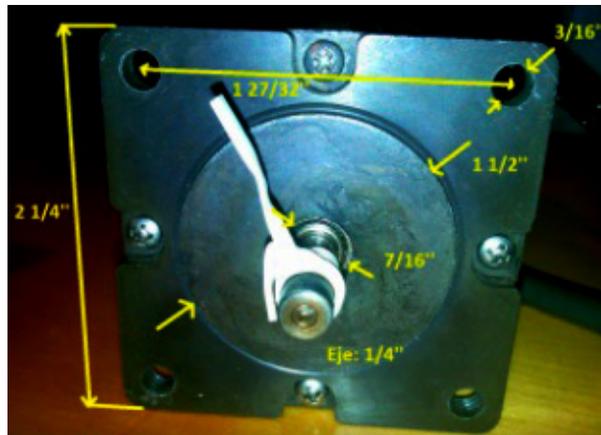


Figura 2.3.4 Dimensiones de los motores marca *Thomson* que moverán el brazo y el antebrazo. La profundidad o altura del cuerpo del motor (excluyendo al eje), es de 8-10 cm.

## 2.4 Matriz morfológica

Una vez definidos los conceptos de solución para cada sistema, se vertieron en una matriz morfológica con la finalidad de observar las opciones que se tienen para cada sistema, y las combinaciones que se podrían realizar entre ellas y obtener algunas configuraciones de diseño del brazo-antebrazo. En la figura 2.4.1 se observa esta matriz, y por medio de flechas, se representan las configuraciones (combinaciones de conceptos) que se pueden generar y que se evaluarán más adelante.

Inicialmente, se descartaron las que implicaban conceptos que se contradecían entre sí; por ejemplo, el Concepto 3 del Sistema Motriz 1 y el Concepto 4 del Sistema Motriz 2, coinciden en que el motor para mover el brazo y el motor para mover el antebrazo, están en la misma posición, lo cual es imposible. Así también, se descartó la configuración que implica el Concepto 4 del Sistema Motriz 1 y el Concepto 4 del Sistema Motriz 2, ya que el mecanismo para mover el brazo, alojado en la parte superior de la estructura principal, no haría posible que trabajara el mecanismo de transmisión para mover el antebrazo.

Las configuraciones que se consideraron como posibles para evaluar son las mostradas en la figura 2.4.1. Esta figura contiene las distintas configuraciones que son posibles, cada una representada por un color. Por ejemplo, la configuración que está en color café, combina los conceptos 1 ó 2 del Sistema Motriz 1, el concepto 1 del Sistema Motriz 2 y los conceptos 1 ó 3 del Sistema de Transmisión.

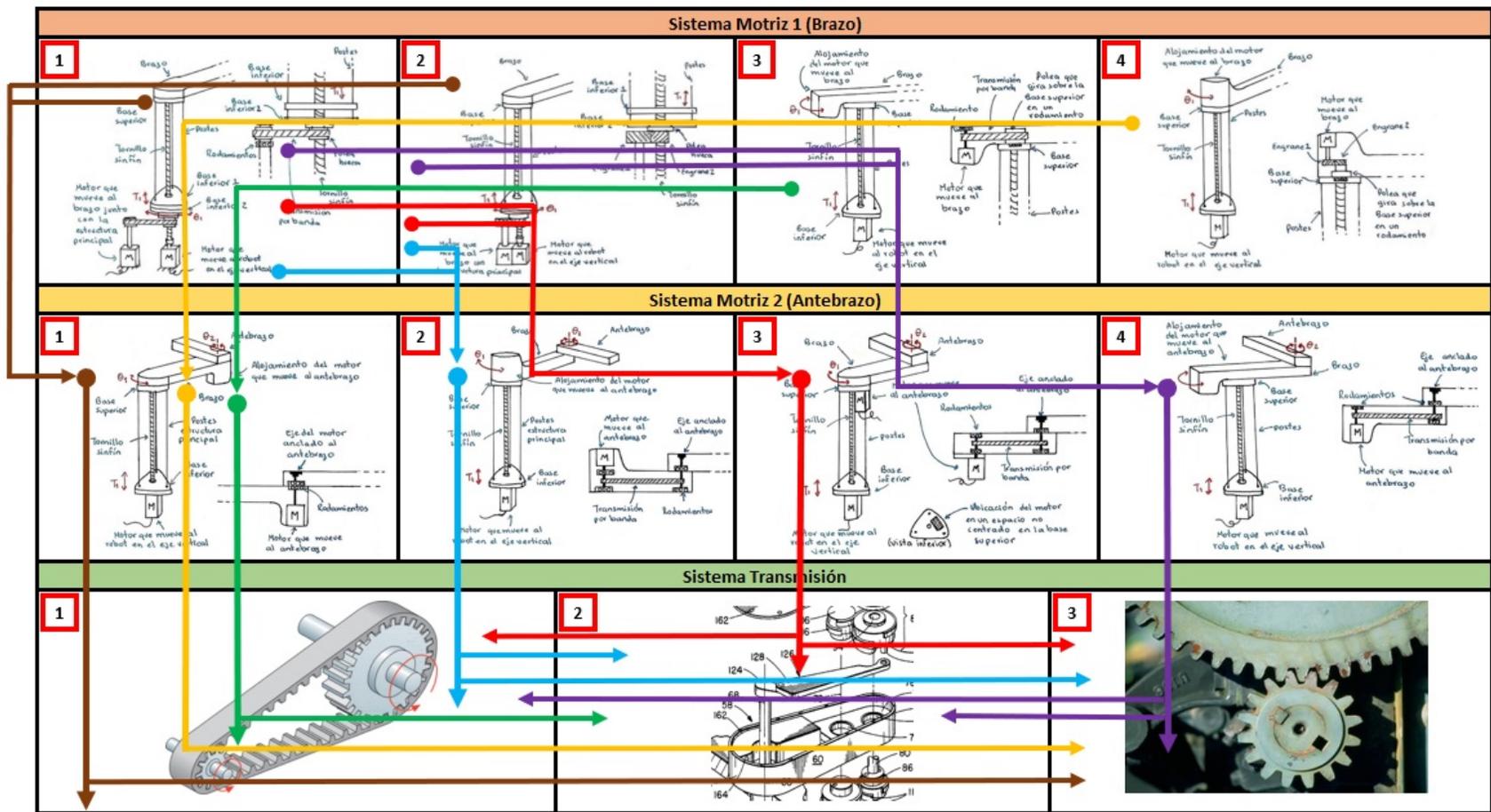


Figura 2.4.1 Matriz morfológica con los conceptos de solución para cada sistema. Cada secuencia de flechas con un color en específico representa la combinación de los conceptos de los distintos sistemas para formar una configuración. En esta figura se representan las configuraciones que son posibles de evaluar.

## 2.5 Configuraciones obtenidas

A continuación, en las figuras 2.5.1-2.5.6, se muestran las configuraciones obtenidas producto de combinar los conceptos de los distintos sistemas, junto con una descripción de cada una de ellas.

## CONFIGURACIÓN 1

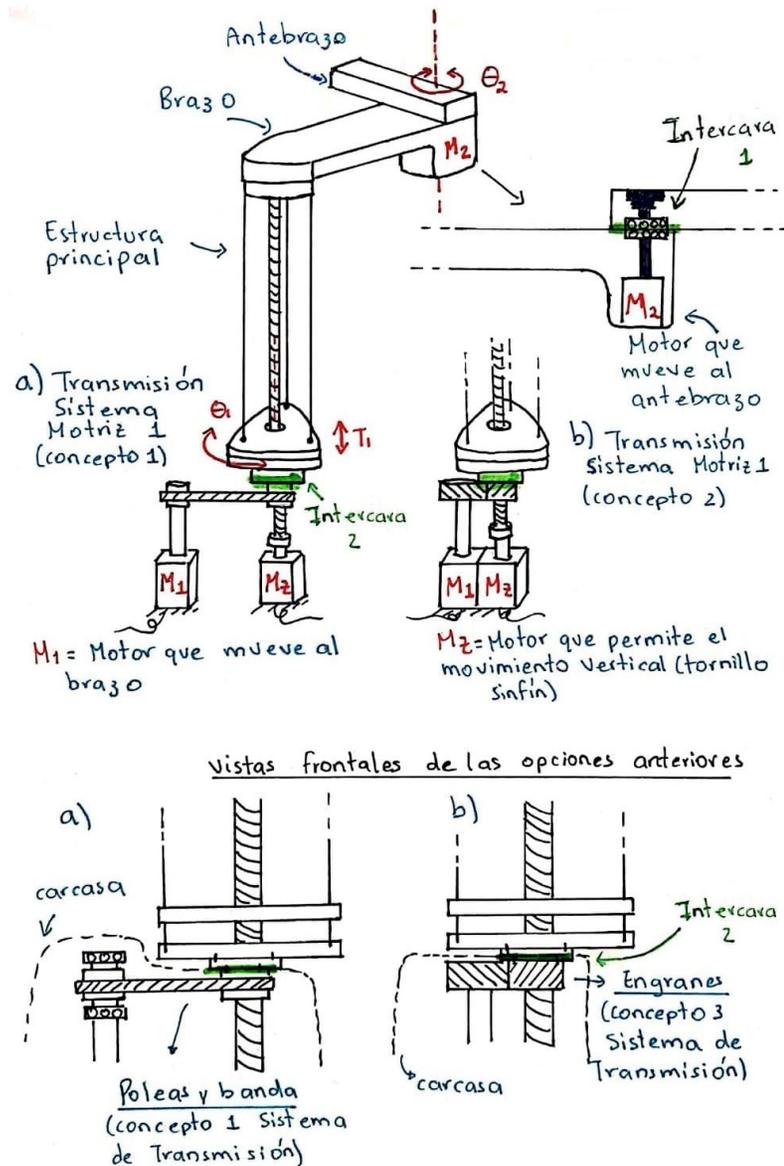


Figura 2.5.1 Bosquejo de la Configuración 1.

En la configuración mostrada en la figura 2.5.1, se combinan los conceptos 1 ó 2 del Sistema Motriz 1 (brazo), con el concepto 1 del Sistema Motriz 2 (antebrazo) y los conceptos 1 ó 3 del Sistema de Transmisión. De esta manera, el brazo es movido junto con la estructura principal y desde la parte inferior de ésta, ya sea por medio de engranes o con poleas y banda dentada, a partir de un motor  $M_1$ . Esta forma de mover el brazo desde abajo permite que el robot pueda desplazarse verticalmente en el eje Z a partir de un tornillo sinfín movido por el motor  $M_2$ ; los movimientos no se contraponen. Es posible encapsular la transmisión encargada de mover el brazo (transmisión del Sistema Motriz 1) junto con el sistema que mueve al robot verticalmente (motor  $M_2$  y parte del tornillo sinfín) por medio de una **carcasa**, ya que los motores se encuentran a nivel del suelo y ésta previene la salida de partículas contaminantes hacia el cuarto limpio.

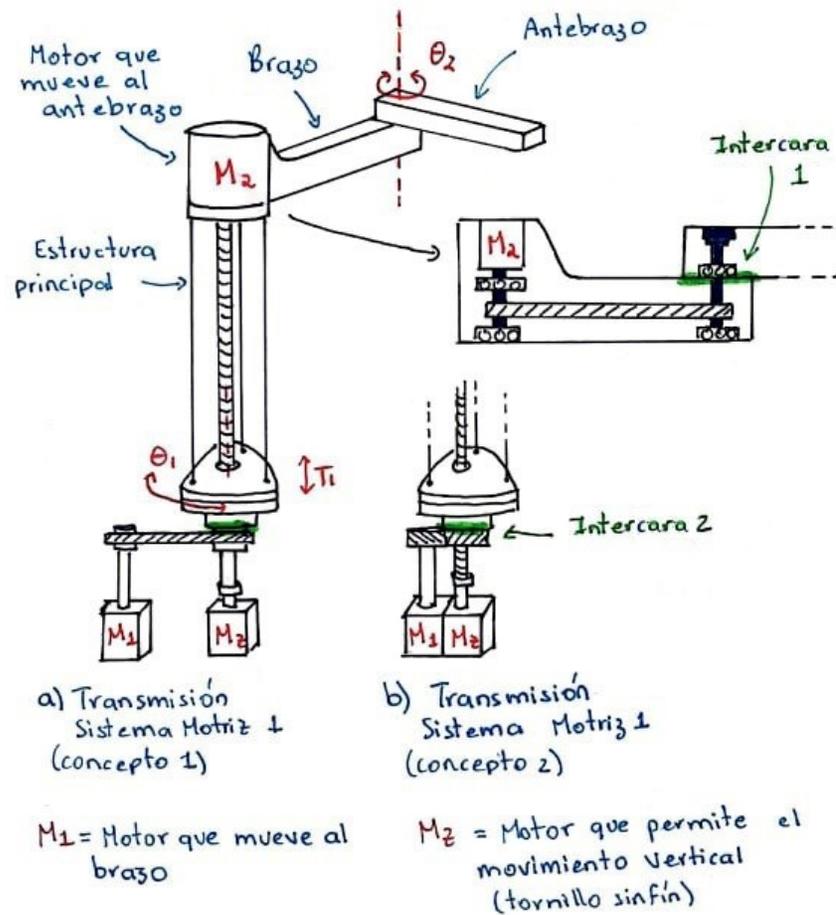
Para el movimiento del antebrazo, el motor ( $M_2$ ) encargado de su movimiento está alojado en la articulación del codo (en un extremo del brazo), y dado que el motor se encuentra en la transmisión misma (es una transmisión directa), no son necesarios bandas o engranes.

Esta configuración permite que todos los elementos del brazo-antebrazo queden por debajo del plano del disco que se va a transportar.

Se aprecian en tono verde las intercara (donde dos encapsulados se tocan) que se consideran para el criterio de evaluación C.

Los detalles sobre cada concepto que conforma esta configuración se encuentran en las figuras 2.3.1(a) y (b), 2.3.2(a) y 2.3.3 (a) y (c).

## CONFIGURACIÓN 2



Las vistas frontales de las opciones anteriores son las mismas que las mostradas en la Configuración 1.

Figura 2.5.2 Bosquejo de la Configuración 2.

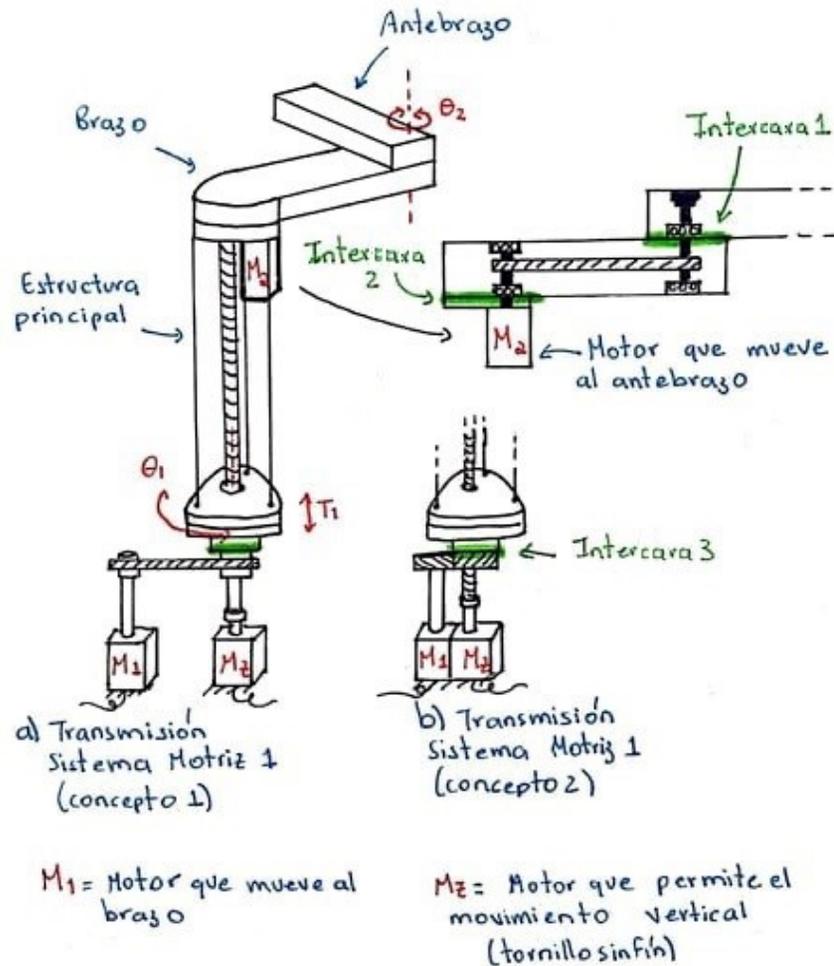
En la configuración mostrada en la figura 2.5.2, se combinan los conceptos 1 ó 2 del Sistema Motriz 1 (brazo), con el concepto 2 del Sistema Motriz 2 (antebrazo) y los conceptos 1 ó 3 del Sistema de Transmisión. De esta manera, el brazo es movido junto con la estructura principal y desde la parte inferior de ésta, ya sea por medio de engranes o con poleas y banda dentada, a partir de un motor  $M_1$ . Esta forma de mover el brazo desde abajo permite que el robot pueda desplazarse verticalmente en el eje Z a partir de un tornillo sinfín movido por el motor  $M_Z$ ; los movimientos no se contraponen. Es posible encapsular la transmisión encargada de mover el brazo (transmisión del Sistema Motriz 1) junto con el sistema que mueve al robot verticalmente (motor  $M_Z$  y parte del tornillo sinfín) por medio de una carcasa, ya que los motores se encuentran a nivel del suelo y ésta previene la salida de partículas contaminantes hacia el cuarto limpio. Para el movimiento del antebrazo, el motor ( $M_2$ ) encargado de éste se aloja encima de la estructura principal, con el eje vertical y hacia abajo, y por medio de una transmisión por banda es posible mover otro eje que está anclado en el antebrazo, por lo que cuando este eje gira, el antebrazo también lo hace.

Cabe resaltar que esta configuración no permite que todos los elementos del brazo-antebrazo queden por debajo del plano del disco que se va a transportar, debido a que las dimensiones del motor  $M_2$  que mueve al antebrazo (ver figura 2.3.4) hacen que este sobresalga del plano del disco.

Se aprecian en tono verde las intercara (donde dos encapsulados se tocan) que se consideran para el criterio de evaluación C.

Los detalles sobre cada concepto que conforma esta configuración se encuentran en las figuras 2.3.1(a) y (b), 2.3.2(b) y 2.3.3 (a) y (c).

### CONFIGURACIÓN 3



Las vistas frontales de las opciones anteriores son las mismas que las mostradas en la Configuración 1.

Figura 2.5.3 Bosquejo de la Configuración 3.

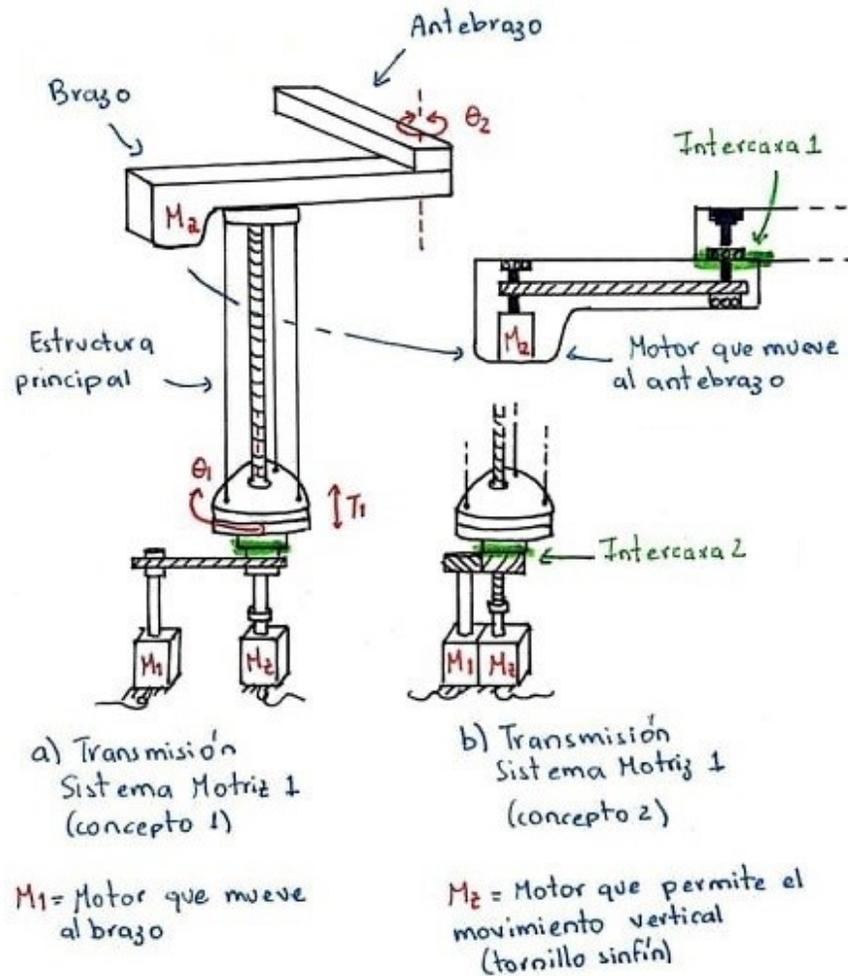
En la configuración mostrada en la figura 2.5.3, se combinan los conceptos 1 ó 2 del Sistema Motriz 1 (brazo), con el concepto 3 del Sistema Motriz 2 (antebrazo) y los conceptos 1 ó 3 del Sistema de Transmisión. El funcionamiento para mover el brazo y el posible encapsulado es el mismo que para las configuraciones anteriores, y para el movimiento del antebrazo, el motor ( $M_2$ ) destinado a esta tarea está lejos de la articulación del codo; se encuentra alojado en la estructura principal, específicamente debajo de la Base superior, con el eje orientado verticalmente y hacia arriba. Es importante resaltar que, aunque el motor está en la estructura principal, el eje de éste y el de la estructura no están alineados. Para hacer llegar el movimiento hasta el antebrazo, es necesaria una transmisión, y ésta se encuentra a lo largo del brazo, hacia un eje que está anclado en el antebrazo, por lo que cuando el eje gira, el antebrazo también lo hace.

Esta configuración permite que todos los elementos del brazo-antebrazo, queden por debajo del plano del disco que se va a transportar, sin embargo, el motor ( $M_2$ ) que mueve al antebrazo se encuentra fuera de los encapsulados del robot.

Se aprecian en tono verde las intercara (donde dos encapsulados se tocan) que se consideran para el criterio de evaluación C.

Los detalles sobre cada concepto que conforma esta configuración se encuentran en las figuras 2.3.1(a) y (b), 2.3.2(c) y 2.3.3(a) y (c).

## CONFIGURACIÓN 4



Las vistas frontales de las opciones anteriores son las mismas que las mostradas en la Configuración 1.

En la configuración mostrada en la figura 2.5.4, se combinan los conceptos 1 ó 2 del Sistema Motriz 1 (brazo), con el concepto 4 del Sistema Motriz 2 (antebrazo) y los conceptos 1 ó 3 del Sistema de Transmisión. El funcionamiento para mover el brazo y el posible encapsulado es el mismo que para las configuraciones anteriores, y para el movimiento del antebrazo, el motor ( $M_2$ ) destinado a esta tarea se encuentra alojado en un extremo del brazo que es contrario a donde se sujeta el antebrazo, generando un contrapeso. El motor está orientado con el eje vertical y hacia arriba y la transmisión del par motriz se da por medio de una banda a lo largo del brazo hasta un eje que está anclado en el antebrazo; si gira el eje, el antebrazo también lo hace.

Esta configuración permite que todos los elementos del brazo-antebrazo, queden por debajo del plano del disco que se va a transportar, además de que existe un contrapeso por parte del motor ( $M_2$ ) para contrarrestar la masa del antebrazo.

Se aprecian en tono verde las intercaras (donde dos encapsulados se tocan) que se consideran para el criterio de evaluación C.

Los detalles sobre cada concepto que conforma esta configuración se encuentran en las figuras 2.3.1(a) y (b), 2.3.2(d) y 2.3.3(a) y (c).

Figura 2.5.4 Bosquejo de la Configuración 4.

## CONFIGURACIÓN 5

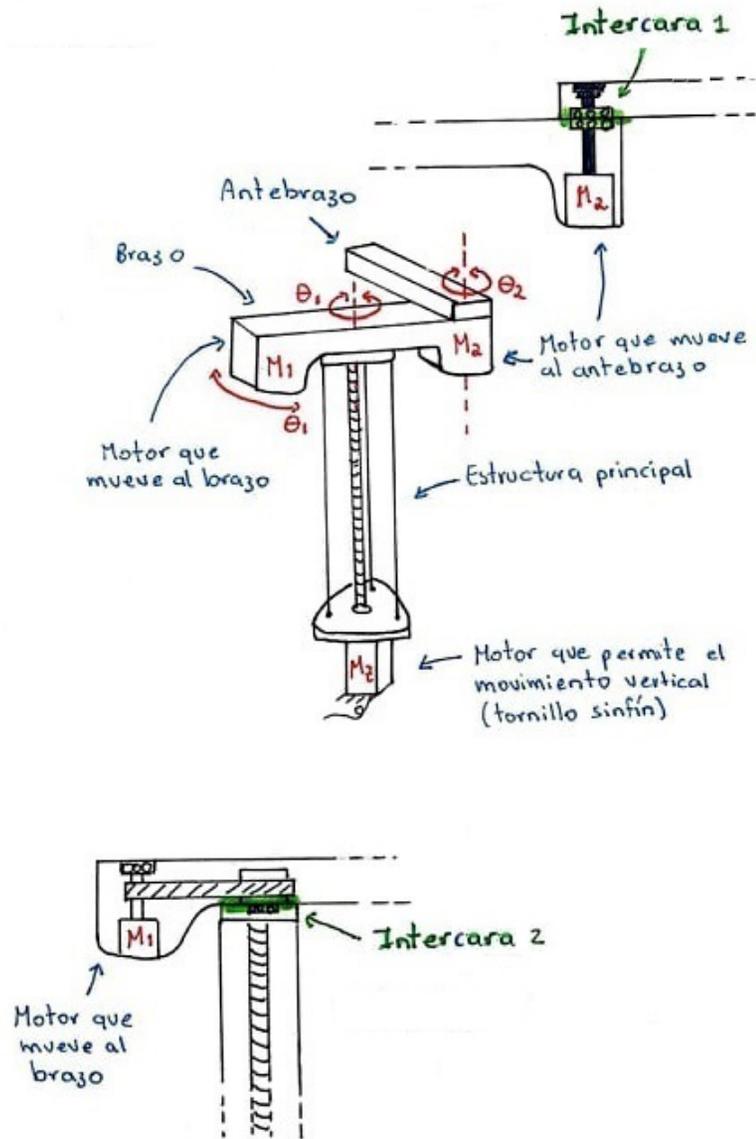


Figura 2.5.5 Bosquejo de la Configuración 5.

En la configuración mostrada en la figura 2.5.5, se combinan el concepto 3 del Sistema Motriz 1 (brazo), con el concepto 1 del Sistema Motriz 2 (antebrazo) y el concepto 1 del Sistema de Transmisión.

El movimiento del brazo es posible mediante un motor ( $M_1$ ) que está colocado en el brazo mismo. En este caso, el motor se encuentra alojado en un extremo del brazo, que es contrario a donde se sujeta el antebrazo, generando un contrapeso. Este motor está orientado con el eje vertical y hacia arriba, y la transmisión del par motriz se da por medio de una banda hasta una polea que está unida al brazo mismo, pero gira libremente en un rodamiento que se encuentra en la Base superior de la estructura principal, por lo que esta estructura no gira pero el brazo sí lo hace. Para el movimiento del antebrazo, el motor ( $M_2$ ) encargado de su movimiento está alojado también en el brazo, pero en la articulación del codo (en el extremo contrario a  $M_1$ ) y dado que el motor se encuentra en la transmisión misma, no son necesarios bandas o engranes.

Esta configuración permite que todos los elementos del brazo-antebrazo queden por debajo del plano del disco que se va a transportar, además de que esta configuración cuenta con dos motores que hacen contrapeso entre sí. Se aprecian en tono verde las intercaras (donde dos encapsulados se tocan) que se consideran para el criterio de evaluación C.

Los detalles sobre cada concepto que conforma esta configuración se encuentran en las figuras 2.3.1(c), 2.3.2(a) y 2.3.3(a).

## CONFIGURACIÓN 6

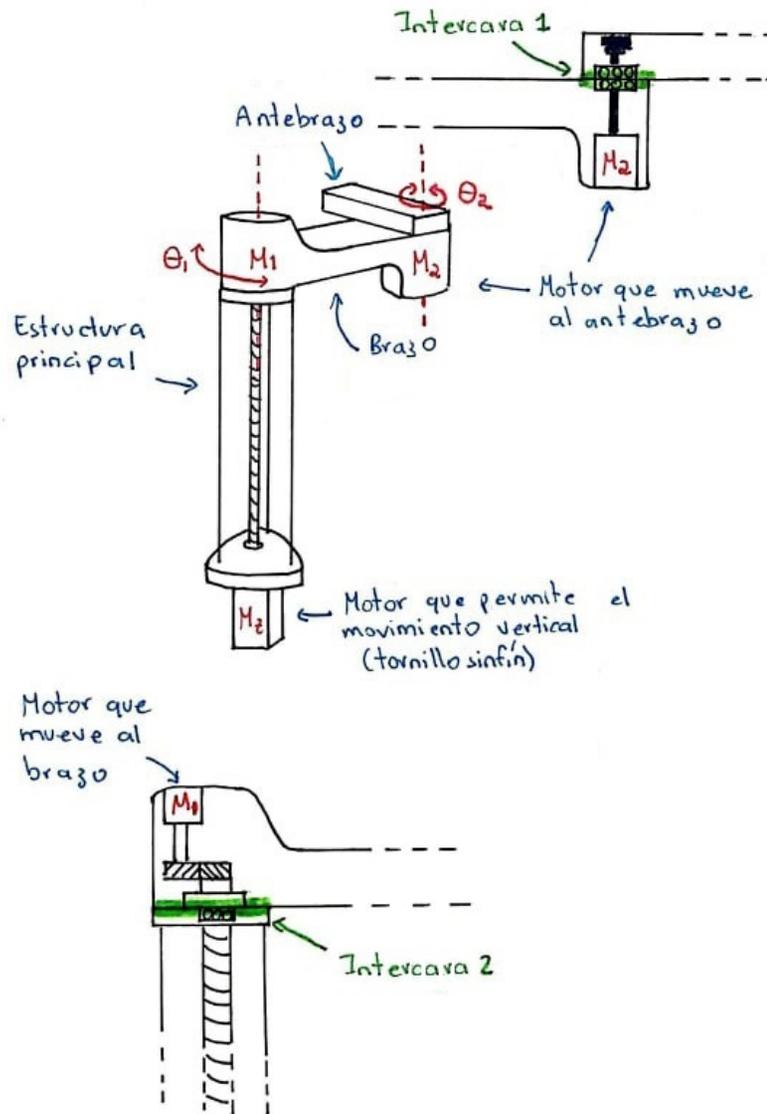


Figura 2.5.6 Bosquejo de la Configuración 6.

En la configuración mostrada en la figura 2.5.6, se combinan el concepto 4 del Sistema Motriz 1 (brazo), con el concepto 1 del Sistema Motriz 2 (antebrazo) y el concepto 3 del Sistema de Transmisión.

El funcionamiento en esta configuración es igual a la anterior (en cuanto al movimiento del antebrazo). Para el movimiento del brazo, la idea es la misma que para la combinación anterior, con la diferencia de que el motor  $M_1$  se encuentra alojado encima de la estructura principal y no como contrapeso. Dada la cercanía del motor con el eje de rotación de la polea que gira libremente en un rodamiento que se encuentra en la Base superior, es posible transmitir el movimiento del motor mediante engranes y no una banda. De igual manera, el brazo girará, pero la estructura principal no.

Cabe resaltar que esta configuración no permite que todos los elementos del brazo-antebrazo queden por debajo del plano del disco que se va a transportar, debido a que las dimensiones del motor  $M_2$  que mueve al brazo hacen que éste sobresalga del plano del disco. Además, a diferencia de la configuración anterior, no existe un contrapeso para contrarrestar la masa del antebrazo y del motor que mueve a este último.

Se aprecian en tono verde las intercaras (donde dos encapsulados se tocan) que se consideran para el criterio de evaluación C.

Los detalles sobre cada concepto que conforma esta configuración se encuentran en las figuras 2.3.1(d), 2.3.2(a) y 2.3.3(c).

## 2.6 Evaluación de las configuraciones

### Criterios de diseño/selección:

Para evaluar las posibles configuraciones de la figura 2.4.1, primero es necesario establecer los criterios de diseño/selección y asignarles una ponderación, resultado de compararlos entre sí en cuanto a su importancia. Posteriormente, se podrá analizar si cada una de las configuraciones cumple con los criterios establecidos. A continuación, se enlistan los criterios de diseño/selección junto con una breve explicación de su significado, y para una mejor comprensión de cómo se aplicará cada criterio, se explica qué características de diseño se deben tomar en cuenta para evaluar las configuraciones. Estos criterios fueron seleccionados con base en la información recabada en la teoría (capítulo 1) y antecedentes expuestos en [56], y significan lo que debe tener técnicamente el diseño para que se cumplan las necesidades y se proporcione una solución al problema.

A) Fricción entre componentes: la fricción es una fuerza que siempre está presente cuando dos superficies están en contacto, y en el caso del robot tipo SCARA sucederá principalmente en los sistemas de transmisión que requieran trasladar el movimiento de un lugar a otro (transmisiones no directas), porque habrá más piezas en movimiento relativo (mayor fricción y esparcimiento de las partículas generadas por el desgaste). Por lo tanto, cuando se evalúen las configuraciones para este criterio, se tomará en cuenta el **número de transmisiones no directas** (como son el uso de poleas y bandas o de engranes), o el **número de piezas que compongan un mecanismo en específico**.

B) Movimiento por debajo del plano del disco: un robot tipo SCARA, como ya se mencionó en la sección 1.3, tiene comúnmente una configuración de un brazo, un antebrazo y un sujetador, que es un efector terminal unido al antebrazo. Este sujetador es el encargado de actuar como una mano con el fin de tomar y soltar elementos para trasladarlos de un lugar a otro, o sostener herramientas que servirán para ensamblar algún componente o aplicar algún recubrimiento, dependiendo de la función del robot. Para el caso de la industria de los semiconductores, al manipularse obleas (discos) de silicio, el cuerpo del robot debiera operar por debajo del plano de la oblea o disco para que las partículas que se lleguen a generar se depositen por debajo de las obleas y no se vean afectadas. Para evaluar las configuraciones según este criterio, se contará el **número de elementos que estén por encima del plano del disco**.

C) Nivel de emisión de partículas: el nivel de emisión de partículas está asociado al desgaste que pueda haber entre componentes debido al movimiento relativo entre piezas; existe desprendimiento de partículas que, si salen del encapsulado del robot, afectarán la limpieza del cuarto limpio. Por lo tanto, para evaluar las configuraciones se hará énfasis en observar si los **motores junto con las transmisiones están encapsuladas** (una carcasa que evite en medida de lo posible la salida de partículas contaminantes) y en **cuántos cambios de encapsulado a encapsulado existen en la configuración propuesta**, entendiendo como un cambio de encapsulado la existencia de una intercara (donde dos encapsulados se tocan); esto último debido a que entre un encapsulado y otro existe siempre una posibilidad de espacio para que las partículas generadas salgan del entorno del robot y afecten la limpieza del cuarto. En el caso de evaluar un mecanismo

específico, determinar **cuál de ellos presenta un mayor desgaste en sus piezas, qué tan fácil es cambiar el componente con regularidad para que no exista contaminación por emisión de partículas, y también el número de piezas con las que cuenta la transmisión.** Se toma en cuenta esta última perspectiva porque más adelante se evaluarán los conceptos pertenecientes al sistema de transmisión, y este aspecto es fácilmente aplicable a ella.

D) Backlash: por lo general, el juego entre componentes se da por la pérdida de material debido a la fricción, o en los elementos que estarán sometidos a cargas constantes o cíclicas y con el paso del tiempo existe una distorsión de la geometría, una reducción del tamaño de los componentes o un desplazamiento por inercia; por ejemplo, en las zonas de las transmisiones que están sujetas al movimiento directo del motor o el que genera una banda o engrane en una transmisión no directa; debido al constante torque que ejerce el motor sobre las demás piezas sobre todo al comienzo, término y cambio brusco de dirección de giro. Por estas razones, para evaluar las configuraciones se contará el **número de ejes que giran en las distintas transmisiones que componen el brazo-antebrazo**; al igual que el criterio anterior, en el caso de evaluar un mecanismo específico, tomar en cuenta el **juego que puede haber entre componentes debido a la pérdida de material por el desgaste.**

E) Perfil aerodinámico: el mobiliario o equipo dentro de un cuarto limpio debe diseñarse o colocarse de tal manera que se prevengan espacios muertos (donde no hay flujo aéreo) y se eviten cambios bruscos en el sentido del flujo del aire, por lo que el posicionamiento y geometría de los objetos dentro del cuarto debe permitir que fluya el aire alrededor de los mismos de una manera suave, además de tener una geometría no rebuscada para que no queden atascadas partículas, como se mencionó en la sección 1.1. Por lo tanto, es necesario determinar **si la configuración a evaluar tiene un diseño aerodinámico**, tomando en cuenta si la disposición de ciertos elementos genera huecos entre ellos que interrumpen el flujo de aire del cuarto limpio. La cuestión de las esquinas, redondeos y chaflanes no se tomará en cuenta aún ya que estas configuraciones son solamente propuestas y están sujetas a modificaciones finales en cuanto a la geometría interna o externa.

F) Movimiento de las conexiones: una de las consideraciones para el diseño de robots para cuartos limpios es que el cableado debe ser interno para evitar que se enrede con el movimiento del robot y genere partículas contaminantes. Por lo tanto, para la evaluación de las configuraciones, se debe tomar en cuenta **si hay posibilidad de que los cables se enreden con el movimiento del robot o no puedan ir ajustados en la parte interna de la carcasa**, y para el caso de evaluar qué transmisión es la óptima, tomar en cuenta **si el movimiento de ésta y sus componentes dejan lugar a que el cableado sea interno y no externo.**

G) Movimiento de pesos muertos: el movimiento de masas extras como pesos muertos consume energía, además de que genera un momento de fuerza sobre la estructura principal, propiciando desgaste en los componentes que se ven sometidos a esfuerzos debido a estas cargas adicionales. Por peso muerto se entienden los motores que están fuera

de un eje imaginario de la estructura principal; no se consideran las masas del antebrazo o del brazo. Por lo que, para evaluar las configuraciones, se contará **el número de motores que están en una posición como la anteriormente descrita, pero también se tomará en cuenta si existen motores que generen un contrapeso y le den estabilidad al robot.**

Para asignarle una ponderación a cada uno de los criterios anteriores, se hizo uso de una matriz de comparación por pares, en la que se compara la importancia de cada criterio respecto a todos los demás. Se tomó un criterio renglón y se comparó con cada criterio columna, y en la casilla correspondiente se le asigna un 1 si el criterio renglón es más importante que el criterio columna, y un 0 si no lo es. De esta manera se llena toda la tabla (ver Tabla 2.6.1). Por ejemplo, en el caso del criterio B (Movimiento por debajo del plano del disco), tiene valor de 1 en cada casilla, significando que este criterio es más importante que todos los demás. Otro ejemplo es el del criterio E (Perfil aerodinámico); este criterio no es más importante que otros excepto cuando se le compara con el criterio C (Nivel de emisión de partículas) pues, aunque haya una emisión de partículas, si el brazo-antebrazo tiene un perfil aerodinámico adecuado, permitirá que el flujo de aire del cuarto limpio arrastre las partículas generadas y sean extraídas del cuarto.

Al final se sumó para cada renglón el valor asignado en cada casilla y, además, se hizo una suma total entre los renglones (para este caso, fue de 21). Para obtener el factor de ponderación, se divide la suma de cada renglón entre la suma total, obteniendo un número que indica el nivel de importancia de un criterio respecto a los otros. Este factor se utiliza más adelante en la evaluación de las configuraciones.

En la tabla 2.6.1 se observa la matriz de comparación por pares para la evaluación de los criterios de diseño/selección.

Criterios de diseño/selección	A	B	C	D	E	F	G	SUMA	FACTOR
Fricción entre componentes	A	0	1	1	1	0	1	4	0.19
Movimiento por debajo del plano del disco	B	1	1	1	1	1	1	6	0.29
Nivel de emisión de partículas	C	0	0	1	0	0	1	2	0.10
Backlash	D	0	0	0	1	0	0	1	0.05
Perfil aerodinámico	E	0	0	1	0	0	0	1	0.05
Movimiento de las conexiones	F	1	0	1	1	1	1	5	0.24
Movimiento de pesos muertos	G	0	0	0	1	1	0	2	0.10
								21	1.00

Tabla 2.6.1 Matriz de comparación por pares para los criterios de diseño/selección.

Una vez que se le ha asignado a cada criterio un factor de ponderación, se procede a evaluar las configuraciones mostradas en las figuras 2.5.1-2.5.6. Para esto, se utilizó una matriz de selección en la que se le asigna una calificación a la configuración a evaluar, que significa qué tan buen desempeño tiene la configuración respecto a un criterio de diseño, siendo 10 el mejor desempeño y 0 el desempeño más deficiente. Para obtener la puntuación, se multiplica esa calificación por el factor de ponderación del criterio (ya antes calculado), obteniendo así una calificación ponderada. Al final se suman todas las

calificaciones para esa configuración, obteniendo una global.

En la matriz morfológica (figura 2.4.1), se observa que algunas configuraciones de los conceptos del Sistema Motriz 1 y del Sistema Motriz 2, pueden empatar con dos o tres posibles conceptos del Sistema de Transmisión. Para reducir la cantidad de combinaciones, primero se hizo una evaluación entre los conceptos que pertenecen al Sistema de Transmisión. El Concepto 1 es una transmisión por poleas y banda dentada, ideal para transmitir potencia entre dos ejes que están separados por una distancia que no puede cubrir un sistema de engranes simples, los cuales forman el Concepto 3. Por último, el Concepto 2, trata de un mecanismo de biela-manivela, logrando que un eje rotativo genere la rotación de otro eje gracias a la unión de ambos por una barra rígida que tiene un movimiento plano general. Al igual que la transmisión por bandas, este mecanismo se utiliza para cuando los ejes están a una distancia que no puede cubrir un sistema de engranes simples.

Estos tres conceptos se sometieron a una evaluación según algunos de los criterios antes expuestos (pues no todos los criterios son aplicables al Sistema de Transmisión). Por ejemplo, los criterios A (Fricción entre componentes), C (Nivel de emisión de partículas), D (*Backlash*) y F (Movimiento de las conexiones) sí son aplicables a un sistema de transmisión por banda, engranes o biela-manivela, ya que estos criterios tienen que ver con la fricción entre componentes y por lo tanto la emisión de partículas, además del juego que pueden tener los componentes entre sí justamente debido al movimiento relativo que existe entre las distintas piezas que componen un sistema de transmisión; y también es importante el espacio que el sistema de transmisión pueda dejar para el cableado interno. Los criterios B, E y G no son aplicables para un sistema de transmisión pues éstos se refieren a la disposición, forma del brazo antebrazo y a la colocación de los motores, criterios que se tomarán en cuenta más adelante cuando se evalúen las configuraciones mostradas en las figuras 2.5.1 a 2.5.6.

En la tabla 2.6.2 se muestra la evaluación por medio de una matriz de selección que se realizó entre los conceptos que componen al Sistema de Transmisión.

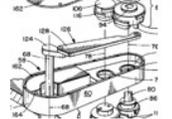
		Concepto					
							
Criterios	Fac	Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación	Calificación	Puntuación
Fricción entre componentes	0.19	8	1.52	7	1.33	5	0.95
Nivel de emisión de partículas	0.10	8	0.76	8	0.76	5	0.48
Backlash	0.05	8	0.38	8	0.38	5	0.24
Movimiento de las conexiones	0.24	9	2.16	6	1.44	9	2.16
<b>SUMA</b>			<b>4.83</b>		<b>3.92</b>		<b>3.83</b>

Tabla 2.6.2 Matriz de selección para la evaluación de los conceptos del Sistema de Transmisión.

Aunque los engranes son la opción ideal para transmitir movimiento cuando la distancia entre ejes es corta, presentan la gran desventaja de que después de un cierto número de ciclos de trabajo, pueden experimentar desgaste en los dientes por el contacto de metal contra metal por la presencia de partículas abrasivas en el lubricante o adhesión entre los dientes por una mala lubricación [60]; esto genera juego entre los componentes (*Backlash*) porque además son elementos mecánicos fijos y no se puede corregir la distancia entre centros una vez que se han diseñado y montado físicamente, a menos que se cambien por engranes nuevos. El desgaste mismo implica desprendimiento de partículas, siendo una fuente de contaminación para el cuarto limpio.

Como una mejor opción, se tienen las poleas con banda dentada (que son útiles para distancias cortas o largas); existe menos juego entre polea y banda, aunque la vida útil de los engranes es mayor que la de una banda. En el caso de que existiera desgaste en la banda, ésta es fácilmente reemplazable además de que se puede ajustar la tensión de la banda con tensores. Es necesario aclarar que se hace la propuesta de una transmisión con banda dentada y no una banda lisa porque el hecho de tener dientes hace que el agarre sea mejor, existe menos fricción entre la banda y la polea y se tiene mayor exactitud y altas velocidades de giro (como lo es el caso de un brazo robótico tipo SCARA).

En el caso de la transmisión por un sistema de biela-manivela, el desempeño de éste es parecido al de transmisión por poleas y banda dentada por el hecho de que las piezas son más fácilmente reemplazables y, por lo tanto, la emisión de partículas en comparación con los engranes es menor. Pero presenta el inconveniente de que el movimiento para llevar a cabo la transmisión es un movimiento plano general, por lo que ocupa mucho más espacio que una transmisión por engranes o por poleas y bandas. Debido a que la transmisión por biela-manivela tiene esta característica, dejaría menos espacio para un cableado interno, pudiendo los cables presentar movimiento y sería necesario un cableado externo.

En todas las transmisiones presentadas existe fricción entre componentes y emisión de partículas pues hay movimiento relativo entre las piezas, pero la evaluación para estos criterios se basó en qué tan fácil es cambiar el componente con regularidad para que no exista contaminación por emisión de partículas y también según el número de piezas con las que cuenta la transmisión, ya que, a mayor número de piezas, hay más fricción y por lo tanto mayor emisión de partículas.

A manera de conclusión, la transmisión más adecuada para mover el antebrazo y el brazo del robot tipo SCARA, es la **transmisión por poleas y banda dentada**, selección realizada con base en la discusión previamente presentada.

Habiendo realizado este análisis sobre el sistema de Transmisión, se procedió a evaluar las configuraciones presentadas en las figuras 2.5.1-2.5.6, tomando en cuenta que las transmisiones necesarias serán por **poleas y bandas dentadas**. A continuación, se muestra en cada página, un resumen de las características de cada configuración (mostradas en las figuras 2.5.1 a 2.5.6) referentes a los criterios de diseño, con las que es posible evaluarlas.

## CONFIGURACIÓN 1

A Fricción entre componentes: esta configuración cuenta con una transmisión no directa (en este caso utilizando el concepto 1 del Sistema de Transmisión ya que es por poleas y banda y no por engranes como anteriormente se ha determinado según la evaluación mostrada en la tabla 2.6.2), correspondiente al movimiento del brazo.

B Movimiento por debajo del plano del disco: dada la disposición de los motores en esta configuración, no existen elementos que estén por encima del plano del disco u oblea de silicio.

C Nivel de emisión de partículas: el motor que se encarga del movimiento del antebrazo está encapsulado y, como ya se mencionó, el sistema de transmisión para el movimiento del brazo también podría estar encapsulado, por lo que ambas transmisiones estarían dentro de carcasas. En cuanto a los cambios de encapsulado a encapsulado, existen dos: uno en la intercara del brazo y el antebrazo, y el otro en la intercara de la carcasa que protege a los motores encargados del movimiento del brazo junto con el movimiento vertical del robot y la estructura principal del robot (no se muestra la carcasa en las figuras anteriores).

D Backlash: para evaluar con este criterio, se toman en cuenta el número de ejes que giran en las distintas transmisiones que componen el brazo-antebrazo, y en la configuración 1 son tres: los dos primeros pertenecen al sistema de transmisión destinado a mover al brazo, y el tercero en la transmisión directa para mover al antebrazo.

E Perfil aerodinámico: dada la disposición de los motores, no existen cavidades o huecos entre elementos, por lo que el flujo de aire del cuarto limpio no se verá afectado. La geometría externa está sujeta a cambios en cuanto a redondeos y chaffanes para hacer un diseño más aerodinámico, tomando en cuenta que mayores radios de curvatura en las piezas, harán el componente más aerodinámico.

F Movimiento de las conexiones: para evaluar con este criterio, se tomará en cuenta si hay posibilidad de que los cables se enreden con el movimiento del robot o no puedan ir ajustados en la parte interna de la carcasa. En esta configuración, dado que la transmisión y el motor para mover el antebrazo están dentro de carcasas (encapsulados), el cableado puede ser interno en esa zona, y en la transmisión para el brazo, como éste se mueve desde abajo, si los cables están dentro de la carcasa o fuera, no interferirán con el movimiento del robot.

G Movimiento de pesos muertos: sólo hay un motor que está en una posición alejada del eje de la estructura principal del robot (el motor  $M_2$  que mueve al antebrazo), generando un peso muerto que significa una carga extra. En esta configuración, no existen motores que hagan contrapeso entre sí, por lo que la carga del motor mencionado no se verá compensada con algún otro elemento.

## CONFIGURACIÓN 2

A Fricción entre componentes: esta configuración cuenta con dos transmisiones no directas (en este caso utilizando el concepto 1 del Sistema de Transmisión ya que es por poleas y banda y no por engranes como anteriormente se ha determinado según la evaluación mostrada en la tabla 2.6.2), correspondientes al movimiento del brazo y al movimiento del antebrazo.

B Movimiento por debajo del plano del disco: dada la disposición de los motores en esta configuración, existe un elemento que está por encima del plano del disco u oblea de silicio; se trata del motor encargado de mover al antebrazo. Dadas las dimensiones del motor (ver figura 2.3.4) y los componentes adicionales a la transmisión como un eje, rodamientos y carcasa que cubre el motor, la parte superior del brazo quedará por encima del plano del disco.

C Nivel de emisión de partículas: el motor que se encarga del movimiento del antebrazo está encapsulado y, como ya se mencionó, el sistema de transmisión para el movimiento del brazo también podría estar encapsulado, por lo que ambas transmisiones estarían dentro de carcasas. En cuanto a los cambios de encapsulado a encapsulado, existen dos: uno en la intercara del brazo y el antebrazo, y el otro en la intercara de la carcasa que protege a los motores encargados del movimiento del brazo junto con el movimiento vertical del robot y la estructura principal del robot (no se muestra la carcasa en las figuras anteriores).

D Backlash: para evaluar con este criterio, se toman en cuenta el número de ejes que giran en las distintas transmisiones que componen el brazo-antebrazo, y en la configuración 2 son cuatro: los dos primeros pertenecen al sistema de transmisión destinado a mover al brazo, y los otros dos ejes forman parte de la transmisión para mover el antebrazo: uno ubicado en el motor  $M_2$  que genera el movimiento y el otro está ubicado al otro lado de la banda de transmisión, anclado al antebrazo para poder moverlo.

E Perfil aerodinámico: dada la disposición de los motores, no existen cavidades o huecos entre elementos, por lo que el flujo de aire del cuarto limpio no se verá afectado. La geometría externa está sujeta a cambios en cuanto a redondeos y chaflanes para hacer un diseño más aerodinámico, tomando en cuenta que mayores radios de curvatura en las piezas, harán el componente más aerodinámico.

F Movimiento de las conexiones: en esta configuración, dado que la transmisión y el motor para mover el antebrazo están dentro de carcasas (encapsulados), el cableado puede ser interno en esa zona, y en la transmisión para el brazo, como éste se mueve desde abajo, si los cables están dentro de la carcasa o fuera, no interferirán con el movimiento del robot.

G Movimiento de pesos muertos: en esta configuración no existen motores que estén en una posición alejada del eje de la estructura principal del robot, por lo que no hay generación de un peso muerto que signifique una carga extra. De igual manera no hay motores que hagan contrapeso entre sí, el motor que mueve al brazo está posicionado en el suelo y el motor que mueve al antebrazo está justo sobre la estructura principal, por lo que no representan una carga extra.

### CONFIGURACIÓN 3

A Fricción entre componentes: esta configuración cuenta con dos transmisiones no directas (en este caso utilizando el concepto 1 del Sistema de Transmisión ya que es por poleas y banda y no por engranes como anteriormente se ha determinado según la evaluación mostrada en la tabla 2.6.2), correspondientes al movimiento del brazo y al movimiento del antebrazo.

B Movimiento por debajo del plano del disco: dada la disposición de los motores en esta configuración, no existen elementos que estén por encima del plano del disco u oblea de silicio. Incluso, el único motor que no está encapsulado (el que mueve al antebrazo), está por debajo del brazo.

C Nivel de emisión de partículas: el motor que se encarga del movimiento del brazo llevará una carcasa como se mencionó anteriormente, pero el motor encargado de mover al antebrazo no está encapsulado. En cuanto a los cambios de encapsulado a encapsulado, existen tres: uno en la intercara del brazo y el antebrazo, el segundo en la intercara entre el motor  $M_2$  y la base superior, y el tercero en la intercara de la carcasa que protege a los motores encargados del movimiento del brazo junto con el movimiento vertical del robot y la estructura principal del robot.

D Backlash: para evaluar con este criterio, se toman en cuenta el número de ejes que giran en las distintas transmisiones que componen el brazo-antebrazo, y en la configuración 3 son cuatro: los dos primeros pertenecen al sistema de transmisión destinado a mover al brazo, y los otros dos ejes forman parte de la transmisión para mover el antebrazo: uno ubicado en el motor  $M_2$  que genera el movimiento y el otro está ubicado al otro lado de la banda de transmisión, anclado al antebrazo para poder moverlo.

E Perfil aerodinámico: dada la disposición de los motores, no existen cavidades o huecos entre elementos, por lo que el flujo de aire del cuarto limpio no se verá afectado. La geometría externa está sujeta a cambios en cuanto a redondeos y chaffanes para hacer un diseño más aerodinámico, tomando en cuenta que mayores radios de curvatura en las piezas, harán el componente más aerodinámico.

F Movimiento de las conexiones: en esta configuración, aunque el motor que mueve al antebrazo no está encapsulado en una carcasa, se moverá junto con el brazo mismo y la estructura principal, por lo que el cableado no tendrá movimiento relativo y no habrá generación de partículas contaminantes. En la transmisión para el brazo, como éste se mueve desde abajo, si los cables están dentro de la carcasa o fuera, no interferirán con el movimiento del robot.

G Movimiento de pesos muertos: en esta configuración existe un motor que está en una posición ligeramente alejada del eje de la estructura principal del robot, por lo que hay generación de un peso muerto que significa una carga extra, aunque es mínima dado que el motor sigue estando en la estructura principal. De igual manera no hay motores que hagan contrapeso entre sí; el motor que mueve al brazo está posicionado en el suelo por lo que no representa una carga extra.

## CONFIGURACIÓN 4

A Fricción entre componentes: esta configuración cuenta con dos transmisiones no directas (en este caso utilizando el concepto 1 del Sistema de Transmisión ya que es por poleas y banda y no por engranes como anteriormente se ha determinado según la evaluación mostrada en la tabla 2.6.2), correspondientes al movimiento del brazo y al movimiento del antebrazo.

B Movimiento por debajo del plano del disco: dada la disposición de los motores en esta configuración, no existen elementos que estén por encima del plano del disco u oblea de silicio.

C Nivel de emisión de partículas: el motor que se encarga del movimiento del antebrazo está encapsulado y, como ya se mencionó, el sistema de transmisión para el movimiento del brazo también podría estar encapsulado, por lo que ambas transmisiones estarían dentro de carcasas. En cuanto a los cambios de encapsulado a encapsulado, existen dos: uno en la intercara del brazo y el antebrazo, y el otro en la intercara de la carcasa que protege a los motores encargados del movimiento del brazo junto con el movimiento vertical del robot y la estructura principal del robot.

D Backlash: para evaluar con este criterio, se toman en cuenta el número de ejes que giran en las distintas transmisiones que componen el brazo-antebrazo, y en la configuración 4 son cuatro: los dos primeros pertenecen al sistema de transmisión destinado a mover al brazo, y los otros dos ejes forman parte de la transmisión para mover el antebrazo: uno ubicado en el motor  $M_2$  que genera el movimiento y el otro está ubicado al otro lado de la banda de transmisión, anclado al antebrazo para poder moverlo.

E Perfil aerodinámico: dada la disposición de los motores, no existen cavidades o huecos entre elementos, por lo que el flujo de aire del cuarto limpio no se verá afectado. La geometría externa está sujeta a cambios en cuanto a redondeos y chaflanes para hacer un diseño más aerodinámico, tomando en cuenta que mayores radios de curvatura en las piezas, harán el componente más aerodinámico.

F Movimiento de las conexiones: en esta configuración, dado que la transmisión y el motor para mover el antebrazo están dentro de carcasas (encapsulados), el cableado puede ser interno en esa zona, y en la transmisión para el brazo, como éste se mueve desde abajo, si los cables están dentro de la carcasa o fuera, no interferirán con el movimiento del robot.

G Movimiento de pesos muertos: en esta configuración existe un motor que está en una posición alejada del eje de la estructura principal del robot, por lo que hay generación de un peso muerto que significa una carga extra, pero a su vez, este motor puede considerarse un contrapeso de la carga que representan el brazo y el antebrazo por sí mismos.

## CONFIGURACIÓN 5

A Fricción entre componentes: esta configuración cuenta con una transmisión no directa (en este caso utilizando el concepto 1 del Sistema de Transmisión ya que es por poleas y banda y no por engranes como anteriormente se ha determinado según la evaluación mostrada en la tabla 2.6.2), correspondiente al movimiento del brazo.

B Movimiento por debajo del plano del disco: dada la disposición de los motores en esta configuración, no existen elementos que estén por encima del plano del disco u oblea de silicio.

C Nivel de emisión de partículas: los motores que se encargan de los movimientos del antebrazo y del brazo están encapsulados, por lo que ambas transmisiones estarían dentro de carcasas. En cuanto a los cambios de encapsulado a encapsulado, existen dos: uno en la intercara del brazo y el antebrazo, y el otro en la intercara de la estructura principal y el brazo, pues en esta configuración, el brazo no girará con la estructura principal desde abajo como en las configuraciones anteriores.

D Backlash: para evaluar con este criterio, se toman en cuenta el número de ejes que giran en las distintas transmisiones que componen el brazo-antebrazo, y en la configuración 5 son tres: los dos primeros pertenecen al sistema de transmisión destinado a mover al brazo (que se encuentra en el brazo mismo) y el otro en la transmisión directa para mover al antebrazo.

E Perfil aerodinámico: dada la disposición de los motores, no existen cavidades o huecos entre elementos, por lo que el flujo de aire del cuarto limpio no se verá afectado. La geometría externa está sujeta a cambios en cuanto a redondeos y chaflanes para hacer un diseño más aerodinámico, tomando en cuenta que mayores radios de curvatura en las piezas, harán el componente más aerodinámico.

F Movimiento de las conexiones: en esta configuración, dado que las transmisiones y los motores para mover el brazo y el antebrazo están dentro de carcasas (encapsulados), el cableado puede ser interno en esa zona, aunque como el brazo se mueve independientemente de la estructura principal, al girar, los cables que salen del motor que mueve al brazo se estarían moviendo, causando partículas contaminantes e incluso podrían enredarse.

G Movimiento de pesos muertos: en esta configuración existen dos motores que son pesos muertos, pero a su vez actúan como contrapeso el uno del otro. Esta disposición generará una mayor velocidad angular al girar a comparación de que si se tuviera un solo motor como peso muerto, pero la velocidad angular a la que giran las articulaciones de este tipo de robots para la industria de semiconductores está relacionada con el tiempo de transporte de los discos, que es de 5 discos/minuto, por lo que el aumento de la fuerza centrífuga es despreciable [61].

## CONFIGURACIÓN 6

A Fricción entre componentes: esta configuración cuenta con una transmisión no directa correspondiente al movimiento del brazo (en este caso utilizando el concepto 3 del Sistema de Transmisión que es por engranes), y aunque es mejor optar por una transmisión por poleas y bandas como se muestra en la evaluación mostrada en la tabla 2.6.2, esta configuración se evaluará así ya que se caracteriza por ser una alternativa de la configuración 5.

B Movimiento por debajo del plano del disco: dada la disposición de los motores en esta configuración, existe un elemento que está por encima del plano del disco u oblea de silicio: se trata del motor encargado de mover al brazo. Dadas las dimensiones del motor (ver figura 2.2.4) y los componentes adicionales a la transmisión como un eje, rodamientos y carcasa que cubre el motor, la parte superior del brazo quedará por encima del plano del disco.

C Nivel de emisión de partículas: los motores que se encargan de los movimientos del antebrazo y del brazo están encapsulados, por lo que ambas transmisiones estarían dentro de carcasas. En cuanto a los cambios de encapsulado a encapsulado, existen dos: uno en la intercara del brazo y el antebrazo, y el otro en la intercara de la estructura principal y el brazo, pues en esta configuración, el brazo no girará con la estructura principal desde abajo.

D Backlash: para evaluar con este criterio, se toman en cuenta el número de ejes que giran en las distintas transmisiones que componen el brazo-antebrazo, y en la configuración 6 son tres: los dos primeros pertenecen al sistema de transmisión destinado a mover al brazo (que se encuentra en el brazo mismo) y el otro en la transmisión directa para mover al antebrazo. Cabe resaltar que esta configuración cuenta con una transmisión por engranes ya que la distancia entre ejes es muy pequeña, pero como ya se mencionó anteriormente, los engranes después de un cierto número de ciclos de trabajo pueden experimentar desgaste en los dientes, generando juego entre componentes, y además desprendimiento de partículas, siendo una fuente de contaminación para el cuarto limpio.

E Perfil aerodinámico: dada la disposición de los motores, no existen cavidades o huecos entre elementos, por lo que el flujo de aire del cuarto limpio no se verá afectado. La geometría externa está sujeta a cambios en cuanto a redondeos y chaflanes para hacer un diseño más aerodinámico, tomando en cuenta que mayores radios de curvatura en las piezas, harán el componente más aerodinámico.

F Movimiento de las conexiones: en esta configuración, dado que las transmisiones y los motores para mover el brazo y el antebrazo están dentro de carcasas (encapsulados), el cableado puede ser interno en esa zona, aunque como el brazo se mueve independientemente de la estructura principal como en la configuración anterior, al girar, los cables que salen del motor que mueve al brazo se estarían moviendo, causando partículas contaminantes e incluso podrían enredarse.

G Movimiento de pesos muertos: sólo hay un motor que está en una posición alejada del eje de la estructura principal del robot (el motor que mueve al antebrazo), generando un peso muerto que significa una carga extra. En esta configuración, no existen motores que hagan contrapeso entre sí, por lo que la carga de este motor no se verá compensada con algún otro elemento.

En la tabla 2.6.3 se muestra la evaluación por medio de una matriz de selección que se realizó de las seis configuraciones posibles para el diseño del brazo-antebrazo después de haber hecho los resúmenes anteriores. Para la evaluación de estas configuraciones, se tomaron en cuenta todos los criterios mostrados en la tabla 2.6.1, ya que todos son aplicables a la combinación de los sistemas (Motriz 1, Motriz 2 y de Transmisión).

		Configuraciones											
		CONFIGURACIÓN 1		CONFIGURACIÓN 2		CONFIGURACIÓN 3		CONFIGURACIÓN 4		CONFIGURACIÓN 5		CONFIGURACIÓN 6	
Friction between components	0.19	8	1.52	7	1.33	7	1.33	7	1.33	8	1.52	6	1.14
Movement below the plane of the disc	0.29	9	2.57	6	1.71	9	2.57	9	2.57	9	2.57	6	1.71
Level of particle emission	0.10	9	0.86	9	0.86	6	0.57	9	0.86	9	0.86	9	0.86
Backlash	0.05	9	0.43	8	0.38	8	0.38	8	0.38	9	0.43	5	0.24
Aerodynamic profile	0.05	9	0.43	9	0.43	9	0.43	9	0.43	9	0.43	9	0.43
Movement of the connections	0.24	9	2.14	9	2.14	9	2.14	9	2.14	8	1.90	8	1.90
Movement of dead weights	0.10	7	0.67	9	0.86	9	0.86	10	0.95	9	0.86	7	0.67
<b>SUMA</b>			8.62		7.71		8.29		8.67		8.57		6.95

Tabla 2.6.3 Matriz de selección para la evaluación de las 6 configuraciones.

A continuación, se presenta una síntesis sobre la evaluación de las configuraciones:

- Las configuraciones 1 y 5 son las únicas que sólo cuentan con una transmisión no directa, por lo que son las opciones en las que se genera menor fricción y, por ende, menor generación de partículas contaminantes. Aunque la configuración 6 también tiene sólo una transmisión no directa, ésta cuenta con engranes, y como anteriormente ya se ha mencionado, no es la mejor opción debido a que con el tiempo los dientes experimentan desgaste por el contacto metal con metal, generando incluso *Backlash* entre los componentes.
- La mayoría de las configuraciones cuentan con un arreglo tal que no existen elementos que estén por encima del plano del disco u oblea de silicio, excepto en las configuraciones 2 y 6, pues el motor alojado en la parte superior de la estructura principal rebasaría por sus dimensiones el plano del disco a transportar, es por esto que a estas configuraciones se les asignó una calificación muy baja, pues es indispensable que ningún elemento rebase este plano.
- Todas las configuraciones excepto la 3, cuentan con dos cambios de encapsulado a encapsulado (intercaras), marcadas en tono verde en las figuras 2.5.1 a 2.5.6, por lo que el nivel de emisión de partículas sería prácticamente el mismo en esas configuraciones. Además de que la configuración 3 cuenta con tres cambios de encapsulado, el motor  $M_2$  no está dentro de los encapsulados del robot, siendo un problema de emisión de partículas hacia el cuarto limpio.
- Para la evaluación del *Backlash*, se observó cuántos ejes giran en las distintas transmisiones, y las configuraciones que tienen menos ejes son la 1 y la 5 (con tres ejes), obteniendo la mayor puntuación de todas en este criterio. Las configuraciones 2, 3 y 4 cuentan con cuatro ejes cada una, por lo que tienen una calificación menor. El caso de la configuración 6, al tener una transmisión por engranes, el desgaste entre los dientes después de un determinado número de ciclos generará juego entre componentes (*Backlash*).
- En cuanto al perfil aerodinámico, la disposición de los motores de todas las configuraciones no afectará el flujo de aire del cuarto limpio, además de que la geometría externa como chaflanes y redondeos está sujeta a cambios, por lo que, en este rubro, todas las configuraciones obtuvieron la misma calificación.
- En las configuraciones 1 a 4, no existen problemas de movimiento de las conexiones (cables) debido a que el movimiento del brazo es generado desde abajo con todo y la estructura principal, y no se requieren cables que puedan enredarse en ese movimiento, además de que la transmisión del antebrazo está encapsulada y los cables pueden ser internos. Pero en las configuraciones 5 y 6 sí existen problemas de movimiento de conexiones debido a que el movimiento del brazo se genera en el brazo mismo y no se mueve con la estructura principal; por lo que, al girar, los cables que salen de este motor  $M_1$  se estarían moviendo con respecto a la estructura principal, causando partículas contaminantes e incluso podrían enredarse.
- En cuanto al movimiento de pesos muertos, las configuraciones 1 y 6 son parecidas ya que el motor  $M_2$  es un peso muerto y el robot no cuenta con un contrapeso, por lo que se les asignó la calificación más baja. La configuración 2 no cuenta con ningún motor que genere una carga extra, pero tampoco hay un contrapeso que

pueda contrarrestar la carga que generan el brazo y el antebrazo por sí mismos. La configuración 3 puede evaluarse igual que la anterior pues el motor que mueve al antebrazo, aunque está ligeramente alejado del eje de la estructura principal, la carga extra que implica es mínima. En cuanto a la configuración 4, existe un motor que se considera peso muerto, pero a su vez actúa como contrapeso a la carga que representan el antebrazo y el brazo, por lo que esto hace que tenga la mejor calificación de todas las configuraciones. En cuanto a la configuración 5, los dos motores que son peso muerto actúan como contrapesos entre sí, pero a diferencia de la configuración anterior, existe un lado del brazo que representará mayor carga extra (el extremo donde se encuentra el antebrazo) por la masa del antebrazo mismo. Este último criterio marcó la diferencia entre la configuración 4 y la 5; obteniendo estas dos las calificaciones más altas.

## 2.7 Propuesta de configuración final

Después de la evaluación y síntesis, se ha determinado que la configuración con mayor desempeño en cuanto a los criterios de diseño antes establecidos, es la **configuración No. 4**. Es importante mencionar que, al momento de hacer el diseño de detalle, pueden surgir cambios en la configuración, e incluso es válido combinarla con características de otras configuraciones que presentan un mejor desempeño en ciertos criterios de diseño. A continuación, en las figuras 2.7.1-2.7.7 se muestra la configuración 4 con mayor detalle de los elementos que la componen.

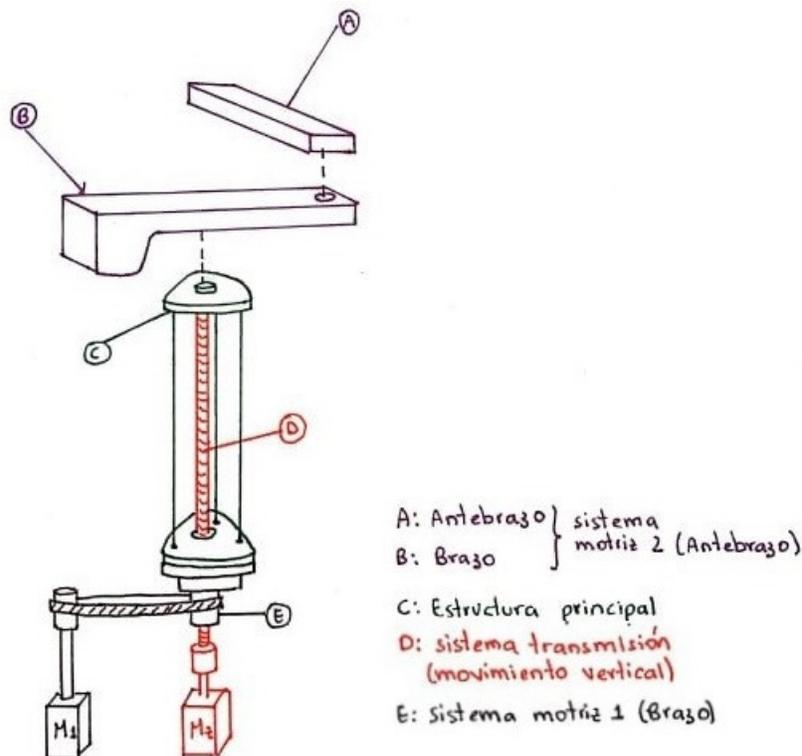


Figura 2.7.1 Desglose general de los sistemas.

En la figura 2.7.1 se observa un desglose de los sistemas contemplados para el diseño del brazo-antebrazo, enfocados a la configuración 4 previamente seleccionada como la que presenta el mejor desempeño.

Para una mejor apreciación de los componentes preliminares que forman parte de la **Estructura Principal** del robot y del **Sistema Motriz 1**, se presenta el esquema de la figura 2.7.2. Como ya se mencionó anteriormente, la estructura principal se encarga de mover al robot en el eje vertical; esto se logra mediante un *tornillo sinfín* y una *tuerca de bolas* que permiten subir y bajar la *base inferior 1* (por medio de una transformación de movimiento rotacional en lineal). Los *postes huecos* y los *postes sólidos* sirven como guía para que este movimiento se pueda efectuar; los *postes sólidos* se introducen en los huecos y de esta manera la *base inferior 1* puede desplazarse completamente hacia abajo (hacia la *base inferior 2*) o completamente hacia arriba hasta la longitud máxima permitida por los postes. Este *tornillo sinfín* es accionado por medio del motor  $M_Z$ , y el movimiento de rotación generado por éste es totalmente independiente del movimiento del Sistema Motriz 1. En cuanto a este sistema, encargado del movimiento rotacional del brazo, se compone por un motor  $M_1$  que, por medio de una transmisión por *banda dentada*, moverá una *polea hueca* que está anclada a la *base inferior 2*, generando una rotación de toda la estructura principal y por lo tanto del brazo. Es importante que la polea mencionada esté hueca para dejar pasar el *tornillo sinfín* y no interfieran los movimientos. Es así como el brazo (montado en la parte superior de la estructura principal), puede rotar sin que el motor encargado de ese movimiento esté en el brazo mismo. En los esquemas no se muestra, pero es posible encapsular las transmisiones antes mencionadas para evitar la salida de partículas contaminantes hacia el cuarto limpio.

En este esquema también se observa la colocación de los *rodamientos magnéticos radiales* que darán soporte a los ejes utilizados. La cantidad de rodamientos mostrados puede ser diferente a la cantidad a utilizar, pues este es un diseño preliminar sujeto a cambios.

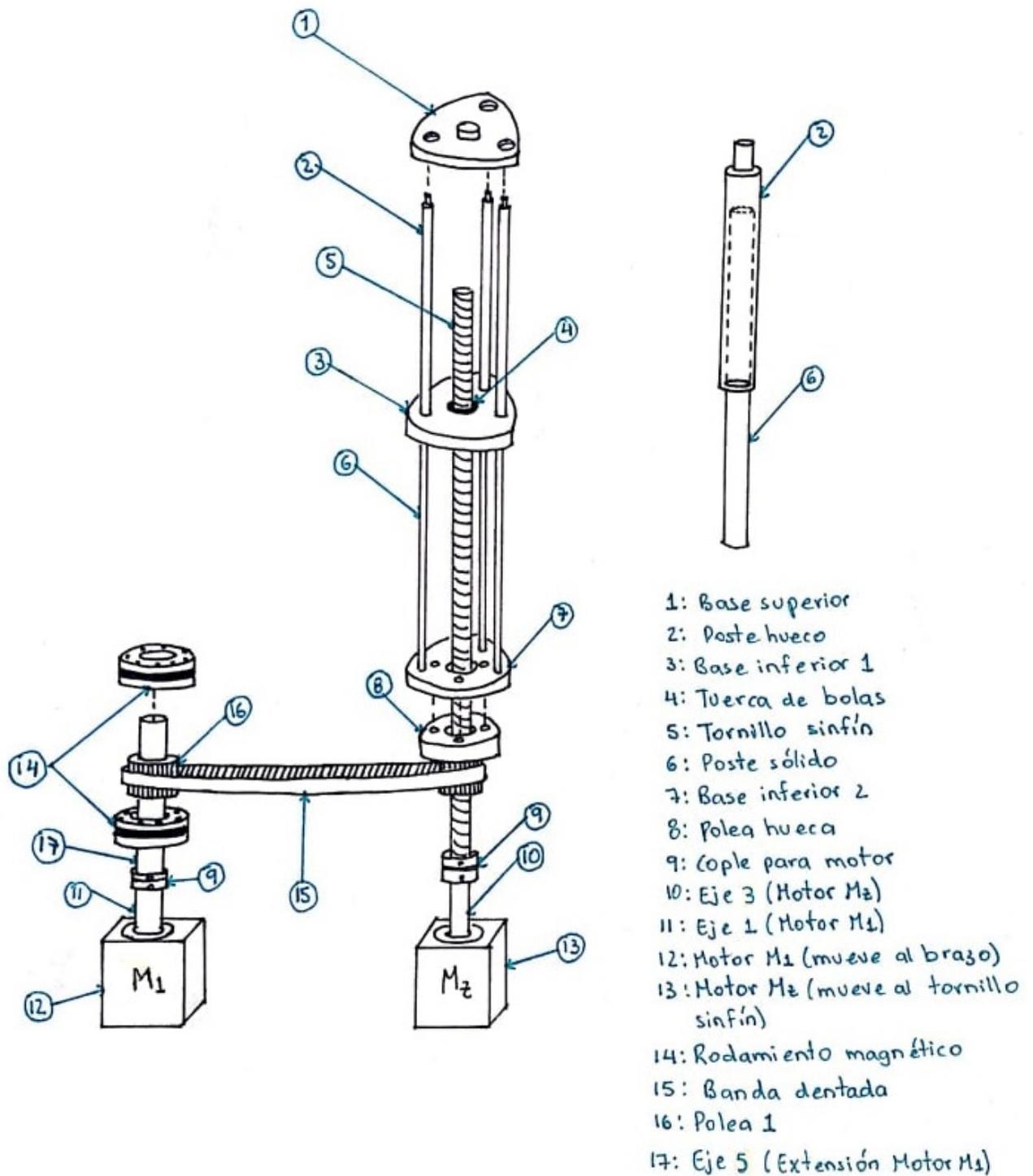


Figura 2.7.2 Esquema del Sistema motriz 1 y de la Estructura Principal.

Como complemento a este esquema, se tiene el mostrado en la figura 2.7.3, en el que se muestra un corte y un detalle con los componentes del Sistema Motriz 1 y de una parte de la Estructura Principal. Se observa la colocación de los *rodamientos magnéticos*, mostrados en el esquema como el corte longitudinal de un cilindro que envuelve (sin

haber contacto), al eje. En este último también se especifica una zona que debe tener características magnéticas para que pueda darse el fenómeno de levitación radial en este caso. En el detalle  $B'$  se aprecia con mayor claridad la representación de un eje dentro de un *rodamiento magnético*; las flechas representan el campo magnético entre el eje y los pares de bobinas  $EM_4$  y  $EM_2$ , que se encuentran en posiciones contrarias en el *rodamiento magnético*. Al ser un corte, sólo se representan estos pares de bobinas, pero realmente el rodamiento contiene más, como se puede apreciar en la figura 2.7.4.

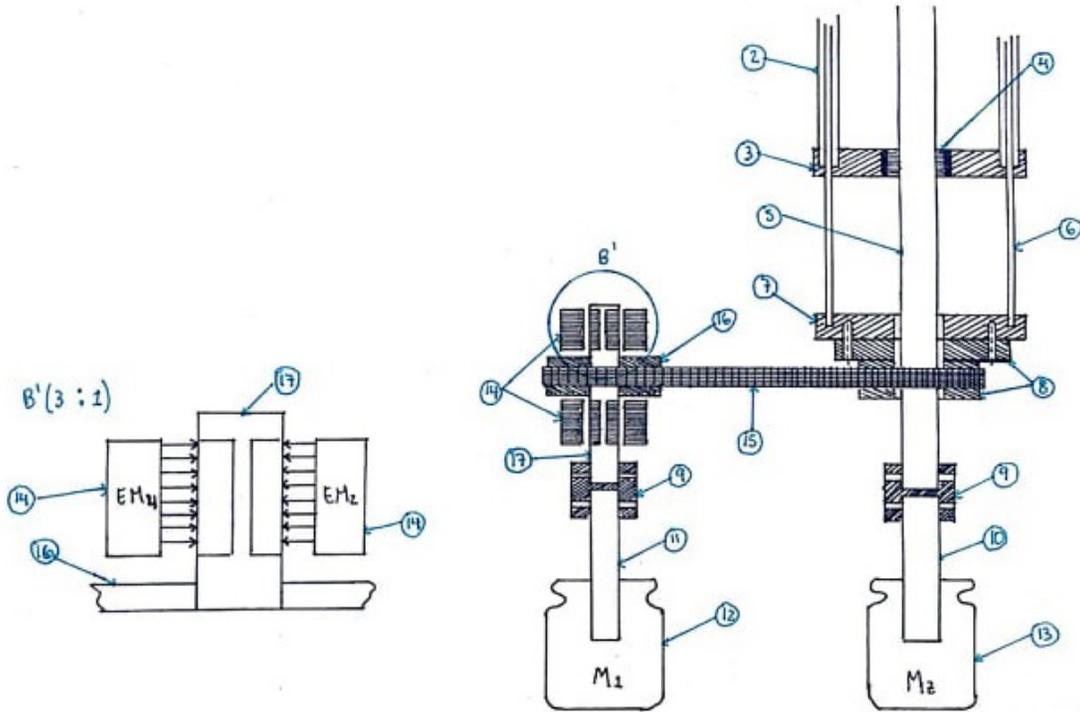


Figura 2.7.3 Esquema con corte y detalle del Sistema motriz 1 y parte de la Estructura Principal.

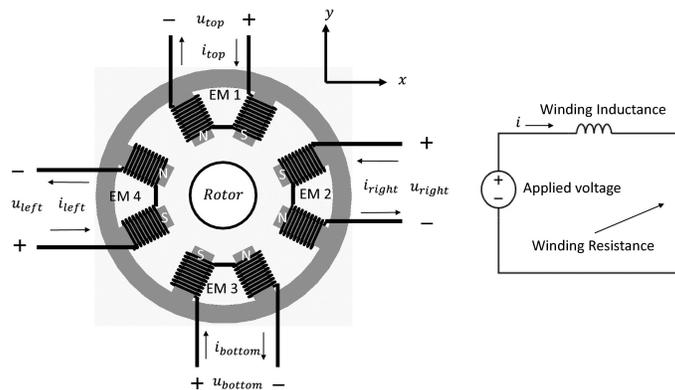


Figura 2.7.4 Sección transversal de un rodamiento magnético radial. Obtenida de [62].

En el esquema de la figura 2.7.5 se muestran un corte y un detalle del **Sistema Motriz 2** (el encargado de mover al antebrazo). El motor  $M_2$  encargado del movimiento, está alojado en un extremo del brazo, y por medio de una *banda dentada* se transmite el

movimiento hasta el *eje 4* que está anclado al antebrazo con ayuda de una *tuerca con mamelón* y con un *tornillo prisionero*; de esta manera, cuando el *eje 4* gira, el antebrazo también lo hace.

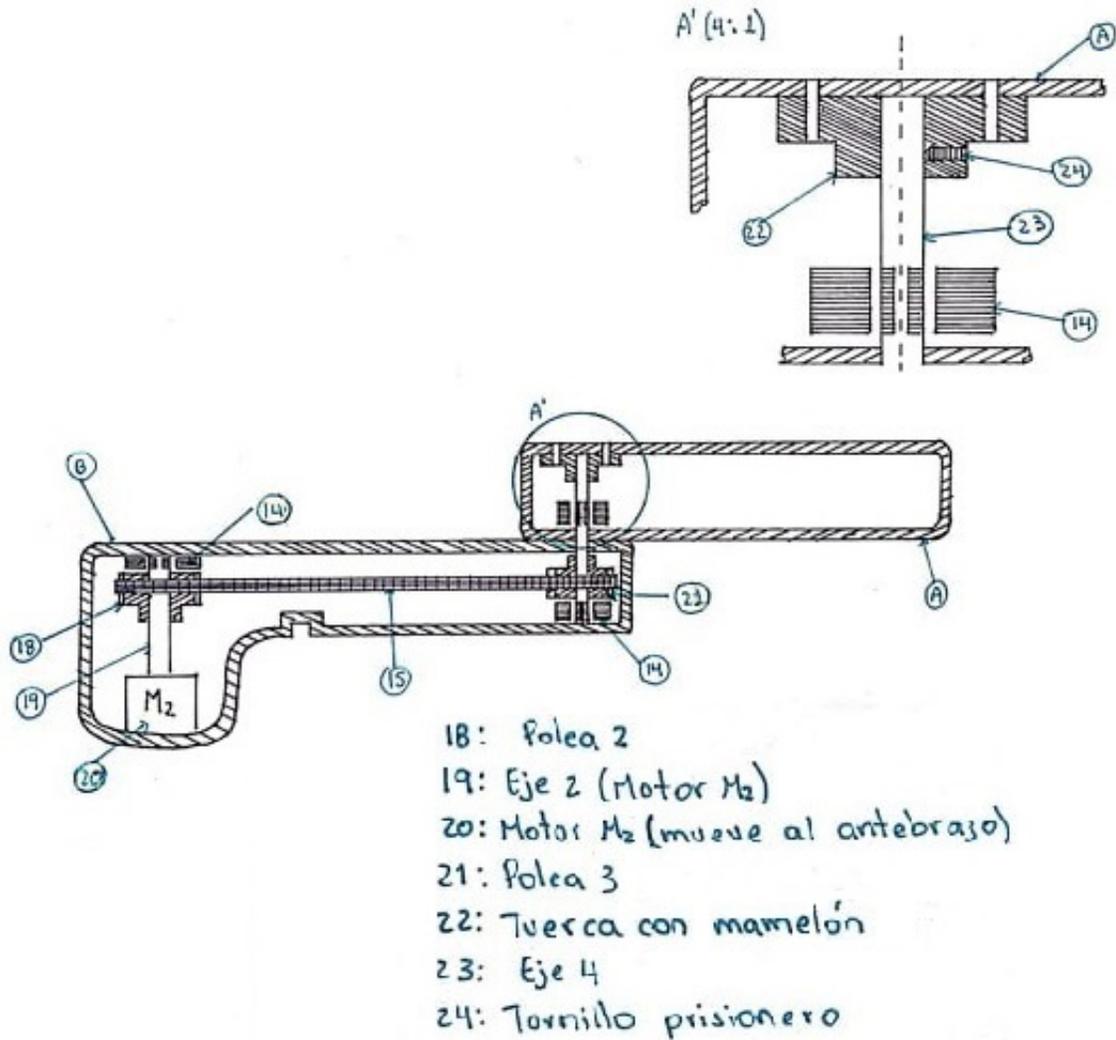


Figura 2.7.5 Esquema con corte y detalle del Sistema motriz 2.

Finalmente, como parte del diseño preliminar, se proponen dimensiones de algunos elementos que conforman la configuración seleccionada. En la figura 2.7.6 se observa una vista lateral y una superior del brazo y antebrazo ensamblados. Las dimensiones fueron propuestas con base en las dimensiones de los motores (ver figura 2.3.4) para que existiera una proporcionalidad en cada una de las partes. Siendo esto así, con el brazo y antebrazo alineados (en su total extensión), el robot tiene un alcance de poco más de 50 cm, una anchura de brazo y antebrazo de 7-10 cm y cada uno tiene una altura de 3 cm aproximadamente. También se especifican redondeos en ciertas zonas.

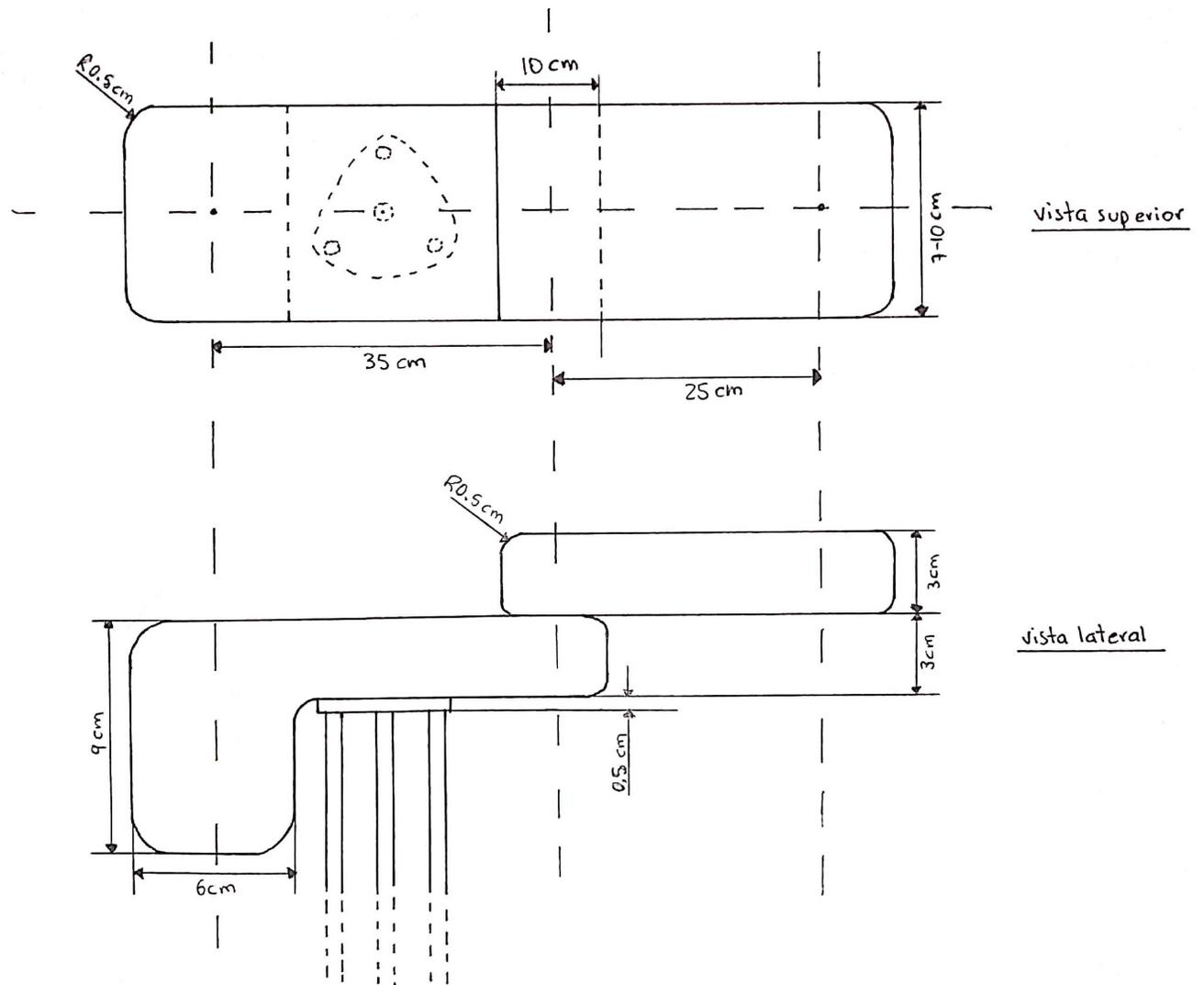


Figura 2.7.6 Dimensiones preliminares del brazo-antebrazo.

En la figura 2.7.7 se observa una vista lateral de la Estructura Principal junto con el Sistema Motriz 1. De igual manera que la figura anterior, las dimensiones fueron propuestas con base en las dimensiones de los motores. Además, en este esquema se pueden observar las dimensiones aproximadas de los rodamientos magnéticos en comparación con el eje de cada motor.

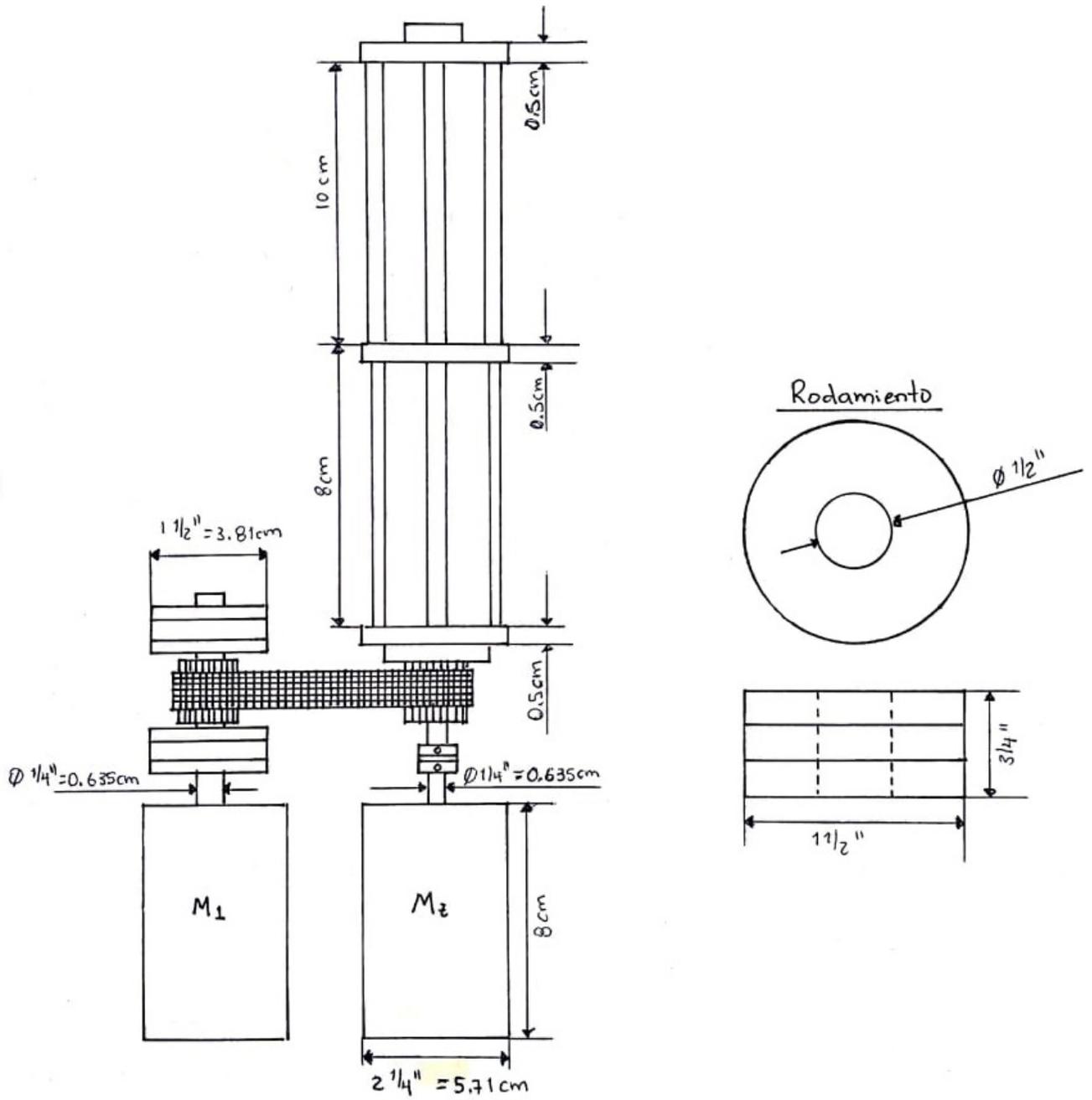


Figura 2.7.7 Dimensiones preliminares del Sistema Motriz 1 y de la Estructura Principal.

## Capítulo 3

# Diseño de detalle de la configuración del brazo – antebrazo con articulaciones rotacionales que utilizan rodamientos magnéticos

En este apartado, se pueden encontrar las especificaciones técnicas para la propuesta de diseño, que componen la configuración final del brazo-antebrazo con articulaciones rotacionales que utilizan rodamientos magnéticos. Después de presentar un diseño conceptual que considera un primer acercamiento a los tres sistemas antes mencionados, se ha determinado que la propuesta de diseño se centrará en el brazo y antebrazo (en particular en el diseño del **Sistema Motriz 2**, encargado de darle movimiento rotacional al antebrazo, junto con la **Transmisión** necesaria para llevar a cabo esta tarea). El brazo y el antebrazo podrán ensamblarse posteriormente en distintas alternativas de una estructura principal que mueva al robot en el eje Z y permita el movimiento rotacional del brazo desde la estructura misma. Cabe señalar que el equipo de trabajo se trabaja para que la estructura principal diseñada, cumpla con los requerimientos de limpieza, por lo que aún se encuentra sujeta a cambios (por ejemplo, el reemplazo del tornillo sinfín de la estructura principal por otro mecanismo).

En este capítulo se presentan las piezas que fueron diseñadas con base en las especificaciones y necesidades definidas en el diseño conceptual, así como las que fueron seleccionadas comercialmente, junto con una descripción de sus características y función en conjunto. Todo lo anteriormente descrito es fundamentado con bases teóricas y normas ya establecidas para que se pueda fabricar en un futuro.

### 3.1 Generalidades sobre el diseño

La propuesta de diseño se realizó con ayuda de un programa de diseño asistido por computadora (CAD) llamado Inventor®<sup>®</sup>, versión estudiantil (ver Apéndice A). A continuación, en la figura 3.1.1 se muestra una vista isométrica del brazo y del antebrazo ensamblados; en la figura 3.1.2, vistas frontal y superior. Como se puede observar, el diseño por fuera del brazo y del antebrazo se ha mantenido como en la configuración mostrada en el capítulo pasado. Todos los elementos quedan por debajo del plano de la oblea o disco a transportar, que, en este caso, estaría colocada en un efector final que puede colocarse en el antebrazo, en el extremo contrario a donde se ensambla con el brazo; siendo esto así, la oblea sería el elemento que quedaría posicionado en un plano más arriba que todos los demás, cumpliéndose este criterio de diseño. El brazo y el antebrazo tienen diseños aerodinámicos, geometrías redondeadas, incluso en las tapas de ambos, se tienen chaflanes para evitar cambios bruscos de geometría y permitir que el flujo de aire del cuarto limpio se encuentre con geometrías suaves para generar la menor turbulencia posible.

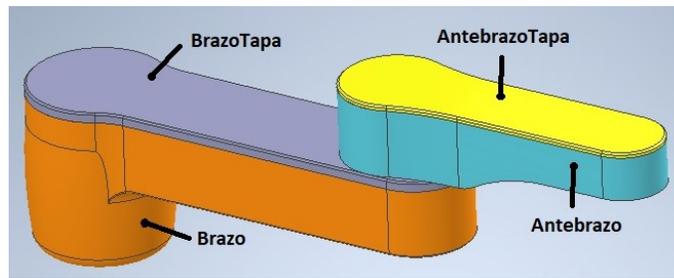
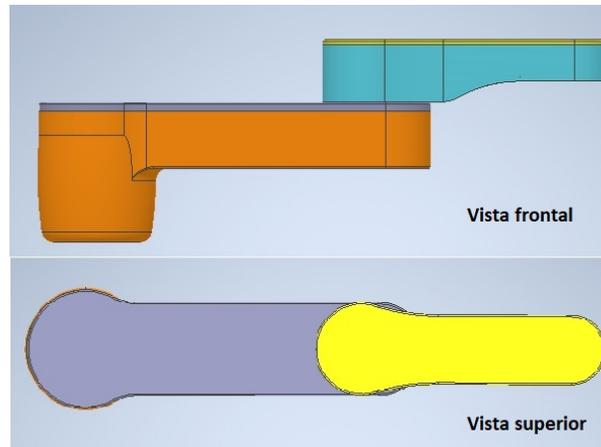
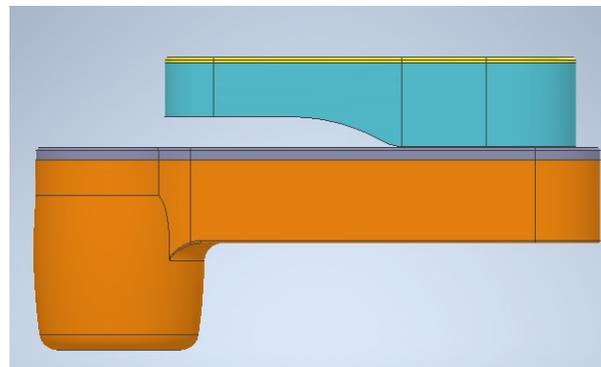


Figura 3.1.1 Vistas isométricas del ensamble del brazo y del antebrazo.



(a)



(b)

Figura 3.1.2. a) Vista frontal y vista superior del ensamble del brazo y del antebrazo en su máxima extensión; b) Vista frontal del brazo y del antebrazo en su mínima extensión.

A continuación, se enlistan las partes que componen el diseño junto con una breve descripción de ellas e imágenes para una mejor comprensión; cabe aclarar que los nombres de las piezas aquí mencionadas se respetan tal cual aparecen en el diseño en el programa y en los planos que se presentarán en el Apéndice B. Los detalles y especificaciones sobre el ensamble de las piezas, se puede consultar más adelante en el apartado de Diseño para ensamble.

**Brazo:** este elemento contiene en su interior la transmisión para mover al antebrazo (motor, banda, poleas) y los rodamientos magnéticos necesarios para poder centrar al eje que le da movimiento al antebrazo. En uno de sus extremos, existe una cavidad que aloja al motor de la transmisión mencionada, y en el otro extremo está la articulación (codo) que permite el movimiento entre el brazo y el antebrazo. El brazo se puede mover junto con la estructura principal, mediante el Sistema Motriz 1 descrito en el capítulo anterior, como se muestra en la figura 2.7.1 y 2.7.6. El acoplamiento entre el brazo y la estructura principal no forma parte del diseño trabajado, pero es posible adecuarlos para su ensamble, ya que el brazo tiene suficiente longitud para poder ser sujeto en un punto a la estructura principal, como el boceto de la figura 2.5.4. El brazo tiene agujeros con rosca necesarios para atornillar algunos elementos que más adelante se describen.

**Motor:** se encarga de darle movimiento, a través de una transmisión, al antebrazo. Está colocado en un extremo del brazo, en una cavidad. Este diseño parte de la idea de crear un contrapeso con la masa del motor, que contrarreste el momento que generan el mismo brazo y el antebrazo en el extremo contrario. El motor contemplado para el diseño es el motor marca Thomson mencionado en el capítulo anterior, el cual se observa en la figura 3.1.3, cuyas medidas se pueden observar en las especificaciones técnicas del mismo, presentadas en el Apéndice B para la serie BLD-23. El motor utilizado en el CAD es una reproducción creada para su representación en el ensamble.

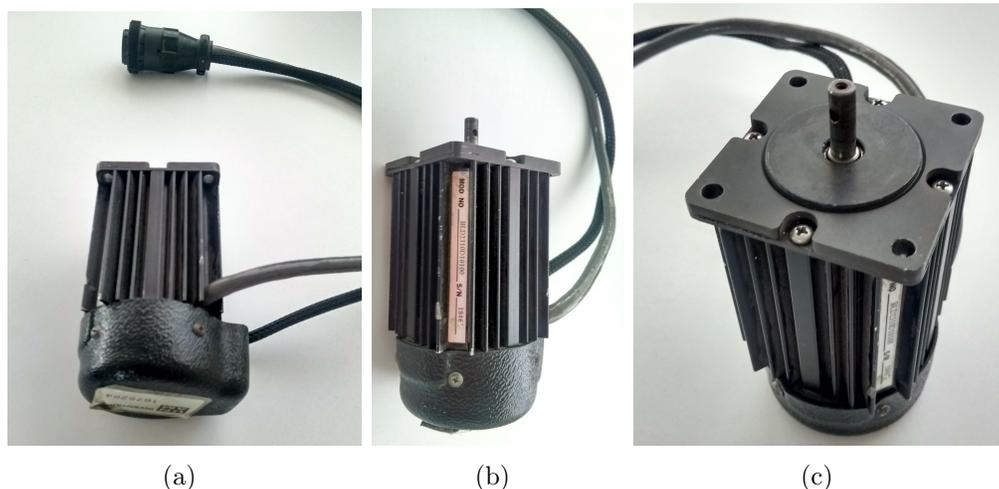


Figura 3.1.3. Diferentes perspectivas del motor *Thomson BLD-23* contemplado para el diseño.

**SoporteMotor:** esta pieza fue diseñada para poder ensamblar el motor al brazo y mantenerlo en su lugar. Los agujeros que tiene el motor para que pueda ser colocado en una superficie y no se mueva, están cerca del eje del motor, no en la base del mismo, por lo que se dificultaba su ensamble en el brazo para colocarlo con el eje vertical hacia arriba. Para el caso del diseño presentado, se utilizan los mismos agujeros que tiene el motor, pero éstos se aseguran a una pieza adicional (SoporteMotor) para que el motor pueda estar orientado con el eje hacia arriba; y esta pieza adicional se puede asegurar al brazo en la cavidad destinada a ello.

**PoleaMotriz:** la transmisión está dada por poleas y una banda dentada, como se determinó en el capítulo anterior, en la Matriz de selección para la evaluación de los conceptos del Sistema de Transmisión de la tabla 2.6.2. La polea aquí mencionada forma parte de la transmisión que moverá al antebrazo. Es la encargada de transmitir el movimiento del eje del motor, a la banda que moverá a la PoleaConducida que está en el otro extremo del brazo. Más adelante se describe cómo se seleccionó esta polea y más detalles de la transmisión.

Los elementos anteriormente descritos se pueden observar en el ensamble de la figura 3.1.4. Los elementos que aparecen a la derecha, arriba del brazo y de su tapa, se describirán más adelante junto con otras imágenes. Cabe señalar que la banda de transmisión no aparece en la imagen pero está colocada entre la PoleaMotriz y la PoleaConducida.

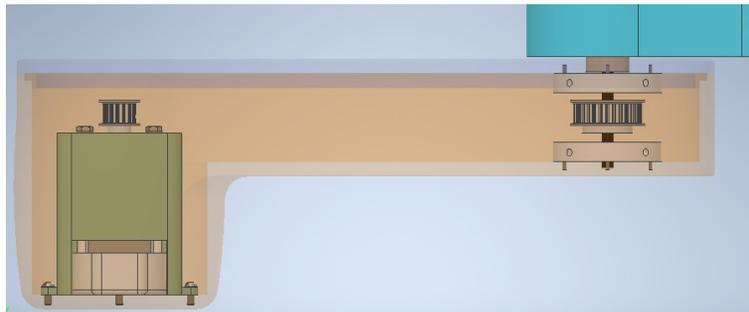


Figura 3.1.4. Vista frontal del brazo con los elementos que tiene en su interior. A la izquierda, el Motor, el SoporteMotor, la PoleaMotriz; a la derecha, la PoleaConducida, dos rodamientos magnéticos (RodamientoMagnético), dos carcasas que rodean a los rodamientos magnéticos (CarcasaRodamiento), el Eje, el Mamelón y se visualiza parte del Antebrazo. El Brazo y la TapaBrazo aparecen como transparentes para poder visualizar dentro de ellos.

La figura 3.1.5 es un acercamiento del extremo del brazo que contiene los elementos antes descritos.

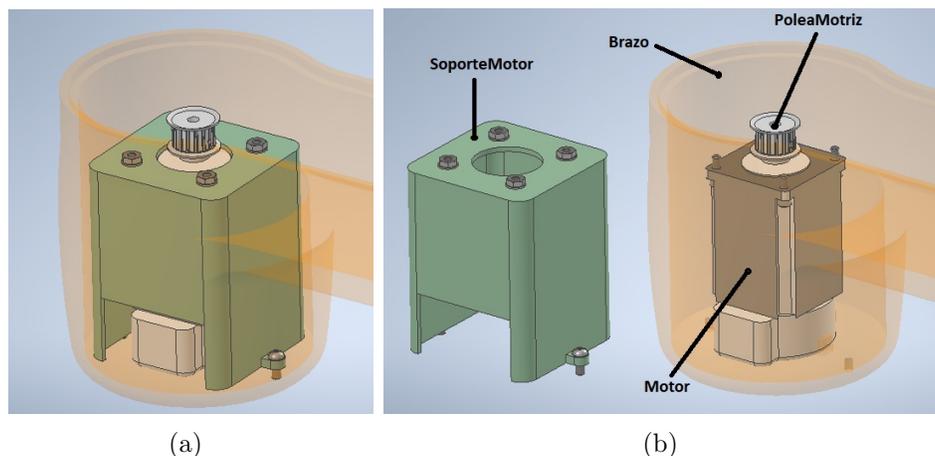


Figura 3.1.5. a) y b) Vistas isométricas de uno de los extremos del brazo con los elementos que tiene en su interior. Se agregaron señalizaciones para mayor apreciación de los componentes.

**PoleaConducida:** forma parte de la transmisión para mover el antebrazo. Esta polea es movida por la PoleaMotriz, a través de la banda de transmisión. Esta polea está sujeta al Eje, el cual mueve directamente al antebrazo por medio de una pieza llamada Mamelón (o brida). Más adelante se describe cómo se seleccionó esta polea y más detalles de la transmisión.

**RodamientoMagnético:** el diseño presentado incluye el uso de los rodamientos magnéticos activos para la articulación del brazo-antebrazo, con la finalidad de eliminar la generación de partículas contaminantes causadas por la fricción entre los componentes de un rodamiento magnético convencional. Las características de los rodamientos magnéticos se mencionan en el Capítulo 1, pero en este apartado se retoman algunos detalles. Los rodamientos magnéticos que se sugieren utilizar en esta propuesta de diseño forman parte del desarrollo de un proyecto PAPIIT llamado “Desarrollo de un par cinemático rotacional con rodamientos magnéticos” basado en un control PID [63]. Para la utilización de los rodamientos en el diseño de este trabajo, fue necesario tomar en cuenta que el número de bobinas propuestas son cuatro, la holgura entre el eje y el rodamiento es de 1 mm, dos cables provienen de cada bobina y además se tienen cuatro sensores (que también requieren un cable), distribuidos en la misma orientación que las bobinas; y también fue necesario contemplar las dimensiones finales a alcanzar en el proyecto (diámetro y altura) una vez que el prototipo se haya terminado. Esta información fue amablemente otorgada por los integrantes de dicho proyecto.

Una vez contemplado esto, se diseñó en el programa de Inventor® un rodamiento magnético preliminar, parecido al prototipo que se desarrolla en el proyecto mencionado, para poder incluirlo en el brazo. El rodamiento está representado por un cilindro hueco con una base sólida, con cuatro cavidades distribuidas de manera simétrica, pensadas para colocar en cada una de ellas, una bobina; en la pared del cilindro se tienen cuatro agujeros pasados para que por ahí puedan pasar los cables que alimentan las bobinas y también los que van a los sensores. En el centro de la base del cilindro hay un agujero pasado para que por ahí se coloque el eje que moverá al antebrazo y que justamente el rodamiento magnético mantiene centrado radialmente; y tiene agujeros con rosca para poder sujetarlo a una superficie plana. Esta pieza está sujeta a cambios que se hagan en un futuro dependiendo de los resultados que se obtengan como parte del proyecto PAPIIT.

**CarcasaRodamiento:** con la finalidad de proteger los componentes del rodamiento y poder instalarlo como una sola unidad, se diseñó una carcasa cilíndrica que se inserta a presión y de igual manera tiene agujeros con rosca para sujetarla a una superficie plana. La carcasa cuenta con los agujeros necesarios para la salida de los cables, así como un agujero en el centro para permitir el paso del eje. Es necesario mencionar que uno de estos rodamientos magnéticos mantiene centrado al eje siempre y cuando el rodamiento esté energizado; en el caso de que el robot no esté en funcionamiento y las bobinas no estén alimentadas, el eje que antes estaba siendo sostenido radialmente, tiende a ladearse y apoyarse por inercia en un punto en su superficie, aunque esté sostenido axialmente. Para esto también funciona la carcasa; el agujero del centro que permite que el eje pase verticalmente y gire libremente sin fricción, también funciona como

tope cuando las bobinas no están energizadas. La holgura (gap) entre el agujero de la carcasa y el eje es mínima (1 mm en total) para que el eje pueda regresar fácilmente a su posición totalmente vertical cuando las bobinas se energicen de nuevo. El diseño que se está trabajando en el proyecto PAPIIT [63], tiene como característica en la parte del modelado de los campos magnéticos, el hacer que el eje se sostenga por repulsión y no por atracción. Cada bobina genera un campo magnético que repele al eje ferromagnético, y al haber un arreglo simétrico de cuatro bobinas, el eje queda centrado en cuatro direcciones. Trabajando de esta manera, cuando suceda que las bobinas se energicen de nuevo después de no estar funcionando, el eje se verá repelido de tal manera que se separe del punto donde estaba apoyado en la carcasa. Las piezas CarcasaRodamiento y RodamientoMagnético se muestran representadas en la figura 3.1.6.

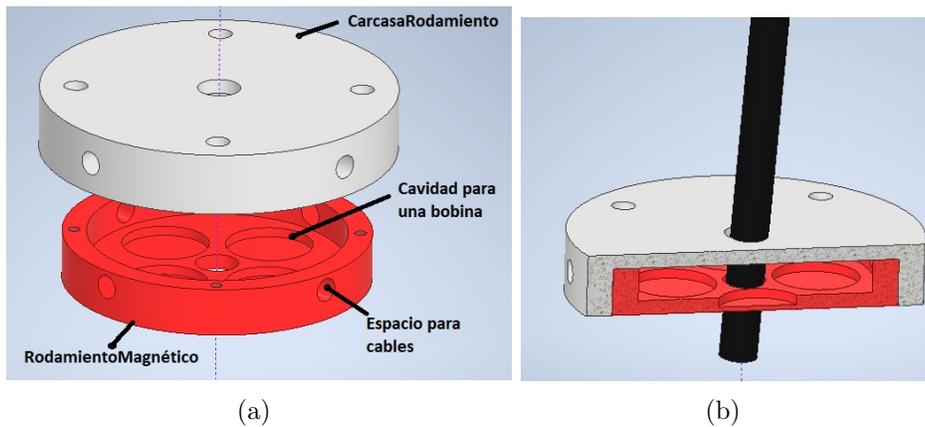


Figura 3.1.6. a) Rodamiento magnético y su carcasa, alineados para ser ensamblados; b) Representación del eje apoyado en la carcasa del rodamiento cuando el robot no está en funcionamiento. Se puede notar que el borde del agujero de la carcasa sirve como tope para que el eje descanse.

En la configuración mostrada en el capítulo anterior (figura 2.7.5), se contempló utilizar tres rodamientos magnéticos radiales para darle estabilidad a la transmisión que mueve al brazo; esto cambia en el diseño trabajado en este capítulo. No se utilizará un rodamiento magnético para sostener al eje del motor porque la longitud de éste no es lo suficientemente grande como para rebasar completamente el barreno de la polea, y únicamente hay espacio para ensamblar la polea, además de que las cargas aplicadas al eje por parte de la banda de transmisión, no lo afectarán.

La utilización de los otros dos rodamientos mostrados en la figura mencionada sí se llevará a cabo, pero no exactamente en la disposición pensada. El eje utilizado en la transmisión que mueve al antebrazo no está anclado a ningún elemento como sucede con el eje del motor, incluso el propio motor está sujeto al brazo; por lo que en el caso de este eje sí será necesario un rodamiento magnético cerca de cada extremo para darle estabilidad radial; se puede entender como un rodamiento magnético de dos pisos (o como dos rodamientos magnéticos por separado). Se utilizará un rodamiento en la parte inferior del eje, colocado en la superficie interior del brazo; para el otro extremo del eje, se utilizará un segundo rodamiento magnético, pero se colocará aún

dentro del brazo, sujeto a la superficie interior de la tapa del brazo (BrazoTapa). Esto se ha determinado así, y no como en la figura 2.7.5 (en la que este rodamiento se encuentra en el antebrazo), porque no es funcional colocarlo en la misma pieza que el rodamiento trata de estabilizar. El antebrazo está directamente conectado al eje, si éste gira, el antebrazo también lo hace, por lo que es conveniente colocar el rodamiento magnético fuera del antebrazo para lograr darle una estabilidad radial al eje y, por consiguiente, una estabilidad radial al antebrazo. Es por esto por lo que se optó el colocarlo en la tapa del brazo; de esta manera está cerca del extremo del eje y está sujeto a una pieza que ya está soportada como tal (con la estructura principal). El uso de las carcasas para los rodamientos es indispensable para la protección de los cables y para el soporte para el eje cuando no están en funcionamiento, por lo que se utilizarán dos rodamientos magnéticos (alineados verticalmente, uno sujeto al brazo y el otro a la tapa del brazo, con sus respectivas carcasas. En las figuras 3.1.7 y 3.1.8 se pueden observar la ubicación de las piezas antes mencionadas (PoleaConducida, RodamientoMagnético y CarcasaRodamiento).

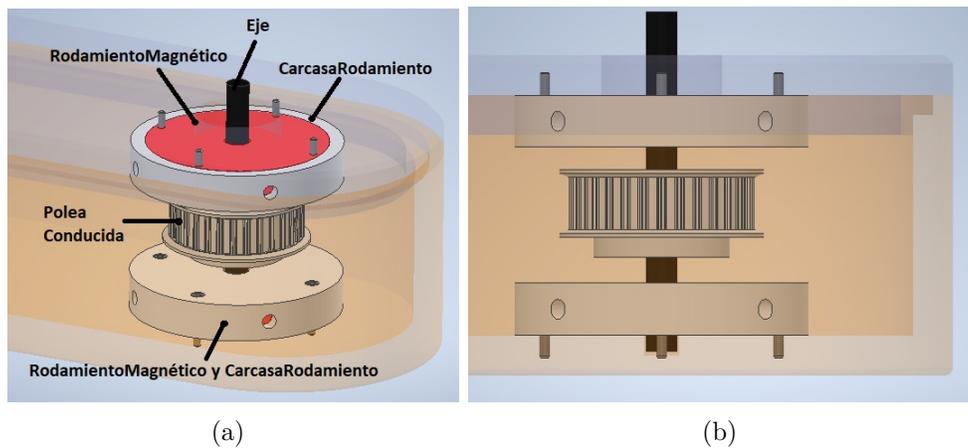


Figura 3.1.7. a) Vista isométrica de la colocación de ambos rodamientos magnéticos o de un rodamiento magnético de dos pisos para la alineación del eje de la transmisión que mueve al antebrazo. Se observan señalizaciones. b) Vista frontal de la misma zona enfocada en a).

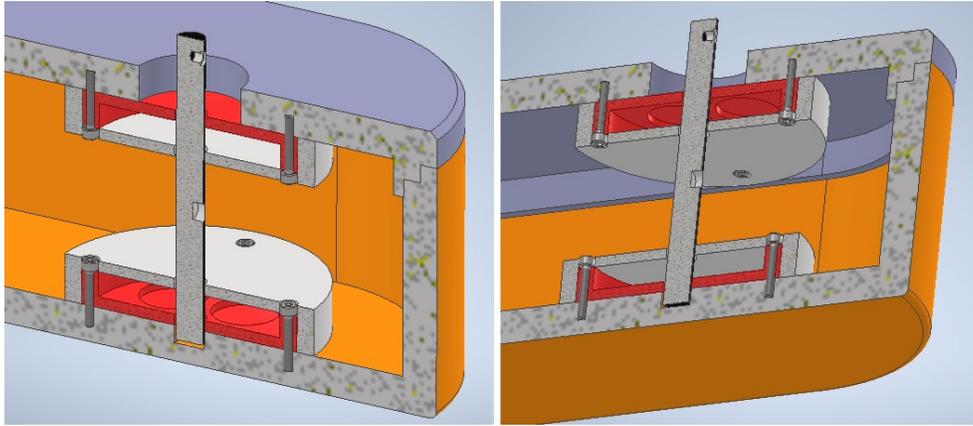


Figura 3.1.8. Vistas isométricas (superior e inferior respectivamente) de la colocación de ambos rodamientos magnéticos o de un rodamiento magnético de dos pisos para la alineación del eje de la transmisión que mueve al antebrazo. No aparece la PoleaConducida para mejor apreciación. A la izquierda se observa de mejor manera el rodamiento que se coloca en el brazo, y a la derecha, el que se coloca en su tapa.

**Eje:** este eje es centrado radialmente por los dos rodamientos antes mencionados, y es el que da movimiento al antebrazo gracias a la transmisión por banda. La polea motriz transmite el movimiento del eje del motor hacia la polea conducida por medio de la banda; y la manera en que el movimiento del eje es transmitido al antebrazo es por medio de la pieza llamada Mamelón (que más adelante se describirá). Para que el eje pueda ser centrado y soportado radialmente por los rodamientos, éste debe ser de un material ferroso en su totalidad o solamente en la zona que estará inmersa por el rodamiento magnético, para que exista una suspensión radial gracias a los campos magnéticos que generan las bobinas.

**Mamelón:** esta pieza tiene dos funciones: transmitir el movimiento del eje al antebrazo y conectar el brazo con el antebrazo. Para realizar la función, el mamelón está ensamblado al eje tal y como se muestra en la figura 3.1.9 a), y al mismo tiempo está ensamblado al antebrazo (figura 3.1.9 b)), por lo que cuando el eje gire, el mamelón lo hará y también el antebrazo.

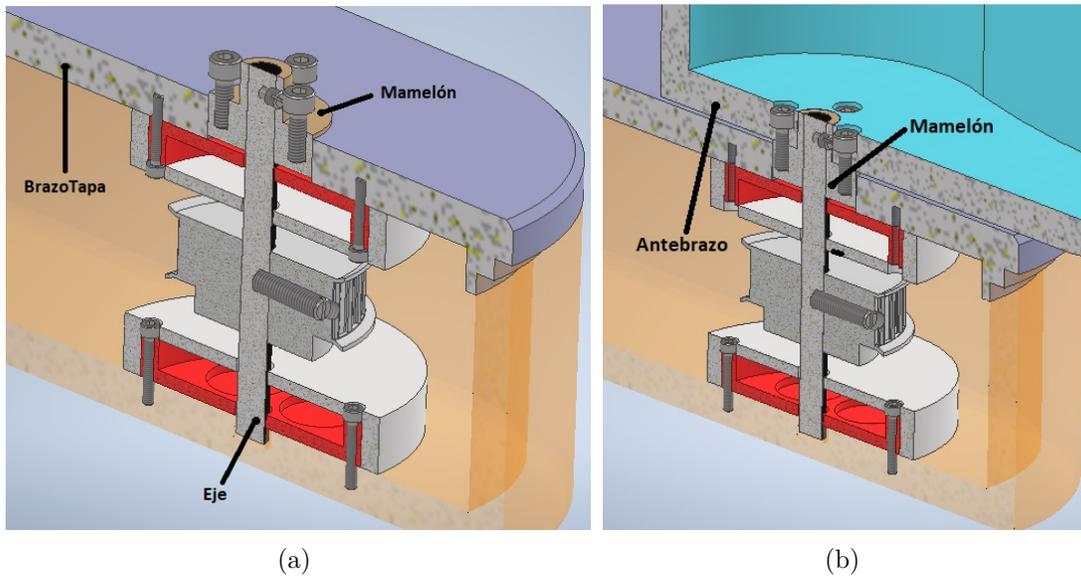


Figura 3.1.9. Vistas isométricas de los componentes que aseguran el movimiento del antebrazo (Mamelón, Eje, Antebrazo). En la figura a) se observa cómo el mamelón está sujeto al eje, y en la figura b) cómo el antebrazo está sujeto al mamelón.

La segunda función que desempeña esta pieza es la de unir al antebrazo con la tapa del brazo sin que exista un contacto superficial entre ambos. El antebrazo está unido al mamelón, el cual solamente gira concéntricamente dentro de un agujero que tiene la tapa del brazo, pero no lo toca. La manera de unir un brazo y un antebrazo en un robot es mediante una articulación, que permite que ambas partes tengan movimiento relativo y a la vez se mantengan unidas. En un robot para cuartos limpios, el diseño correcto de las articulaciones es muy importante ya que es en esta zona donde puede existir salida de partículas que se generan dentro de las partes implicadas o incluso en la interfaz de ambas y esto provoca contaminación en el cuarto. En esta propuesta de diseño, se utiliza el mamelón como una pieza que permite el movimiento entre el brazo y el antebrazo, pero sin que exista contacto físico entre ellos. En el apartado de Diseño para ensamble se explican algunos detalles y consideraciones que se deben tener con esta pieza para su correcto funcionamiento.

En la figura 3.1.10 se puede observar un acercamiento de un corte del ensamble de ambas partes (brazo y antebrazo completos), en la que se observa la forma de unión mediante el mamelón.

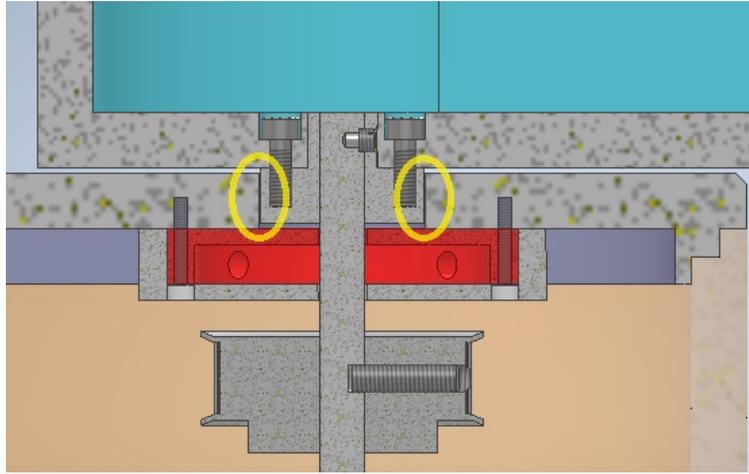


Figura 3.1.10 Corte del ensamble del brazo y antebrazo; se observa la unión mediante el mamelón. La zona con contorno amarillo es el espacio que existe entre el mamelón y el agujero que tiene la tapa del brazo para que el mamelón gire libremente con el eje y el antebrazo. Este espacio u holgura es crítico en el diseño porque de él depende la salida de partículas; el cálculo del tamaño del agujero y del mamelón se describe más adelante en el Diseño para Ensamble. Cabe señalar que a modo de visualizar el espacio encerrado en amarillo, se ha exagerado pero en la realidad no es perceptible a simple vista.

**BrazoTapa** y **AntebrazoTapa**: estas piezas son las respectivas tapas del brazo y del antebrazo para tener un entorno completamente cerrado y las pocas partículas que se puedan generar internamente debido a la transmisión, no puedan salir y contaminar el cuarto limpio. El brazo con su tapa y el antebrazo con su tapa, en sí actúan como carcasas que protegen al ambiente del mecanismo interno necesario para el funcionamiento de esta parte del robot SCARA. Estas piezas pueden observarse en la figura 3.1.1. Los detalles de las piezas antes descritas se pueden observar en los planos de cada una en el Apéndice B.

### 3.2 Selección de la transmisión

La transmisión está ubicada dentro del brazo y es la necesaria para mover el antebrazo a partir del motor eléctrico. Este motor está dentro del brazo mismo, por lo que es necesario llevar una banda de transmisión hasta la articulación del codo y pueda haber movimiento entre el brazo y el antebrazo. En el capítulo anterior, se determinó que la mejor opción para una transmisión para este diseño es por bandas dentadas porque el agarre es mejor, existe menos fricción entre la banda y las poleas, y por lo tanto menor emisión de partículas; y se tiene mayor exactitud y altas velocidades de giro. Se optó por utilizar bandas Optibelt® tipo Alpha AT. Estas bandas son dentadas y están compuestas de poliuretano, material que proporciona resistencia a la abrasión, tienen mayor vida útil y permiten una sincronización precisa para transporte y posicionamiento lineal y rotatorio. Están compuestas con cuerdas de acero inoxidable de baja tensión. No requieren lubricación, no sufren de alargamiento, generan bajo ruido al funcionar y son ideales para transmisiones compactas [64, 65].

Para la realización de los cálculos de la transmisión y selección de banda y poleas, se

utilizó el programa CAP para cálculo de una transmisión por banda, que ofrece la empresa Optibelt® como parte de sus servicios [66] (consultar Apéndice A).

Datos de entrada: Antes de comenzar el cálculo, es necesario definir el tipo de banda entre el catálogo de opciones que se despliegan, e ingresar algunos datos de entrada como los que se muestran a continuación.

- Tipo de banda: Optibel® ALPHA.
- Velocidad de entrada ( $v_1$ )= 15 rpm (de un motor eléctrico, que es la máquina motriz).
- Velocidad de salida ( $v_2$ )= 7.5 rpm (como la salida de una máquina parecida en funcionamiento a una lavadora pues continuamente cambia de sentido de giro).
- Distancia entre centros: 335 mm. La distancia real entre centros del propio brazo es de 350 mm, pero para la transmisión, se propone que la distancia entre eje y eje sea más pequeña para que exista espacio para los cables que salen de los rodamientos magnéticos y estos se pueden acomodar alrededor de la transmisión, en la periferia del interior del brazo.
- Par de giro ( $\tau_P$ )= 1.26 Nm.

La relación de velocidades se asignó de esa manera porque el robot debe entregar 300 discos u obleas de silicio/hora, es decir, 5 discos u obleas de silicio/minuto. La manera en que un robot SCARA haría esta acción, se muestra esquemáticamente en la figura 3.2.1.

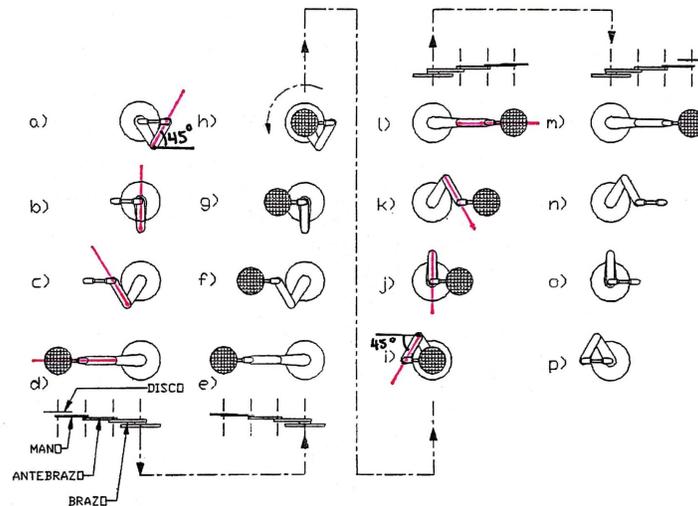


Figura 3.2.1. Secuencia de movimientos del brazo, antebrazo y efector final para el traslado de un disco de silicio de un extremo a otro. Obtenida de [56].

Se parte de una posición inicial (ver el inciso a) de la figura 3.2.1), giran las articulaciones del hombro, codo y muñeca para mover respectivamente el brazo, el antebrazo y la mano (efector final) con la finalidad de extenderlos completamente y llegar a la posición d), se toma el disco; luego el robot regresa a la posición original h), posteriormente el brazo, antebrazo y la mano son girados 180° como conjunto como se muestra en i), para luego

extenderse completamente y dejar la oblea en su lugar destino m), y luego se recogen completamente llegando a la posición p). Para partir de nuevo, el brazo gira  $180^\circ$  y comienza el ciclo nuevamente en a).

De la posición a) a la p) se considera un ciclo completo. En la figura 3.2.1 se puede observar mediante una línea roja, la posición angular del antebrazo durante todo el recorrido que hace en un ciclo. En la posición a), el antebrazo está a  $45^\circ$  con respecto a la horizontal; para cuando el robot ha llegado a la posición d), el antebrazo está completamente extendido, a  $180^\circ$ , por lo que de a) hasta d), el antebrazo ha girado  $135^\circ$ . En el regreso del robot de la posición e) a la h), el antebrazo nuevamente recorre  $135^\circ$ , con un total de  $270^\circ$ . En la posición i) el robot gira en conjunto  $180^\circ$  pero el antebrazo sigue manteniendo su posición angular respecto a la horizontal ( $45^\circ$ ). De la posición i) a la p), el antebrazo hace exactamente el mismo recorrido que de a) a h), por lo que también recorre  $270^\circ$ . En conclusión, en un ciclo completo, el antebrazo recorre  $540^\circ$  ( $270^\circ+270^\circ$ ), que es lo equivalente a 1.5 revoluciones. La articulación que mueve al antebrazo debe dar 1.5 revoluciones para entregar 1 disco, por lo que para entregar 5 discos en un minuto requiere dar 7.5 revoluciones. Es necesario aclarar que las 7.5 rpm que dará esta articulación para mover el antebrazo, es un aproximado porque no se está contando el tiempo muerto que existe cuando el extensor toma o deja el disco e incluso el tiempo que le toma a una articulación cambiar de sentido de giro. Por lo tanto, la velocidad de salida (antebrazo), es de 7.5 rpm, y se ha propuesto que la relación de velocidad entre las poleas sea de 2:1, por lo que la velocidad de entrada debe ser el doble que la de salida. De igual manera, la velocidad de entrada se puede regular porque proviene de un servomotor, aunque es recomendable mantenerla en 15 rpm para que se cumpla el objetivo de discos a tomar y entregar. Estos datos se ingresaron en el programa de cálculo, como se puede observar en la figura 3.2.2.

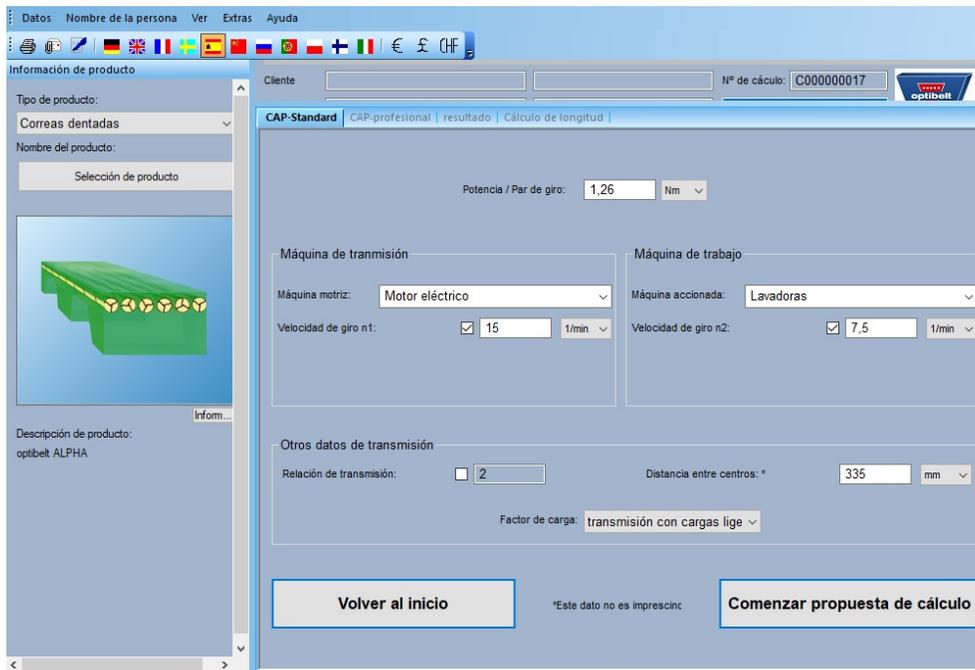


Figura 3.2.2. Datos ingresados en el programa CAP para el cálculo de la transmisión. Obtenida de [66].

Los resultados del programa fueron los siguientes, los cuales se visualizan en las figuras 3.2.3 y 3.2.4.

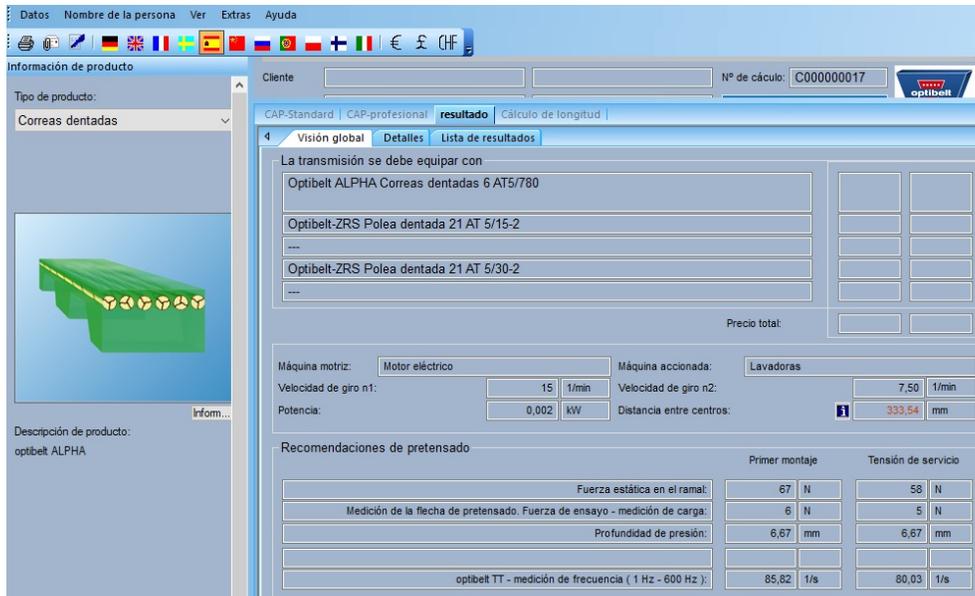


Figura 3.2.3. Visión global de los resultados que arrojó el programa CAP. Se observa la nomenclatura para la banda y para las poleas Optibelt® que componen la transmisión. Obtenida de [66].

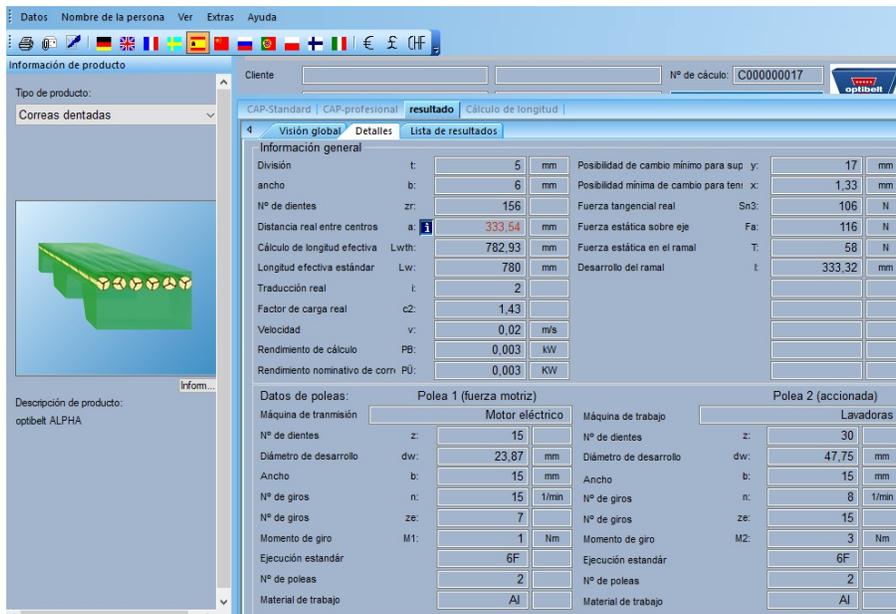


Figura 3.2.4. Detalles de la transmisión. En la información general se encuentran detalles de la banda como ancho, longitud, número de dientes; de la distancia entre centros y el número de poleas en la transmisión. Abajo se encuentra información sobre cada una de las poleas: número de dientes, diámetro entre dientes (diámetro de desarrollo), ancho, material y velocidad a la que girarán. Obtenida de [66].

A continuación, se presenta un resumen de la transmisión con los datos técnicos de la banda y de ambas poleas.

**BANDA:** ALPHA AT: 6 AT5 / 780

- Ancho: 6 mm
- Tipo AT5 (Alpha)
- Longitud efectiva estándar: 780 mm
- No. Dientes: 156
- Paso: 5mm
- Material: Poliuretano.

**POLEA MOTRIZ (Motor eléctrico):** 21 AT 5/15-2

- Diámetro a dientes 23.87 mm
- Diámetro total: 28 mm
- Diámetro cubo: 16 mm
- Tipo AT5 (Alpha)
- Ancho: 15 mm
- Material: Aluminio 6082 T6 (Si: 0.7-1.3%, Mg: 0.6-1.2%, Mn: 0.4-1%, tratado térmicamente con un envejecimiento).
- No. Dientes: 15
- Ancho total: 22 mm

## POLEA CONDUCTIDA (Máquina tipo lavadora): 21 AT 5/30-2

- Diámetro a dientes: 47.75 mm
- Diámetro total: 51 mm
- Diámetro cubo: 34 mm
- Diámetro eje: 8 mm
- Tipo AT5 (Alpha)
- Ancho: 15 mm
- Material: Aluminio 6082 T6 (Si: 0.7-1.3 %, Mg: 0.6-1.2 %, Mn: 0.4-1 %, tratado térmicamente con un envejecimiento).
- No. Dientes: 30
- Ancho total: 22 mm

## TRANSMISIÓN:

- Relación 2:1
- Número de poleas: 2
- Distancia entre centros: 335 mm
- Distancia real entre centros:  $333.54 \text{ mm} - 1.464 \text{ mm} = 332.076 \text{ mm}$ . Se le resta esta cantidad debido a una corrección que el programa sugiere debido a la distancia entre centros propuesta. Esta corrección se encuentra en un documento que resume los datos para la transmisión, otorgado por el programa CAP; éste se encuentra en el Apéndice C.

La empresa Optibelt® también proporciona un catálogo llamado CAD de modelos tridimensionales de poleas que son descargables; se utilizó esta herramienta para incluirlos en el diseño hecho en el programa Inventor®. La PoleaConducida ya tiene por defecto un barreno estándar para acoplarla a un eje, pero la PoleaMotriz no la tiene, por lo que fue necesario hacerle un barreno para ensamblarla al eje del motor. El cálculo del ajuste y las tolerancias necesarias para este ensamble, se detallan en el apartado de Diseño para ensamble, junto con la manera de asegurar el ensamble. Con esta transmisión se asegura que exista una relación 2 a 1 entre las velocidades de las poleas, y se cumplirá, aunque se modifique la velocidad de entrada por medio del servomotor. La relación de velocidades entre la PoleaConducida, el Eje donde está ensamblada, el Mamelón y el Antebrazo, es de 1 a 1, por lo que al haber una velocidad de entrada de 15 rpm, el antebrazo girará a 7.5 rpm, manteniéndose la relación 2 a 1 propuesta.

En figuras anteriores se han mostrado las características de la transmisión; en la figura 3.2.5 se muestra una imagen de ambas poleas. En el diseño en el programa de Inventor® no se incluyó la banda dentada, pero en la figura 3.2.6 se muestra una ampliación de un plano que contiene un corte del ensamble del brazo-antebrazo con la transmisión completa; para observar el plano completo, éste se puede consultar en el Apéndice B.

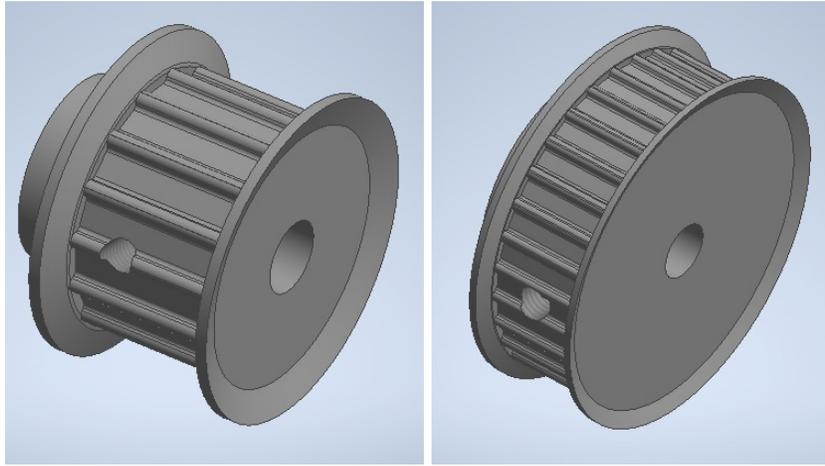


Figura 3.2.5. Vistas isométricas de las poleas usadas en la transmisión por banda dentada. A la izquierda, se observa la PoleaMotriz y a la derecha la PoleaConducida.

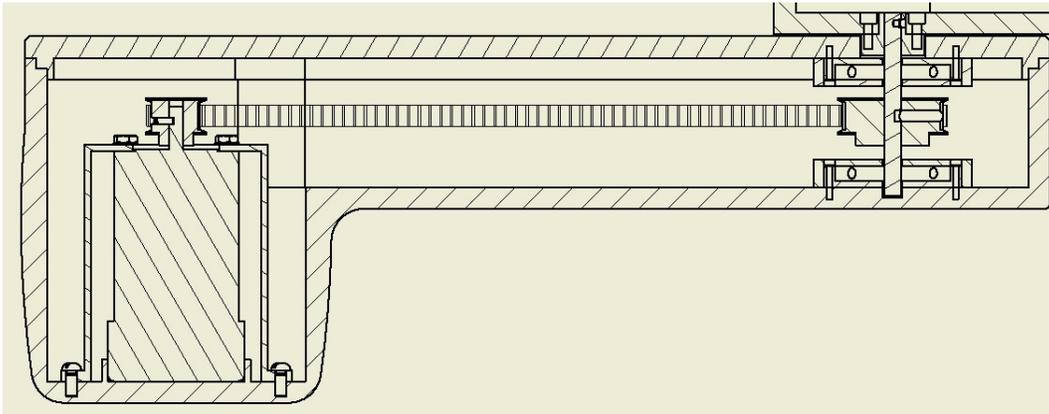


Figura 3.2.6 Corte del ensamble del brazo-antebrazo en el que se puede observar la transmisión por banda dentada. El plano completo se encuentra en el Apéndice B, Plano No. 1.

### 3.3 Diseño para ensamble

En este apartado se detallará la manera en que las piezas se ensamblan: el orden, la forma de sujeción (a presión o con tornillos y tuercas), y a su vez, los ajustes y tolerancias necesarios para lograr lo anterior. Para una mejor comprensión, se acompañarán las descripciones con imágenes de subensambles o planos de explosión.

#### Ensamble 1:

Uno de los primeros componentes a ensamblar es el motor, que está sujeto al brazo gracias a la pieza llamada SoporteMotor por medio de tornillos; pero primero deben ensamblarse el motor y su soporte con tornillos ya que la colocación de estos no es posible si el motor ya está ensamblado al brazo. Para ensamblar el Motor y el SoporteMotor es necesario utilizar cuatro tornillos con sus respectivas tuercas y rondanas, como se ve ilustrado en la figura 3.3.1 a) y b). Los tornillos deben ser colocados con la cabeza orientada hacia abajo, para que el cuerpo del tornillo que tiene cuerda pueda enroscarse en la cuerda del soporte del motor y a su vez ser sujetado con la tuerca, como se puede ver en la figura 3.3.1.

El motor debe estar orientado de tal manera que la parte inferior (donde se encuentra el “Encoder” ver en el Apéndice B los planos del motor, “BLD BRUSHLESS SERVO MOTORS”) entre en el hueco rectangular que tiene el soporte, tal como se muestra en la figura 3.3.1. Las dimensiones del soporte están calculadas para que, al ensamblar completamente en el motor, las superficies inferiores tanto del motor como del soporte queden al mismo nivel tocando al brazo. Esto también se puede observar en la figura 3.2.6.

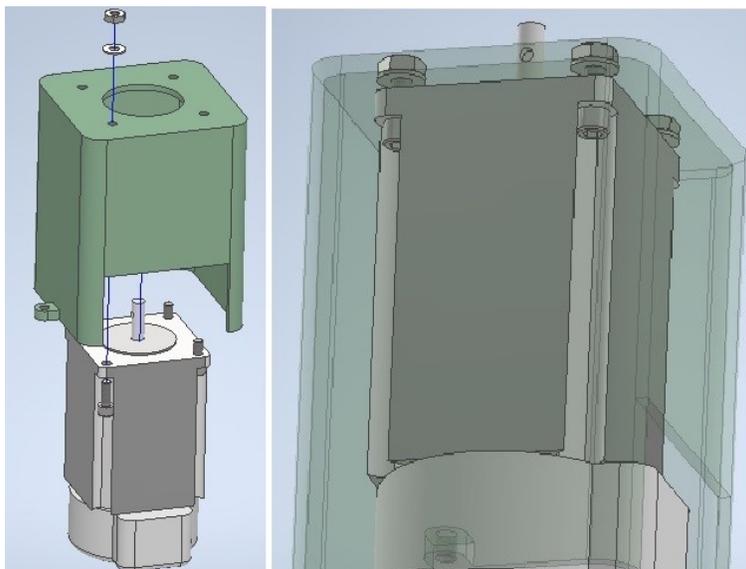


Figura 3.3.1 Ensamble del Motor con el SoporteMotor por medio de tornillos, tuercas y rondanas. Se observan las trayectorias de despiece del motor y de uno de los tornillos con su tuerca y rondana; y también todos los elementos ya colocados y en específico cómo los tornillos deben ensamblarse en los orificios del motor con la cabeza hacia abajo.

A continuación, en la figura 3.3.2 se encuentra un resumen de las piezas necesarias para este ensamble y algunas especificaciones técnicas. Los agujeros del motor por donde pasan los tornillos para ensamblar el soporte del motor no tienen rosca, son agujeros pasados. Los tornillos pasan con una holgura de 0.26 mm por los agujeros del motor, se enroscan en el soporte del motor y se aseguran en su extremo con las tuercas; también se utilizan rondanas para el apriete. La inserción de los tornillos se debe hacer con ayuda de una llave Allen ya que la cabeza de los tornillos tiene hueco hexagonal.

ENSAMBLE MOTOR - SOPORTE MOTOR	
<b>Motor</b>	No aplica
<b>SopORTE MOTOR</b>	4 x Roscas Unificadas ANSI 10-32 UNF
	Tamaño 0.19in (3/16") (#10)
	Clase 2B
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 3mm
	Paso 32 hilos/in
<b>Tornillería</b>	4 x Tornillos de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal 10-32 UNF-0.5
	Ønominal 0.19in (3/16") = 4.82mm (equivalente a un M5 métrico). Tamaño 10 en sistema inglés
	Longitud nominal 0.5in
	Longitud de la rosca 0.453in
	Øcabeza 0.312in; 7.92mm
	Paso 0.03125in; 32hilos/in
	Tipo de rosca ANSI Unified Screw Threads. Rosca UNF, (paso fino).
	Clase 2A
	Material Acero suave
<b>TUERCAS</b>	4 x Tuercas hexagonales para maquinaria 10-32 UNF
	Ønominal 0.19in (3/16") = 4.82mm (equivalente a un M5 métrico). Tamaño 10 en sistema inglés.
	Altura de la cabeza 0.130in
	Anchura de caras planas 0.375in
	Paso 0.03125in; 32hilos/in.
	Tipo de rosca ANSI Unified Screw Threads. Rosca UNF (paso fino).
	Clase 2B
	Material Acero suave
<b>RONDANAS</b>	4 x Arandela elástica. N°10. SAE tipo L. Fino. 10-32 UNF
	Ønominal 0.19in = 4.826mm
	Øinterior 0.203in = 5.15mm
	Øexterior 0.446in = 11.32mm
	Grueso 0.035in = 0.889mm
	Material Acero suave

Figura 3.3.2 Resumen de las especificaciones técnicas del ensamble del Motor con el SopORTE MOTOR. Las dimensiones y demás especificaciones del motor se encuentran en el Apéndice B, "BLD BRUSHLESS SERVO MOTORS", al igual que las de SopORTE MOTOR, Apéndice B, Plano No. 2.

## Ensamble 2:

Una vez ensamblado el motor con su soporte, es conveniente ensamblar la PoleaMotriz al eje del motor, debido a que una vez que el motor y su soporte estén montados en el brazo, sería complicado acceder al espacio para instalar la polea mencionada. La polea contemplada en el cálculo de la transmisión no tiene agujero para su entrada en un eje, se debe manufacturar (como el agujero que se muestra en las figuras anteriores donde se visualiza la polea), mediante un proceso de fresado con el que se obtienen calidades o grados de tolerancias numéricas de  $IT=6-7$ , utilizadas para mecánica en general [67]. La polea debe entrar a presión en el eje del motor pero no debe ser una entrada demasiado forzada, por lo que se puede utilizar un ajuste de entrada suave, para piezas que deban acoplarse y desacoplarse a mano o a golpe suave con un mazo de madera (consultar Apéndice D, figuras D1 y D2). En la figura 3.3.3 se aprecia la polea motriz ensamblada en el eje del motor.

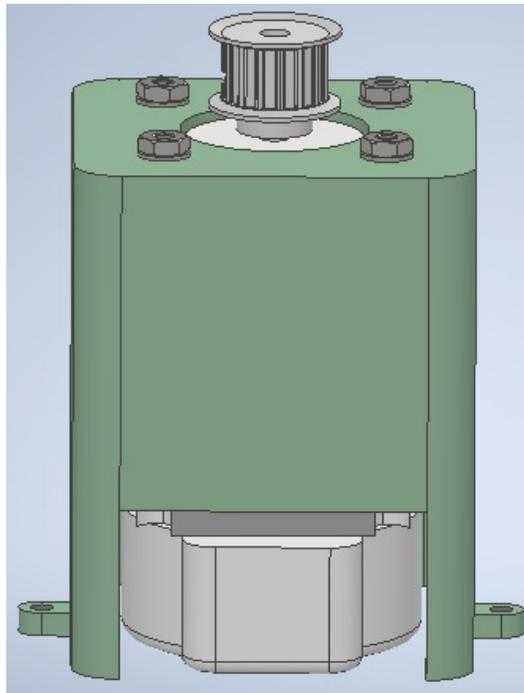


Figura 3.3.3 Ensamble de la polea motriz en el eje del motor. El agujero de la polea debe tener un diámetro de 6.35 mm con tolerancias.

A continuación, se presenta el cálculo de las tolerancias necesarias para lograr el ajuste deseado. El sistema es de eje único ya que las dimensiones del eje motor son fijas. Teniendo esto en cuenta, se tienen los siguientes datos:

– Dimensión nominal (Diámetro del eje del motor: 6.35 mm). Es un sistema de eje único (h, norma DIN 7155) porque las dimensiones del motor ya están estandarizadas.

Según las características del ensamble, la combinación h6 para el eje del motor y J7 para el agujero de la polea, da como resultado un ajuste fino de entrada suave que

necesita seguro de giro y deslizamiento. Para esto se consultó la tabla de Aplicaciones recomendadas de ajustes para eje único (Apéndice D, tabla D2).

- Ajuste para el eje del motor: **h6** (ajuste fino), consultar Apéndice D, figura D2.
- Ajuste para el agujero: **J7** (ajuste de entrada suave), consultar Apéndice D, figura D2.
- Calidad de la tolerancia eje del motor: **IT=6**, mecánica general, para piezas maquinadas que van a ajustar.
- Calidad de la tolerancia agujero de la polea: **IT=7**, mecánica general, para piezas maquinadas que van a ajustar. Estas calidades se pueden consultar en el Apéndice D, tabla D1.

$\phi$  **6.35mm J7 / h6**, tolerancia dimensional agujero de la polea: 0.015mm (15 micras)  
tolerancia dimensional del eje del motor: 0.009mm (9 micras)

Para obtener estos valores, se consultó la tabla D1 del Apéndice D, IT=6 para el eje e IT=7 para el agujero y con un diámetro de 6.35mm.

Como el eje es único, el límite superior es la línea base (cero). Para lograr las tolerancias totales para el eje y el agujero, se consultó la tabla D3 del Apéndice D, y se obtiene:

**Eje:**  $\phi$  6.350 h6     $\phi$  6.35 $_{-0.009}^{+0.000}$      $d_{max} = 6.35$  mm,  $d_{min} = 6.341$  mm

**Agujero:**  $\phi$  6.35 J7     $\phi$  6.35 $_{-0.007}^{+0.008}$      $d_{max} = 6.358$  mm,  $d_{min} = 6.343$  mm

Usando la “*d*” para el diámetro del eje y la “*D*” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ : 6.343-6.35= **-0.007 mm** (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ : 6.358-6.341= **+0.017 mm** (espacio libre máximo).

Con estas tolerancias para el eje del motor y para el agujero de la polea, se logran los ajustes mínimo y máximo antes descritos. El eje del motor tiene dimensiones ya establecidas, por lo que se tomará siempre el diámetro nominal (en este caso igual a  $d_{max} = 6.35$  mm +0.00 mm = 6.35 mm); si se le combina por ejemplo, con el diámetro mínimo del agujero de la polea ( $D_{min}=6.343$  mm), se tiene una interferencia de 0.007 mm, y si se le combina con el diámetro máximo del agujero de la polea ( $D_{max}=6.358$  mm), se logra una holgura entre piezas igual a 0.008 mm, lo que genera que la polea se deba ensamblar con golpes suaves con un mazo se madera.

El cálculo se ha corroborado por medio del calculador en línea llamado *Mesys*, el cual es un programa libre para cálculos técnicos en ingeniería mecánica [68], ver Apéndice A. En la figura 3.3.4 se encuentra el cálculo de los ajustes para este ensamble, donde se corroboran los resultados obtenidos, y en la figura 3.3.5 las tolerancias que debe tener el agujero de la polea para lograr el ajuste necesario. Para cálculos posteriores, se utilizará directamente el programa para el cálculo de los ajustes.

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependent on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

Nominal size	D	<input type="text" value="6.35"/>	mm
Tolerance hub		<input type="text" value="J"/> <input type="text" value="7"/>	
Upper limit deviation	ES	<input type="text" value="0.008"/>	mm
Lower limit deviation	EI	<input type="text" value="-0.007"/>	mm
Tolerance shaft		<input type="text" value="h"/> <input type="text" value="6"/>	
Upper limit deviation	es	<input type="text" value="0"/>	mm
Lower limit deviation	ei	<input type="text" value="-0.009"/>	mm
		<input type="button" value="Calculate"/>	
		Transition fit	
Maximum clearance	cmax	<input type="text" value="0.017"/>	mm
Maximum interference	imax	<input type="text" value="0.007"/>	mm

Figura 3.3.4. Cálculo de ajustes para el ensamble del eje del Motor con la PoleaMotriz. Obtenida de [68].

Las especificaciones sobre esta polea se encuentran en el Apéndice B, “21 AT5 /15-2”, y en el (Plano No. 3) se encuentra un plano con medidas y especificaciones complementarias.

La polea motriz tiene un agujero pasado pero la polea no entrará en el eje a lo largo de toda su extensión debido a que el ancho de la polea es mayor que la longitud del eje del motor. Para que la polea no choque con la superficie del motor de donde parte el eje, la polea no se introducirá completamente en el eje del motor, debe existir un espacio de 1.8 mm entre el cubo de la polea y la superficie del motor de donde parte el eje, como se muestra en la figura 3.3.5.

El ajuste h6 / J7 para la polea, necesita un seguro contra deslizamiento, por lo que se ha elegido asegurar la polea en el eje con un tornillo prisionero. El agujero para el mismo, junto con la rosca deben hacerse ya que la polea contemplada no los incluye. La posición y dimensiones del espacio para el tornillo prisionero son coincidentes con el pequeño agujero que tiene el eje del motor justamente para utilizar un tornillo en su ensamble, con 3 mm de diámetro y 2 mm de profundidad, ubicado a 6.7 mm del extremo libre del eje.

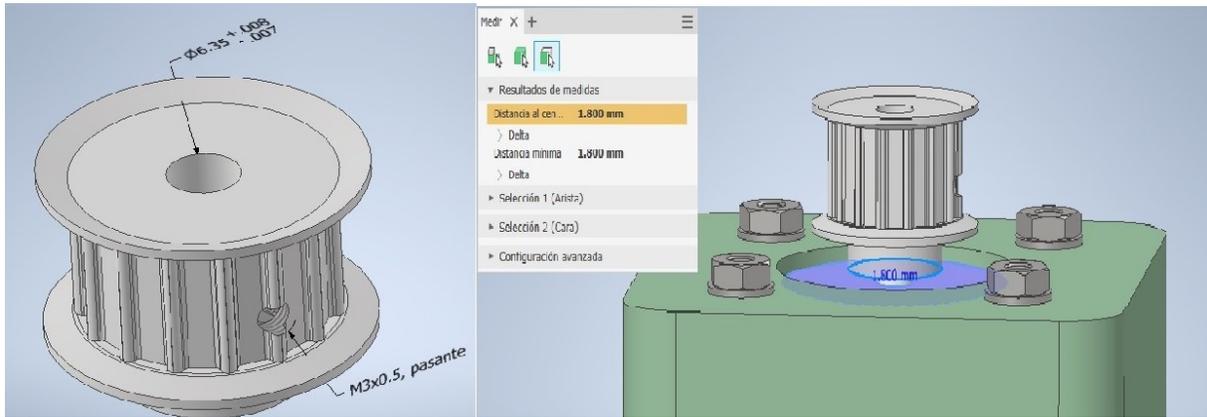


Figura 3.3.5. Se observan las tolerancias para el agujero de la polea motriz, y la distancia (1.8 mm) entre la superficie inferior del cubo de la polea y la superficie desde donde inicia el eje del motor, que son las superficies mostradas en azul en la figura. Cabe señalar que las tolerancias en a) están en milímetros.

Dadas las dimensiones del agujero en el motor y el diámetro de la polea motriz, se ha determinado que se debe utilizar un tornillo prisionero *DIN EN 24766* de 3 mm de diámetro y 8 mm de largo. En la figura 3.3.5 se aprecia la ubicación de la rosca para el tornillo prisionero, y en la figura 3.3.6 se encuentra un resumen de las especificaciones técnicas del ensamble de la PoleaMotriz con el eje del Motor mediante el tornillo prisionero.

ENSAMBLE POLEA MOTRIZ - EJE MOTOR	
<b>Eje del motor</b>	Barreno de fábrica sin rosca para tornillo prisionero
	Tamaño 3mm
	Profundidad 2mm
<b>PoleaMotriz</b>	1 Rosca M3x0.5 Perfil Métrico ISO
	Tamaño 3mm
	Clase 6H
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 8.527mm (la profundidad completa del barreno)
	Paso 0.5mm
<b>Tornillería</b>	1 Tornillo DIN EN 24766 M3x8
	Ønominal 3mm (M3)
	Longitud nominal 8mm
	Longitud de la rosca 7.193mm
	Paso 0.5mm, 2hilos/mm
	Tipo de rosca ISO Metric Profile
	Clase 6g
	Material Acero suave

Figura 3.3.6 Resumen de las especificaciones técnicas del ensamble de la PoleaMotriz con el eje del Motor.

La PoleaConducida, también implicada en la transmisión, se encuentra ubicada a una distancia simétrica de ambos rodamientos magnéticos, esto determinó la posición vertical de la PoleaMotriz para que ambas poleas quedaran en el mismo plano y la banda quede colocada correctamente. Dada esta condición, se propone que la polea motriz debe ser ensamblada con el cubo orientado hacia abajo, como se muestra en la figura 3.3.7, de esta manera, existe mayor superficie de contacto entre el agujero de la polea y el eje del motor. La razón de la posición del agujero para el tornillo prisionero es la misma, debido a la ubicación vertical de la polea motriz, se decidió hacer el agujero en el cuerpo de la polea donde están los dientes, en vez de en el cubo de la polea, para que exista un punto de sujeción ubicado hacia el centro geométrico de la polea y no hacia el extremo de ésta (en el cubo), incluso para que el punto de sujeción no esté demasiado cerca del extremo libre del eje del motor. Esto da una mayor seguridad de sujeción para la carga que implica la tensión y el movimiento de la banda. A continuación, en la figura 3.3.7 se muestra el ensamble del eje del Motor con la PoleaMotriz.

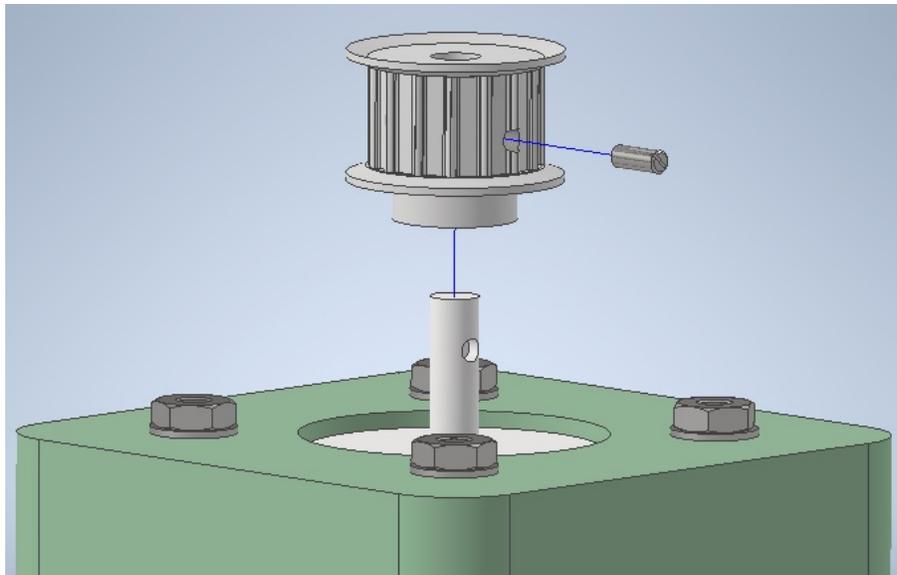


Figura 3.3.7 Ensamble de la PoleaMotriz con el eje del Motor por medio de un tornillo prisionero. Se observan las trayectorias de despiece y la orientación que tiene la PoleaMotriz, mencionada anteriormente.

### **Ensamble 3:**

Posterior a la colocación de la PoleaMotriz, se puede hacer el ensamble con el brazo. Para esto se han determinado dos formas de sujeción; la primera es mediante dos pequeños topes que forman parte del brazo, y están entre sí a una distancia que es igual al diámetro de la parte inferior del motor (por lo que se puede considerar un agujero). Estos topes sirven para centrar el motor al momento de ensamblar. La segunda manera implica tornillos que ensamben el soporte del motor con el brazo. En la figura 3.3.8 se aprecian los topes y los tornillos mencionados para realizar el ensamble.

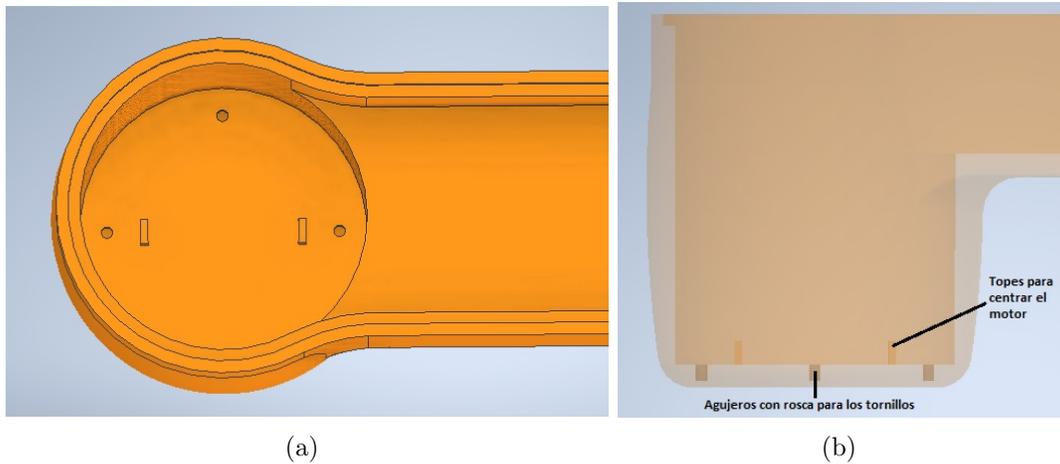


Figura 3.3.8 a) Vista superior isométrica y b) vista frontal con transparencia de los agujeros con rosca y topes en la cavidad del Brazo para su ensamble con el Motor y el SoporteMotor.

Primero se deben colocar el motor junto con su soporte, en la superficie interna de la cavidad del brazo, guiando el ensamble con los topes mencionados. Este ensamble no requiere un ajuste a presión, por lo que se puede utilizar un ajuste de juego libre (consultar Apéndice D, figura D1 y figura D2). A continuación, se presenta el cálculo de las tolerancias necesarias para lograr el ajuste deseado. El ensamble se puede considerar como un ensamble de un agujero (el espacio entre los topes es una circunferencia) y un eje (la parte cilíndrica del motor). El sistema sería de eje único ya que las dimensiones del motor son fijas. Teniendo esto en cuenta, se tienen los siguientes datos:

- Dimensión nominal (Diámetro del cilindro del motor: 63.5 mm). Es un sistema de eje único (h, norma DIN 7155) porque las dimensiones del motor ya están estandarizadas. Según las características del ensamble, la combinación h9 para el eje y E9 para el agujero, da como resultado un ajuste libre con juego mediano; en este caso, los topes que forman parte del brazo sólo servirán como guía y no se necesita un ajuste de apriete. Para esto se consultó la tabla de Aplicaciones recomendadas de ajustes para eje único (Apéndice D, tabla D2).

- Ajuste para el eje: **h9** (ajuste corriente), consultar Apéndice D, figura D2.
- Ajuste para el agujero: **E9** (ajuste de juego libre), consultar Apéndice D, figura D2.

Se utilizó el programa *Mesys* para el cálculo de las tolerancias y holguras, ingresando el ajuste para el eje y el agujero y el diámetro contemplado, y se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 3.3.9).

Por lo tanto, las tolerancias para ambos elementos quedan de la siguiente manera:

$$\text{Eje: } \phi 63.5 \text{ h9} \quad \phi 63.5^{+0.000}_{-0.074} \quad d_{max} = 63.5 \text{ mm}, \quad d_{min} = 63.426 \text{ mm}$$

$$\text{Agujero: } \phi 63.5 \text{ E9} \quad \phi 63.5^{+0.134}_{+0.060} \quad d_{max} = 63.634 \text{ mm}, \quad d_{min} = 63.56 \text{ mm}$$

Usando la “d” para el diámetro del eje y la “D” para el del agujero, se tienen los si-

guientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ :  $63.56-63.50= 0.060$  mm (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ :  $63.634-63.426= 0.208$  mm (espacio libre máximo).

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependent on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

Nominal size	D	<input type="text" value="63.5"/>	mm
Tolerance hub		<input type="text" value="E 9"/>	
Upper limit deviation ES		<input type="text" value="0.134"/>	mm
Lower limit deviation EI		<input type="text" value="0.06"/>	mm
Tolerance shaft		<input type="text" value="h 9"/>	
Upper limit deviation es		<input type="text" value="0"/>	mm
Lower limit deviation ei		<input type="text" value="-0.074"/>	mm
		<input type="button" value="Calculate"/>	
		Clearance fit	
Maximum clearance cmax		<input type="text" value="0.208"/>	mm
Minimum clearance cmin		<input type="text" value="0.06"/>	mm

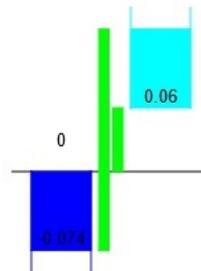


Figura 3.3.9. Cálculo de ajustes para el ensamble del motor con el brazo. Obtenida de [68].

Con estas tolerancias para el eje (motor) y para el agujero (topes del brazo), se logran los ajustes mínimo y máximo antes descritos. El eje (motor), tiene dimensiones ya establecidas, por lo que se tomará siempre el diámetro nominal (en este caso igual a  $d_{max} = 63.5$  mm + 0.0 mm=63.5); si se le combina por ejemplo, con el diámetro máximo del agujero ( $D_{max} = 63.634$ ), se tiene una holgura de 0.134 mm, el cual es aceptable para ensamblar el motor en el brazo sin dificultad.

En la figura 3.3.10 a), y b) se muestran los topes antes mencionados que sirven como guía para ensamblar el motor al brazo, junto con las tolerancias que debe tener el agujero formado por éstos.

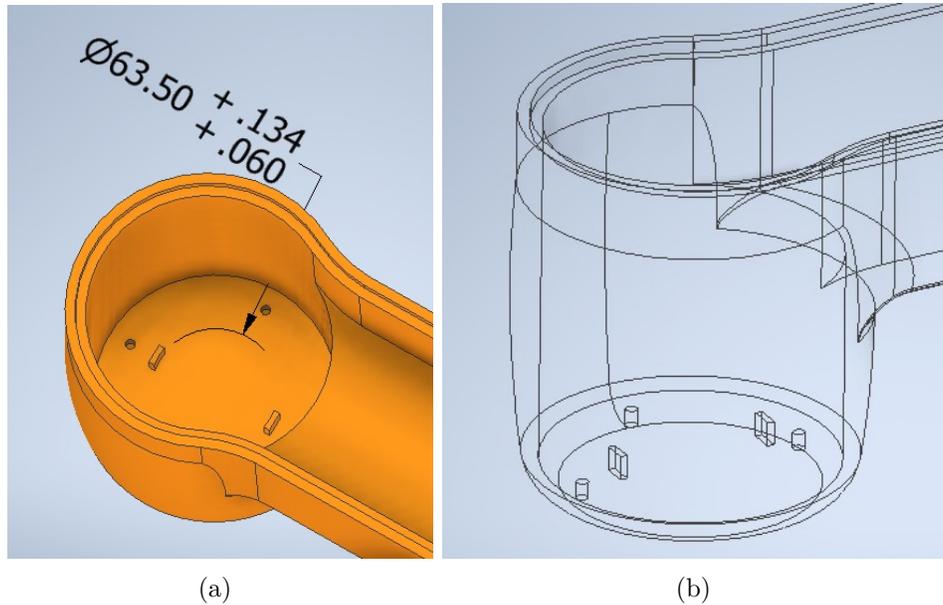


Figura 3.3.10. a) Topes para guiar el ensamble del motor en el brazo junto con las tolerancias necesarias para el agujero (formado por los topes), en b) se aprecian los topes gracias a una representación alámbrica de la pieza.

Una vez centrados el motor y su soporte en el brazo, se procede a atornillar el soporte al brazo por medio de las pestañas que tiene el soporte en la parte inferior. Serán necesarios tres tornillos como se ve ilustrado en la figura 3.3.11. Los tornillos deben ser colocados con la cabeza orientada hacia arriba, y deben atornillarse tanto con el soporte del motor como con el brazo, pues ambas piezas tienen rosca. El ensamble se muestra en la figura 3.3.11.

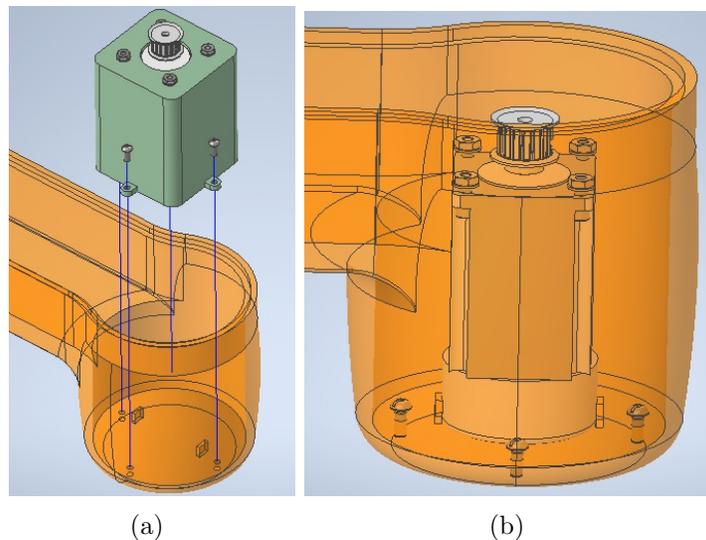


Figura 3.3.11. Ensamble del Motor y el SoporteMotor con el BrazoSoporteMotor por medio de tornillos. En a) se observan las trayectorias de despiece del ensamble y en b) se observan los elementos ya colocados, en específico cómo el motor embona en los topes del brazo. Se omitió el SoporteMotor en esta imagen para una mejor apreciación.

A continuación, en la figura 3.3.12 se encuentra un resumen de las piezas necesarias para este ensamble y algunas especificaciones técnicas. Los tornillos se enroscan en el soporte del motor y en el brazo, no hay necesidad de usar tuercas ni rondanas.

ENSAMBLE SOPORTE MOTOR - BRAZO	
<b>SoporteMotor</b>	3 Roscas M5x0.8 Perfil Métrico ISO
	Tamaño 5mm
	Clase 6H
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 5mm (pasado)
	Paso 0.8mm
<b>Brazo</b>	3 Roscas M5x0.8 Perfil Métrico ISO
	Tamaño 5mm
	Clase 6H
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 7mm
	Paso 0.8mm
<b>Tornillería</b>	4 Tornillos CNS 9671 M5x12
	Ønominal 5mm (M5)
	Longitud nominal 12mm
	Longitud de la rosca 10mm
	Altura cabeza 3.52mm
	Øcabeza 9mm
	Paso 0.8mm, 1.25hilos/mm
	Tipo de rosca ISO Metric Profile
	Clase 6g
Material Acero suave	

Figura 3.3.12 Resumen de las especificaciones técnicas del ensamble del SoporteMotor con el Brazo.

Las dimensiones y demás especificaciones de las piezas involucradas en este ensamble se encuentran en el Apéndice B, (Planos No. 2, 3, 4 y 4.1; junto con un plano explosivo del ensamble de las piezas (Plano No. 5).

#### **Ensamble 4:**

Para proceder con el ensamble en el extremo del brazo que corresponde a la articulación, se debe realizar primero el ensamble del RodamientoMagnético con su carcasa (CarcasaRodamiento). Estas dos piezas se pueden ensamblar sin necesidad de ejercer una presión, por lo que se puede utilizar un ajuste de juego libre (consultar Apéndice D, figura D1 y figura D2). La manera de ensamblar estas dos piezas al brazo es por medio de tornillos, lo que le da más seguridad al ensamble, esto se explicará más adelante.

La pieza CarcasaRodamiento se considerará como un agujero, en el que va a entrar un eje (la pieza RodamientoMagnético), y el sistema puede ser tanto de eje o agujero único, se opta por la primera opción. Teniendo esto en cuenta, se tienen los siguientes datos:

– Dimensión nominal (Diámetro externo del rodamiento magnético: 2.5 in= 63.5 mm), y se trata de un sistema de eje único (h, norma DIN 7155).

Al igual que para el ensamble anterior, la combinación h9 para el eje y E9 para el agujero, da como resultado un ajuste libre con juego mediano; la carcasa protegerá al rodamiento, pero no se necesita un ajuste de apriete. Para esto se consultó la tabla de

Aplicaciones recomendadas de ajustes para eje único (Apéndice D, tabla 2).

- Ajuste para el eje: **h9** (ajuste corriente), consultar Apéndice D, figura D2.
- Ajuste para el agujero: **E9** (ajuste de juego libre), consultar Apéndice D, figura D2.

Se utilizó el programa *Mesys* para el cálculo de las tolerancias y holguras, ingresando el ajuste para el eje y el agujero y el diámetro contemplado, y se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 3.3.13).

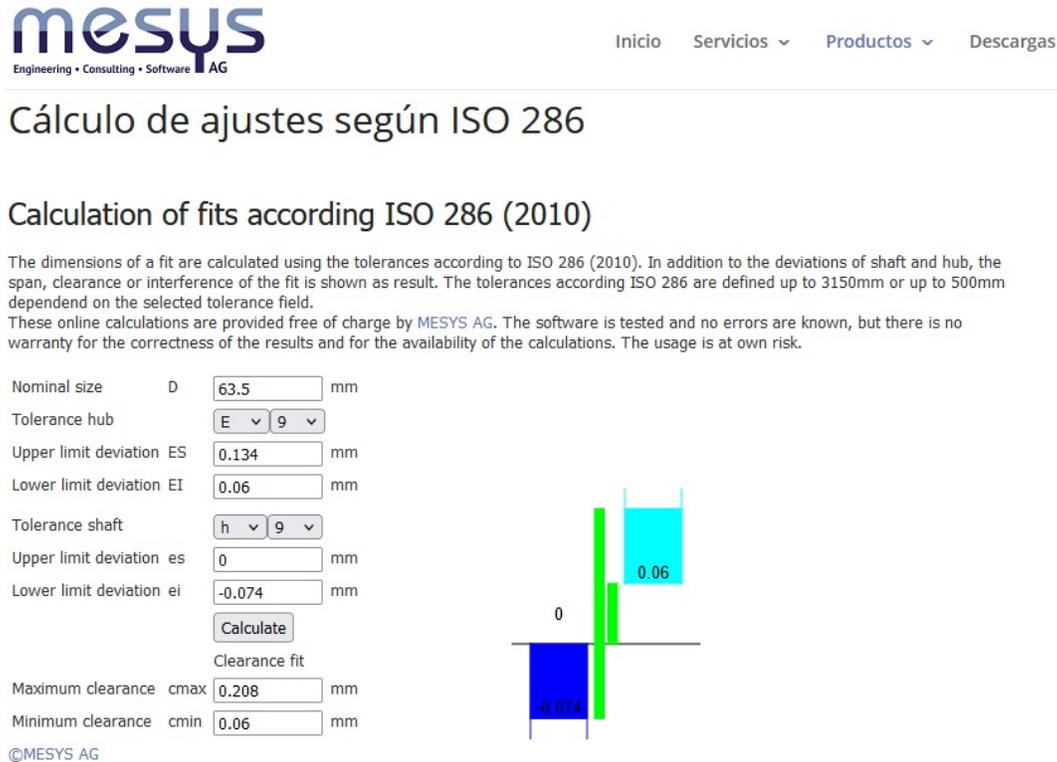


Figura 3.3.13. Cálculo de ajustes para el ensamble del rodamiento con su carcasa. Obtenida de [68].

Al tratarse del mismo diámetro nominal que para el ensamble anterior, se obtuvieron las mismas tolerancias:

**Eje:**  $\phi 63.5 \text{ h9}$      $\phi 63.5^{+0.000}_{-0.074}$      $d_{max} = 63.500 \text{ mm}$ ,  $d_{min} = 63.426 \text{ mm}$

**Agujero:**  $\phi 63.5 \text{ E9}$      $\phi 63.5^{+0.134}_{+0.060}$      $d_{max} = 63.634 \text{ mm}$ ,  $d_{min} = 63.560 \text{ mm}$

Usando la “*d*” para el diámetro del eje y la “*D*” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ :  $63.56 - 63.50 = +0.060 \text{ mm}$  (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ :  $63.634 - 63.426 = +0.208 \text{ mm}$  (espacio libre máximo).

Con estas tolerancias para el eje (RodamientoMagnético) y para el agujero (CarcasaRodamiento), se logran los ajustes mínimo y máximo antes descritos. En la figura 3.3.14 a), y b) se muestran el RodamientoMagnético y la CarcasaRodamiento respectivamente, las tolerancias necesarias para un ajuste con juego libre.

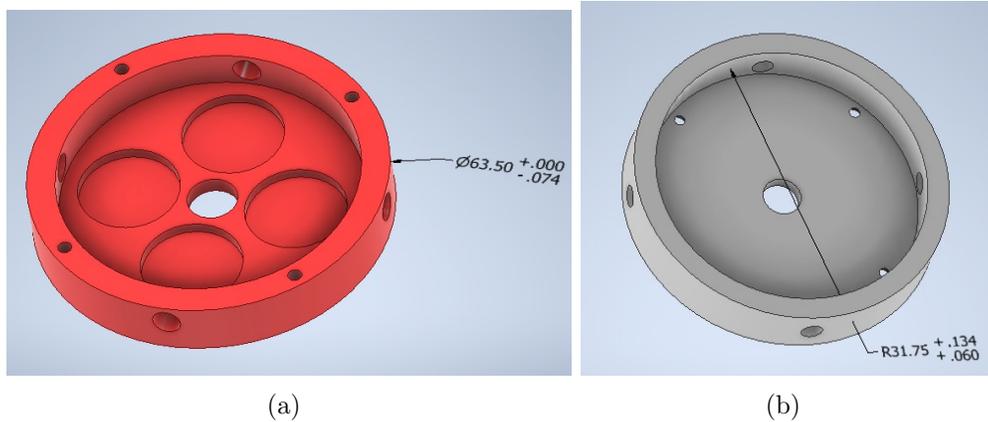


Figura 3.3.14. a) Rodamiento magnético y b) CarcasaRodamiento, ambos con sus respectivas tolerancias para su ensamble.

El ensamble se realiza introduciendo el rodamiento magnético en su carcasa, como se muestra en la figura 3.1.6, teniendo cuidado de que los agujeros para los cables y para los tornillos, queden alineados.

Para ensamblar estas piezas en el brazo, se utilizarán tornillos, colocados con la cabeza orientada hacia abajo, y deben pasar a través de la carcasa (tiene agujeros pasados más no roscas) y atornillarse con el rodamiento magnético y con el brazo, pues estas dos últimas piezas cuentan con rosca. El ensamble se muestra en la figura 3.3.15.

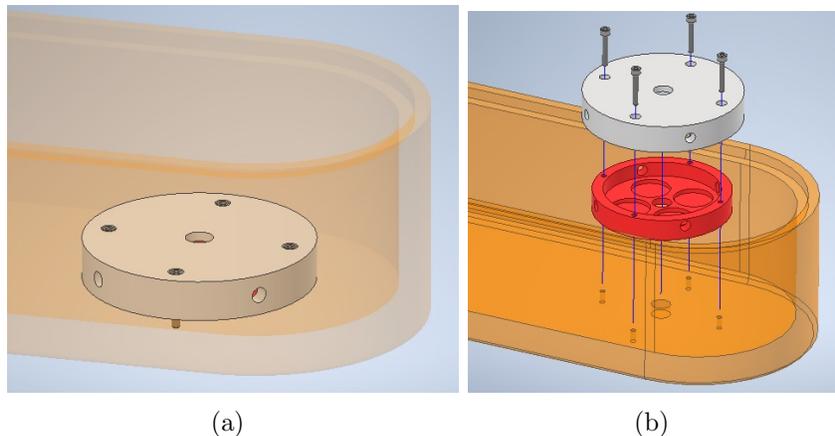


Figura 3.3.15. Ensamble del RodamientoMagnético y la CarcasaRodamiento con el Brazo por medio de tornillos. Como se observa en a), la cabeza de los tornillos no sobresale de la carcasa del rodamiento. En la zona de la articulación es necesario tener cuidado con la acumulación de las partículas que se lleguen a generar, por lo que las piezas que estén en esta zona deberán unirse a presión o mediante tornillería, pero si es este el caso, debe estar inmersa en la pieza para que no exista un fácil desprendimiento de las partículas que se lleguen a acumular en los tornillos. En b) se aprecia la manera de ensamblaje con una vista explosionada.

A continuación, en la figura 3.3.16 se encuentra un resumen de las piezas necesarias para este ensamble y algunas especificaciones técnicas.

ENSAMBLE RODAMIENTO MAGNÉTICO - CARCASA RODAMIENTO - BRAZO	
<b>CarcasaRodamiento</b>	No aplica
<b>RodamientoMagnético</b>	4 Roscas M2.5x0.45 Perfil Métrico ISO
	Tamaño 2.5mm
	Clase 6H
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 10mm
	Paso 0.45mm
<b>Brazo / BrazoTapa</b>	4 Roscas M2.5x0.45 Perfil Métrico ISO
	Tamaño 2.5mm
	Clase 6H
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 5.6mm
	Paso 0.45mm
<b>Tornillería</b>	4 Tornillos BS 4168. Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal. M2.5x16
	Ønominal 2.5mm (M2.5)
	Longitud nominal 16mm
	Longitud de la rosca 14.875mm
	Altura cabeza 2.5mm
	Øcabeza 4.5mm
	Paso 0.45mm; 2.22hilos/mm
	Tipo de rosca ISO Metric Profile
	Clase 6g
	Material Acero suave

Figura 3.3.16. Resumen de las especificaciones técnicas del ensamble del RodamientoMagnético con la CarcasaRodamiento y el Brazo. Estas especificaciones también se utilizarán para la tapa del brazo (BrazoTapa).

Las dimensiones y demás especificaciones de las piezas involucradas en este ensamble se encuentran en el Apéndice B, (Planos No. 4, 4.1, 6 y 7).

### **Ensamble 5:**

La siguiente pieza para ensamblar es el Eje, pero éste ya debe estar acoplado a la polea Conducida para mayor facilidad de montaje en el Brazo. Como se dice en el apartado 3.2 *Selección de la transmisión*, la PoleaConducida ya tiene por defecto un barreno estándar para acoplarla a un eje (de 8 mm de diámetro, pasado), por lo que el sistema sería de agujero único (H, norma DIN 7154), para que no cambien las dimensiones de la polea.

Al igual que la PoleaMotriz, la PoleaConducida debe entrar a presión en el Eje de la transmisión en la articulación, pero no debe ser una entrada demasiado forzada, por lo que se puede utilizar un ajuste de entrada suave, para piezas que deban acoplarse y desacoplarse a mano o a golpe suave con un mazo de madera (consultar Apéndice D, figuras D1 y D2). En la figura 3.3.17 se aprecia la polea conducida ensamblada en el eje de la transmisión.

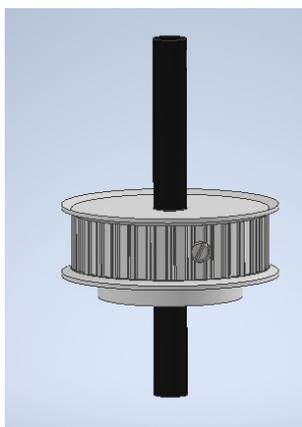


Figura 3.3.17 Ensamble de la polea conducida en el eje de la transmisión. La PoleaConducida debe tener un diámetro de 8 mm con tolerancias.

A continuación, se presenta el cálculo de las tolerancias necesarias para lograr el ajuste deseado:

- Dimensión nominal (Diámetro del agujero de la polea conducida: 8 mm).

Según las características del ensamble, la combinación H7 para el agujero de la polea y j6 para el eje de la transmisión, da como resultado un ajuste fino de entrada suave que necesita seguro de giro y deslizamiento. Para esto se consultó la tabla de Aplicaciones recomendadas de ajustes para eje único (Apéndice D, tabla D2).

- Ajuste para el agujero de la polea: **H7** (ajuste fino), consultar Apéndice D, figura D2.
- Ajuste para el eje de la transmisión: **j6** (ajuste de entrada suave), consultar Apéndice D, figura D2.

Se utilizó el programa Mesys para el cálculo de las tolerancias y holguras, ingresando el ajuste para el eje y el agujero y el diámetro contemplado, y se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 3.3.18).

**Eje:**  $\phi 8.0 \text{ j6}$      $\phi 8.0_{-0.002}^{+0.007}$      $d_{max} = 8.007 \text{ mm}$ ,  $d_{min} = 7.998 \text{ mm}$

**Agujero:**  $\phi 8.0 \text{ H7}$      $\phi 8.0_{+0.000}^{+0.015}$      $d_{max} = 8.015 \text{ mm}$ ,  $d_{min} = 8.000 \text{ mm}$

Usando la “*d*” para el diámetro del eje y la “*D*” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ :  $8.000 - 8.007 = -0.007 \text{ mm}$  (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ :  $8.015 - 7.998 = +0.017 \text{ mm}$  (espacio libre máximo).

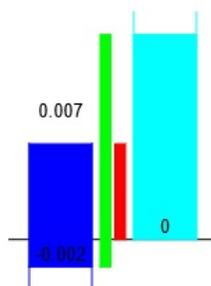
## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependent on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

Nominal size	D	<input type="text" value="8"/>	mm
Tolerance hub		<input type="text" value="H"/> <input type="text" value="7"/>	
Upper limit deviation	ES	<input type="text" value="0.015"/>	mm
Lower limit deviation	EI	<input type="text" value="0"/>	mm
Tolerance shaft		<input type="text" value="j"/> <input type="text" value="6"/>	
Upper limit deviation	es	<input type="text" value="0.007"/>	mm
Lower limit deviation	ei	<input type="text" value="-0.002"/>	mm
<input type="button" value="Calculate"/>			
Transition fit			
Maximum clearance	cmax	<input type="text" value="0.017"/>	mm
Maximum interference	imax	<input type="text" value="0.007"/>	mm



©MESYS AG

Figura 3.3.18. Cálculo de ajustes para el ensamble del eje de la transmisión con la polea conducida. Obtenida de [68].

Con estas tolerancias para el eje de la transmisión y para el agujero de la polea, se logran los ajustes mínimo y máximo antes descritos. La polea conducida tiene dimensiones ya establecidas, por lo que se tomará siempre el diámetro nominal (en este caso igual a  $D_{min}=8.0\text{ mm}-0.0\text{ mm}=8.0\text{ mm}$ ); si se le combina por ejemplo, con el diámetro mínimo del eje ( $d_{min}=7.998\text{ mm}$ ), se tiene una holgura de 0.002 mm, y si se le combina con el diámetro máximo del eje ( $d_{max}=8.007\text{ mm}$ ), se logra una interferencia máxima entre piezas igual a 0.007 mm, lo que genera que la polea se deba ensamblar con golpes suaves con un mazo de madera. Este ajuste debe aplicar en la superficie del Eje que esté en contacto con la PoleaConducida, a lo largo de 21 mm del eje (lo que mide de largo el barreno de la polea). Las especificaciones sobre esta polea se encuentran en el Apéndice B, “21 AT5 /30-2, y en el (Plano No. 8) se encuentra un plano con medidas y especificaciones complementarias.

El ajuste H7 / j6 para la polea, necesita un seguro contra deslizamiento, por lo que se ha elegido asegurar la polea con un tornillo prisionero. El agujero para el mismo, junto con la rosca deben hacerse ya que la polea contemplada no los incluye. La posición y dimensiones del espacio para el tornillo prisionero son coincidentes con un pequeño agujero que se le tiene que hacer al eje justamente para utilizar un tornillo en su ensamble; es un agujero con 5mm de diámetro y 3mm de profundidad, ubicado su centro a 36 mm del extremo inferior del eje. Se propone utilizar un tornillo prisionero *DIN EN 24766* de 5 mm de diámetro y 20 mm de largo. En la figura 3.3.19 a) se aprecia

la ubicación de la rosca para el tornillo prisionero, y en la figura 3.3.20 se encuentra un resumen de las especificaciones técnicas del ensamble de la PoleaConducida con el Eje mediante el tornillo prisionero.

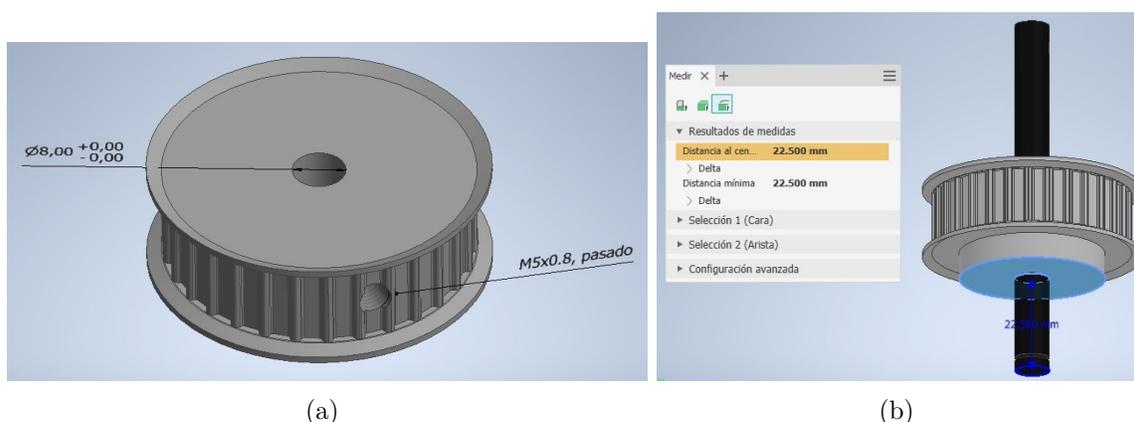


Figura 3.3.19. En a) se observan las tolerancias para el agujero de la polea conducida, y en b) la distancia a partir de la parte inferior del eje a la que debe quedar colocada la polea conducida. Cabe señalar que las tolerancias de a) están en milímetros.

ENSAMBLE POLEA CONDUCTIDA - EJE DE TRANSMISIÓN	
<b>Eje</b>	Barreno sin rosca para tornillo prisionero
	Tamaño 5mm
	Profundidad 3mm
<b>PoleaConducida</b>	1 Rosca M5x0.8 Perfil Métrico ISO
	Tamaño 5mm
	Clase 6H
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 20.029mm (la profundidad completa del barreno)
Paso 0.8mm	
<b>Tornillería</b>	1 Tornillo DIN EN 24766 M5x20
	θnominal 5mm (M5)
	Longitud nominal 20mm
	Longitud de la rosca 18.759mm
	Paso 0.8mm, 1.25hilos/mm
	Tipo de rosca ISO Metric Profile
	Clase 6g
Material Acero suave	

Figura 3.3.20 Resumen de las especificaciones técnicas del ensamble de la PoleaConducida con el Eje.

La posición vertical de la PoleaConducida en el Eje se escogió así para que la PoleaConducida se encuentre ubicada a una distancia simétrica de ambos rodamientos magnéticos (el que ya se ensambló y el próximo a ensamblar). Esta polea queda ensamblada con el cubo hacia abajo, como la PoleaMotriz, como se muestra en la figura 3.3.19 b). A

continuación, en la figura 3.3.21 se muestra el ensamble del Eje con la PoleaConducida y el ensamble anterior del RodamientoMagnético, la CarcasaRodamiento y el Brazo.

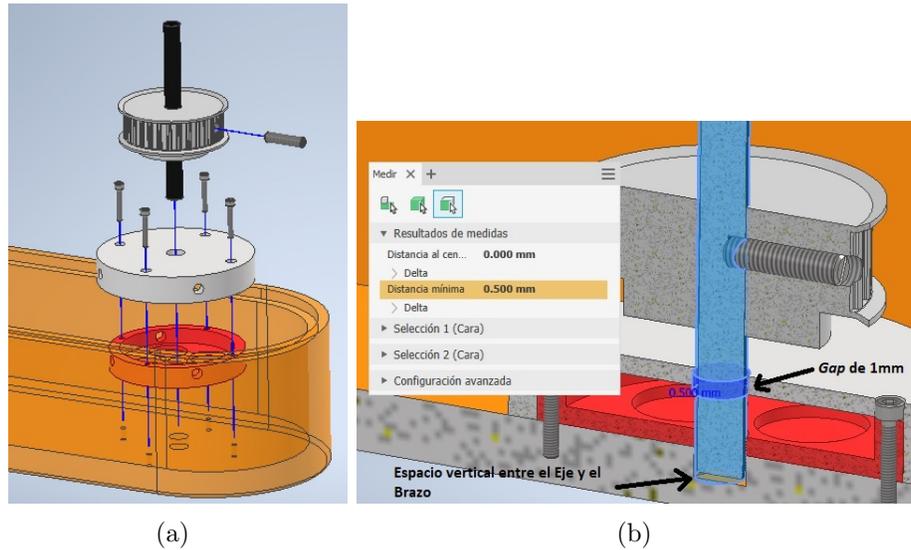


Figura 3.3.21. En a) se observan las trayectorias de despiece del ensamble mencionado. En b) se aprecian las piezas ya ensambladas junto con la holgura (0.5 mm radialmente, de 1 mm en total) que existe entre la superficie del Eje y la superficie interna de la CarcasaRodamiento y, por lo tanto, del RodamientoMagnético. También se aprecia el espacio vertical entre el Eje y el Brazo.

La holgura (gap) de 1 mm antes mencionada es necesaria para que el eje pueda regresar fácilmente a su posición vertical cuando las bobinas se energicen de nuevo después de haber estado inactivas. En cuanto a la posición vertical del Eje, se ha contemplado dejar un espacio de 1 mm entre el extremo inferior de éste y el Brazo, esto gracias a una cavidad en la superficie interna del brazo para que el eje entre en ella. El diámetro de esta cavidad es 1 mm mayor al diámetro del eje (como en el caso del rodamiento y de su carcasa). La manera de lograr que el eje quede posicionado verticalmente a esa distancia en el ensamble se logra mediante un soporte axial, el cual se mencionará al final del apartado de Diseño para Ensamble.

Al momento de hacer el ensamble de las piezas antes mencionadas, se puede hacer el ensamble de la banda de transmisión en ambas poleas. El hecho de que el ensamble se realice cuando los rodamientos están inactivos, hace que el eje no esté centrado y tenga juego dentro del rodamiento que ya está montado (como se muestra en la figura 3.1.6 b); de esta manera, el eje se puede ladear un poco para que se coloque la banda de transmisión sin ningún inconveniente. La corrección de la posición radial que sufre el eje gracias a los rodamientos magnéticos, hace que la banda se tense para su correcto funcionamiento. Las dimensiones y demás especificaciones de las piezas involucradas en este ensamble se encuentran en el Apéndice B, (Planos No. 4, 4.1, 6, 7, 8 y 12).

## Ensamble 6:

Para darle mayor estabilidad al eje de la transmisión, es necesario incluir otro rodamiento magnético con su carcasa, así el eje estará soportado en los extremos. El arreglo de ambos rodamientos y ambas carcasas para darle soporte al eje se puede entender como un único rodamiento magnético, pero de dos pisos. El piso para ensamblar a continuación es el segundo. Éste se ensambla de igual manera que el anterior, pero en la tapa del brazo (BrazoTapa); las especificaciones técnicas de este ensamble son las mismas que para el primer piso del rodamiento (ver figura 3.3.16). En la figura 3.3.22 se muestra el ensamble del segundo piso del rodamiento.

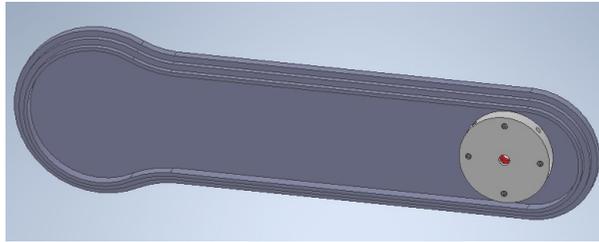


Figura 3.3.22. Ensamble del segundo piso del rodamiento (RodamientoMagnético y Carcasa-Rodamiento) con la pieza BrazoTapa.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, uno de los criterios de diseño es que el cableado sea interno para evitar que éste se enrede con el movimiento del robot y genere partículas contaminantes. En el diseño de la transmisión, la distancia entre centros de las poleas permite que los rodamientos magnéticos junto con sus carcasas (que comparten la línea de centro con la polea conducida), estén lo suficientemente separados de la parte interna del brazo y de su tapa como para que los cables de alimentación de las bobinas y de los sensores se puedan acomodar alrededor en ese espacio sin que sufran dobleces que los dañen.

En la figura 3.3.23 se observa el primer y el segundo piso del rodamiento ensamblados al brazo y a la tapa del brazo respectivamente, y la distancia mínima entre los rodamientos y las partes a las que están sujetadas.

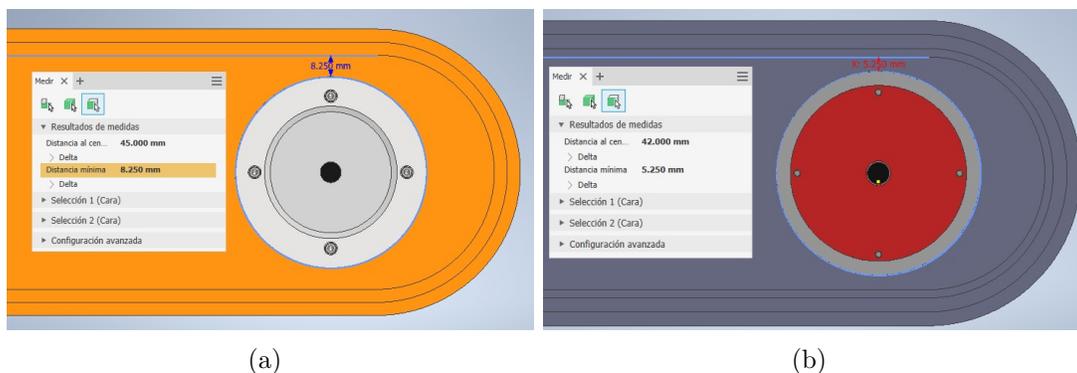


Figura 3.3.23. a) Distancia mínima entre la carcasa del rodamiento y la pared interna del brazo (es una vista superior); b) distancia mínima entre la carcasa del rodamiento y la pared interna de la tapa del brazo (es una vista inferior).

Esta distancia, está calculada para que los cables que alimentan a las bobinas y a los sensores, tengan suficiente espacio para darle la vuelta a la carcasa y sigan su camino a lo largo de todo el brazo. La configuración del brazo-antebrazo en esta propuesta de diseño, permite que el cableado que alimenta a ambos rodamientos sea interno y no tenga movimiento relativo con alguna pieza interna; al funcionar la transmisión y moverse el antebrazo, los cables permanecen estáticos y no interfieren con el movimiento. La salida de los cables para que puedan ser conectados a una fuente de alimentación y al control, se puede efectuar por la cavidad del brazo que aloja al motor, pero debe efectuarse por un agujero muy justo recubierto con un sello para que no exista salida de partículas, y también es preferible fijar cierta longitud del cable a la parte externa de la cavidad del brazo para que cuando éste se mueva, el cable también lo haga y no exista movimiento relativo entre ambos. En la figura 3.3.24 se observan esquemáticamente las trayectorias que podrían seguir los cables.

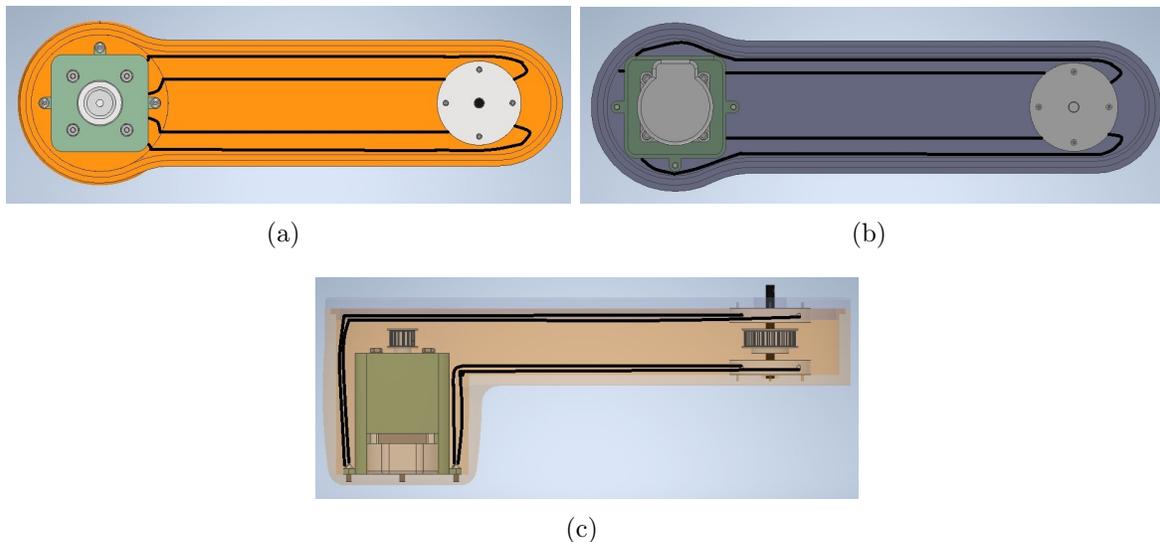


Figura 3.3.24. a) Vista superior del brazo: esquema del cableado que sale del primer piso del rodamiento hacia la cavidad del brazo que aloja al motor. Los cables están sujetos a la superficie interna del brazo y caen hacia la cavidad del motor; b) Vista inferior de la tapa del brazo: se observa algo similar pero con el segundo piso del rodamiento y la tapa del brazo. En este caso, también los cables caen hacia la cavidad del motor sin obstruir en ningún momento la transmisión; c) Vista lateral del brazo y su tapa: se observa la trayectoria de los cables hacia la cavidad del motor. La configuración interna y la salida de los cables, dependerá del arreglo final con una estructura en la que se monte el brazo para construir un robot SCARA completo.

### **Ensamble 7:**

El siguiente ensamble para realizar es el de la tapa del brazo con el brazo. Estas dos piezas ensambladas actúan como una carcasa que protege el ambiente del cuarto limpio de las partículas que se lleguen a generar debido a la transmisión. La utilización de tornillos externos no es una opción por lo que se ha mencionado anteriormente; una

manera de evitarlo es ensamblar estas piezas a presión con ajustes y tolerancias para que se logre esta acción.

En las figuras 3.1.8, 3.1.9, 3.1.10, 3.2.6, 3.3.11 y 3.3.25, se puede apreciar que la forma de ensamblar las dos piezas mencionadas es por medio de escalones (que tienen la misma geometría de las piezas). Cuando dos piezas se ensamblan de esta manera la probabilidad de que exista intercambio de partículas del interior al exterior y viceversa, es mínimo, pues cada escalón significa una trampa para la salida o entrada de partículas. Es por esto que se propone utilizar dos escalones para el ensamble del brazo y su tapa.

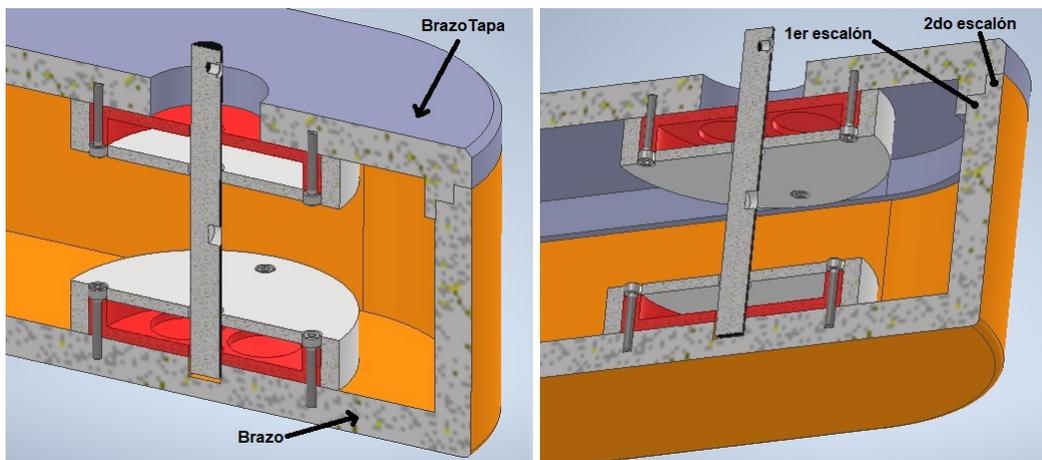


Figura 3.3.25. Visualización de los escalones de las piezas Brazo y BrazoTapa para su ensamble a presión.

A continuación, se expone el cálculo de los ajustes y tolerancias necesarios para llevar a cabo el ensamble.

Estas dos piezas se tienen que ensamblar a presión con golpes suaves si es necesario. Las piezas quedarán fijas y no será frecuente su desmontaje, por lo que se puede utilizar un ajuste de adherencia (consultar Apéndice D, figura D1 y figura D2).

Aunque las piezas no tienen en su totalidad una forma cilíndrica, ambas cuentan con curvas que provienen de una circunferencia, por lo que se les puede considerar en conjunto un sistema eje-agujero. En este caso, la pieza BrazoTapa se considerará como un eje, que va a entrar en un agujero (la pieza Brazo), y el sistema se considerará como agujero único (H, norma DIN 7154). Al haber dos escalones, se aplicará el mismo procedimiento para cada uno con sus respectivas dimensiones.

La combinación k6 para el eje y H7 para el agujero, da como resultado un ajuste de adherencia, forzado medio con montaje a martillo de mano. Para esto se consultó la tabla de Aplicaciones recomendadas de ajustes para eje único (Apéndice D, tabla D2).

- Ajuste para el eje: **k6** (ajuste de adherencia), consultar Apéndice D, figura D2.
- Ajuste para el agujero: **H7** (ajuste fino), consultar Apéndice D, figura D2.

Teniendo esto en cuenta, se tienen los siguientes datos para el primer escalón:

- Dimensión nominal (Diámetro interno del brazo: 90 mm para el extremo del brazo donde está la articulación y para la distancia entre las dos paredes internas y paralelas,

y 120 mm para el extremo del brazo donde se encuentra la cavidad para el alojamiento del motor).

– Dimensión nominal (Curvatura donde comienza la cavidad del brazo para alojar al motor): 160 mm de diámetro.

Se utilizó el programa Mesys para el cálculo de las tolerancias y holguras, ingresando el ajuste para el eje y el agujero y el diámetro contemplado; en este caso, se puede utilizar el diámetro de 90 mm y el de 120 mm para el mismo cálculo porque en las tablas, ambos están en el mismo rango de diámetros, pero para la curvatura de 160 mm se tiene que hacer otro cálculo porque está en otro rango de diámetros (ver Apéndice D, Tabla D1). Las medidas de estos diámetros se pueden consultar en el Apéndice B, (Planos No. 4, 4.1, 9 y 9.1). Se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 3.3.26 y 3.3.27). Se obtienen las siguientes tolerancias para las medidas de 90 mm y 120 mm.

**Eje:**  $\phi$  90/120 k6     $\phi$  90/120 $_{+0.003}^{+0.025}$      $d_{max} = 90.025/120.025$  mm,  $d_{min} = 90.003/120.003$  mm

**Agujero:**  $\phi$  90/120 H7     $\phi$  90/120 $_{+0.000}^{+0.035}$      $d_{max} = 90.035/120.035$  mm,  $d_{min} = 90.000/120.000$  mm

Usando la “*d*” para el diámetro del eje y la “*D*” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ : 90.000-90.025=120.000-120.025= **-0.025 mm** (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ : 90.035-90.003=120.035-120.003= **+0.032 mm** (espacio libre máximo).

Se obtienen las siguientes tolerancias para la medida de 160 mm.

**Eje:**  $\phi$  160 k6     $\phi$  160 $_{+0.003}^{+0.028}$      $d_{max} = 160.028$  mm,  $d_{min} = 160.003$  mm

**Agujero:**  $\phi$  160 H7     $\phi$  160 $_{+0.000}^{+0.04}$      $d_{max} = 160.04$  mm,  $d_{min} = 160.00$  mm

Usando la “*d*” para el diámetro del eje y la “*D*” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ : 160.000-160.028= **-0.028 mm** (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ : 160.040-160.003= **+0.037 mm** (espacio libre máximo).

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependent on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

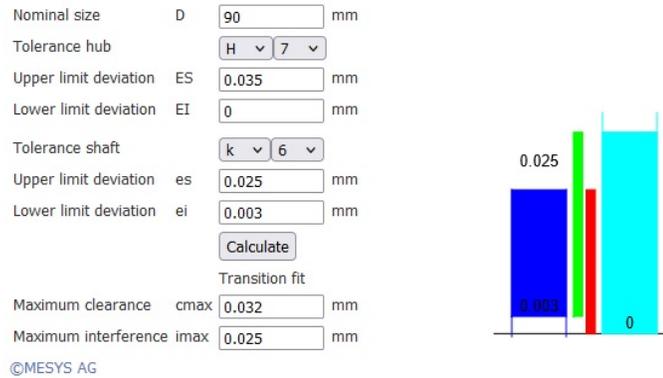


Figura 3.3.26. Cálculo de ajustes para el ensamble del brazo y su tapa para las medidas de 90 mm y 120 mm (primer escalón). Obtenida de [68].

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependent on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

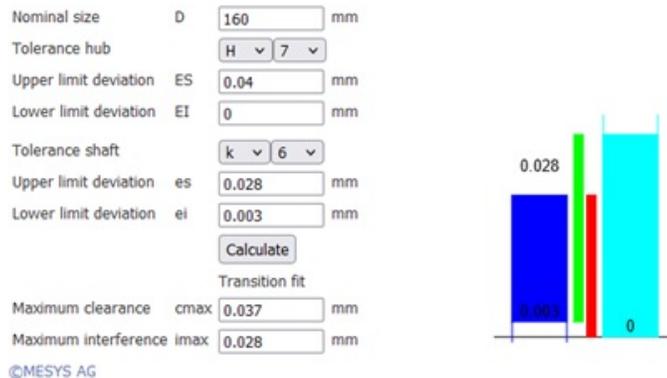


Figura 3.3.27. Cálculo de ajustes para el ensamble del brazo y su tapa para la medida de 160 mm (primer escalón). Obtenida de [68].

Con estas tolerancias para el eje (BrazoTapa) y para el agujero (Brazo), se logran los ajustes mínimo y máximo antes descritos. En la figura 3.3.28 se observan las tolerancias necesarias para el brazo y su tapa para lograr el ajuste a presión deseado.

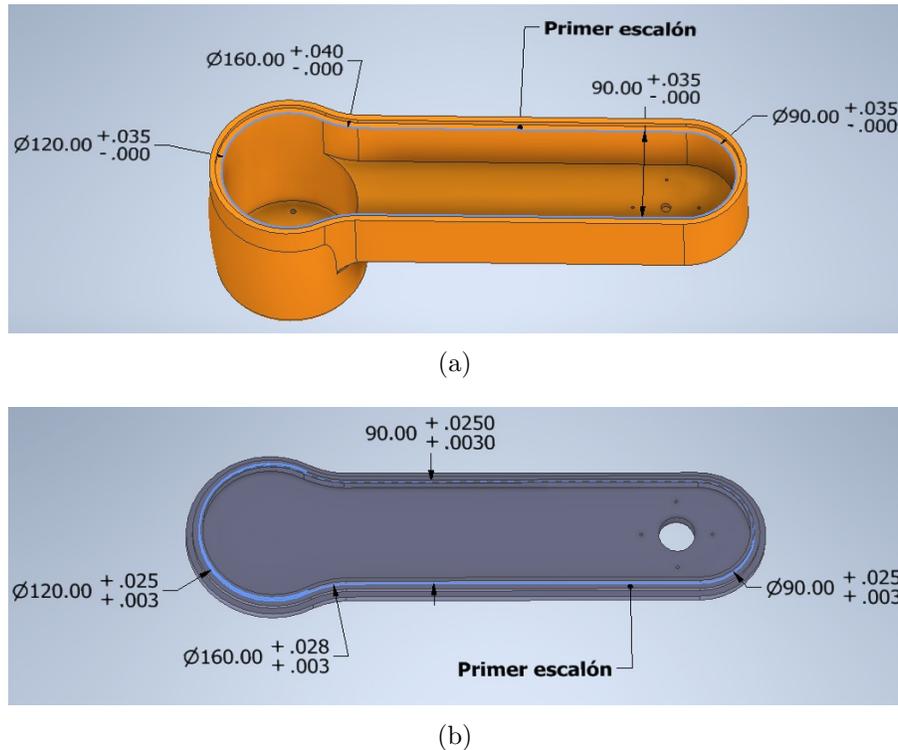


Figura 3.3.28. a) Tolerancias para el primer escalón en el Brazo, b) tolerancias para el primer escalón en el BrazoTapa para su correcto ensamble.

Para el segundo escalón se tienen los siguientes datos:

- Dimensión nominal (Diámetro interno del brazo: 100 mm para el extremo del brazo donde está la articulación y para la distancia entre las dos paredes internas y paralelas, y 130 mm para el extremo del brazo donde se encuentra la cavidad para el alojamiento del motor).
- Dimensión nominal (Curvatura donde comienza la cavidad del brazo para alojar al motor): 150 mm de diámetro.

Se utilizó el programa Mesys para el cálculo de las tolerancias y holguras, ingresando el ajuste para el eje y el agujero y el diámetro contemplado; en este caso, se puede utilizar el diámetro de 130 mm y el de 150 mm para el mismo cálculo porque en las tablas, ambos están en el mismo rango de diámetros, pero para el diámetro de 100 mm se tiene que hacer otro cálculo porque está en otro rango de diámetros (ver Apéndice D, Tabla D1). Las medidas de estos diámetros se pueden consultar en el Apéndice B, (Planos No. 4, 4.1, 9 y 9.1). Se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 3.3.29 y 3.3.30).

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependend on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

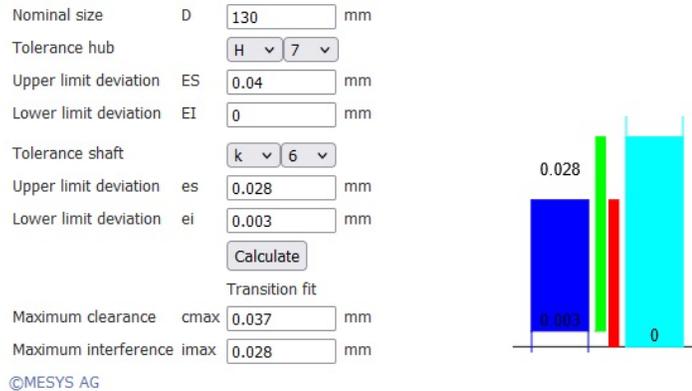


Figura 3.3.29. Cálculo de ajustes para el ensamble del brazo y su tapa para las medidas de 130 mm y 150 mm (segundo escalón). Obtenida de [68].

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependend on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

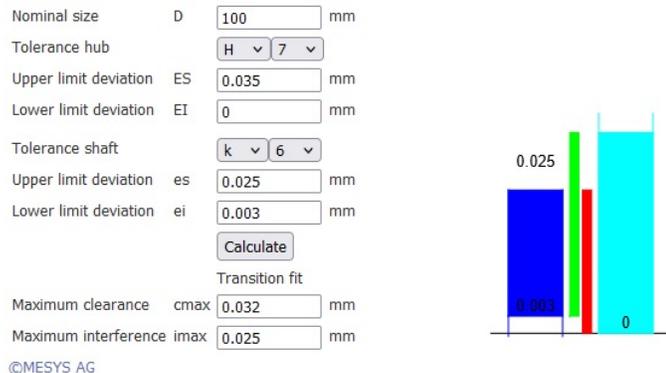


Figura 3.3.30. Cálculo de ajustes para el ensamble del brazo y su tapa para la medida de 100 mm (segundo escalón). Obtenida de [68].

Se obtienen las siguientes tolerancias para las medidas de 130 mm y 150 mm.

**Eje:**  $\phi$  130/150 k6  $\phi$  130/150 $^{+0.028}_{+0.003}$   $d_{max} = 130.028/150.028$  mm,  $d_{min} = 130.003/150.003$  mm

**Agujero:**  $\phi$  130/150 H7  $\phi$  130/150 $^{+0.04}_{+0.00}$   $d_{max} = 130.04/150.04$  mm,  $d_{min} = 130.00/150.00$  mm

Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ : 130.000-130.028=150.000-150.028= **-0.028 mm** (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ : 130.040-130.003=150.040-150.003= **+0.037 mm** (espacio libre máximo).

Se obtienen las siguientes tolerancias para la medida de 100 mm.

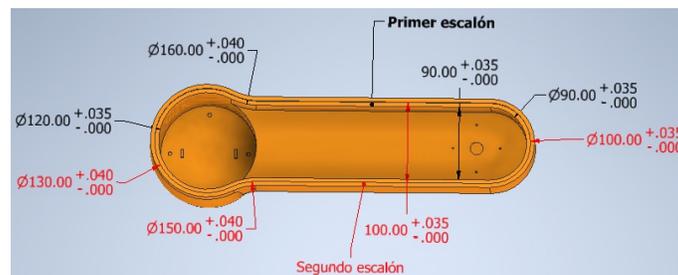
**Eje:**  $\phi$  100 k6  $\phi$  100 $^{+0.025}_{+0.003}$   $d_{max} = 100.025$  mm,  $d_{min} = 100.003$  mm

**Agujero:**  $\phi$  100 H7  $\phi$  100 $^{+0.035}_{+0.000}$   $d_{max} = 100.035$  mm,  $d_{min} = 100.000$  mm

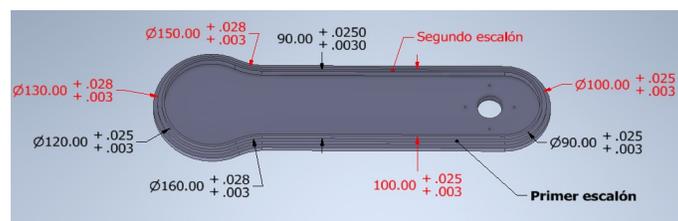
Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ : 100.0-100.025= **-0.025 mm** (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ : 100.035-100.003= **+0.032 mm** (espacio libre máximo).



(a)



(b)

Figura 3.3.31. a) Tolerancias para el primer escalón (negro) y segundo escalón (rojo) en la pieza Brazo y en b) para la pieza BrazoTapa para su correcto ensamble.

Con estas tolerancias para el eje (BrazoTapa) y para el agujero (Brazo), se logran los ajustes mínimo y máximo antes descritos. En la figura 3.3.31 se observan las tolerancias necesarias para el brazo y su tapa para lograr el ajuste a presión deseado; las cotas en negro son para el primer escalón y las que están en rojo para el segundo escalón.

A continuación, en la figura 3.3.32 se muestra la conjunción de los últimos tres ensambles: ensamble 4 (el primer piso del rodamiento con la parte interna del brazo), ensamble 5 (polea conducida con el eje de transmisión), y el ensamble 6 (segundo piso del rodamiento con la tapa del brazo); en ese orden aparecen estos ensambles en la figura mencionada. El montaje de la banda de transmisión se realiza cuando se ensambla la polea conductora y el eje con el primer piso del rodamiento. Al finalizar el ensamble, el eje tenderá a ladearse ya que los rodamientos magnéticos se activan hasta que el ensamble de todo el brazo-antebrazo está completo; también la parte inferior del eje tocará al brazo debido a la fuerza de gravedad. La manera de compensar esta fuerza y sostener la articulación axialmente se explicará más adelante.

Las dimensiones y demás especificaciones de las piezas involucradas en este último ensamble se encuentran en el Apéndice B, (Planos No. 4, 4.1, 6, 7, 8, 9, 9.1 y 12); junto con un plano explosivo del ensamble de las piezas (Plano No. 10).

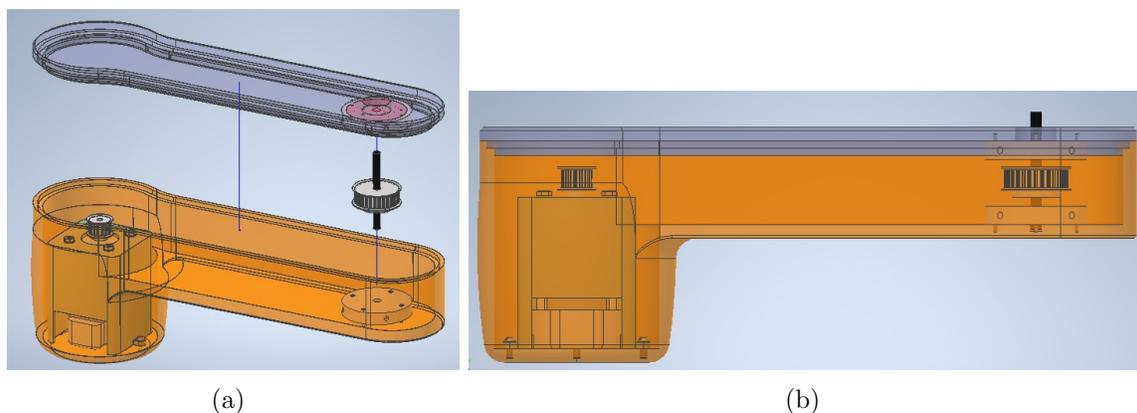


Figura 3.3.32. En a) se observan las trayectorias de despiece del último ensamble mencionado. En b) se aprecian los componentes ya ensamblados con sus respectivos métodos (tornillos o a presión). No se observa la banda de transmisión.

### **Ensamble 8:**

Con el ensamble anterior, los elementos que componen la transmisión quedan cubiertos por una carcasa compuesta por el brazo y su tapa. Así mismo se ensamblarán el antebrazo y su tapa, para crear una carcasa que proteja al exterior de las posibles partículas que se generen adentro. Pero la manera de conectar el brazo con el antebrazo debe ser mediante una pieza que permita el movimiento relativo entre ellos sin que exista fricción, y a su vez no permita la salida de partículas. Esta pieza conectora entre el brazo y el antebrazo es el Mamelón. En esta propuesta de diseño, se utiliza el mamelón como una pieza que permite el movimiento entre el brazo y el antebrazo, pero sin que exista contacto físico entre ellos. La descripción a detalle de esta pieza se hizo en el apartado *3.1 Generalidades sobre el diseño*, y la forma de ensamblarla se observa en las figuras

3.1.9 y 3.1.10. El espacio que existe entre el mamelón y el agujero que tiene la tapa del brazo para que el mamelón gire libremente junto con el eje y el antebrazo, es crítico en el diseño porque de él depende la salida de partículas. A continuación, se presenta el cálculo del tamaño del agujero y del mamelón para su correcto ensamble.

Al igual que las poleas, el mamelón debe entrar a presión en el Eje de la transmisión, con un ajuste de entrada suave, para piezas que deban acoplarse y desacoplarse a mano o a golpe suave con un mazo de madera (consultar Apéndice D, figuras D1 y D2). A comparación de la PoleaConducida, este puede ser un sistema de **eje único**. A continuación, se presenta el cálculo de las tolerancias necesarias para lograr el ajuste deseado:

- Dimensión nominal (Diámetro del eje: 8 mm). Según las características del ensamble, la combinación h6 para el eje de transmisión y J7 para el agujero del mamelón, da como resultado un ajuste fino de entrada suave que necesita seguro de giro y deslizamiento. Para esto se consultó la tabla de Aplicaciones recomendadas de ajustes para eje único (Apéndice D, tabla D2).

- Ajuste para el eje de la transmisión: h6 (ajuste fino), consultar Apéndice D, figura D2.

- Ajuste para el agujero del mamelón: J7 (ajuste de entrada suave), consultar Apéndice D, figura D2.

Se utilizó el programa Mesys para el cálculo de las tolerancias y holguras, ingresando el ajuste para el eje y el agujero y el diámetro contemplado, y se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 3.3.33).

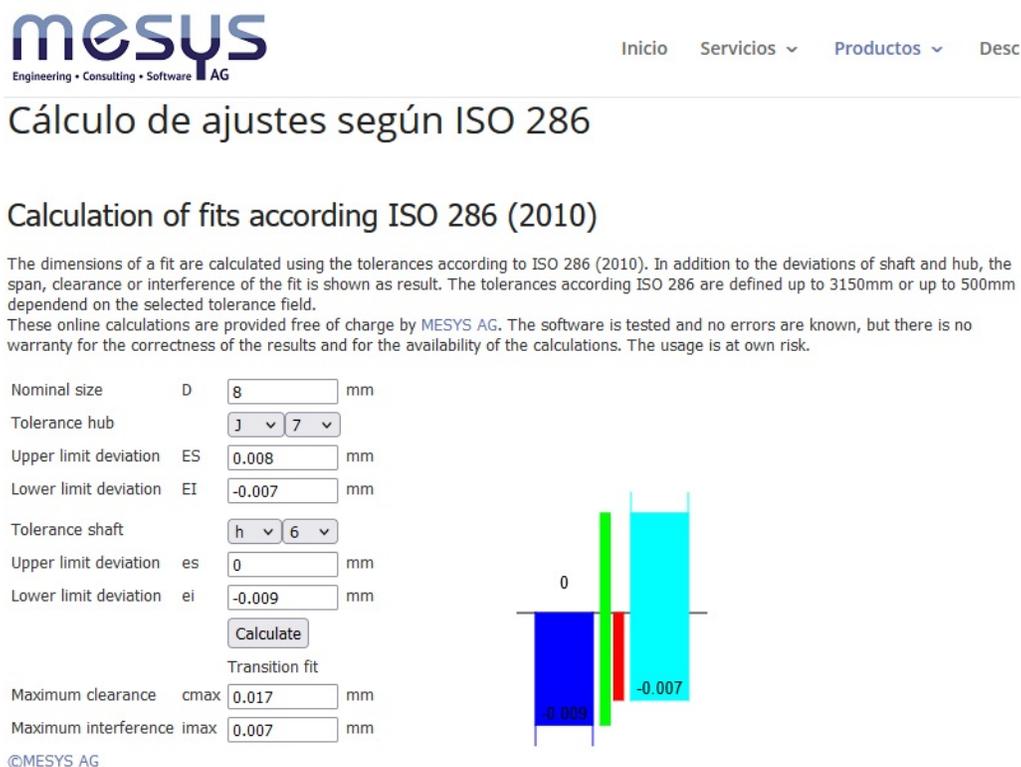


Figura 3.3.33. Cálculo de ajustes para el ensamble del eje de la transmisión con el mamelón. Obtenida de [68].

Eje:  $\phi 8 \text{ h6}$     $\phi 8_{-0.009}^{+0.000}$     $d_{max} = 8.000 \text{ mm}$ ,  $d_{min} = 7.991 \text{ mm}$

Agujero:  $\phi 8 \text{ J7}$     $\phi 8_{-0.007}^{+0.008}$     $d_{max} = 8.008 \text{ mm}$ ,  $d_{min} = 7.993 \text{ mm}$

Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ :  $7.993 - 8.000 = -0.007 \text{ mm}$  (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ :  $8.008 - 7.991 = +0.017 \text{ mm}$  (espacio libre máximo).

Con estas tolerancias para el eje de la transmisión y para el agujero del mamelón, se logran los ajustes mínimo y máximo antes descritos. Este ajuste debe aplicar en la superficie del Eje que esté en contacto con el mamelón, a lo largo de 20 mm desde el extremo del eje (lo que mide de largo el mamelón). Las especificaciones sobre estas piezas se encuentran en el Apéndice B, en el (Planos No. 11 y 12).

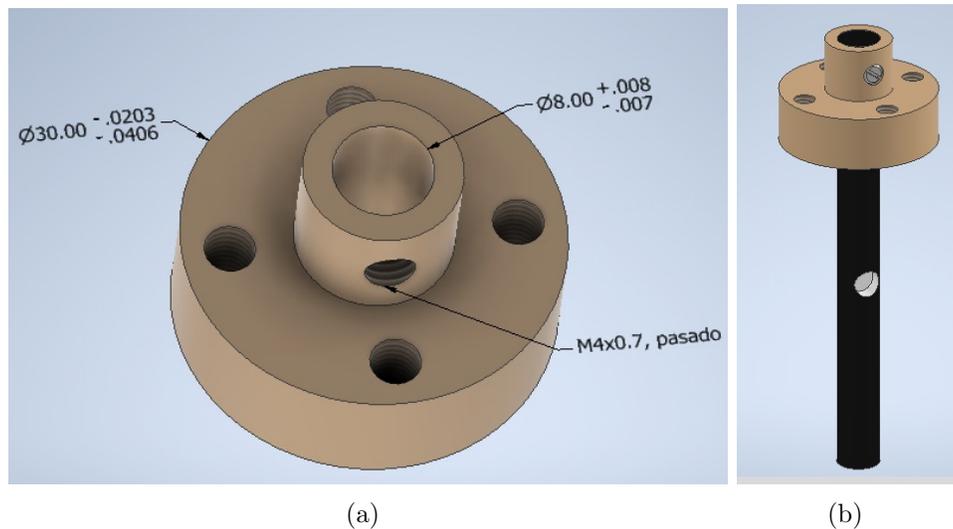


Figura 3.3.34. En a) se observan las tolerancias para el mamelón, y en b) la colocación del mamelón en el eje; el extremo superior del eje y la parte sobresaliente del agujero del mamelón están al mismo nivel.

El ajuste  $\text{h6} / \text{J7}$  para el mamelón, necesita un seguro contra deslizamiento, por lo que se ha elegido asegurarlo con un tornillo prisionero. La posición y dimensiones del espacio para el tornillo prisionero son coincidentes con un pequeño agujero que se le tiene que hacer al eje justamente para utilizar un tornillo en su ensamble; es un agujero con 4 y 2.8 mm de diámetro (ya que el tornillo cuenta con una reducción en su diámetro) y 4 mm de profundidad, ubicado a 5 mm del extremo superior del eje.

Se propone utilizar un tornillo prisionero *DIN 926 M4x3x3-14H* de 4 mm de diámetro nominal, y 6 mm de largo. En la figura 3.3.34 a) se aprecia la ubicación de la rosca para el tornillo prisionero en el mamelón, y en la figura 3.3.35 se encuentra un resumen de

las especificaciones técnicas del ensamble del Mamelón con el Eje mediante el tornillo prisionero.

ENSAMBLE MAMELÓN - EJE DE TRANSMISIÓN	
<b>Eje</b>	Barreno con una reducción de diámetro sin rosca para tornillo prisionero
	Tamaño 4mm (1er barreno), 2.8mm (2do barreno)
	Profundidad 0.5mm (1er barreno) 3.5mm (2do barreno)
<b>Mamelón</b>	1 Rosca M4x0.7 Perfil Métrico ISO
	Tamaño 4mm
	Clase 6H
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 2.822mm (la profundidad completa del barreno)
	Paso 0.7mm
<b>Tornillería</b>	1 Tornillo DIN 926 M4x3x3-14H
	Ønominal 4mm (M4)
	Longitud nominal 6mm
	Longitud de la rosca 3mm
	Longitud del extremo 3mm
	Diámetro de punta troncocónica 2.8mm
	Diámetro de cabeza 2.8mm
	Paso 0.7mm, 1.4285hilos/mm.
	Tipo de rosca ISO Metric Profile
	Clase 6g
	Material Acero suave

Figura 3.3.35 Resumen de las especificaciones técnicas del ensamble del Mamelón con el Eje.

La posición vertical del Mamelón en el Eje se escogió así para que coincidiera con el agujero de la pieza BrazoTapa. En la figura 3.1.10 se observa en contorno amarillo el espacio necesario entre el mamelón y el agujero de la tapa del brazo para que el mamelón gire libremente con el eje y el antebrazo sin que haya fricción. Este espacio es crítico pues si es un ajuste muy apretado (interferencia entre las piezas), habría fricción, y si existe mucha holgura, habría demasiado espacio para la salida de partículas hacia el ambiente del cuarto limpio. En lugar de elegir un ajuste de interferencia como en los casos anteriores, para este ensamble se eligió utilizar un ajuste de holgura, para piezas que deban moverse entre sí, sin existir una necesidad de apriete. De [69, 70] se determinó utilizar un ajuste de holgura RC4, correspondiente a un ajuste de estrecho deslizamiento; es el ajuste de holgura que permite el juego mínimo. Con un ajuste RC3 se tiene la desventaja de que puede haber dificultad en el juego con cambios de temperatura, y un ajuste RC5 es parecido al RC4 pero para cargas y velocidades mucho mayores. El brazo-antebrazo no se verá sometido a cargas grandes, por lo que el ajuste RC4 es adecuado.

Para este caso, el mamelón actúa como eje, y entra en el agujero de la tapa del brazo; a continuación, se presentan los cálculos para el ajuste (se utilizaron las tablas de [69 y 70]), en pulgadas.

Dimensión nominal: 30 mm = 1.1811 in.

**Eje (Mamelón):**  $\phi 1.1811_{-0.0016}^{-0.0008}$   $d_{max} = 1.1803$  mm,  $d_{min} = 1.1795$  mm

**Orificio (TapaBrazo):**  $\phi 1.1811_{+0.0000}^{+0.0012}$   $d_{max} = 1.1823$  mm,  $d_{min} = 1.1811$  mm

Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ : 1.1811-1.1803 = 0.0008 in = **0.0203 mm** (espacio mínimo libre).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ : 1.1823-1.1795 = 0.0028 in = **0.07112 mm** (espacio máximo libre).

Con estas tolerancias para el eje de la transmisión y para el agujero del mamelón, se logran los ajustes mínimo y máximo antes descritos. El rango de holgura es de entre 20.3-71.1 micras , lo cual sigue siendo grande para el tamaño de partículas que pueden salir y contaminar el cuarto. Para un cuarto de Clase 1 puede haber cierto número de partículas desde 0.1-1  $\mu\text{m}$  (ver Tabla 1.1.2). Utilizar un ajuste mayor a RC4 implica una mayor holgura (que no es lo deseado), y utilizar un ajuste menor a RC4 implica la posibilidad de que las piezas se rocen, siendo un riesgo mayor para la limpieza del cuarto por la generación de partículas.

Cuando se tienen dos piezas ensambladas que deben tener movimiento relativo entre sí y no debe existir fricción, es necesario tener un espacio entre ellos por mínimo que sea, y para la aplicación del brazo-antebrazo, esto implica un espacio por donde puede haber contaminación hacia el ambiente del cuarto limpio (siempre existirá al haber un espacio); es por esto que se calcularon las dimensiones para un ajuste que diera una holgura mínima y no hubiera posibilidad de que las piezas se tocaran. En la tabla expuesta en [69], se observa que entre más pequeño sea el diámetro nominal, para un mismo ajuste, se obtienen holguras más pequeñas. En la propuesta de diseño, el diámetro original del mamelón era de 40 mm, y se redujo a 30 mm para hacer más pequeña la holgura entre las piezas, pero por cuestiones de ensamble, entre más pequeño sea el diámetro exterior del mamelón, existen dificultades para ensamblar el antebrazo (existe un menor espacio entre el diámetro externo y el diámetro del agujero para el eje, dejando menos espacio para los tornillos que sostienen al antebrazo). En esta propuesta de diseño se ha elegido la opción de que exista una holgura mínima entre el brazo y el exterior, a que exista fricción entre las piezas (lo último implica mayor probabilidad de contaminación incluso porque el área de contacto que habría entre estas piezas, está expuesta al ambiente del cuarto limpio y no está encapsulada).

Las especificaciones sobre esta pieza se encuentran en el Apéndice B, (Planos No. 9, 9.1 y 11). En la figura 3.3.34 a) se observan las tolerancias necesarias para el mamelón y en la figura 3.3.36 las tolerancias para la tapa del brazo.

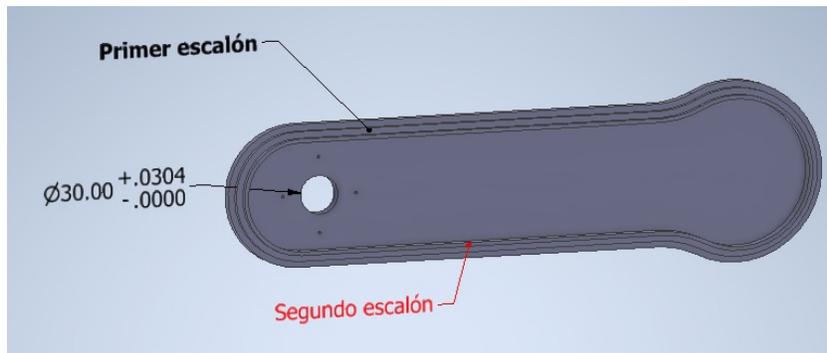


Figura 3.3.36. Tolerancias necesarias para lograr el ajuste adecuado con el mamelón.

Para poder ensamblar el mamelón, se introduce en el eje de la transmisión y a su vez en el agujero de la tapa del brazo, una vez que se ha ensamblado esta última con el brazo. Se introduce de tal manera que el cilindro pequeño del mamelón quede al nivel del extremo superior del eje, como se muestra en la figura 3.3.37 b) y se asegura con el tornillo prisionero. Al realizar este ensamble, el cilindro más grande del mamelón queda a 1 mm de la superficie del rodamiento, y por lo tanto, a 1 mm por arriba de la tapa del brazo, como se observa en la figura 3.3.37 b) y c).

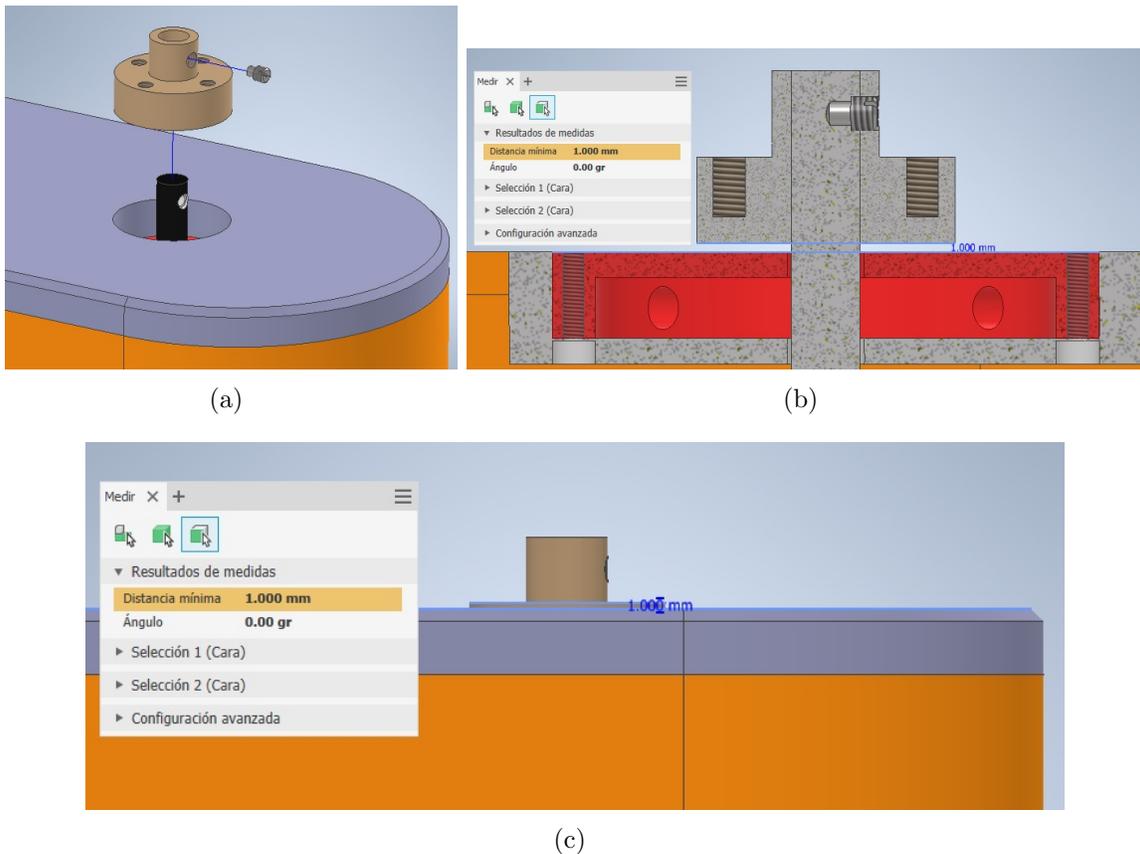


Figura 3.3.37. Ensamble del mamelón en la tapa del brazo y en el eje. Se aprecian las distancias mencionadas anteriormente.

### Ensamble 9:

El ensamble del Antebrazo debe ser posterior al ensamble del Mamelón, ya que el tornillo prisionero que asegura a esta pieza, no podría ser ensamblado si el Antebrazo ya estuviera en su lugar. Este tornillo prisionero debe quedar totalmente metido en el cilindro del mamelón para que no sobresalga y el ensamble del Antebrazo no se complique. Para realizar este ensamble, se requiere del uso de ajustes y tolerancias y tornillos para reforzarlo. La parte inferior del Antebrazo tiene un agujero que entra en el cilindro más pequeño del Mamelón, debe entrar a presión pero no forzada; se recomienda utilizar un ajuste de entrada suave, para piezas que deban acoplarse y desacoplarse a mano o a golpe suave con un mazo de madera (consultar Apéndice D, figuras D1 y D2), y se va a considerar como un eje único, en donde el eje es el mamelón. En la figura 3.3.38 se observa la manera de ensamblar el Antebrazo con el Mamelón.

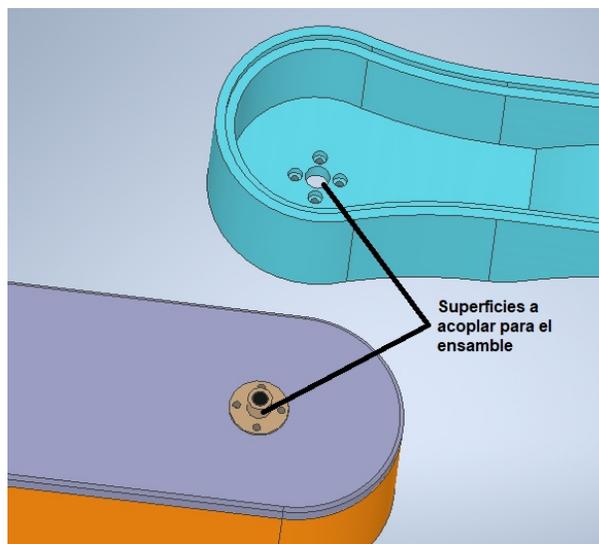


Figura 3.3.38. En la figura se observan las piezas a ensamblar y la señalización del lugar donde se ensamblan.

A continuación, se presenta el cálculo de las tolerancias necesarias para lograr el ajuste deseado:

– Dimensión nominal (Diámetro del eje del mamelón y del agujero del antebrazo: 12.5 mm).

Según las características del ensamble, la combinación h6 para el mamelón y J7 para el agujero, da como resultado un ajuste fino de entrada suave que necesita seguro de giro y deslizamiento. Para esto se consultó la tabla de Aplicaciones recomendadas de ajustes para eje único (Apéndice D, tabla D2).

– Ajuste para el agujero del antebrazo: **J7** (ajuste de entrada suave), consultar Apéndice D, figura D2.

– Ajuste para el eje (cilindro del mamelón): **h6** (ajuste fino), consultar Apéndice D, figura D2.

Se utilizó el programa Mesys para el cálculo de las tolerancias y holguras, ingresando el ajuste para el eje y el agujero y el diámetro contemplado, y se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 3.3.39).

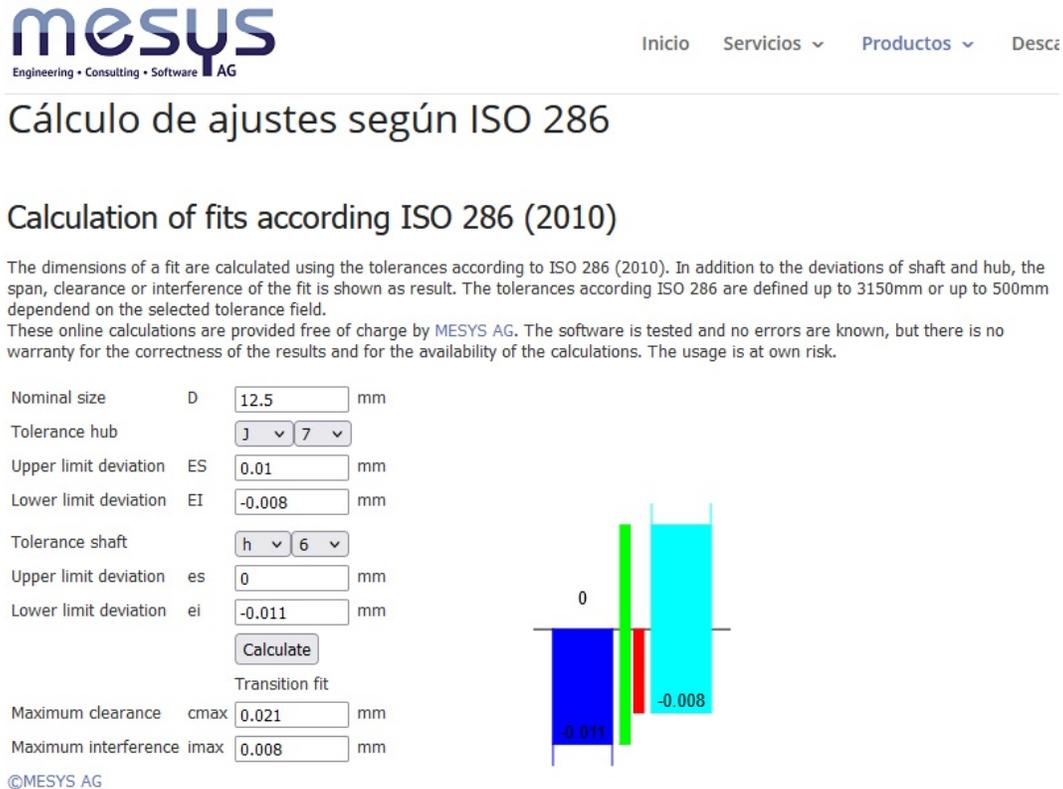


Figura 3.3.39. Cálculo de ajustes para el ensamble del mamelón con el antebrazo. Obtenida de [68].

**Eje:**  $\phi 12.5\ h6$   $\phi 12.5^{+0.000}_{-0.011}$   $d_{max} = 12.50\ \text{mm}$ ,  $d_{min} = 12.489\ \text{mm}$

**Agujero:**  $\phi 12.5\ J7$   $\phi 12.5^{+0.010}_{-0.008}$   $d_{max} = 12.510\ \text{mm}$ ,  $d_{min} = 12.492\ \text{mm}$

Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ :  $12.492 - 12.500 = -0.008\ \text{mm}$  (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ :  $12.510 - 12.489 = 0.021\ \text{mm}$  (espacio libre máximo).

Las especificaciones sobre esta polea se encuentran en el Apéndice B, (Planos No. 11, 13 y 13.1). En la figura 3.3.40 se observan las tolerancias para cada pieza del presente ensamble.

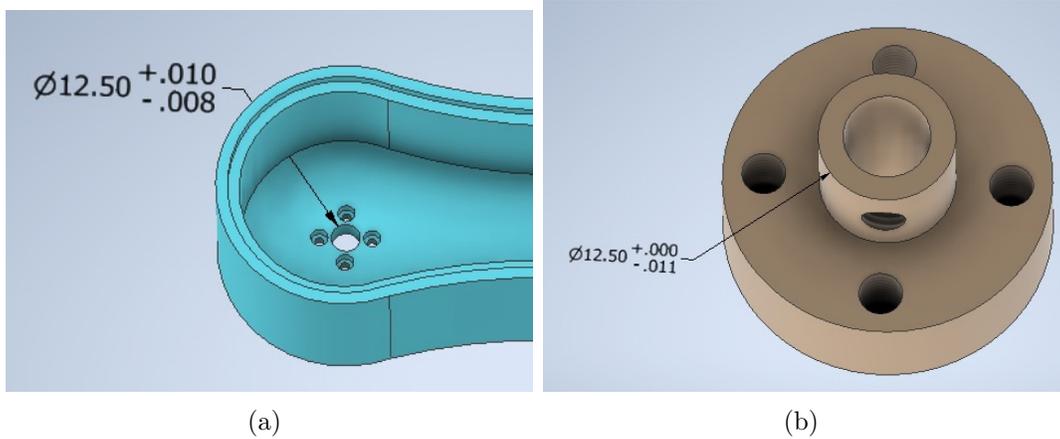


Figura 3.3.40. a) Tolerancias para el Antebrazo, b) tolerancias para el Mamelón para su correcto ensamble.

El ajuste  $h6 / J7$  para la polea, necesita asegurarse contra el deslizamiento, por lo que se ha elegido utilizar cuatro tornillos repartidos equidistantemente que van desde el antebrazo al mamelón. Se propone utilizar tornillos *BS 4168 M4x12*. En la figura 3.3.41 se observa la colocación de la tornillería. El antebrazo tiene agujeros con rosca y cavidades para que entre la cabeza de los tornillos y no sobresalgan. Los tornillos se enroscan a partir del antebrazo, atraviesan su grosor y terminan de atornillarse en el mamelón, que cuenta con agujeros ciegos con rosca.

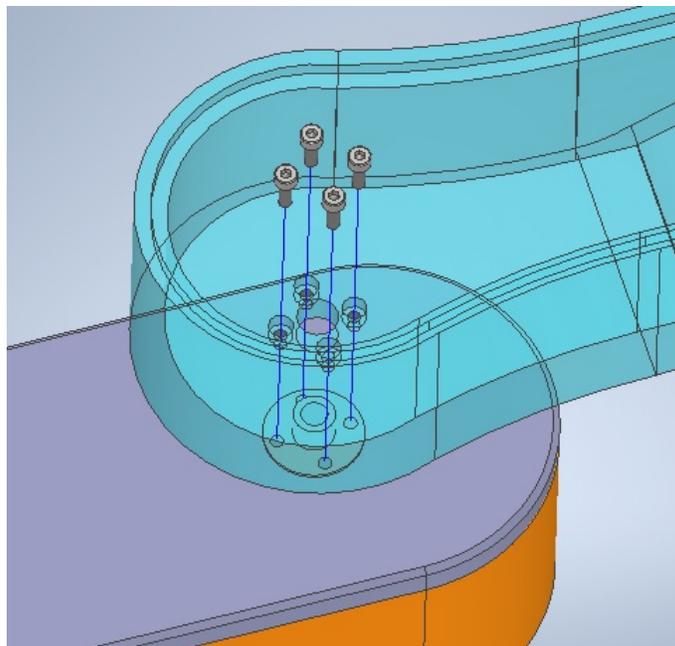


Figura 3.3.41. Ensamble del Antebrazo y el Mamelón por medio de tornillos; cada tornillo tiene una trayectoria de despiece que indica en dónde va enroscado.

En la figura 3.3.42 se encuentra un resumen de las especificaciones técnicas del ensamble antes mencionado mediante los tornillos.

ENSAMBLE ANTEBRAZO - MAMELÓN	
<b>Antebrazo</b>	4 Roscas M4x0.7 Perfil Métrico ISO
	Tamaño 4mm
	Clase 6H
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 5mm (pasado)
	Paso 0.7mm
<b>Mamelón</b>	4 Roscas M4x0.7 Perfil Métrico ISO
	Tamaño 4mm
	Clase 6H
	Tipo de rosca Derecha
	Profundidad 7mm
	Paso 0.7mm
<b>Tornillería</b>	4 Tornillos BS 4168 M4x12
	Ønominal 4mm (M4)
	Longitud nominal 12mm
	Longitud de la rosca 10.25mm
	Altura cabeza 4mm
	Øcabeza 7mm
	Paso 0.7mm, 1.4285hilos/mm
	Tipo de rosca ISO Metric Profile
	Clase 6g
Material Acero suave	

Figura 3.3.42 Resumen de las especificaciones técnicas del ensamble del Antebrazo con el Mamelón.

Al colocar así al antebrazo, este queda a una distancia de 1 mm del brazo, suficiente para que no exista contacto entre estas piezas. Este espacio se aprecia en las figuras 3.1.9 y 3.1.10.

### Ensamble 10:

Todo este procedimiento se realiza accediendo a la zona de ensamble por el antebrazo, por lo que la tapa del antebrazo es la última pieza que se coloca. Su ensamble es igual al de la tapa del brazo, a presión, mediante un sistema de escalones para maximizar la limpieza. Esto se observa en la figura 3.3.43.

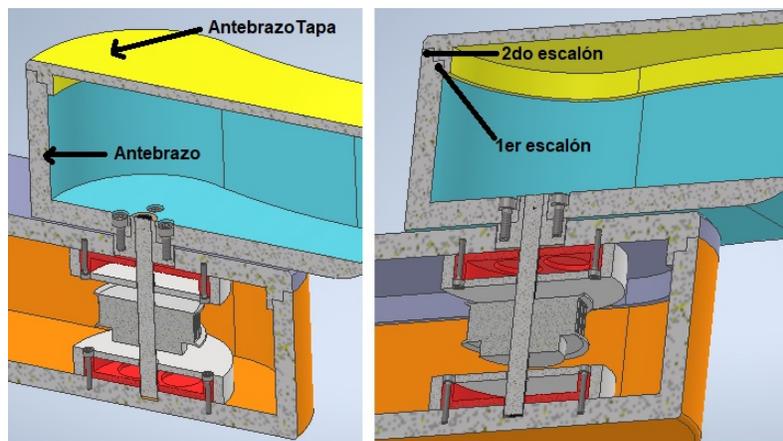


Figura 3.3.43. Visualización de los escalones de las piezas Antebrazo y AntebrazoTapa para su ensamble a presión.

Igual que para el brazo y su tapa, se utilizará un ajuste por adherencia (consultar Apéndice D, figura D1 y figura D2); a continuación, se expone el cálculo de los ajustes y tolerancias necesarios para llevar a cabo el ensamble.

- Ajuste para el eje: **k6** (ajuste de adherencia), consultar Apéndice D, figura D2.
- Ajuste para el agujero: **H7** (ajuste fino), consultar Apéndice D, figura D2.

Teniendo esto en cuenta, se tienen los siguientes datos para el primer escalón:

– Dimensión nominal (Diámetro interno del antebrazo: 62 mm para el extremo libre del antebrazo y para la distancia entre las dos paredes internas y paralelas, y 90 mm para el extremo del antebrazo donde está la articulación).

– Dimensión nominal (Curvatura de transición entre las medidas anteriores): 500 mm de diámetro.

Se utilizó el programa Mesys para el cálculo de las tolerancias y holguras, ingresando el ajuste para el eje y el agujero y el diámetro contemplado; en este caso, se tendrá que hacer un cálculo para cada diámetro porque no están todos en el mismo rango de diámetros (ver Apéndice D, Tabla D1). Las medidas de estos diámetros se pueden consultar en el Apéndice B, (Planos No. 13, 13.1, 14 y 14.1). Se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 3.3.44, 3.3.45 y 3.3.46).

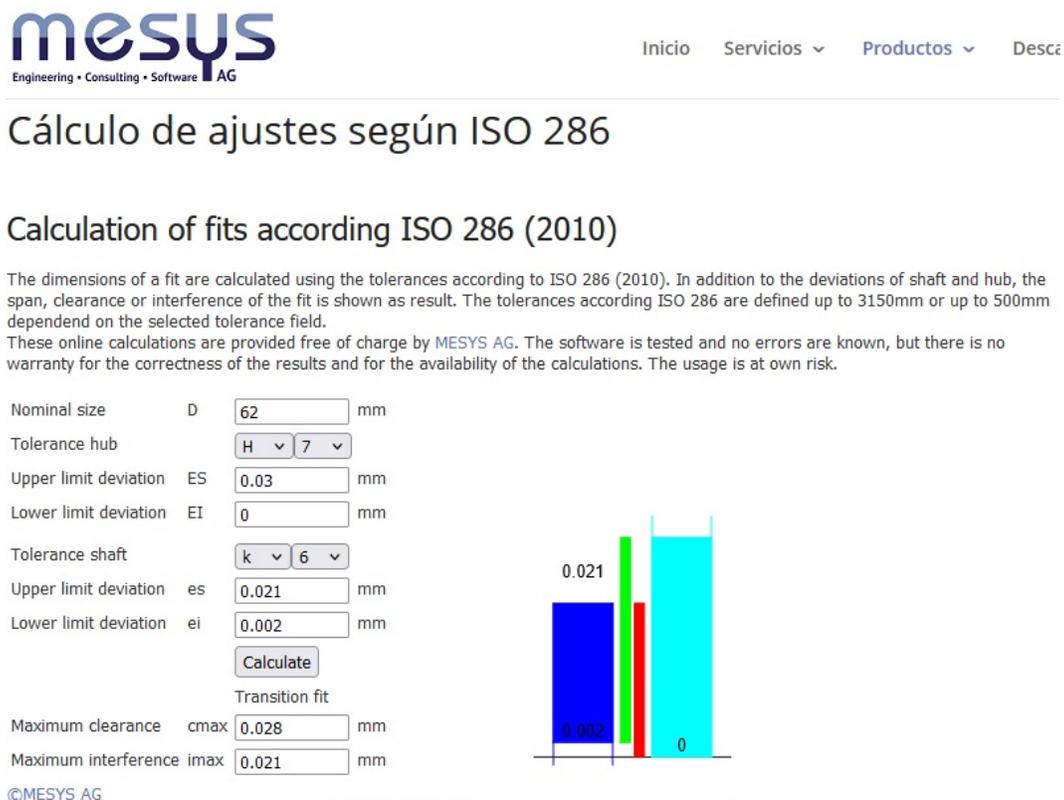


Figura 3.3.44. Cálculo de ajustes para el ensamble del antebrazo y su tapa para la medida de 62 mm de diámetro (primer escalón). Obtenida de [68].

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependend on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

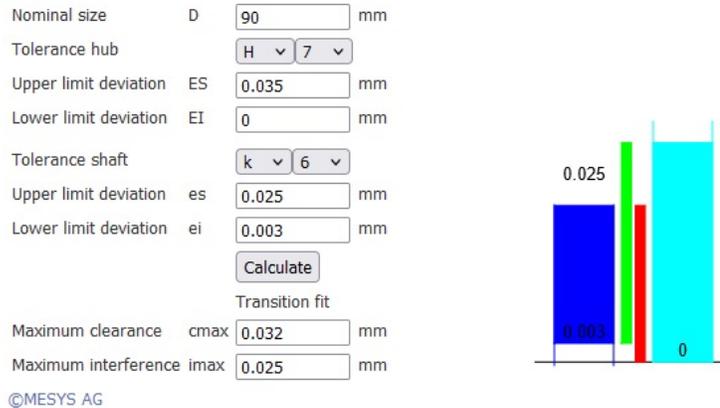


Figura 3.3.45. Cálculo de ajustes para el ensamble del antebrazo y su tapa para la medida de 90 mm (primer escalón). Obtenida de [68].

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependend on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

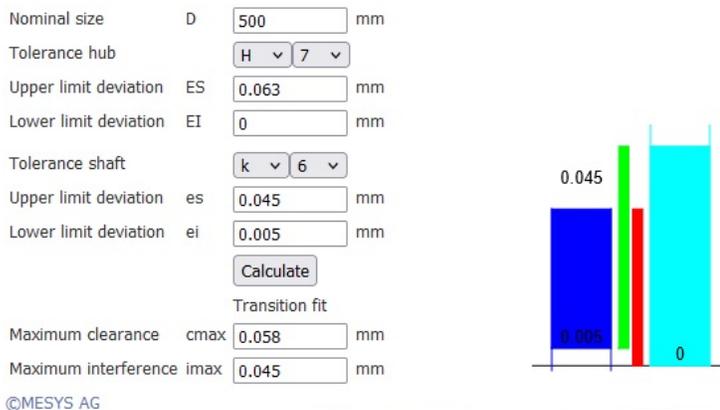


Figura 3.3.46. Cálculo de ajustes para el ensamble del antebrazo y su tapa para la medida de 500 mm (primer escalón). Obtenida de [68].

Se obtienen las siguientes tolerancias para la medida de 62 mm.

**Eje:**  $\phi$  62 k6  $\phi$  62 $^{+0.021}_{+0.002}$   $d_{max} = 62.021$  mm,  $d_{min} = 62.002$  mm

**Agujero:**  $\phi$  62 H7  $\phi$  62 $^{+0.030}_{+0.000}$   $d_{max} = 62.03$  mm,  $d_{min} = 62.00$  mm

Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ : 62.000-62.021= **-0.021 mm** (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ : 62.030-62.002= **+0.028 mm** (espacio libre máximo).

Se obtienen las siguientes tolerancias para la medida de 90 mm.

**Eje:**  $\phi$  90 k6  $\phi$  90 $^{+0.025}_{+0.003}$   $d_{max} = 90.025$  mm,  $d_{min} = 90.003$  mm

**Agujero:**  $\phi$  90 H7  $\phi$  90 $^{+0.035}_{+0.000}$   $d_{max} = 90.035$  mm,  $d_{min} = 90.000$  mm

Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ : 90.000-90.025= **-0.025 mm** (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ : 90.035-90.003= **+0.032 mm** (espacio libre máximo).

Se obtienen las siguientes tolerancias para la medida de 500 mm.

**Eje:**  $\phi$  500 k6  $\phi$  500 $^{+0.045}_{+0.005}$   $d_{max} = 500.045$  mm,  $d_{min} = 500.005$  mm

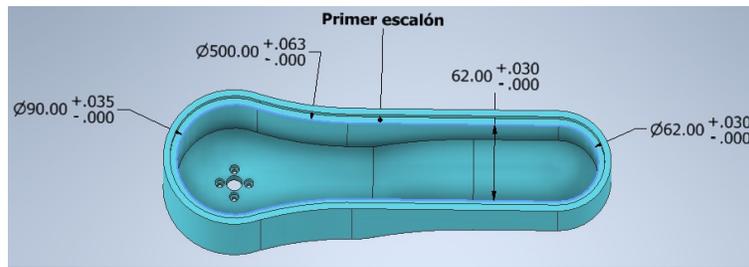
**Agujero:**  $\phi$  500 H7  $\phi$  500 $^{+0.063}_{+0.000}$   $d_{max} = 500.063$  mm,  $d_{min} = 500.000$  mm

Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

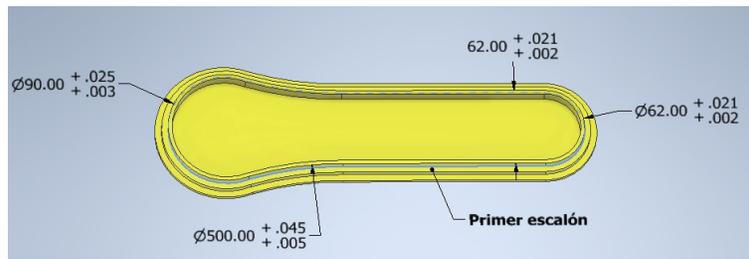
Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ : 500.000-500.045= **-0.045 mm** (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ : 500.063-500.005= **+0.058 mm** (espacio libre máximo).

En la figura 3.3.47 se observan las tolerancias necesarias para el antebrazo y su tapa para lograr el ajuste a presión deseado.



(a)



(b)

Figura 3.3.47. a) Tolerancias para el primer escalón en el Antebrazo, b) tolerancias para el primer escalón en el AntebrazoTapa para su correcto ensamble

Para el segundo escalón se tienen los siguientes datos:

- Dimensión nominal (Diámetro interno del antebrazo: 72 mm para el extremo libre del antebrazo y para la distancia entre las dos paredes internas y paralelas, y 100 mm para el extremo del antebrazo donde está la articulación).
- Dimensión nominal (Curvatura de transición entre las medidas anteriores): 490 mm de diámetro.

Se utilizó el programa Mesys para el cálculo de las tolerancias y holguras, ingresando el ajuste para el eje y el agujero y el diámetro contemplado; en este caso, se tendrá que hacer un cálculo para cada diámetro porque no están todos en el mismo rango de diámetros (ver Apéndice D, Tabla D1). Las medidas de estos diámetros se pueden consultar en el Apéndice B, (Planos No. 13, 13.1, 14 y 14.1). Se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 3.3.48, 3.3.49 y 3.3.50).

Se obtienen las siguientes tolerancias para la medida de 72 mm.

**Eje:**  $\phi 72 \text{ k6} \quad \phi 72_{+0.002}^{+0.021} \quad d_{max} = 72.021 \text{ mm}, d_{min} = 72.002 \text{ mm}$

**Agujero:**  $\phi 72 \text{ H7} \quad \phi 72_{+0.000}^{+0.030} \quad d_{max} = 72.030 \text{ mm}, d_{min} = 72.000 \text{ mm}$

Usando la “d” para el diámetro del eje y la “D” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}: 72.000-72.021= -0.021 \text{ mm}$  (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}: 72.030-72.002= +0.028 \text{ mm}$  (espacio libre máximo).

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependent on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

Nominal size	D	<input type="text" value="72"/>	mm
Tolerance hub		<input type="text" value="H"/> ▾ <input type="text" value="7"/> ▾	
Upper limit deviation	ES	<input type="text" value="0.03"/>	mm
Lower limit deviation	EI	<input type="text" value="0"/>	mm
Tolerance shaft		<input type="text" value="k"/> ▾ <input type="text" value="6"/> ▾	
Upper limit deviation	es	<input type="text" value="0.021"/>	mm
Lower limit deviation	ei	<input type="text" value="0.002"/>	mm
<input type="button" value="Calculate"/>			
Transition fit			
Maximum clearance	cmax	<input type="text" value="0.028"/>	mm
Maximum interference	imax	<input type="text" value="0.021"/>	mm

©MESYS AG

Figura 3.3.48. Cálculo de ajustes para el ensamble del antebrazo y su tapa para la medida de 72 mm (segundo escalón). Obtenida de [68].

## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependent on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

Nominal size	D	<input type="text" value="100"/>	mm
Tolerance hub		<input type="text" value="H"/> ▾ <input type="text" value="7"/> ▾	
Upper limit deviation	ES	<input type="text" value="0.035"/>	mm
Lower limit deviation	EI	<input type="text" value="0"/>	mm
Tolerance shaft		<input type="text" value="k"/> ▾ <input type="text" value="6"/> ▾	
Upper limit deviation	es	<input type="text" value="0.025"/>	mm
Lower limit deviation	ei	<input type="text" value="0.003"/>	mm
<input type="button" value="Calculate"/>			
Transition fit			
Maximum clearance	cmax	<input type="text" value="0.032"/>	mm
Maximum interference	imax	<input type="text" value="0.025"/>	mm

©MESYS AG

Figura 3.3.49. Cálculo de ajustes para el ensamble del antebrazo y su tapa para la medida de 100 mm (segundo escalón). Obtenida de [68].

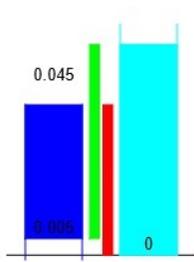
## Cálculo de ajustes según ISO 286

### Calculation of fits according ISO 286 (2010)

The dimensions of a fit are calculated using the tolerances according to ISO 286 (2010). In addition to the deviations of shaft and hub, the span, clearance or interference of the fit is shown as result. The tolerances according ISO 286 are defined up to 3150mm or up to 500mm dependent on the selected tolerance field.

These online calculations are provided free of charge by MESYS AG. The software is tested and no errors are known, but there is no warranty for the correctness of the results and for the availability of the calculations. The usage is at own risk.

Nominal size	D	<input type="text" value="490"/>	mm
Tolerance hub		<input type="text" value="H"/> ▾ <input type="text" value="7"/> ▾	
Upper limit deviation	ES	<input type="text" value="0.063"/>	mm
Lower limit deviation	EI	<input type="text" value="0"/>	mm
Tolerance shaft		<input type="text" value="k"/> ▾ <input type="text" value="6"/> ▾	
Upper limit deviation	es	<input type="text" value="0.045"/>	mm
Lower limit deviation	ei	<input type="text" value="0.005"/>	mm
<input type="button" value="Calculate"/>			
Transition fit			
Maximum clearance	cmax	<input type="text" value="0.058"/>	mm
Maximum interference	imax	<input type="text" value="0.045"/>	mm



©MESYS AG

Figura 3.3.50. Cálculo de ajustes para el ensamble del antebrazo y su tapa para la medida de 490 mm (segundo escalón). Obtenida de [68].

Se obtienen las siguientes tolerancias para la medida de 100 mm.

**Eje:**  $\phi 100 k6$   $\phi 100_{+0.003}^{+0.025}$   $d_{max} = 100.025$  mm,  $d_{min} = 100.003$  mm

**Agujero:**  $\phi 100 H7$   $\phi 100_{+0.000}^{+0.035}$   $d_{max} = 100.035$  mm,  $d_{min} = 100.000$  mm

Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ :  $100.000 - 100.025 = -0.025$  mm (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ :  $100.035 - 100.003 = +0.032$  mm (espacio libre máximo).

Se obtienen las siguientes tolerancias para la medida de 490 mm.

**Eje:**  $\phi 490 k6$   $\phi 490_{+0.005}^{+0.045}$   $d_{max} = 490.045$  mm,  $d_{min} = 490.005$  mm

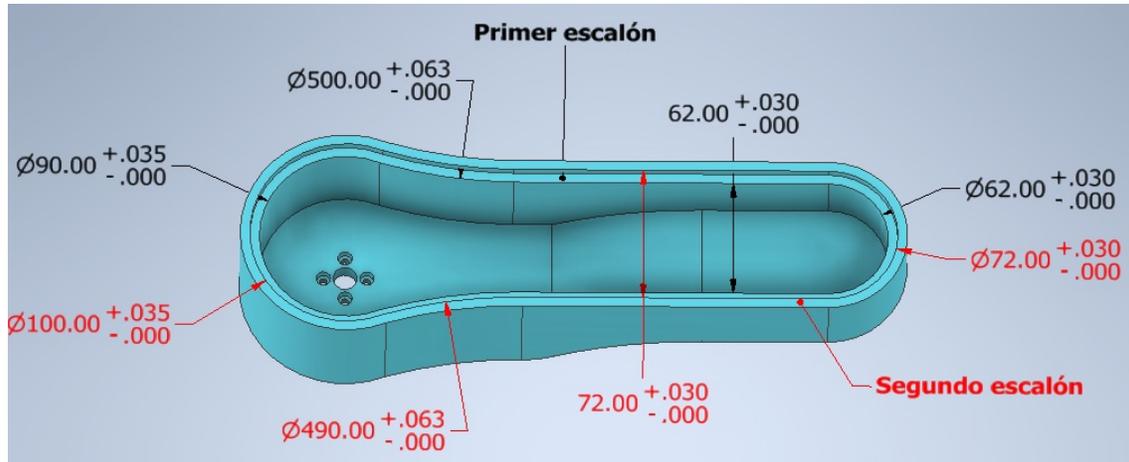
**Agujero:**  $\phi 490 H7$   $\phi 490_{+0.000}^{+0.063}$   $d_{max} = 490.063$  mm,  $d_{min} = 490.000$  mm

Usando la “ $d$ ” para el diámetro del eje y la “ $D$ ” para el del agujero, se tienen los siguientes ajustes:

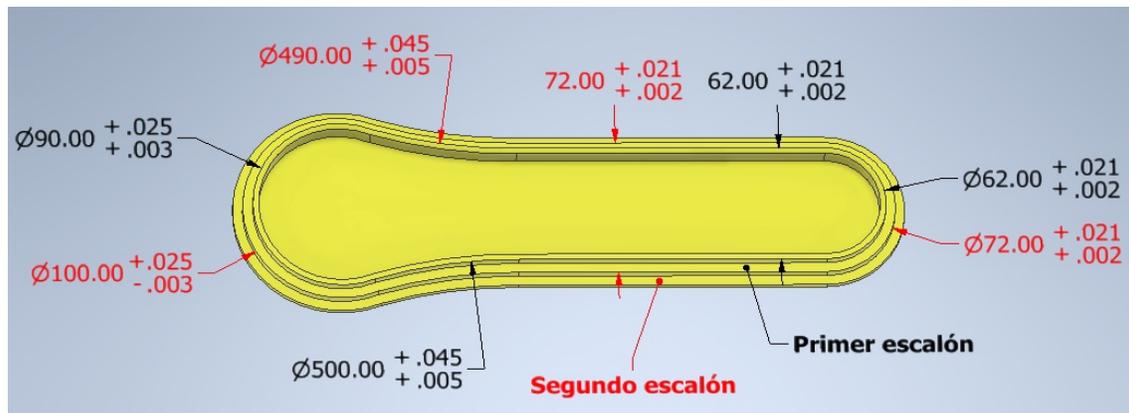
Ajuste mínimo entre piezas:  $D_{min} - d_{max}$ :  $490.000 - 490.045 = -0.045$  mm (máxima interferencia).

Ajuste máximo entre piezas:  $D_{max} - d_{min}$ :  $490.063 - 490.005 = +0.058$  mm (espacio libre máximo).

Con estas tolerancias para el eje (AntebrazoTapa) y para el agujero (Antebrazo), se logran los ajustes mínimo y máximo antes descritos. En la figura 3.3.51 se observan las tolerancias necesarias para el antebrazo y su tapa para lograr el ajuste a presión deseado.



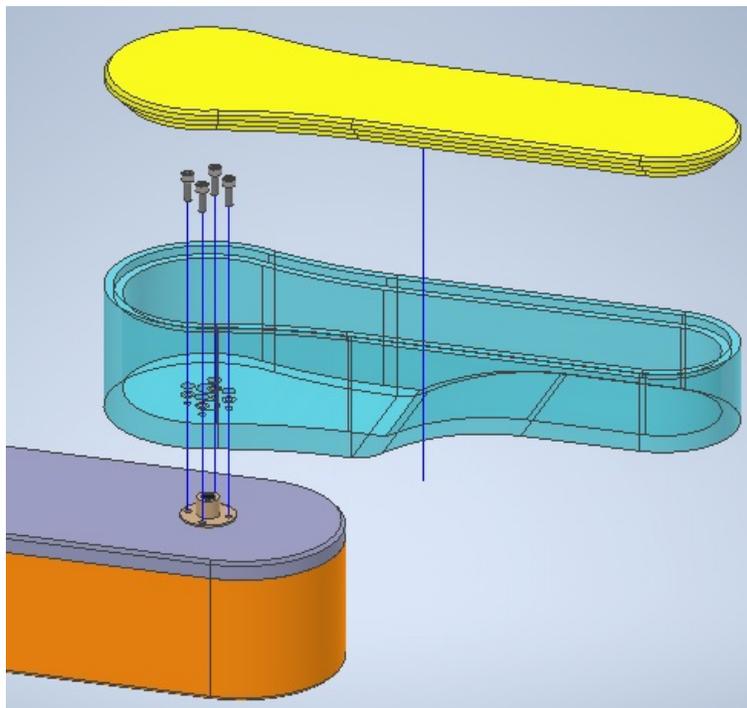
(a)



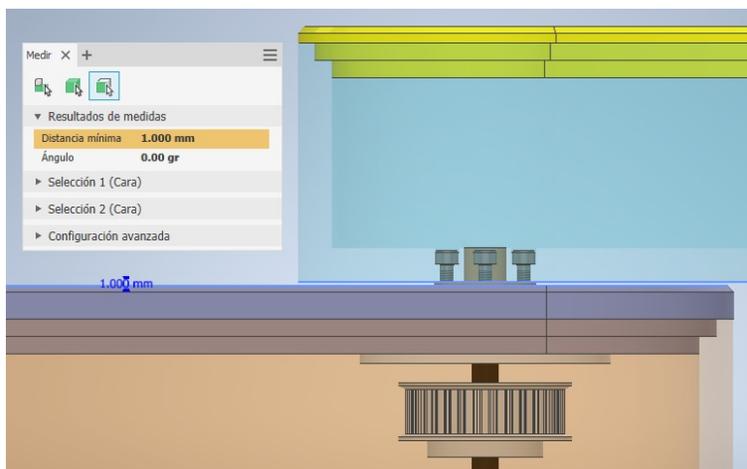
(b)

Figura 3.3.51. a) Tolerancias para el primer (negro) y segundo escalón (rojo) en la pieza Antebrazo y en b) para la pieza AntebrazoTapa para su correcto ensamble.

A continuación, en la figura 3.3.52 se muestra el ensamble del mamelón, el antebrazo y su tapa, en el Apéndice B, Plano No. 15, se encuentra el explosivo completo del ensamble de estas piezas.



(a)



(b)

Figura 3.3.52. En a) se observan las trayectorias de despiece del ensamble mencionado. En b) se aprecian los componentes ya ensamblados y la distancia entre el Brazo y el Antebrazo.

A manera de resumen y comparación, en el Apéndice D, Tabla D4, se presenta cada uno de los ajustes y tolerancias utilizados para los ensambles anteriores.

El diseño presentado anteriormente no contempla el problema de sostener axialmente al eje de transmisión que mueve al antebrazo, asegurando una correcta limpieza en el brazo-antebrazo. Los rodamientos magnéticos que se proponen en este diseño como parte del proyecto en curso son rodamientos radiales, y con su implementación, se espera se reduzca significativamente la contaminación por partículas para un cuarto limpio.

Actualmente no se tiene un diseño de rodamientos magnéticos axiales adaptado para las dimensiones del brazo-antebrazo, pero lo ideal es que en un futuro se contemplen rodamientos magnéticos radiales y axiales para sostener totalmente al eje y no permitir ningún tipo de movimiento no deseado excepto el giro. La combinación de ambos rodamientos haría que el sistema se encuentre exento de partículas contaminantes generadas por el eje y los rodamientos. Es necesario considerar que la implementación de un rodamiento magnético axial (sólo se necesitaría uno por la manera en que trabajan, como el que se muestra en la figura 1.4.5), implica diseñar un brazo-antebrazo con dimensiones mayores y, sobre todo, mayor carga que generará un momento de fuerza extra al sistema.

Como segunda alternativa para sostener axialmente el eje se tienen los rodamientos de bolas axiales con bolas vidrio de borosilicato con una jaula de hecha de material PEEK. En cuartos limpios se evitan rodamientos que contengan piezas metálicas por el desgaste que pueden tener entre sí y además porque ese tipo de rodamientos requieren lubricación, lo cual no es apto para cuartos limpios porque puede ayudar a la salida de partículas contaminantes [71]. Los rodamientos con bolas de vidrio y jaula de polímero presentan un desgaste mínimo, un funcionamiento silencioso, baja absorción de humedad (lo cual evita óxido en sus partes y posterior contaminación por partículas), resistente a sustancias químicas, económico, resistente a la suciedad y tienen una vida útil más prolongada [71]. Comercialmente existen rodamientos de este tipo con dimensiones pequeñas (diámetros exteriores de 2.4 cm y 8 mm de alto), pero el inconveniente es que el tamaño de los rodamientos magnéticos radiales a utilizar en este diseño, sigue siendo relativamente grande (el número de bobinas y el tamaño de estas no permite por ahora reducir demasiado sus dimensiones), y dado las dimensiones contempladas para el brazo, no existe espacio suficiente para este tipo de rodamientos axiales ya que si se utilizaran, tendrían que ser en conjunto con los magnéticos radiales para que se complementaran. Esta alternativa se podría contemplar si las dimensiones del brazo y del antebrazo fueran mayores y las dimensiones de los rodamientos magnéticos radiales fueran menores; esto último se podría lograr a futuro cuando existan más pruebas de funcionamiento y una investigación amplia de la relación entre el tamaño de las bobinas y el campo magnético que pueden generar para sostener el eje de la transmisión y contemplar una posible reducción en sus dimensiones, pero el proyecto PAPIIT aún está en desarrollo.

La alternativa que se ha elegido para el presente trabajo debido a la falta de espacio para un rodamiento magnético axial o de bolas de borosilicato, es la utilización de anillos de retención de acero inoxidable para sostener axialmente al eje. Los anillos de retención son elementos mecánicos sujetos al eje que, por contacto con otros elementos, evitan que el eje se mueva axialmente, así que esta opción no iguala ni supera en nivel de limpieza al uso de los rodamientos magnéticos radiales o al uso de éstos junto con el de los rodamientos de bolas de vidrio, porque implica fricción por mínima que sea. Su uso no implica mayor espacio en el diseño ni mayores cargas, lo cual lo hace una alternativa viable para las dimensiones que se tienen que manejar, pero no es la mejor opción si las otras ya evaluadas fueran viables. Para minimizar la fricción, se utilizaría únicamente un anillo de retención en la parte inferior del eje, y esta parte estaría encapsulada dentro del mismo brazo para evitar en medida de lo posible la salida de partículas. Los

anillos deberán ser de acero inoxidable 440C, que tiene alto contenido de carbono con buena resistencia al desgaste. A continuación, en la figura 3.3.53 se muestra un anillo de retención externo.



Figura 3.3.53. Anillo de retención externo. Obtenido de [73].

Este tipo de anillos se abren de los ojillos que tiene con ayuda de una pinza, su diámetro interno crece, se ingresa en el eje a la altura de la ranura donde será colocado y se libera volviendo a cerrar los ojillos. El anillo queda a presión en la ranura del eje por lo que no tendrá desplazamiento vertical.

Para sostener axialmente el eje en cuestión, se utilizará sólo un anillo de retención, colocado en el eje, a una altura tal que quede justo por debajo del rodamiento magnético inferior (el primer piso del rodamiento completo); de esta manera, el eje no podrá tener movimiento vertical hacia arriba porque el anillo haría contacto con el rodamiento. El anillo está ubicado lo más alejado posible de la conexión entre el brazo y el antebrazo para mayor seguridad en cuanto a la salida de partículas, además de que se ha pensado su colocación debajo del rodamiento magnético porque éste sirve como protección o una cubierta para que la mayoría de las partículas que se lleguen a generar por la fricción del anillo, se queden atrapadas en el rodamiento. Es imposible encapsular totalmente el anillo porque es necesario dejar un espacio libre entre el eje y el rodamiento magnético para que éste cumpla de manera correcta su función. Para evitar el movimiento vertical hacia abajo, se aprovechará el contacto entre la cavidad que tiene el brazo para el eje en su parte interior y el eje mismo; para este caso, ya no se contempla el espacio de 1 mm entre la parte inferior del eje y la cavidad del brazo (representado en la figura 3.3.21 b)). Para una mejor comprensión, ver las figuras 3.3.54 y 3.3.55.

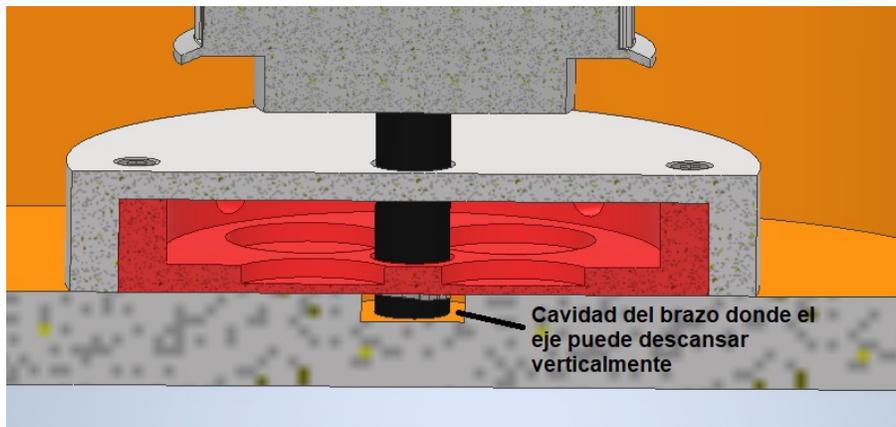


Figura 3.3.54. Cavidad del brazo en su parte inferior en donde se puede apoyar el extremo inferior del eje para no moverse hacia abajo.

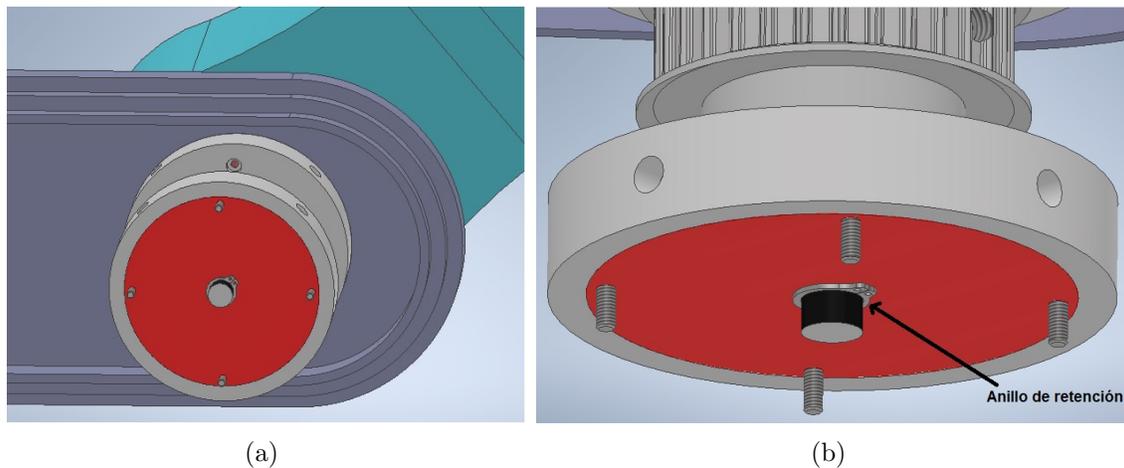


Figura 3.3.55 Vistas isométricas inferiores de la colocación del anillo de retención en la ranura del eje. En b) se puede observar que el anillo sobresale del diámetro del eje y hace contacto con la parte inferior del rodamiento magnético; de esta manera el eje no puede tener movimiento hacia arriba ya que el rodamiento es una pieza que está fija en el brazo.

En el diseño en Inventor® se observa que las dimensiones del anillo son más pequeñas que en la realidad, esto porque el programa proporciona las dimensiones del anillo libre (el anillo antes de ser ensamblado al eje) y no las del anillo ya liberado en la ranura del eje (el diámetro del anillo aumenta cuando ya está en el eje debido a la apertura que sufre para entrar correctamente). El eje sólo tocará al brazo en su parte plana, más no cilíndricamente, el espacio entre la superficie cilíndrica del eje y de la cavidad del brazo donde se aloja, ya no es de 1 mm debido a que se debe dejar un espacio suficiente también para las orejas del anillo de retención. Estos cambios en el brazo y en el eje se observan en el Apéndice B, Plano No. 4, 4.1 y 12. Para la selección del anillo de retención, se consultó un catálogo (ver Apéndice E, Tabla E) en el que se encuentran un anillo según el diámetro del eje. Para un diámetro de 8 mm, que son aproximadamente 5/16 in, se tienen los siguientes valores:

Eje:

Para un eje de  $D_s = 5/16$  in = 7.93 mm

Diámetro de acanalado en el eje:  $D_g = 0.29 \begin{smallmatrix} +0.002 \\ -0.002 \end{smallmatrix}$  in =  $7.366 \begin{smallmatrix} +0.0508 \\ -0.0508 \end{smallmatrix}$  mm

Anchura acanalado en el eje:  $W = 0.029 \begin{smallmatrix} +0.003 \\ -0.000 \end{smallmatrix}$  in =  $0.7366 \begin{smallmatrix} +0.0762 \\ -0.0000 \end{smallmatrix}$  mm

Anillo de retención:

1 Anillo de retención externo No. SH-31, ASME B18.27.1 NA1 5/16.

Tamaño=5/16 in.

Diámetro interior anillo libre:  $D_f = 0.281 \begin{smallmatrix} +0.002 \\ -0.005 \end{smallmatrix}$  in =  $7.137 \begin{smallmatrix} +0.0508 \\ -0.1270 \end{smallmatrix}$  mm

Grosor del anillo  $T = 0.025 \begin{smallmatrix} +0.002 \\ -0.002 \end{smallmatrix}$  in =  $0.635 \begin{smallmatrix} +0.0508 \\ -0.0508 \end{smallmatrix}$  mm

Diámetro exterior del anillo expandido sobre el eje:  $L_1=0.54$  in= $13.716$  mm

Diámetro exterior del anillo liberado en la ranura del eje:  $L_2=0.52$  in= $13.208$  mm

Material: Acero inoxidable 440C.

El diámetro externo del anillo ya liberado en el eje es mayor que el agujero del rodamiento por donde pasa el eje (que es de 9 mm), por lo que podrá cumplir su función de tocar la superficie inferior del rodamiento y evitar el movimiento vertical hacia arriba. En la figura 3.3.56 se muestran dimensiones del anillo y de la ranura del eje correspondientes a la nomenclatura utilizada anteriormente.

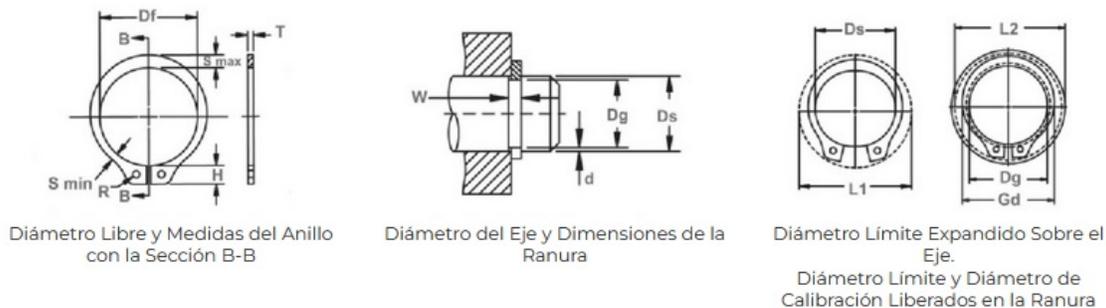


Figura 3.3.56. Nomenclatura para las diversas medidas del anillo de retención. Obtenida de [74]

La manera de ensamblar las piezas que se muestran en el Apéndice B, Plano No. 10 cambia un poco debido a que es necesario ensamblar el anillo de retención antes de insertar el rodamiento magnético con su carcasa; el orden de ensamble sería el siguiente:

1. Primero debe colocarse el eje ya con el anillo de retención, en el brazo, en la cavidad destinada a ello.
2. El rodamiento magnético ya ensamblado a su carcasa debe deslizarse desde el extremo superior del eje y hacia abajo. Se termina de asegurar la carcasa en el brazo con los tornillos correspondientes.

3. La colocación de la polea conducida debe ser por el extremo superior del eje, a mano o a golpe de mazo suave por las tolerancias que se determinaron. La polea se asegura con el tornillo prisionero.
4. El resto del ensamble se puede hacer sin problema como antes.

Como conclusión, la alternativa seleccionada para esta propuesta de diseño resuelve el problema de sostener axialmente el eje y por lo tanto la transmisión y también el antebrazo, pero la más óptima que tendría que implementarse en un futuro para garantizar la limpieza interna del robot y por lo tanto del cuarto limpio, es utilizar rodamientos magnéticos radiales y también axiales; esto implica redimensionar el brazo-antebrazo y todos sus componentes internos y de igual manera utilizar rodamientos magnéticos más pequeños para que la propuesta sea viable.

### 3.4 Diseño para manufactura

A la par del diseño conceptual y selección de los elementos que componen el brazo-antebrazo del robot tipo SCARA, es necesario identificar el proceso de manufactura por el cual se fabricarán.

Los criterios de diseño anteriormente analizados exigen que las piezas que tendrán interacción con el ambiente del cuarto limpio tengan un **acabado superficial** tipo alto pulido N5 o N6 (ver Figura 3.4.1), equivalente a una operación de rectificado (que genera rugosidades de entre 0.4 y 0.8  $\mu\text{m}$  respectivamente (ver Figura 3.4.1 a)) o entre 0.1-3  $\mu\text{m}$  dependiendo de si se trata de un rectificado de acabado fino o de desbaste (ver figura 3.4.1 b)) [75,76]. También se exige una **calidad dimensional con tolerancias cerradas** (aproximadamente 0.001 in = 0.0254 mm) para que pueda existir el nivel de limpieza deseado. Menor rugosidad implica menor acumulación de partículas en la superficie del material (ya sea en la parte interna o externa de la pieza); y un buen ajuste en el ensamble gracias a tolerancias geométricas estrechas, implica el buen cierre de encapsulados evitando la salida de partículas contaminantes.

Valor de $R_a$ en $\mu$	Clase de rugosidad	Signo equivalente (antiguo)
50 25	N 12 N 11	
12.5 6.3	N 10 N 9	
3.2 1.6	N 8 N 7	
0.8 0.4	N 6 N 5	
0.2 0.1 0.05 0.025	N 4 N 3 N 2 N 1	

Valores en micras	
<b>Cepillado</b>	
<b>Torneado normal</b>	<b>5 - 30</b>
<b>Fresado</b>	
<b>Taladrado</b>	
<b>Brochado</b>	<b>0,15 - 15</b>
<b>Escariado</b>	<b>1 - 7</b>
<b>Torneado muy fino</b>	<b>0,5 - 3</b>
<b>Rectificado</b>	
<b>Rectificado muy fino</b>	<b>0,1 - 0,5</b>
<b>Lapeado</b>	<b>0,05 - 0,5</b>
<b>Super-Finish</b>	<b>0,03 - 0,5</b>

(a)
(b)

Figura 3.4.1. a) Equivalencia entre símbolos de rugosidad, b) rugosidades que se pueden obtener en diferentes operaciones de mecanizado por arranque de viruta [75,76].

Para el caso de algunas piezas del ensamble total, en el presente trabajo se propone utilizar uno de los procesos de manufactura aditiva existentes hasta el momento, que se ajuste a las características de diseño deseadas; teniendo en cuenta que si posteriormente a una investigación de los nuevos procesos de manufactura aditiva, se concluye que no existe alguno que satisfaga los criterios antes descritos, se buscará un proceso de manufactura convencional que sí lo haga.

La *manufactura aditiva*, es un “proceso de unión de materiales capa a capa para hacer objetos modelados en 3D, en oposición a las metodologías de fabricación sustractivas, tales como el mecanizado tradicional” (Jiménez, Porras, Domínguez, Romero y del Mar, 2013, pp 1-20). Se basa en la fabricación de componentes tridimensionales por aporte de material a partir de un modelo desarrollado en un programa CAD (Computer Aided Design).

Este tipo de manufactura tiene la ventaja de obtener prototipos (de diseño, de geometría o funcionales) en un corto tiempo y se puede efectuar una validación de la geometría y calidad antes de producir la pieza en masa; también se tiene la ventaja de producir piezas complejas desde el punto de vista geométrico, existe la posibilidad de crear estructuras huecas que son más ligeras e incluso se puede jugar con la porosidad de las piezas utilizando un mismo material o mediante la combinación de distintos materiales. Sin embargo, este tipo de manufactura también presenta algunas desventajas: al basarse en adición de material por capas, se produce un efecto llamado “escalera”, elevando la rugosidad superficial de la pieza, sobre todo si la capa es gruesa; también la deposición en capas produce materiales anisotrópicos, lo cual genera tensiones diferenciales en el material ante ciertas cargas. Por último, las tolerancias obtenidas en la mayoría de los métodos de fabricación aditiva son todavía mayores que en otros métodos como los basados en arranque de material [77], incluso existen algunos procesos en los que el material sufre pequeñas contracciones al enfriarse y esto repercute en la precisión dimensional. Teniendo en cuenta estos puntos, es necesario elegir un proceso de manufactura aditiva entre todos los existentes en el mercado que cumpla con los criterios de diseño antes mencionados. Algunas de las características más importantes a tomar en cuenta para la selección del proceso son las siguientes:

- Precisión y calidad dimensional de la máquina: altura de la capa, resolución (tamaño mínimo de detalle), repetibilidad, espesor mínimo de pared y dimensiones del área de trabajo.
- Material de trabajo: porosidad en el acabado superficial, resistencia mecánica.
- Tamaño de las partículas de polvo en el caso de que el material se encuentre en esta presentación.
- Post-procesos requeridos.

Se realizó una investigación de las características para algunos de los distintos procesos de manufactura aditiva existentes en el mercado, los cuales se mencionan a continuación:

1. SLA - Stereo Litography Apparatus (estereolitografía).
2. Araldite Digitalis (estereolitografía).
3. DLP - Digital Light Processing (estereolitografía).
4. FDM - Fused Deposition Modeling.
5. Polyjet (Photopolymer Jetting).

6. DOD - Drop On Demand.
7. NPJ - Nano Particle Jetting.
8. SLS - Selective Laser Sintering.
9. DMLS / SLM - Selective Laser Melting.
10. MJF - Multi jet Fusion.
11. BJ - Binder Jetting.
12. EBM - Electron Beam Melting.
13. LOM - Laminated Object Manufacturing.

Con base en la información recabada, se realizó una tabla comparativa (Tabla 3.4.1) entre cinco procesos de los anteriormente mencionados, que presentan mejor desempeño considerando los criterios de diseño establecidos en páginas anteriores. Algunos objetos manufacturados mediante estas tecnologías se presentan en la Figura 3.4.2.

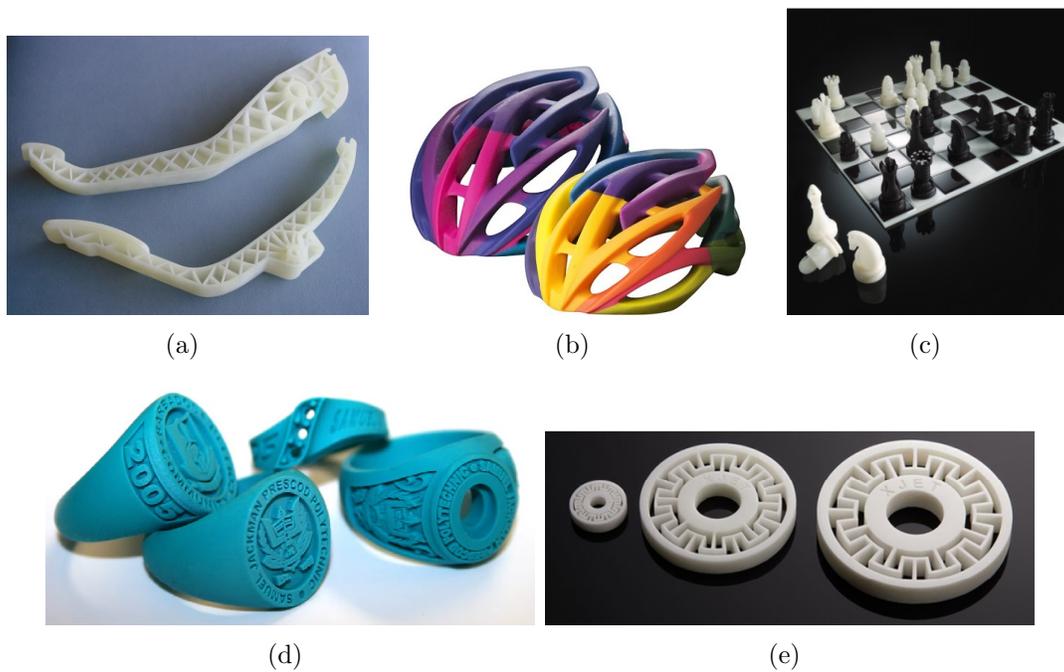


Figura 3.4.2 Apariencia de piezas manufacturadas por SLA, Polyjet, Araldite Digitalis, DOD y NPJ respectivamente. Obtenidas de [79, 88, 83, 119, 96] respectivamente.

<b>SLA</b>	
<b>Descripción</b>	Se emplea un láser UV (un punto que describe una trayectoria) que se proyecta sobre un baño de <b>resina fotosensible líquida para polimerizarla</b> . El material que no es expuesto al láser permanece líquido [78]. Una vez fabricada la pieza, se deben retirar los soportes utilizados y pasar por un proceso de limpieza. Finalmente, hay que someterla a un proceso de <b>post-curado</b> en un horno de luz ultravioleta para dejarla totalmente solidificada [79], lo que genera cierto grado de contracción [81]. Se crean enlaces químicos conectando fotopolímeros entre las capas, lo que da como resultado piezas totalmente densas, impermeables y herméticas; estos enlaces proporcionan altos grados de resistencia lateral, con lo que se generan piezas isotrópicas [85].
<b>Precisión</b>	<p>Espesor de capa: 100 <math>\mu\text{m}</math> [78].</p> <p><u>Resolución</u>: Impresoras como LFS Form 3 alcanzan una resolución XY de 25 <math>\mu\text{m}</math> [84].</p> <p><b>Presenta resultados sistemáticos.</b></p> <p>Existe distribución uniforme de la luz en cada parte de la impresión.</p> <p>Requiere compleja calibración para compensar posibles distorsiones.</p>
<b>Tolerancias</b>	<p><math>\pm 0.127 \text{ mm}</math> [81].</p> <p><math>\pm 0.2 \text{ mm}</math> [79].</p> <p><math>\pm 0.15 \text{ mm}</math> [86]</p> <p><math>\pm 0.01 \text{ mm}</math> [100].</p> <p>“La impresión SLA ofrece la mayor tolerancia de todas las tecnologías de impresión 3D disponibles en el mercado” [81].</p>
<b>Acabado superficial</b>	Excelente, junto con el proceso DLP, <b>cuenta con el acabado de la superficie más liso de todos los procesos de impresión 3D</b> [84].
<b>Materiales</b>	<p>Resinas epoxi:</p> <p>*<i>Accura Xtreme</i> (E=1.52-2.070 MPa)</p> <p>*<i>DSM 11122</i> (E= 2.040-2.370 MPa). Ideal para visualizar el comportamiento de fluidos.</p> <p>*<i>Robusta G</i> (E=2.276-2.390 MPa)</p> <p>Estos tres materiales cuentan con una <b>alta fiabilidad dimensional y excelente acabado superficial</b>, además de que son fáciles de pulir; ideales para prototipos visuales, montajes de conjuntos y modelos para moldes de silicona, así como piezas funcionales. [79].</p> <p>*<i>Watershed XC 11122</i></p> <p>Produce piezas muy detalladas con estabilidad dimensional [80].</p>

Tabla 3.4.1. Tabla comparativa entre cinco de los procesos de manufactura aditiva anteriormente mencionados, que presentan mejor desempeño.

<i>Polyjet</i>	
<i>Descripción</i>	Un cabezal va depositando capas sucesivas y horizontales de un <b>polímero líquido (parecido al gel), fotosensible, las cuales son curadas con lámparas mientras se hace la deposición</b> ; cada capa se va adhiriendo con la capa posterior hasta formar el objeto físico. <b>Requiere uso de soportes</b> , pero dejan poca o ninguna marca en la superficie y son fácilmente removibles con chorro de agua. <b>No se requiere un proceso de post-curado.</b>
<i>Precisión</i>	<u>Esesor de capa:</u> El esesor de capa estándar es de 28 $\mu\text{m}$ [93], pero existen máquinas que permiten depositar capas horizontales de hasta 16 $\mu\text{m}$ de esesor, y paredes extrafinas de hasta 0.6 mm [87, 89]. <u>Resolución:</u> El tamaño mínimo de detalle es de 0.15 mm [86], o de 0.2 mm [93]. PolyJet tiene la tolerancia de esesor de capa estándar más pequeña, lo que significa que puede crear piezas muy detalladas. <b>Los objetos tendrán una superficie lisa y un alto nivel de detalles, lo que hace que la tecnología PolyJet sea apta para quienes necesitan producir piezas con precisión dimensional [93].</b>
<i>Tolerancias</i>	$\pm 0.025$ mm [86]. $\pm 0.1 - 0.3$ mm [87]. $\pm 0.3\%$ con un límite de $\pm 0.3$ mm [93]. $\pm 0.05$ mm [100]. En caso de requerir altas tolerancias, para agujeros, la pieza deberá ser modelada sub dimensionada. Para las superficies de contacto, utilizar un modelo sobre dimensionado [89]. <b>Para las piezas que deben tener ajuste y se ensamblan después de imprimir, dejar un espacio de 0.05-0.1 mm entre partes [89].</b>
<i>Acabado superficial</i>	Alto grado de acabado superficial y es suave.
<i>Materiales</i>	<u>Resinas fotosensibles y materiales compuestos:</u> * <i>Digital ABS2</i> : Ofrece una mayor rigidez y resistencia en paredes de menos de 1.2 mm de esesor. Ideal para <b>prototipos funcionales</b> , herramientas de fabricación, moldes, incluyendo moldes por inyección, <b>piezas de encaje a presión</b> para su uso a altas o bajas temperaturas, piezas eléctricas, <b>carcasas</b> , carcasas para teléfonos móviles, piezas y tapas del motor [88]. * <i>RGD720</i> : Es un fotopolímero PolyJet transparente multiuso para la simulación de plásticos estándar transparentes. Combina una excelente estabilidad dimensional con suavidad superficial [88]. *VeroClear-RGD810: Es un material rígido, prácticamente incoloro, que se caracteriza por una <b>gran estabilidad dimensional para uso general, creación de modelos de gran detalle</b> y simulación visual de termoplásticos transparentes tales como PMMA. [88].

Tabla 3.4.1. Continuación.

<i>Polyjet</i>	
<i><b>Materiales</b></i>	<p>*<i>Familia Vero</i>: VeroWhitePlus (RGD835), VeroGray (RGD850), VeroBlue (RGD840), VeroBlackPlus (RGD875), VeroCyan, VeroMagenta, VeroYellow, VeroBlack: <b>acabado homogéneo para comprobar el ajuste</b>, la forma y el funcionamiento de piezas estáticas, <b>componentes móviles</b> o ensamblajes complejos [88].</p> <p>*<i>Rigur (RGD450)</i>: Es un material de polipropileno simulado que ofrece durabilidad y un bonito acabado superficial. <b>Útil para construir prototipos resistentes para componentes de encaje a presión; presenta dimensiones estables</b> [88].</p> <p>*<i>VeroDentPlus (MED690)</i>: Es un material beige oscuro para uso dental pero que crea un acabado y detalles increíblemente finos y ofrece una resistencia, precisión y durabilidad excelentes [88].</p>

Tabla 3.4.1. Continuación.

<i>Araldite Digitalis</i>	
<b><i>Descripción</i></b>	Es un proceso muy similar al SLA, pero en lugar de un punto de incidencia es una <b>línea recta que, al desplazarse, cubre toda la superficie de una capa</b> [78]. Una vez fabricada la pieza, se deben retirar los soportes utilizados y pasar por un <b>proceso de limpieza</b> . Finalmente, hay que someterla a un <b>post-curado</b> en un horno de luz ultravioleta para dejarla totalmente solidificada [79], lo que genera cierto grado de contracción [81].
<b><i>Precisión</i></b>	<u>Espesor de capa</u> : 50 – 150 $\mu\text{m}$ [78]. <u>Resolución</u> : Cuenta con una resolución horizontal de 10 $\mu\text{m}$ [78].
<b><i>Tolerancias</i></b>	$\pm 0.127$ mm [81]. $\pm 0.2$ mm [79]. $\pm 0.15$ mm [86] $\pm 0.01$ mm [100]. Se pueden considerar las mismas que para el proceso SLA, ya que “las diferencias de precisión y fiabilidad se suelen explicar mejor por las diferencias entre las máquinas de distintos fabricantes que por las diferencias entre las tecnologías” [84].
<b><i>Acabado superficial</i></b>	Excelente acabado superficial.
<b><i>Materiales</i></b>	Resinas epoxi: * <i>RenShape SL7870</i> : Es una resina transparente ideal para producir piezas duraderas que cuentan con un <b>acabado superficial suave y de alta calidad y una reproducción precisa</b> de detalles intrincados [82]. * <i>RenShape SL7811</i> : Comparte las mismas cualidades que la resina anterior, pero es de color blanco [82]. * <i>RenShape 4688</i> : La fina calidad de la superficie lograda después de la molienda reduce cualquier tiempo de finalización. <b>Presenta una excelente estabilidad dimensional</b> y es prácticamente inodoro durante la aplicación [82]. En [83] se pueden encontrar a detalle las propiedades mecánicas sobre la línea de materiales <i>RenShape SL</i> .

Tabla 3.4.1.Continuación.

<b>DOD</b>	
<b>Descripción</b>	<p><b>Utiliza un par de chorros de tinta: uno deposita el material de construcción, habitualmente un material parecido a la cera, y el otro, un material soluble para los soportes.</b> Las máquinas DOD siguen una trayectoria predeterminada para inyectar material en una deposición puntual, creando el área transversal de un objeto capa por capa. También utilizan una fresa que pule el área de construcción después de crear cada capa, logrando una superficie perfectamente plana antes de comenzar la siguiente capa. Para eliminar las estructuras de soporte, el objeto se introduce en disolvente.</p> <p>Por lo general se usan para fundición a la cera perdida y fabricación de moldes.</p>
<b>Precisión</b>	<p><u>Espesor de capa:</u> Depende del tamaño de las gotas, pero está alrededor de <math>16 \mu\text{m}</math> con materiales de baja viscosidad [90].</p> <p><u>Resolución:</u> Si se utiliza silicona de alta viscosidad, la resolución mínima posible es actualmente de <math>0.1 \text{ mm}</math>. [90].</p> <p><b>Cuenta con una muy alta precisión dimensional.</b> Es ideal para prototipos realistas, proporcionando detalles excelentes [91].</p> <p><b>“Las gotas de tinta impresas tienen casi la misma forma, y el orden de tamaño demuestra una buena repetibilidad del generador de gotas”</b> [94]. Sin embargo, las primeras gotas que emergen de un orificio pueden variar en carácter (masa, velocidad, trayectoria) de las gotas posteriores debido a las resonancias acústicas y de fluidos y los efectos condicionantes del orificio, como la humectación [92].</p>
<b>Tolerancias</b>	<p>Las bioimpresoras <i>Autodrop Compact</i> proporcionan una tolerancia de: eje x-y-z: <math>\pm 25 \mu\text{m}</math> [95].</p> <p>Las bioimpresoras <i>Autodrop AD-P-8000</i> tienen mejor precisión, la tolerancia es de: eje x-y: <math>\pm 5 \mu\text{m}</math> [95].</p> <p>El material (tinta) P(VDF-TrFE) produce grosores de 9 micras (<math>0.009 \text{ mm}</math>) [95].</p>
<b>Acabado superficial</b>	<p>Produce piezas lisas con superficies comparables al moldeo por inyección, <b>el efecto de capa es apenas perceptible</b> [91]</p>
<b>Materiales</b>	<p>*<i>Cera:</i> En su mayoría se utiliza para aplicaciones de fundición de cera perdida.</p> <p>*<b>Los materiales fotosensibles utilizados en este proceso se degradan con el tiempo.</b></p> <p>*<i>Polímeros conductores:</i> Son tintas de nanopartículas a base de metal, tintas de nanomateriales a base de carbono [101], también PETOX [102].</p> <p>*<b>PP (Polipropileno) y PET:</b> Presentan bajas rugosidades (<math>0.05 \mu\text{m}</math>) a comparación del HDPE y que del PP mate [103].</p>

Tabla 3.4.1.Continuación.

<b>NPJ</b>	
<b>Descripción</b>	<p>Este método utiliza un <b>líquido de fabricación, que contiene nanopartículas de metal o cerámicas, y un líquido de soporte</b>, ambos se instalan en la impresora como un cartucho y se inyectan en la plataforma de impresión formando capas de gotas extremadamente finas. Los dos tipos de material, el material de fabricación (con nanopartículas de metal cerámicas) y el material de soporte, se inyectan al mismo tiempo [91].</p> <p>El proceso se lleva a cabo en un lecho calentado a 250 °C, lo que permite que el líquido se evapore al lanzarse a chorro para que las partículas se adhieran en todas direcciones.</p> <p>Posteriormente se ingresa la pieza en una tina de disolvente que es muy suave, no irritante y no peligroso. Éste disuelve todo el material de soporte, luego la pieza se somete a un proceso de sinterización en un horno [99]. La adhesión entre las partículas es lo suficientemente grande como para soportar un <b>proceso de pulido si se requiere</b> [96]. Se puede utilizar para piezas que necesitan ser resistentes a altas temperaturas y fricción. Las propiedades son isotrópicas [98].</p>
<b>Precisión</b>	<p><u>Resolución:</u> Se generan gotas dentro de un rango de 25 <math>\mu\text{m}</math> para piezas pequeñas y de 50 <math>\mu\text{m}</math> para piezas grandes. El tamaño mínimo de una característica es de 100 <math>\mu\text{m}</math>; la altura de la capa puede ser de 8 – 10 <math>\mu\text{m}</math>, lo que permite obtener detalles finos [96, 99].</p> <p>Las gotas crean una capa ultrafina, lo que permite que esta tecnología brinde detalles superfinos, superficies suaves y alta precisión [97].</p> <p><b>El proceso es muy preciso, predecible y repetible</b> [99].</p>
<b>Tolerancias</b>	$\pm 50 \mu\text{m}$ para piezas pequeñas (alrededor de 50 mm), y para dimensiones mayores, la tolerancia es de $\pm 100 \mu\text{m}$ [98, 99].
<b>Acabado superficial</b>	Liso debido al grosor de la capa ultrafina. No necesita otro proceso para el acabado superficial.
<b>Materiales</b>	<p>*Acero inoxidable 316L</p> <p>*Cerámicos: zirconia, alúmina [96].</p> <p>*Aleaciones: Sn63-Pb37.</p> <p>*Plata, acero inoxidable, aluminio, estaño, cobre [98].</p> <p>*La fabricación con <i>cerámica</i> conlleva a un acabado poroso, y existe contracción al someterla al proceso de sinterizado (del 16.7%) aunque se considera baja [99].</p>

Tabla 3.4.1. Continuación.

De la tabla 3.4.1 se puede concluir que el proceso de manufactura aditiva que más se ajusta a los criterios de diseño antes mencionados, es el proceso Polyjet (proveniente de la tecnología Material Jetting). Sin embargo, presenta algunas características en las que fue necesario ahondar más para comprobar si la tecnología es la adecuada para el diseño del brazo antebrazo.

Se encontró que la tecnología **Polyjet** es adecuada para prototipos funcionales, pero

es necesario saber el comportamiento mecánico de las piezas manufacturadas por esta tecnología. La anisotropía es la tendencia de un material a presentar una diferencia en el valor de sus propiedades en función de la dirección en la que se miden. En el caso de los polímeros, la anisotropía se produce debido a la orientación de las cadenas del polímero. En el campo de las tecnologías de la manufactura aditiva con fotopolímeros, es típico que se presente la anisotropía, a menudo las características anisotrópicas obtenidas son diferentes a las que se presentan cuando las piezas se fabrican con otras tecnologías. La anisotropía es una característica declarada también por los fabricantes, más allá del trabajo realizado en varios estudios. En la figura 3.4.3 se muestran los factores de anisotropía en algunos materiales comerciales según fichas técnicas.

<b>Technology (ISO/ASTM 52900:2015)</b>	<b>Manufacturer</b>	<b>Material</b>	<b>Tensile Modulus Ratio <math>E_V/E_H</math></b>	<b>Tensile Modulus Ratio <math>E_{MAX}/E_{MIN}</math></b>
Material extrusion	Stratasys	ABS Plus-P430	0.8	-
Material extrusion	Stratasys	PC	0.9	-
Material extrusion	BQ	PLA	0.9	-
Powder bed fusion of plastic	EOS	PA2200	1	-
Powder bed fusion of plastic	EOS	PA3200 GF	0.8	-
Vat photopolymerization	3D System	Accura Amethyst	-	1.1
Material jetting	Stratasys	Digital ABS	-	1.2
Powder bed fusion of metal	EOS	Aluminum AISI 10 Mg	0.9	-

Figura 3.4.3 Factores de anisotropía para algunos procesos de manufactura aditiva según ciertos materiales. EV: dirección ZXY, EH: dirección XYZ. Obtenida de [104].

El proceso Polyjet de la tecnología Material Jetting tiene una fuerte anisotropía en las piezas impresas, provocada por las interfaces entre las boquillas, los movimientos del cabezal de impresión y las capas; y ésta se ve aumentada cuando se tienen dos materiales con una interfaz (dos materiales impresos uno al lado del otro) o cuando se mezclan varios materiales, es decir, una mezcla de ambos en un mismo volumen (como un material compuesto). Esto es importante tenerlo en cuenta ya que la tecnología a la que se hace referencia tiene la característica de poder mezclar materiales para obtener distintas propiedades mecánicas o de apariencia en una misma pieza.

La presencia de la anisotropía se puede ver contrarrestada en cierta medida con la orientación de impresión de la pieza. Se sabe que para tales compuestos la resistencia a lo largo de la orientación de la fibra es significativamente mayor que la perpendicular a la orientación de la fibra [104], incluso, las interfaces de varios materiales en la dirección perpendicular a la aplicación de la carga muestran una reducción de la resistencia de hasta un 50% y deben evitarse [104]. La orientación de la pieza al momento de ser manufacturada es importante; se ha encontrado [106] que los resultados del límite de esfuerzo a flexión de tres puntos a piezas manufacturadas con la tecnología Polyjet,

fueron significativamente más bajos para la orientación de impresión Z que para las orientaciones X ó Y, e incluso, el límite de esfuerzo a flexión en X puede ser mayor o menor que en Y dependiendo del material que se utilice [106]. Las orientaciones a las que se refiere este análisis se observan en las figuras 3.4.4 y 3.4.5.

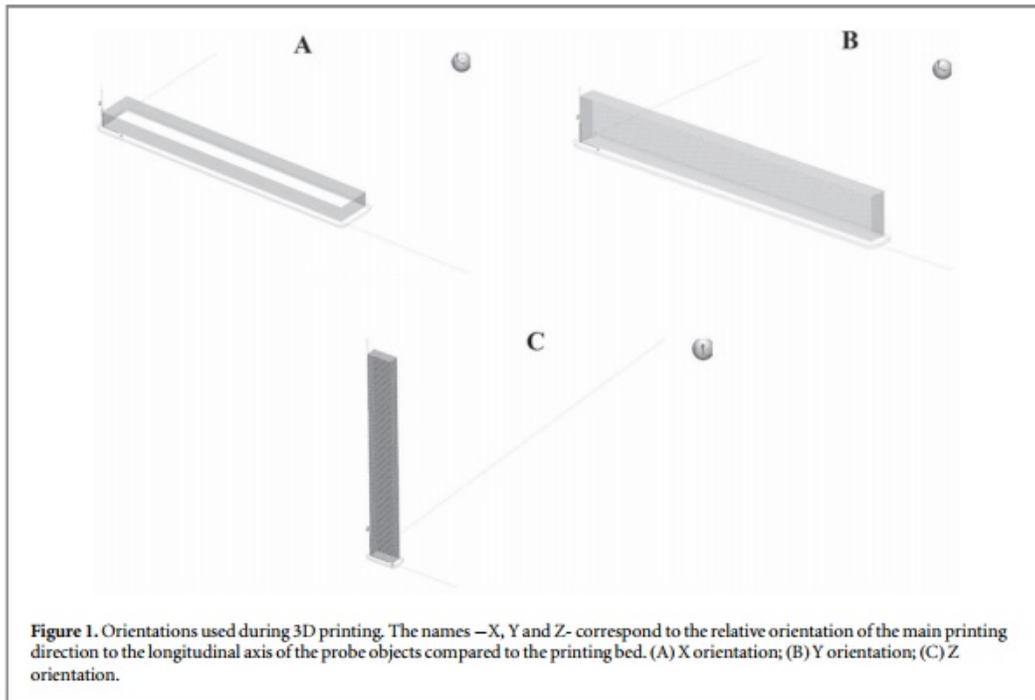


Figura 3.4.4 Orientaciones de impresión en X, Y y Z respectivamente para una misma pieza manufacturada con Polyjet. Obtenida de [106].

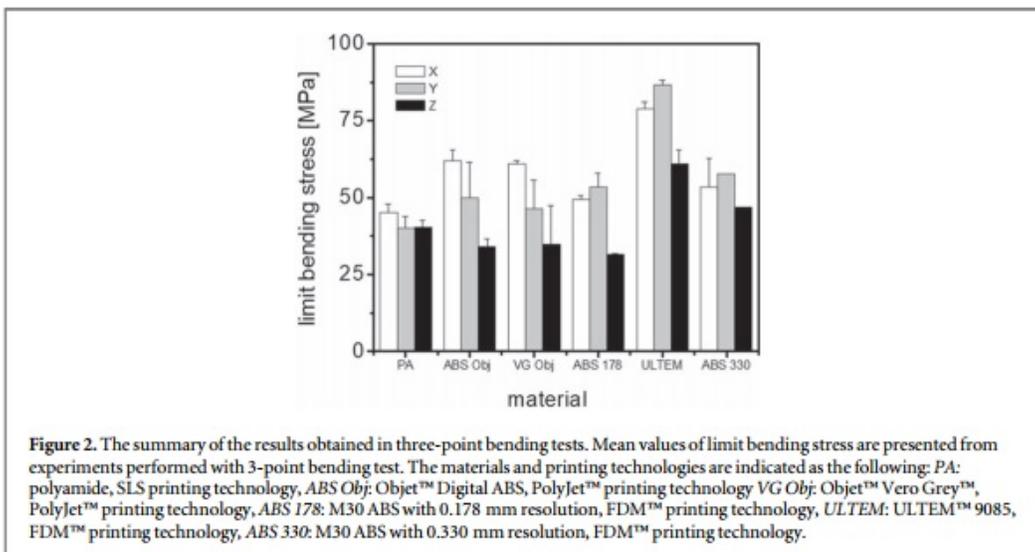


Figura 3.4.5 Diferencia del límite de esfuerzo a flexión según la tecnología, la orientación de impresión y el material. Obtenida de [106].

La orientación de la pieza no sólo es importante en esta tecnología para controlar la anisotropía, sino también para lograr un acabado liso y brillante. En la tecnología **Polyjet**, el material de soporte (ya sea para comenzar la pieza o para hacer geometrías sobresalientes), se imprime de manera simultánea al material de modelado, y la cara de la pieza que está en contacto con el material de soporte, tendrá un acabado superficial mate. Las áreas que miren hacia arriba o no estén en contacto con el material de soporte, tendrán un acabado superficial de alto brillo [89]. La diferencia entre una superficie brillante y una con acabado mate, por mínima que sea, es el tipo de reflexión de luz que tiene cada una de ellas. El acabado mate genera una reflexión difusa (desordenada) debido a la rugosidad de la superficie) que es mayor que la de una superficie brillante (ésta genera una reflexión especular u ordenada). Por lo tanto, la orientación de la pieza definirá la orientación de las superficies brillantes o mate. Esto es importante tomarlo en cuenta para que, en dado caso de que se elija este material, las superficies en contacto con el flujo de aire del cuarto limpio sean lo menos rugosas posibles y no exista acumulación de partículas y un posible arrastre de ellas con el flujo antes mencionado. En el caso de la configuración del brazo-antebrazo elegida, las superficies inferiores son las que tienen menos contacto directo con el flujo de aire del cuarto limpio (que por lo regular la dirección de flujo es de arriba hacia abajo), por lo que las superficies mencionadas son las que podrán tener contacto con el material de soporte (ya sea al inicio para comenzar la manufactura desde la mesa de impresión o para las geometrías sobresalientes que necesiten soporte), y tener un acabado mate más rugoso que las demás superficies brillantes que estarán en contacto directo con el flujo de aire. Para ahondar más en el proceso de manufactura considerado, se consultó a una persona conocedora del tema (el Dr. Alberto Caballero Ruiz), que ha realizado actividades de investigación y desarrollo tecnológico en el área de aplicación de la manufactura aditiva, especialmente para los campos de fabricación y medicina. Su principal aportación se da en el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva y Digital (MADiT), perteneciente al Instituto de Ciencias Aplicadas y tecnología (ICAT) de la UNAM. El Dr. Alberto ha trabajado con procesos de manufactura aditiva como son Fused Deposition Modeling (FDM), Polyjet, Estereolitografía (SLA), Digital Light Processing (DLP) y Selective Laser Sintering (SLS). Dada su experiencia trabajando con estas tecnologías para diversos materiales, se consultó con él si el proceso de manufactura aditiva **Polyjet** antes mencionado cumplía con los requisitos de diseño como son: acabado superficial, calidad dimensional, y limpieza necesaria para un cuarto limpio. Las observaciones que sugirió son las siguientes:

- Dados los requerimientos de diseño que se necesitan para trabajar en un cuarto limpio de clase 1, ninguno de los procesos de manufactura aditiva asegura en la pieza, la precisión y acabado superficial adecuados para el entorno. Al manufacturar por adición de material, siempre existirá el efecto llamado “escalera” en el caso de adición por filamentos, o irregularidades y porosidad dada la unión (no fusión) de las partículas cuando el proceso implica material en polvo.
- La porosidad generada con este tipo de manufactura, por mínima que sea, repercute en la limpieza de un cuarto limpio debido a la acumulación de partículas que quedan atrapadas en los poros del material.
- Con un proceso de manufactura por desbaste (sustracción de material), se ob-

tendrá un mejor acabado superficial y una mayor precisión dimensional que la manufactura aditiva; esto se corrobora de [107]: la rugosidad superficial media en un proceso de mecanizado está en un rango entre  $0.8 - 7 \mu\text{m}$ , y para la manufactura aditiva en un rango de  $3 - 40 \mu\text{m}$ , en ambos casos dependiendo del subproceso del que se trate.

Con base en estas observaciones, el doctor Alberto Caballero realizó algunas recomendaciones para poder seguir la línea de utilizar la manufactura aditiva para la creación de algunas piezas o en su caso, la utilización de algún polímero. La primera fue utilizar un polímero llamado PEEK (Polieterecetona), el cual es un material que se puede fabricar mediante manufactura aditiva por filamentos o mediante fusión de lecho de polvo, también se moldea por extrusión (para tubos), inyección y compresión, pero el proceso que mejor precisión dimensional y el que mejor acabado superficial proporciona, es el mecanizado (se han obtenido valores de  $0.5 \mu\text{m}$  de rugosidad superficial media con este proceso de manufactura) [108]. Este material es apropiado para componentes que trabajan en cuartos limpios, ya que “es un termoplástico con buena resistencia química y al desgaste, así como buena estabilidad dimensional y capacidad de procesamiento” (Mathia, 2010, pp 32). Se utiliza en equipos manipuladores de obleas y de fabricación de semiconductores, en aplicaciones en microelectrónica, tecnología de vacío; en engranes, rodamientos, válvulas o carcasas para bombas. Se puede combinar con fibra de vidrio o de carbono aumentado su resistencia mecánica, cuenta con un excepcional acabado superficial suave, baja tasa de contracción, baja generación de partículas ya que tiene alta resistencia al desgaste, bajo coeficiente de fricción (alrededor de 0.25-0.28 bajo 10 N de carga), módulo de elasticidad: 9,500 MPa y es un aislante eléctrico [109].

Por las propiedades de este material bajo el proceso de mecanizado, es una excelente alternativa para las piezas del brazo-antebrazo que están en contacto con el ambiente del cuarto limpio. El inconveniente de este material es que su venta en bruto o maquinado únicamente es bajo la presentación de tubos extruidos, barras sólidas o láminas de máximo  $24 \times 24 \times 2$  in ( $609.6 \times 609.6 \times 50.8$  mm), lo cual no coincide con las dimensiones de algunas de las piezas que están en contacto con el ambiente del cuarto limpio (el brazo y el antebrazo principalmente). Es un material relativamente nuevo (de principios del siglo XXI) y es un material muy costoso, por lo que los proveedores no manejan mecanizados o venta de bloques para piezas mayores de las especificadas [110].

La segunda recomendación que realizó el Dr. Alberto Caballero fue utilizar el proceso Polyjet junto con un proceso de acabado superficial posterior a la manufactura de la pieza, por ejemplo, mecanizado, esto para corregir la rugosidad superficial de las piezas; “para obtener unos buenos requisitos de salida; y para un mejor acabado, se hace uso de operaciones posteriores, como operaciones de mecanizado, abrasión y micromecanizado y mecanizado por láser (Kumbhar y Mulay, 2016)” [107].

El proceso Polyjet implica la utilización de polímeros, y las calidades que se obtienen con estos materiales son deficientes. Se ha comprobado que el mecanizado como proceso posterior a la fabricación de una pieza mediante manufactura aditiva con polímeros, ha mejorado la calidad superficial en cuanto a la rugosidad:

1. Muestras de ABS-P400 fabricadas mediante manufactura aditiva FDM, presentan rugosidades de entre  $17$  y  $50 \mu\text{m}$ , y aplicando un proceso posterior de mecanizado

(fresado CNC de tres ejes), se obtuvieron valores de rugosidades de entre 2.5 y 20  $\mu\text{m}$  (Boschetto et al., (2016)) [107].

2. Muestras de lentes ópticos VeroClear RGD810 fabricadas mediante manufactura Polyjet, presentan rugosidades de entre 0.14 y 1.07  $\mu\text{m}$ , y aplicando un proceso posterior de mecanizado mediante torneado con diamante, se obtuvieron valores de rugosidad superficial de entre 0.14-0.32  $\mu\text{m}$  (Huang et al., (2007)) [107].

Las rugosidades presentadas para el material VeroClear RGD810 después de un proceso posterior de mecanizado con diamante, son equivalentes a un acabado superficial de alto pulido tipo N5 o N6; utilizando este material con ambos procesos de manufactura, se cumpliría uno de los criterios de diseño establecidos en cuanto a acabado superficial. A continuación, se describe el material y el proceso de manufactura que tendrá cada una de las piezas contempladas en la propuesta de diseño presentada con base en la discusión anterior.

#### Brazo, BrazoTapa, Antebrazo y AntebrazoTapa:

Estas piezas ensambladas constituyen una carcasa para el sistema de transmisión y demás componentes necesarios para el funcionamiento del antebrazo, por lo que tienen la función de darle una estructura rígida al conjunto brazo-antebrazo y también de proteger al ambiente del cuarto limpio de las partículas generadas al interior del brazo y del antebrazo, por lo que es importante una calidad dimensional con tolerancias cerradas (para que las piezas ensambladas no permitan la salida de partículas) y un acabado superficial de alto pulido (para que no exista acumulación de partículas y un posible arrastre de ellas con el flujo de aire del cuarto limpio). Estos criterios de diseño se cumplen al fabricar estas piezas con **manufactura aditiva (tecnología Polyjet) con el material polimérico VeroClear RGD810**, junto con un **proceso posterior de mecanizado con diamante**, que consta de un proceso de arranque de viruta con una herramienta de diamante policristalino. El mecanizado, además de corregir la rugosidad superficial, mejora las tolerancias dimensionales de las piezas.

Este material se caracteriza por una gran estabilidad dimensional, y junto con el proceso de mecanizado, se logran las rugosidades adecuadas. El uso de la manufactura aditiva permite que se puedan lograr piezas huecas y con geometrías complejas, se pueden generar redondeos, escalones y chafanes, lo cual permite un diseño aerodinámico necesario para el flujo del cuarto limpio. Tanto el Brazo como su tapa y el Antebrazo, tienen roscas, por lo que es necesario un mecanizado de rosca interior que permita realizar esta operación, esto debe ser posterior a la manufactura aditiva.

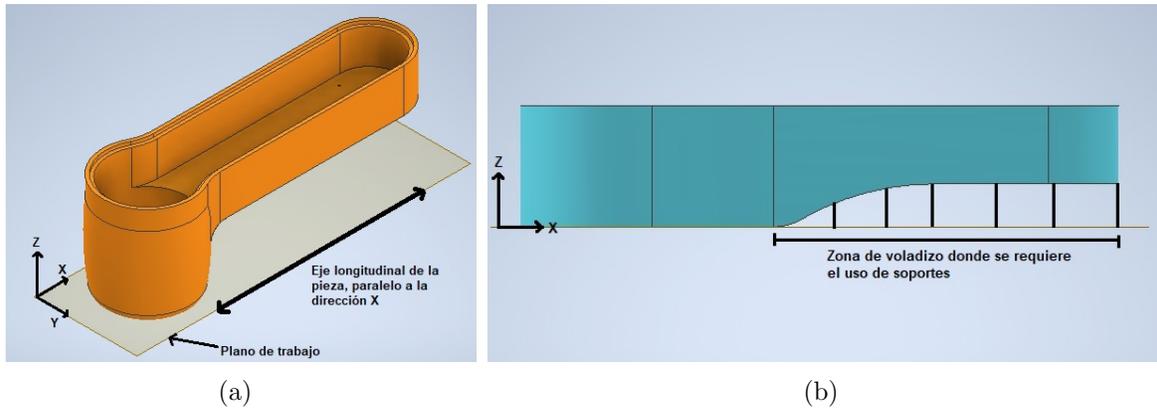


Figura 3.4.6. En a) se aprecia la orientación de fabricación junto con el plano de trabajo donde comienza la manufactura de la pieza; en b) se observan las zonas de voladizo donde es necesario utilizar soportes. Estas características aplican tanto para el Brazo como para el Antebrazo. Nota: los soportes indicados en la figura no necesariamente corresponden al número de soportes a utilizar en la realidad.

La geometría del Brazo y del Antebrazo implica el uso de soportes durante la fabricación aditiva para sostener las partes que están en voladizo, como es la cavidad larga de estas piezas que termina en la articulación (en el caso del brazo) y el extremo opuesto a la articulación (en el caso del antebrazo). Las zonas que requieren soporte y que están en contacto con la mesa de trabajo son las superficies inferiores del brazo y del antebrazo, las cuales, sólo con la manufactura aditiva, tendrán un acabado superficial mate como se mencionó anteriormente, lo cual no afecta en el flujo de aire del cuarto limpio pues la dirección de flujo es de arriba hacia abajo (dirección Z, sentido negativo); aún así, con el proceso de mecanizado, el acabado superficial de la pieza resulta homogéneo. Las marcas resultado de los soportes pueden fácilmente removerse con chorro de agua sin dejar huella.

La orientación de fabricación para la tapa del brazo y del antebrazo sería la mostrada en la figura 3.4.7; si fuera en sentido contrario, la fabricación de los escalones implicaría el uso de mucho material de soporte.

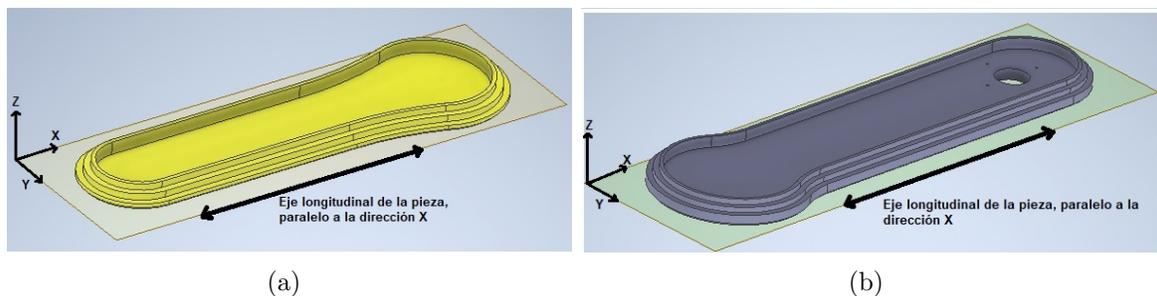


Figura 3.4.7. Orientación de la pieza y plano el trabajo e inicio de la pieza para las piezas AntebrazoTapa y BrazoTapa respectivamente.

### SoporteMotor:

Esta pieza puede ser fabricada mediante **manufactura aditiva (tecnología Polyjet) con el material polimérico VeroClear RGD810**, omitiendo el proceso posterior de mecanizado con diamante ya que no es una pieza que necesite corrección de rugosidad porque no está en contacto con el ambiente del cuarto limpio. De igual manera que el caso anterior, la pieza necesita un mecanizado de rosca interior pero no con herramienta de diamante. La geometría de la pieza es adecuada para este proceso de manufactura porque cuenta con cavidades, agujeros, y la dirección de fabricación es clara, en dirección Z ya que las paredes delgadas son verticales, y se puede aprovechar que la pieza cuenta con una cara sobre el plano XY (la cual corresponde a donde se atornilla el motor, para que la pieza comience a manufacturarse desde ese plano. Por lo tanto, el plano de la mesa de trabajo y la dirección de fabricación resultan como los mostrados en la figura 3.4.8.

En este caso, el eje longitudinal de la pieza no es paralelo al eje X o a la cama de fabricación, debido a que, si se coloca de esa manera, para fabricar la pieza se necesitaría mucho material de soporte para generar la cavidad. Colocada como se muestra en la figura, únicamente se tendrían que utilizar soportes para manufacturar las pestañas que tiene la pieza que se utilizan para atornillarla a la base del brazo, ya que son geometrías que están en voladizo. La pieza no sufrirá cargas significativas como para que la orientación de impresión tenga que ser diferente.

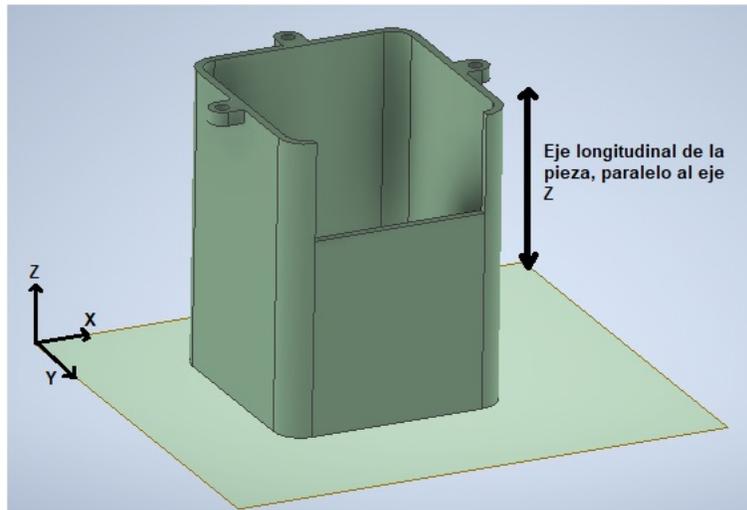


Figura 3.4.8. Dirección de fabricación y plano el trabajo e inicio para la pieza SoporteMotor.

### RodamientoMagnético y CarcasaRodamiento:

Estas piezas pueden ensamblarse a presión después de ser fabricadas con **manufactura aditiva con el proceso Polyjet, con el material VeroClear RGD810**. La orientación de fabricación de ambas piezas es similar a la orientación para el soporte del motor, se aprovecha la cara que está sobre el plano de trabajo para comenzar sobre esa área la manufactura, pero el eje longitudinal de la pieza es paralelo a la cama de fabricación (X ó Y, en este casi, miden lo mismo), como se muestra en la figura 3.4.9.

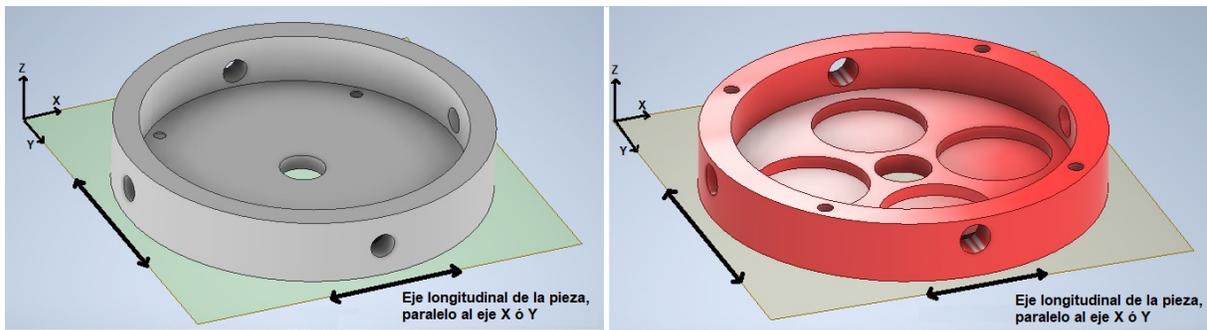


Figura 3.4.9. Dirección de fabricación y plano el trabajo para las piezas: CarcasaRodamiento (a la izquierda) y RodamientoMagnético (a la derecha).

Utilizando únicamente este proceso, se obtienen las tolerancias necesarias en cada pieza para realizar su ensamble (comparar las tolerancias mostradas en la figura 3.3.14 y la tabla 3.4.1); pero las tolerancias que se obtienen con este proceso de manufactura generarían que el espacio entre el eje de la transmisión y el agujero tanto de la carcasa como del rodamiento, no sea exactamente de 1 mm; para que esto se cumpla, sí sería necesario un **proceso de posterior de mecanizado con diamante** únicamente en el agujero destinado al eje para alcanzar dicha holgura entre las piezas mencionadas, las demás superficies pueden no ser mecanizadas ya que no están en contacto directo con el ambiente del cuarto limpio, por lo que no es necesario corregir su rugosidad superficial. Se propone utilizar este material porque es aislante eléctrico, y al estar estas piezas cubriendo las bobinas que generarán un campo magnético, es recomendable no utilizar elementos metálicos para que no afecte el campo generado.

#### Mamelón:

La precisión dimensional en esta pieza es fundamental para que se logre el ajuste necesario con la pieza BrazoTapa ya que es una zona del ensamble del brazo-antebrazo en la que el espacio es crítico pues si es un ajuste muy apretado, habría fricción (interferencia entre las piezas), y si existiese mucha holgura, habría demasiado espacio para la salida de partículas hacia el ambiente del cuarto limpio. Además de este ensamble, el mamelón también necesita tolerancias incluso más cerradas para poder ser ensamblado con el eje de transmisión y con el antebrazo, tolerancias que no cumple el proceso de manufactura aditiva Polyjet (ir al Apéndice B, Plano No. 11 para observar las tolerancias a las que se hace referencia). Para las piezas del brazo, antebrazo y sus respectivas tapas, no era posible utilizar el material PEEK por las dimensiones de las piezas, pero el Mamelón es una pieza que sí se ajusta a las dimensiones para maquinarse en PEEK. El mecanizado de este material permite alta precisión, alta repetibilidad, tolerancias dimensionales cerradas (0.006 mm [111], 0.007 mm [112] si se utilizan herramientas de diamante), tiene un acabado superficial tipo alto pulido ( $0.5 \mu\text{m}$  de rugosidad superficial media con este proceso de manufactura [108]); aunque debe tenerse cuidado porque presenta dificultades para disipar el calor, necesita utilizarse refrigerante, y en ocasiones suele utilizarse un tratamiento de recocido para disminuir las tensiones internas generadas durante el mecanizado [113]. Se ha encontrado en la literatura que el **PEEK natural** presenta mejores precisiones dimensionales y mejor maquinabilidad que en los casos

de PEEK reforzado con fibra de vidrio o fibra de carbono [114]. A continuación, en la figura 3.4.10 se observan algunas piezas de este material, maquinadas.



Figura 3.4.10. Piezas de PEEK maquinadas. Obtenida de [115].

#### Eje:

Esta pieza tiene la particularidad de que debe ser de un material ferromagnético para que el rodamiento magnético pueda sostenerlo radialmente gracias al campo electromagnético creado alrededor del eje. Para esta propuesta de diseño, esta pieza será manufacturada mediante mecanizado (específicamente torneada y rectificada) para obtener las tolerancias adecuadas para el ensamble de la PoleaConducida, del Mamelón y del Anillo de retención. En los cuartos limpios es común utilizar piezas de acero inoxidable 304L porque implica excelente limpieza, resistencia a la corrosión, buena resistencia a la tracción; se prefiere para piezas móviles críticas que tengan que ser inoxidable, de lo contrario, es recomendable utilizar aluminio porque es más liviano que el acero. En el caso de la presente propuesta de diseño se utilizará un acero inoxidable por su resistencia a la corrosión. El acero 304L es austenítico, el cual no cumple la condición de tener alta permeabilidad magnética, por lo que se sustituirá por un **acero ferrítico como es el 430**, en barra sólida, con un diámetro ligeramente mayor que 8 mm para poder maquinarlo y llegar a las medidas indicadas en el plano correspondiente al eje (Apéndice B, Plano. No. 12). Este tipo de acero inoxidable es ferromagnético y tiene buena resistencia a la corrosión.

#### PoleaMotriz y PoleaConducida:

Ambas poleas ya están manufacturadas de fábrica por Optibelt® para su venta, como se especifica en el apartado *3.2 Selección de la transmisión*. Únicamente se le tiene que hacer una modificación a la PoleaMotriz debido a que no cuenta con agujero para el eje del motor. Éste se debe hacer con un proceso de fresado y rectificado para lograr las tolerancias descritas anteriormente y por lo tanto, el ajuste deseado con el eje del motor.

A la PoleaConducida no es necesario modificarle el agujero que tiene de fábrica para un eje, ya que los ajustes están calculados para un agujero único (cuando no cambian las dimensiones del agujero, en este caso, el de la polea conducida). A ambas poleas se les debe hacer el agujero correspondiente al tornillo prisionero y su respectiva rosca.

A continuación, en la tabla 3.4.2 se presenta un resumen de los procesos de manufactura contemplados para las piezas de la propuesta de diseño presentada junto con el material a utilizar. También se especifica si es el caso de que la pieza ya está manufacturada, en este caso procede una compra con las especificaciones técnicas antes descritas.

Pieza	Proceso de manufactura	Material	Observaciones
Brazo, Antebrazo, BrazoTapa y AntabrazoTapa	1.Manufactura aditiva (tecnología Polyjet). 2.Mecanizado con diamante.	VeroClear RGD810 de la familia Vero de Stratasys®	Primero se realiza la manufactura aditiva y posteriormente el mecanizado.
SoporteMotor	Manufactura aditiva (tecnología Polyjet).	VeroClear RGD810 de la familia Vero de Stratasys®	Esta pieza no necesita un mecanizado posterior.
RodamientoMagnético y CarcasaRodamiento	1.Manufactura aditiva (tecnología Polyjet). 2.Mecanizado con diamante.	VeroClear RGD810 de la familia Vero de Stratasys®	El mecanizado de diamante sería únicamente en el agujero que ambas piezas tienen destinado a envolver el eje de la transmisión para lograr la holgura deseada.
Mamelón	Mecanizado con diamante	PEEK natural	
Eje	1.De fábrica. 2.Torneado y rectificado	Acero inoxidable 430	La barra debe ser redonda, de 3/8" de diámetro (9.525 mm) para rebajarla al tamaño adecuado para las tolerancias requeridas.
Motor Thomson (servomotor) BLD-2310D10100	Manufactura de fábrica.	Variado.	

Tabla 3.4.2. Resumen de los procesos de manufactura para cada pieza junto con el material y algunas observaciones.

<b>Pieza</b>	<b>Proceso de manufactura</b>	<b>Material</b>	<b>Observaciones</b>
PoleaMotriz	1.Manufactura de fábrica. 2.Fresado y rectificado. 3.Maquinado para agujero y rosca.	Aluminio 6082 T6	El proceso de fresado y rectificado únicamente es para hacer el agujero para la entrada del eje del motor. Maquinado para la rosca donde va el tornillo prisionero
PoleaConducida	1.Manufactura de fábrica. 2.Maquinado para agujero y rosca	Aluminio 6082 T6	Maquinado para la rosca donde va el tornillo prisionero
Banda de transmisión	Manufactura de fábrica.	Poliuretano	
Tornillos, tuercas y rondanas,	Manufactura de fábrica.	Acero, depende del fabricante.	
Anillos de retención	Manufactura de fábrica.	Acero inoxidable 440C	

Tabla 3.4.2. Continuación.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1 Secuencia de movimiento

Habiendo descrito las especificaciones técnicas de ensamble y manufactura para la propuesta de diseño, a continuación se muestra un conjunto de imágenes del brazo-antebrazo con distintas posiciones angulares del brazo y del antebrazo, con la finalidad de observar que este diseño puede realizar la secuencia del movimiento descrito en la figura 3.2.1 (de a) a d), ya que para los movimientos posteriores se repiten los movimientos pero en sentido inverso). Debe considerarse que en el diseño no contempla un efector final que sostiene los discos a transportar, y que únicamente se muestra el conjunto brazo-antebrazo sin estar ensamblados a una estructura principal. Las vistas son isométricas para una mejor apreciación y desde un mismo punto de referencia.

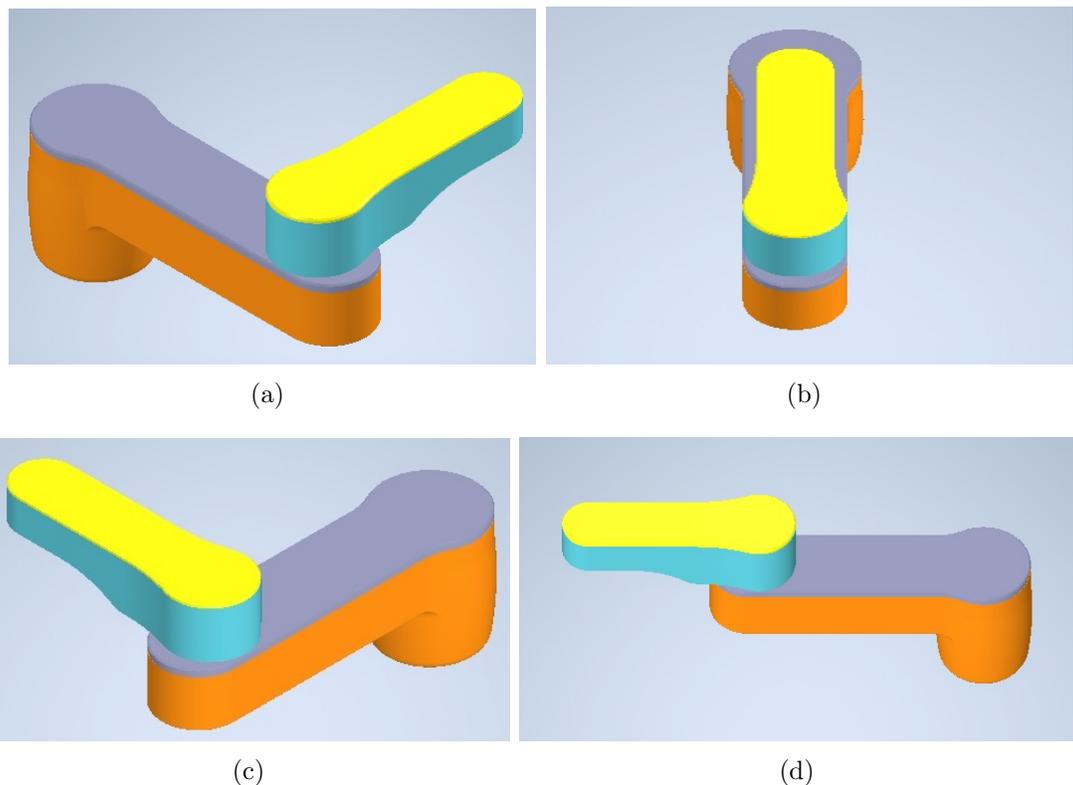


Figura 4.1.1. a) Primer inciso de la secuencia del movimiento. El antebrazo forma  $45^\circ$  con respecto al plano de observación. b) Segundo inciso, en el que el brazo y el antebrazo están alineados pero en la mínima extensión. c) Es una posición simétrica a la posición en a). En d), el antebrazo y el brazo están alineados pero en su máxima extensión.

Si se compara la configuración final del brazo-antebrazo mostrada en la figura 4.1.1 y en las figuras de la sección 3.1 *Generalidades sobre el diseño*, con la mostrada en las figuras 2.7.1, 2.7.5 y 2.7.6 de la sección 2.7 *Propuesta de configuración final*, se observa que la disposición de brazo y del antebrazo, del motor y de la transmisión, se ha conservado,

únicamente se hicieron modificaciones sobre la marcha en cuanto a la colocación de los rodamientos magnéticos y la manera de ensamblar el brazo con el antebrazo por medio del mamelón.

## 4.2 Simulación de análisis de cargas por elemento finito

Dado que la propuesta de diseño es para un robot tipo SCARA, en el que los eslabones están ensamblados uno después de otro (el mismo brazo y antebrazo representan un brazo de palanca para el sistema en general), y en particular en este diseño, existe un motor ubicado para contrarrestar el peso del brazo mismo y del antebrazo, es necesario realizar un análisis estático lineal del sistema bajo condiciones de trabajo. Para esto, se utilizó el mismo programa Inventor® que permite realizar un análisis de tensión del ensamble para conocer el desplazamiento de las piezas sometidas a ciertas cargas.

Si se retoma la idea de que el conjunto brazo-antebrazo deberá estar, en su momento, ensamblado en una estructura principal que permita el movimiento rotacional del brazo y en el eje vertical, tal y como se muestra en la figura 2.5.4, se ha determinado que existen tres fuerzas implicadas para este análisis, que no son colineales a donde pudiera estar ubicada la estructura principal:

- La fuerza que genera la masa del motor que mueve al antebrazo junto con la PoleaMotriz que está ensamblada al mismo. La masa del motor es de 0.400 kg, y la masa de la PoleaMotriz la proporciona el programa Inventor® con base en el material asignado y el volumen de la pieza; es de 0.020 kg. Ambas fuerzas se suman debido a que son colineales, y el punto de aplicación de la fuerza resultante es en la cavidad del brazo destinada a contener el motor. Por lo tanto:  
 $F1 = (0.400kg + 0.020kg) * (9.81m/s^2)$ , **F1=4.1202 N**. Para el análisis, se han desactivado del ensamble el Motor y la PoleaMotriz y se han reemplazado por la fuerza ya calculada.
- La fuerza (**F2**) que resulta del peso de cada de las piezas contempladas en el ensamble, ubicada en el centro de gravedad del ensamble mismo (considerado como un cuerpo único en su totalidad). En este caso, el programa únicamente coloca una fuerza ubicada en el centro de gravedad.
- La fuerza que genera una oblea de silicio de 20 gramos en el extremo libre del antebrazo. En el presente trabajo no se contempla el diseño del efector final que sostiene la oblea o disco de silicio; en su lugar, se ha simulado que la oblea está colocada en el extremo más alejado del antebrazo.  $F3 = (0.020kg) * (9.81m/s^2)$ , **F3=0.1962 N**.

La aplicación de las tres cargas mencionadas se observa en la figura 4.2.1.

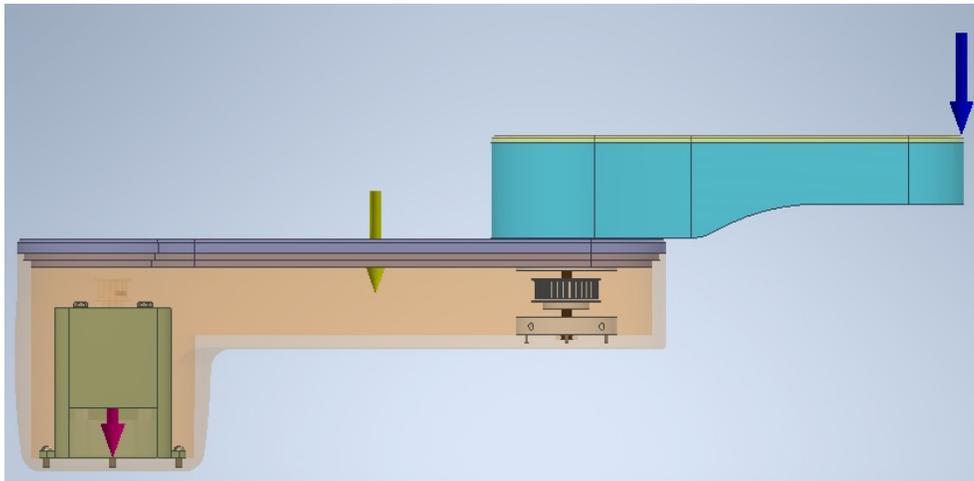


Figura 4.2.1. Aplicación de las fuerzas F1 (rosa), F2 (amarillo) y F3 (azul) para la simulación de condiciones de trabajo.

Para el análisis, es necesario definir un punto de apoyo o de sujeción del ensamble que no permita movimiento. En este caso, siguiendo la configuración 4 seleccionada, si la estructura principal se posiciona debajo del brazo, ésta puede colocarse muy cerca de la cavidad donde se aloja el motor o más cerca de la articulación del brazo-antebrazo. Se propone que la distancia de sujeción, y por lo tanto, la zona donde el sistema brazo-antebrazo quedará sostenido, sea de **140 mm** de centro a centro desde el centro de la cavidad para el brazo hasta el punto de apoyo, que se considerará como un área circular de 100 mm de diámetro. El centro del punto de apoyo se observa en la figura 4.2.2 como un cuadro blanco sobre la parte inferior del brazo.

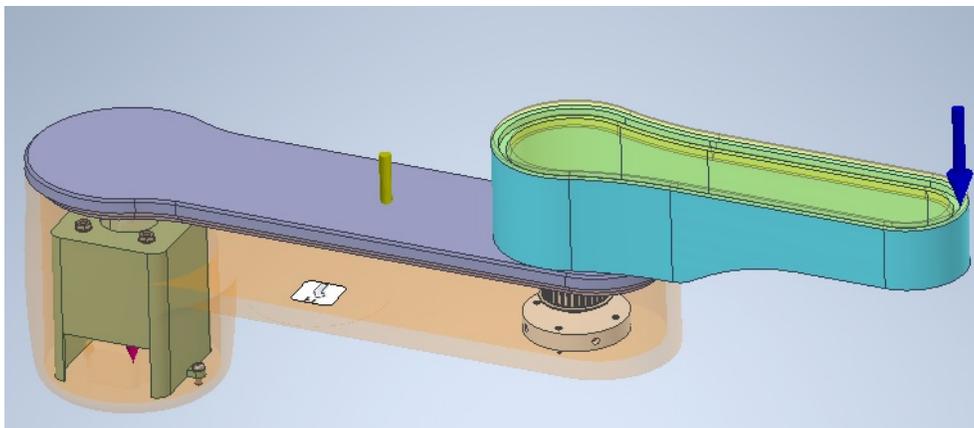


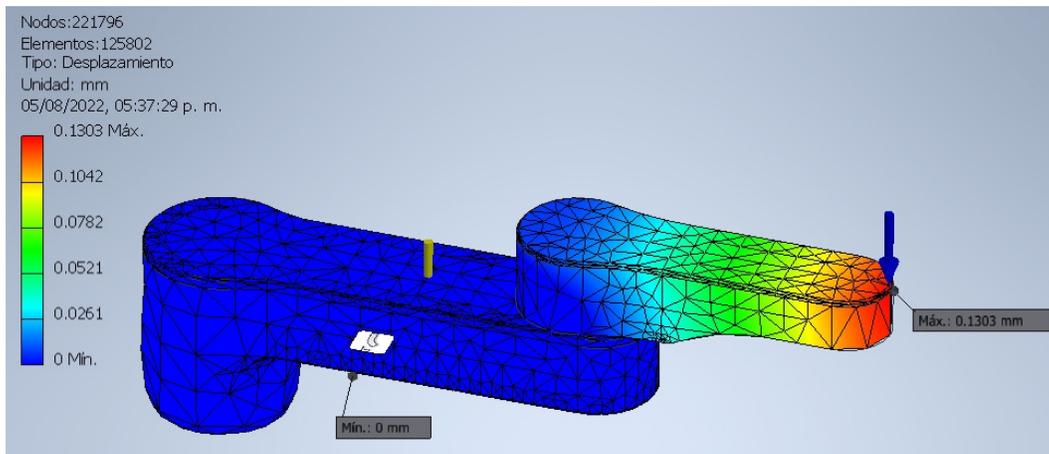
Figura 4.2.2. Colocación del punto de sujeción del sistema. Este punto representa a una estructura principal donde descansa el sistema brazo-antebrazo.

Como parte del análisis, se debe asignar un material a cada pieza. La base de datos de Inventor® no contempla el material Vero Clear RGD 810, que forma parte de la propuesta de diseño. Se determinó que este material es un metacrilato, el cual tiene

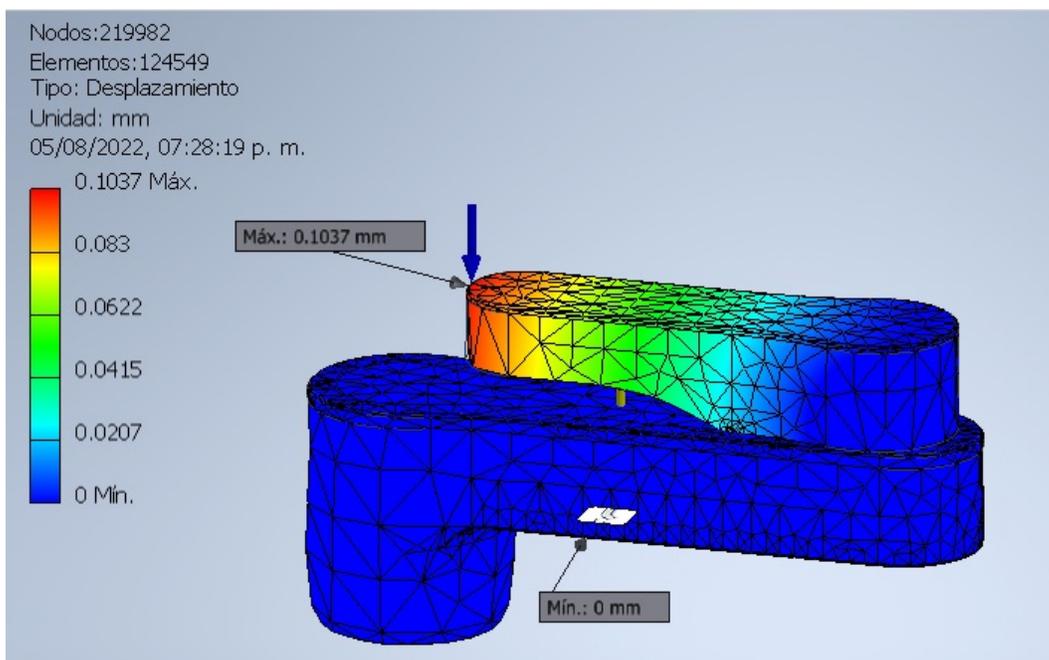
propiedades mecánicas muy parecidas al PMMA (Polimetilmetacrilato), por lo que este material se le asignará a las piezas: Brazo, Antebrazo, BrazoTapa, AntebrazoTapa, SoporteMotor, RodamientoMagnético y CarcasaRodamiento. Es similar el caso del material PEEK, pero en la base de datos del programa existe el material PAEK, el cual es la base del PEEK, por lo que al Mamelón se le asignó este material. En el caso del Eje, se le asignó un acero inoxidable AISI 430; para la PoleaMotriz y PoleaConducida, un aluminio 6061 T6, el cuál es el más parecido mecánicamente al aluminio 6082 T6. La tornillería utilizada en el programa por defecto tiene asignado el material Acero suave.

El parámetro a analizar es el desplazamiento que puede llegar a sufrir el sistema completo debido a las cargas antes mencionadas. La zona del sistema que más desplazamiento puede sufrir es el extremo del antebrazo (en la disposición de máxima extensión del antebrazo, por lo que se pondrá especial atención cuando el brazo y el antebrazo estén en esta posición). Se puede considerar como una viga en cantiliver o voladizo que además tiene una carga (por mínima que sea) en su punto más alejado. El desplazamiento que llegue a presentar el antebrazo, repercutirá en el efector que se llegue a ensamblar en él, y por lo tanto en el momento de tomar o dejar la oblea de silicio en su lugar. Las obleas se llevan de una casetera a otra (un sistema de almacenamiento por repisas, en cada repisa se guarda una oblea de silicio); ver figura 2.2.1 a). Las repisas están separadas por 5 mm entre sí, por lo que una desviación vertical mayor a 0.1 mm del plano del antebrazo, se amplificaría en el efector y afectaría en la toma y colocación de una oblea. Los análisis se realizaron para la configuración del brazo-antebrazo con ese último dispuesto en su máxima y en su mínima extensión, ya que la colocación del punto de sujeción puede ser óptima para una disposición pero no para otra.

Se procedió a realizar el análisis por elemento finito, en el cual se obtuvo el siguiente resultado de desplazamiento:



(a)



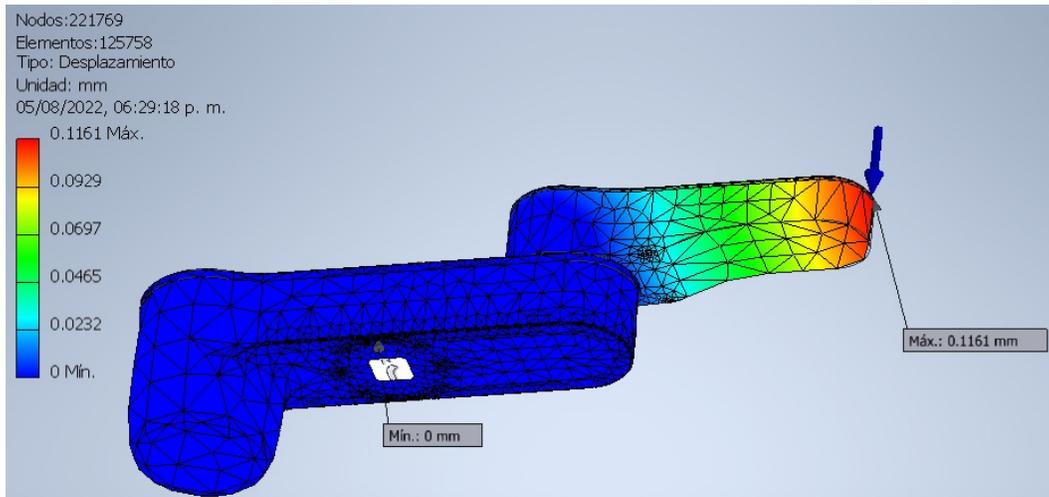
(b)

Figura 4.2.3. Resultado de desplazamiento a través del análisis por elemento finito para a) la máxima extensión del brazo-antebrazo y para b) la mínima extensión del brazo-antebrazo. Se observa a la izquierda una escala de colores con las magnitudes correspondientes. También se señalizan los puntos con el desplazamiento máximo y el mínimo. El punto de sujeción se encuentra próximo a la cavidad donde se aloja el motor (140 mm).

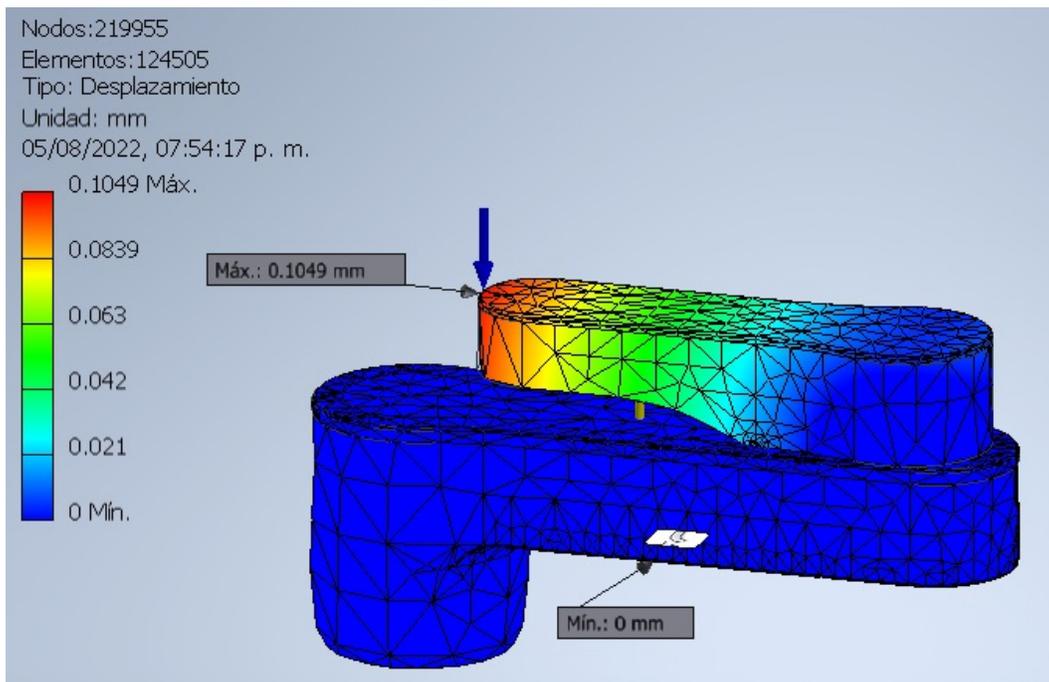
En la figura 4.2.3 se observa que el desplazamiento máximo se encuentra en el extremo libre del antebrazo, como se predijo. La masa del antebrazo (calculada con el programa), es de 700 g, y la masa del motor es de 400 g, por lo que la causa que mayor efecto tiene en el desplazamiento es la masa misma del antebrazo y no la fuerza ejercida por el disco de silicio, que tiene una masa insignificante. El desplazamiento es mayor a 0.1 mm, así que se propone cambiar la distancia donde se sujeta el brazo-antebrazo, por una distancia más cercana al centro de gravedad o inclusive a la articulación para que exista un menor momento (torque). La distancia ahora será de **175 mm**, que es la

mitad de la distancia de centro a centro del brazo.

Se procedió a realizar el análisis por elemento finito con las mismas condiciones de carga, únicamente variando la distancia a la que se encuentra el punto de sujeción. Se obtuvo el siguiente resultado de desplazamiento:



(a)

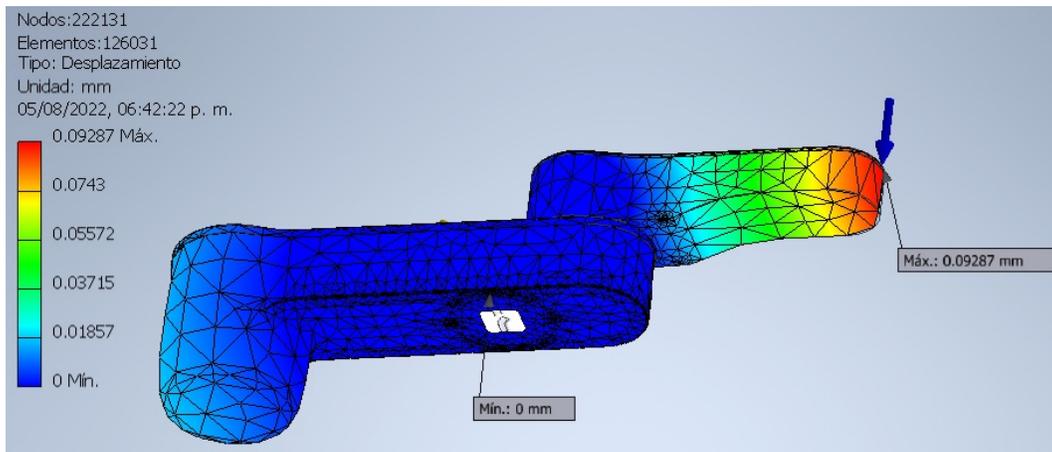


(b)

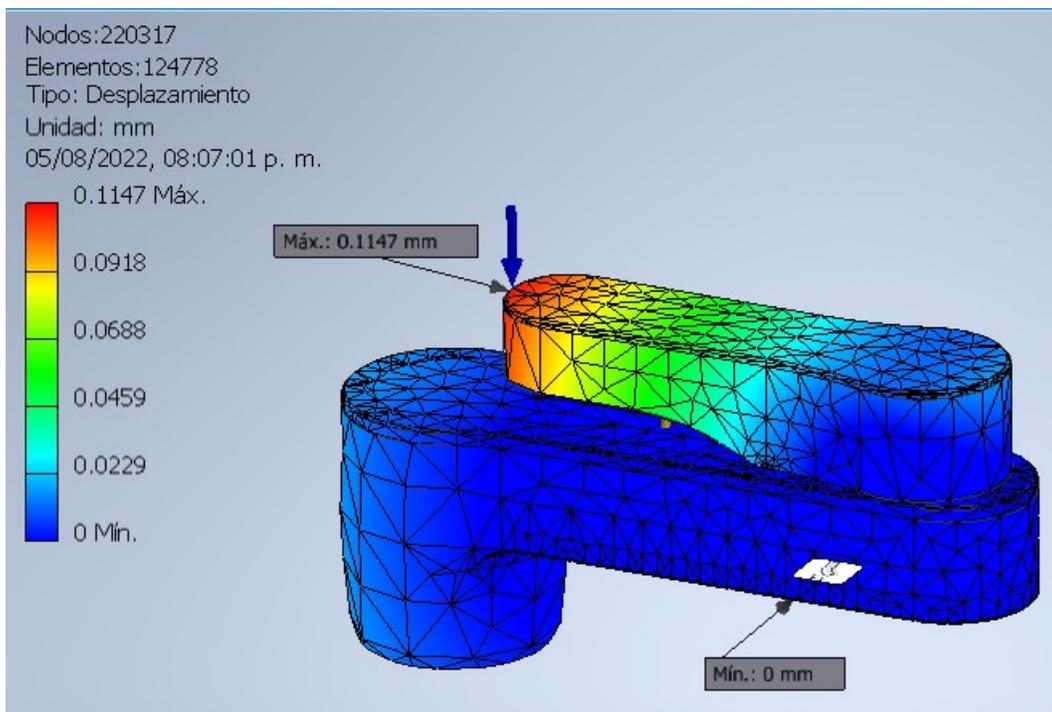
Figura 4.2.4. Resultado de desplazamiento a través del análisis por elemento finito, en a) la máxima extensión del brazo-antebrazo y para b) la mínima extensión del brazo-antebrazo. En este caso el punto de sujeción se encuentra a la mitad de la distancia entre centro y centro del brazo (175 mm). Las vistas son isométricas, inferior en a) y superior en b) para una mejor apreciación del punto de sujeción.

En la figura 4.2.4 se observa que el desplazamiento máximo para el antebrazo completamente extendido (0.1161 mm), es menor que en el caso anterior. Este desplazamiento se puede reducir aún más si se mueve la zona de sujeción a un punto más alejado de la cavidad donde se aloja el motor. Como una tercer propuesta, se realizará el análisis considerando que el punto de sujeción estará a tres cuartas partes (**262.5mm**) de la distancia entre centros del brazo, tomada desde la cavidad para el motor. El desplazamiento máximo del brazo-antebrazo en su mínima extensión, aumentó a comparación del análisis anterior. Conforme se modifique la distancia a la cual está el punto de sujeción, los valores de desplazamiento para el caso del brazo-antebrazo extendido o recogido, cambiarán de manera inversa.

Se procedió a realizar el análisis por elemento finito con las mismas condiciones de carga, únicamente variando la distancia a la que se encuentra el punto de sujeción. Se obtuvo el siguiente resultado de desplazamiento:



(a)



(b)

Figura 4.2.5. Resultado de desplazamiento a través del análisis por elemento finito, en este caso el punto de sujeción se encuentra a tres cuartas partes de la distancia entre centros del brazo, tomada desde la cavidad para el motor (262.5 mm). Las vistas son isométricas, inferior en a) y superior en b) para una mejor apreciación del punto de sujeción.

En la figura 4.2.5 se observa que el desplazamiento máximo para el antebrazo completamente extendido, es menor que en el caso anterior y menor a 0.1 mm (ahora es de 0.09287 mm). Este desplazamiento se ha reducido a comparación del análisis anterior, y el desplazamiento para el antebrazo completamente recogido aumentó a un valor de 0.1147 mm; sin embargo, esta posición del punto de sujeción está más cercana a la articulación, por lo que puede dar mayor estabilidad al sistema considerando que el antebrazo tiene una mayor masa que el motor en el brazo.

Aunque el lugar de sujeción no forma parte de esta propuesta de diseño, debido a la configuración y peso de las piezas, se hace una sugerencia de posicionamiento del brazo-antebrazo en una estructura principal ya manufacturada. La posición que mejor comportamiento proporciona en cuanto al desplazamiento, es la tercera (en la que la zona de sujeción se encuentra a 262.5 mm, medidos a partir de la cavidad donde se aloja el brazo). Se comprueba que la propuesta de diseño (configuración, materiales, geometría y espesores de las piezas) proporciona un desplazamiento del antebrazo óptimo para el traslado de un disco de silicio de una casetera a otra.

## Conclusiones y trabajo futuro

La utilización de robots en la industria de la microelectrónica es cada vez mayor debido a la miniaturización de los circuitos electrónicos. Esto conlleva al manejo preciso de los componentes y al cuidado que se debe tener en cuanto al control de variables externas como lo es la limpieza del entorno de trabajo.

La contaminación por partículas provenientes de la vestimenta de las personas, del cabello, células muertas y demás fuentes de contaminación, se ha eliminado al trabajar en cuartos limpios o salas limpias con robots que sustituyen el trabajo humano, pero ello no asegura el nivel de limpieza adecuado para el funcionamiento del cuarto de trabajo. Todo mecanismo interno en un robot que contenga partes con movimiento relativo entre sí y se toquen, implica fricción y por lo tanto generación de partículas por desprendimiento. Se ha explicado anteriormente el problema que esto conlleva en el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos.

Con base en estos antecedentes, se planteó la generación de una propuesta de diseño no para extraer del robot las partículas generadas, sino minimizar la generación de las mismas. Para llevar a cabo esta propuesta, se utilizó una metodología de diseño que contempla los siguientes puntos: identificación de la necesidad después de haber realizado una revisión bibliográfica sobre el tema; identificación de los requerimientos y criterios de diseño que necesita cumplir la propuesta; generación de conceptos o alternativas que proporcionan posibles soluciones; evaluación de las distintas alternativas con base en los requerimientos y especificaciones; y por último, se realizó el diseño de detalle y elaboración de planos con la propuesta final, que incluye diseño y selección de componentes. Para la selección de los procesos de manufactura y materiales, se realizó una revisión bibliográfica para que la selección coincidiera con los criterios de diseño establecidos.

Siguiendo esta metodología de diseño, fue posible generar seis distintas alternativas de configuración de un brazo-antebrazo para un robot tipo SCARA cuya función es trasladar obleas de silicio de un punto a otro en un cuarto limpio.

La configuración seleccionada con base en una evaluación por comparación, fue la que presentaría un mejor desempeño en cuanto a las necesidades y requerimientos establecidos. Se trabajó en la mejora de esta configuración en cuanto a la geometría del brazo y del antebrazo, la selección de la transmisión para el movimiento de este último; el diseño de componentes contemplando minimizar la generación de partículas, al igual que la adaptación del espacio para el uso de rodamientos magnéticos radiales con la finalidad de sustituir a los rodamientos convencionales que son necesarios en las articulaciones para darle soporte a los ejes involucrados. Se diseñó la disposición de los rodamientos magnéticos junto con el diseño de una carcasa para contener sus componentes y poder colocarlos como una pieza única.

Como parte del diseño, se hizo una propuesta para utilizar la tecnología de manufactura aditiva Polyjet como proceso de fabricación en piezas críticas para su utilización

en un cuarto limpio, considerando las ventajas y desventajas que el proceso conlleva en cuanto a los requerimientos para el funcionamiento de piezas en un cuarto limpio, como son: tolerancias dimensionales, precisión, acabado superficial, materiales de trabajo compatibles y apropiados para su uso en un ambiente controlado; la importancia de la orientación de la pieza y post-procesos necesarios.

Después de realizar una revisión bibliográfica de las tecnologías del proceso de manufactura aditiva, se determinó que por sí misma, la tecnología Polyjet, cuyo rendimiento sobresale entre las diversas tecnologías existentes en la manufactura aditiva, solamente cumple con el 60 % de los requisitos necesarios en la propuesta de diseño. Es importante destacar que en ocasiones, es complicado lograr que un proceso de manufactura cumpla todos los requisitos existentes, y se tiene que optar por combinarlo con otros procesos, y evaluar si los procesos implicados hacen una mejora. Para este caso, la manufactura aditiva por sí sola, aún genera resultados deficientes para los requerimientos necesarios en el diseño presentado, y por eso se optó por combinarla con un proceso de mecanizado, del cual se tiene más conocimiento y manejo de tolerancias más precisas.

Durante la realización de la propuesta de diseño, se encontraron diversas problemáticas para las que fue necesario tomar una decisión entre una o más posibilidades de solución. Por ejemplo, para el caso de la conexión entre el brazo y el antebrazo, se utilizó la pieza llamada mamelón, la cual une las piezas mencionadas y a su vez permite el movimiento relativo entre ellas. En este punto se pudo haber considerado el uso de un sello o retén en el espacio entre el mamelón y la tapa del brazo para evitar la salida de partículas; pero esto implica fricción entre las piezas que se mueven y el sello. Se prefirió no generar más partículas contaminantes que pudieran salir directamente al entorno del cuarto limpio y sí reducir al máximo el espacio mencionado sin que hubiera fricción, aún existiendo la posibilidad de que partículas de otra fuente pudieran salir por el espacio entre el mamelón y la tapa del brazo. Habiendo esta posibilidad, se contempló que los elementos que pueden generar partículas, quedaran ubicados lo más alejados posibles de la conexión entre el brazo y el antebrazo, como lo es el anillo de retención utilizado, que incluso está protegido por el primer piso del rodamiento.

Otro ejemplo es la alternativa elegida que dio solución a la problemática de sostener axialmente al eje de la transmisión en la zona de la articulación. Se tiene presente que el uso de anillos de retención no es la opción que mejor desempeño proporciona por el hecho de que existe fricción entre componentes (de haber tenido que estar los anillos en una zona próxima a la unión entre el brazo y el antebrazo, no se hubiera elegido esta opción), pero es la más viable debido a que las otras dos alternativas contempladas (el uso de rodamientos axiales de bolas de vidrio o el uso de rodamientos magnéticos axiales) aún no son posibles para el diseño generado en la presente propuesta debido al espacio que estos componentes requieren.

Estas decisiones se tomaron después de un análisis de las distintas posibilidades, considerando siempre los criterios de diseño pero también la factibilidad técnica.

El análisis de los resultados muestra que la configuración propuesta (con la geometría, materiales y disposición de los elementos), es factible para el trabajo de mover obleas de silicio de un punto a otro. La magnitud desplazamiento del extremo libre del antebrazo donde se coloca un efector final, es menor a 0.1 mm, por lo el efector podrá tomar y dejar la oblea en la casetera sin necesidad de corregir este desplazamiento.

Esta propuesta de diseño está abierta a que en un futuro, se puedan implementar mejoras y llevar a cabo su fabricación, siguiendo la línea de limpieza dentro de este tipo de espacios de trabajo, teniendo en cuenta que debe haber un balance entre los diversos criterios de diseño. Como un trabajo a futuro para la puesta en marcha del presente diseño, se deberán realizar recomendaciones en cuanto al mantenimiento que debe tener el brazo-antebrazo para su correcto funcionamiento en una sala limpia. Como anteriormente se mencionó, todo mecanismo con partes que tengan movimiento entre sí, será una fuente de contaminación, por lo que se hace necesaria una revisión periódica de la transmisión, en especial de la banda dentada o el anillo de retención (si llegan a presentar signos de desgaste, cambiar inmediatamente aunque el tiempo de vida útil no haya llegado).

Una de las ventajas del uso de rodamientos magnéticos es que están exentos de lubricación, de igual manera al no haber fricción entre sus componentes, no es necesario realizar una limpieza o cambio de partes periódica a los elementos mecánicos, pero sí realizar un mantenimiento preventivo a la electrónica (a las bobinas, sensores y tarjeta utilizada), para asegurar su correcto funcionamiento.

Todo este tipo de medidas pueden realizarse a tiempo con ayuda del conteo de partículas generadas en el cuarto cada cierto tiempo para corroborar que no exista una fuente de contaminación que cambie los niveles de limpieza del cuarto, o mediante el seguimiento de los datos recabados a partir de los sensores. Si llegaran a existir irregularidades en las lecturas, se puede deber a un mal funcionamiento del motor, de los sensores o en la alimentación de las bobinas, lo cual repercute en la corrección de la posición del eje.

Otro aspecto a trabajar a futuro es el diseño del efector final que sostiene al disco u oblea de silicio; de igual manera debe cumplir con los criterios de diseño establecidos, tomando en cuenta que el disco debe sostenerse siempre por debajo y será trasladado desde una casetera con dimensiones cercanas al diámetro del disco.

El alcance de las distintas soluciones que se le puede dar al problema de contaminación por partículas en la utilización de robots en cuartos limpios, se puede trasladar a otras industrias aparte de la microelectrónica, como por ejemplo son el crecimiento de cultivos en microbiología, y fabricación y colocación de lentes en equipos para investigación astronómica.

## Referencias

- [1] ESC. Distribuidor de productos Cleanroom y de Higiene Industrial. (16 de febrero de 2018). *La importancia de los cuartos limpios en la industria farmacéutica*. Recuperado el 2 de marzo de 2021 de: <https://elsauz.com/la-importancia-de-los-cuartos-limpios-en-la-industria-farmacautica/>
- [2] Goneat. Clean Room Laundry. (7 de noviembre de 2018). *Tipos de cuartos limpios*. Recuperado el 2 de marzo de 2021 de: <https://goneattijuana.wordpress.com/2018/11/07/tipos-de-cuartos-limpios/>
- [3] Castaño Sánchez, J.C., Orozco Hincapié, C.A. (Junio de 2008). Metodología para el diseño de cuartos limpios. *Scientia et Technica*, (38), pp 187-192.
- [4] American Cleanrooms Systems. Experts in Pharmaceutical, Medical Device & Industrial Cleanrooms. (2021). *Cleanroom Classifications*. Recuperado el 2 de marzo de 2021 de: <https://www.americancleanrooms.com/cleanroom-classifications/>
- [5] SurgiCube International. Regulatory Cleanroom Standards. (1 de marzo de 2017). *FS209E and ISO Cleanroom Standards*. Recuperado el 4 de marzo de 2021 de: [https://surgicube.com/wp-content/uploads/2017/03/7.1\\_Regulatory\\_FS209E-and-ISO-Cleanroom-Standards.pdf](https://surgicube.com/wp-content/uploads/2017/03/7.1_Regulatory_FS209E-and-ISO-Cleanroom-Standards.pdf)
- [6] Bimos. (2021). *Around the cleanroom-important things to know about working in cleanrooms*. Recuperado el 4 de marzo de 2021 de: <https://www.bimos.com/B/uk-en/news/2996/around-the-cleanroom---important-things-to-know-about-working-in-cleanrooms#4>
- [7] Pedroza Meléndez, A. (2012). Las salas blancas para microelectrónica como un modelo para evitar infecciones nosocomiales. *Revista Mexicana de Cirugía del Aparato Digestivo*, 1(2), pp 87-92.
- [8] Nieto, A. (2018). *Áreas Clasificadas: Elementos para Ambientes Exigentes*. Mundo HVAC&R. Recuperado el 6 de marzo de 2021 de: <https://www.mundohvacr.com.mx/2010/06/areas-clasificadas-elementos-para-ambientes-exigentes-2/>
- [9] AQ. Air Quality De México. (4 de abril de 2016). *Cuarto limpio*. Recuperado el 16 de marzo de 2021 de: <https://www.aqdemexico.com/cuarto-limpio/>
- [10] Barbosa Torres, J. C. (2006). *Transmisión a base de levaduras para robot de cuartos limpios* [Tesis de maestría, UNAM]. Repositorio digital de la Facultad de Ingeniería-UNAM; pp 1-6.
- [11] Berkshire Corporation. (13 de julio de 2016). *I - Robot?* Recuperado el 9 de marzo de 2021 de: <https://berkshire.com/i-robot/>

- [12] Viladesign Engineering. (2021). *Tipos de robots industriales: una pieza clave para ganar competitividad y seguridad laboral*. Recuperado el 9 de marzo de 2021 de: <https://www.vld-eng.com/blog/tipos-de-robots-industriales/>
- [13] Vinssa Industrial Solutions. (2021). *Robot Delta Omron Paralelo*. Recuperado el 9 de marzo de 2021 de: <https://www.vinssa.com/robot-delta-omron/>
- [14] EPSON. Exceed your vision. (2017). *Robots SCARA*. Recuperado el 11 de marzo de 2021 de: <https://epson.com/scara-robots>
- [15] IndustryWeek. (3 de marzo de 2010). *Clean Room: Clean Robot*. Recuperado el 9 de marzo de 2021 de: <https://www.industryweek.com/technology-and-iiot/automation/article/21942748/clean-room-clean-robot>
- [16] NewsMaker. (7 de junio de 2016). *Cleanroom Robots Market to Grow at 5.39% CAGR to 2020 Driven by Integration of IoT in Robotics*. Recuperado el 12 de marzo de 2021 de: <https://www.newsmaker.com.au/news/61460/cleanroom-robots-market-to-grow-at-539-cagr-to-2020-driven-by-integration-of-iot-in-robotics#.YEefitxMG03>
- [17] Brumson, B. (17 de agosto de 2006). *Clean Machines: Clean Room Robotics*. RIA Robotic Industries Association. Recuperado el 11 de marzo de 2021 de: [https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Clean-Machines-Clean-Room-Robotics/content\\_id/1046](https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Clean-Machines-Clean-Room-Robotics/content_id/1046)
- [18] Trenado Soto, J. (2005). *Diseño, fabricación y pruebas de un par cinemático para aplicaciones de cuartos limpios* [Tesis de maestría, UNAM]. Repositorio digital de la Facultad de Ingeniería-UNAM; pp 6-8.
- [19] MIDSAMar Industrial Distribuidora (2013). *Materiales antiestáticos para la industria*. Recuperado el 12 de marzo de 2021 de: <http://www.midsa.com.mx/antiestaticos.php>
- [20] Castiñeira, N, H. (2012). Morfología Básica de un Robot Industrial. *Educación Técnica*. <https://www.tecnologia-tecnica.com.ar/pdfrobotica/PDFmorfologiaderobotindustrial.pdf>
- [21] Barrera Pacheco J. A., Hernández Islas, M. A., Hernández Viveros, S., Contla, M. T. (16 de noviembre de 2014). *ROBOT SCARA*. [Diapositiva de PowerPoint]. SlideShare. <https://es.slideshare.net/JessicaBarreraPacheco/robot-scara>
- [22] Boada, Y., Morales, L. A., Sotomayor, N. S. (2014). Control de Seguimiento de Trayectoria y Paletización de un Robot de Tres Grados de Libertad Tipo SCARA. (Selective Compliance Assembly Robot Arm). *Revista Politécnica*. 33(1). Recuperado el 22 de marzo de: [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/112](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/112)

- [23] Pareja Aparicio, R. (2017-18). *Estudio para la puesta en marcha de un robot SCARA AdeptThree-XL*. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/112648/PAREJA%20-%20Estudio%20para%20la%20puesta%20en%20marcha%20de%20un%20robot%20SCARA%20AdeptThree-XL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] Larraioz Elektronika. (11 de febrero de 2020). *Demo del Robot IAI SCARA IXA*. [Archivo de video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=GjgIfIRbSkU&t=2s>
- [25] Buitrago Molina, J. T. (2014). *Caracterización mecánica y dinámica del robot SCARA UV-CERMA*. [Tesis de Licenciatura, Universidad del Valle]. Biblioteca Digital - Universidad Del Valle. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/7772/CB-0494780.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [26] RobotDigg Shanghai. (18 de abril de 2018). *SCARA Robot Arm from RobotDigg*. [Archivo de video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=OPbBwX7NXLk>
- [27] RobotDigg Shanghai. (1 de Agosto de 2017). *SCARA Robot Arm from RobotDigg V1.2*. [Archivo de video]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=mMcfDKSbqnw&t=3s>
- [28] RobotDigg. (2021). *SCARA Robot Arm STEP or SERVO*. Pinterest. Recuperado el 10 de abril de 2021 de: <https://www.pinterest.com/pin/383509724517767212/>
- [29] Yamaha. Industrial Robots. (s.f). *Low Cost High Performance Scara Robot YK-XE*. Recuperado el 10 de abril de 2021 de: <https://global.yamaha-motor.com/business/robot/lineup/ykxg/yk-xe/>
- [30] Mecalaux. Logismarket. (2021). *Robot Scara (Stäubli TS2-40)*. Recuperado el 26 de marzo de 2021 de: <https://www.logismarket.es/staebli-espanola/robot-scara-staebli-ts2-40/9235034597-p.html>
- [31] Revista de Robots. (21 de julio de 2020). *¿Qué es un robot Scara? Aplicaciones, fabricantes y ejemplos*. Recuperado el 26 de marzo de 2021 de: <https://revistaderobots.com/robots-y-robotica/robot-scara-articulados-caracteristicas-y-marcas/>
- [32] Larraioz Elektronika. (2021). *Robots SCARA*. Recuperado el 5 de abril de 2021 de: <https://larraioz.com/iai/productos/robots-scara>
- [33] FANUC. (s.f). *Robot SCARA SR-3iA*. Recuperado el 5 de abril de 2021 de: <https://www.fanuc.eu/es/es/robots/p%3a1gina-filtro-robots/scara-series/scara-sr-3ia>
- [34] Larraioz Elektronika, (2021). *Robots Scara de 4 ejes de montaje a pared y eje invertido*. Recuperado el 5 de abril de 2021 de: [https://larraioz.com/iai/productos/robots-scara/xyzr-montaje-pared-eje-invertido?utm\\_source=catalogue&utm\\_medium=click&utm\\_campaign=iai](https://larraioz.com/iai/productos/robots-scara/xyzr-montaje-pared-eje-invertido?utm_source=catalogue&utm_medium=click&utm_campaign=iai)

- [35] OMRON. Industrial Automation. (2020). *Industrial Robotics Automation Catalog Product Datasheets*, pp 22-23. Recuperado el 5 de abril de 2021 de: [http://www.ia.omron.com/data\\_pdf/cat/industrial%20robots\\_i822-e1\\_10\\_1\\_csm1050308.pdf?id=3516](http://www.ia.omron.com/data_pdf/cat/industrial%20robots_i822-e1_10_1_csm1050308.pdf?id=3516)
- [36] OMRON. Industrial Automation. (2021). *eCobra 600 Lite/Standard/Pro*. Recuperado el 5 de abril de 2021 de: <http://www.ia.omron.com/products/family/3516/specification.html>
- [37] STÄUBLI. (2021). *TS2-40 SCARA robot*. Recuperado el 5 de abril de 2021 de: <https://www.staubli.com/en/robotics/product-range/industrial-robots/4-axis-scara-robots/ts2-40/>
- [38] IAI Quality and Innovation. (s.f). *Mini SCARA Robot Robot IX-NNN-120/150/180, Mini Cleanroom SCARA IX-NNC-120/150/180*, pp 5. Recuperado el 5 de abril de 2021 de: [https://www.iai-automation.com/files/content/downloads/brochures/IX-120-150-180\\_V5\\_0111\\_eng.pdf#page=5](https://www.iai-automation.com/files/content/downloads/brochures/IX-120-150-180_V5_0111_eng.pdf#page=5)
- [39] EPSON. Exceed your vision. (2021). *Epson SCARA LS10-B802C (cleanroom)*. Recuperado el 13 de abril de 2021 de: <https://www.epson.eu/products/robot/epson-scara-ls10-b802c-cleanroom>
- [40] Royo Silvestre, I. (2013). *Características de un sistema de suspensión magnético, con control activo en los tres ejes*. [Tesis de maestría, Universidad de Zaragoza]. <https://core.ac.uk/download/pdf/289973373.pdf>
- [41] Waukesha Bearings. (2019). *Magnetic Bearings*. Recuperado el 21 de abril de 2021 de: <https://www.waukbearing.com/products/magnetic-bearings/>
- [42] Evolution. Revista de tecnología de SKF. (25 de junio de 2015). *Rodamientos de bolas con cuatro puntos de contacto*. Recuperado el 21 de abril de 2021 de: <https://evolution.skf.com/es/rodamientos-de-bolas-con-cuatro-puntos-de-contacto/>
- [43] García García, H. M. (2020). *Avance #4: Estado del arte de los rodamientos magnéticos*. [Reporte de avance de Servicio Social, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México].
- [44] Canales Sectoriales. Interempresas. (15 de agosto de 2006). *Las “atracciones” múltiples de los cojinetes magnéticos*. Recuperado el 22 de abril de 2021 de: [https://www.interempresas.net/Componentes\\_Mecanicos/Articulos/14732-Las-atracciones-multiples-de-los-cojinetes-magneticos.html](https://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/14732-Las-atracciones-multiples-de-los-cojinetes-magneticos.html)
- [45] Vázquez Díaz, R. (2012). *Control Tolerante a Fallas Pasivo en un Rodamiento Magnético*. [Tesis de maestría, CENIDET]. <https://www.cenidet.edu.mx/subplan/biblio/seleccion/Tesis/ME%20Rigoberto%20Vazquez%20Diaz%202012.pdf>

- [46] Bonilla Bravo, O. D., Monteza Pérez, H. G. (2019). *Diseño de un banco de ensayos de rotores con rodamientos magnéticos para investigación en el pregrado*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Señor de Sipán]. <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/6181/Bonilla%20Bravo%20%26%20Monteza%20Perez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [47] Cazorla Martínez, David. (2011). *Control de maqueta de levitación magnética utilizando un microcontrolador*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica de Cartagena]. <https://docplayer.es/23767785-Control-de-maqueta-de-levitacion-magnetica-utilizando-un-microcontrolador.html>
- [48] Rairán, J. D., Cañón J, C. (2009). Uso del método de elementos finitos en el diseño de rodamientos magnéticos. *Revista Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática*. 6(1), 23-29. [http://www.iiisci.org/journal/CV\\$/risci/pdfs/GC584EE.pdf](http://www.iiisci.org/journal/CV$/risci/pdfs/GC584EE.pdf)
- [49] Mohamed S., Mohamed F., Mohamed, A.M. (26-28 de abril de 2017). *Macro/Micro-Positioning Control and Stability Analysis of Contactless Active Robotic Joint Using Active Magnetic Bearing*. [Conferencia Internacional]. IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), Coimbra, Portugal.
- [50] Matsuda K., Kijimoto, S. (7-10 de noviembre de 2010). *Reaction Disturbance Cancellation for a Magnetically Levitated Ladder Arm of Clean-Room Robot*. [Conferencia anual]. IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, Arizona, EUA. DOI: 10.1109/IECON.2010.5675446
- [51] Magnetic Bearings. (s.f). *Bearingless High Speed Drive*. Recuperado el 3 de mayo de 2021 de: <https://www.magneticbearings.org/2013/05/08/bearingless-high-speed-record/>
- [52] Waukesha Magnetic Bearings. (2015-2019). *Magnetic Bearing Overview*. Recuperado el 3 de mayo de 2021 de: <https://www.waukbearing.com/products/magnetic-bearings/amb-hardware/>
- [53] Schweitzer, G., Maslen, E. H. (2009). *Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Springer. (pp. 389-390).
- [54] Filatov, A., Hawkins, L., McMullen, P. (2016). Homopolar Permanent-Magnet-Biased Actuators and Their Application in Rotational Active Magnetic Bearing Systems. *Actuators*. 5(4), 26. <https://doi.org/10.3390/act5040026>
- [55] 1. Synchrony. (s.f). *Fusion. Magnetic Bearings*. Recuperado el 5 de mayo de 2021 de: <https://d3pcsg2wj9izr.cloudfront.net/files/3063/download/393261/SeptronicsInc.pdf>  
 2. Budris, A. R. (2010). *Activated Magnetic Bearing Potential for Centrifugal Pumps*. WaterWorld. Recuperado el 7 de mayo de 2021 de:

<https://www.waterworld.com/water-utility-management/energy-management/article/16194151/activated-magnetic-bearing-potential-for-centrifugal-pumps>

- [56] González González, L. A. (2006). Diseño y manufactura de un robot para transportar discos de silicio y propuesta experimental para evaluar el nivel de emisión de partículas contaminantes en una de sus articulaciones rotacionales (Vol. 1). [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México] <http://132.248.9.195/pd2007/0618342/Index.html>
- [57] Carmona, F. (23 de marzo de 2012). Cómo fabricar poleas dentadas (sincrónicas) de bajo costo. *Software, Robotica y Tecnologia*. <http://bitsbycode.blogspot.com/2012/03/como-fabricar-poleas-dentadas.html>
- [58] Caveney, R.T; Hofmeister, C.A. (1998). *Robot Handlig Apparatus*. No. 5,765,983. EE.UU: Brooks Automation, Inc.
- [59] Reed, J. (2020). *¿Qué es una transmisión por engranajes?* Noticias Ventos. Recuperado el 17 de junio de 2021 de: <https://www.ventos.site/como/que-es-una-transmision-por-engranajes/>
- [60] Benitez Hernández, L. E. (1985). Las fallas en los engranajes. *Ingeniería e Investigación*, (12), 40-52. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n12.21568>
- [61] MHZ Electronics. (2008). *MagnaTran<sup>®</sup> 7 SCARA Robot. Wafer Transfer Robot for Vacuum Applications Requiring a High Reach/Containment Ratio*. Recuperado el 2 de junio de 2021 de: [http://www.mhzelectronics.com/ebay/manuals/brooks\\_automation\\_magnatran\\_7\\_scara\\_robot\\_datasheet.pdf](http://www.mhzelectronics.com/ebay/manuals/brooks_automation_magnatran_7_scara_robot_datasheet.pdf)
- [62] Ahad, M.A., Iqbal, N., Ahmad, S.M. et al. (2021). Detailed modelling and LQG\LTR control of a 2-DOF radial active magnetic bearing for rigid rotor. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 43, 234. <https://doi.org/10.1007/s40430-021-02951-4>
- [63] PAPIIT IT101321. Torrestiana González, Walter; González Mendoza, Emmanuel. *Modelado matemático de un rodamiento magnético activo con control retroalimentado PID para ser utilizado en un par cinemático rotacional de un robot tipo SCARA para cuartos limpios y validación mediante pruebas experimentales y simulación*.
- [64] GATES MECTROL. (s.f). *Bandas Sincrónicas de Poliuretano*. Recuperado el 23 de abril de 2022 de: <http://www.gates.com.mx/pdf/CAPACITACION%20PCC-TIMING-MECTROL.pdf>
- [65] Optibelt. (s.f). *Correas dentadas de alto rendimiento - sin fin, poliuretano de colada*. Recuperado el 23 de abril de 2022 de: <https://www.optibelt.com/sp/productos/correas-dentadas-de-pu/optibelt-alpha-power/>

- [66] Optibelt. (s.f). *Optibelt Extranet*. Recuperado el 25 de abril de 2022 de: [https://service.optibelt.com/index.php?id=81&signon\\_id=551&L=1](https://service.optibelt.com/index.php?id=81&signon_id=551&L=1)
- [67] Rodríguez Grasso, J.M; Torres Valhuerdi, A; Alonso González, A. (2008). *Tolerancias dimensionales y geométricas*. SistemaMID. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” Recuperado el 12 de mayo de 2022 de: [https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-08-05\\_06-59-00108355.pdf](https://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-08-05_06-59-00108355.pdf)
- [68] Mesys. (s.f). *Cálculo de ajustes según ISO 286*. Recuperado el 20 de mayo de 2022 de: [https://www.mesys.es/?page\\_id=1227](https://www.mesys.es/?page_id=1227)
- [69] Mott, R.L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. (4a ed., pp. 575-587). Pearson. México.
- [70] Bertoline, Gary R. (1999). *Dibujo en ingeniería y comunicación gráfica*. (2a ed., Ap. 7 y 11). McGraw-Hill. México.  
[https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?vid=56UDC\\_INST:56UDC\\_INST&search\\_scope=MyInst\\_and\\_CI&tab=Everything&docid=alma991006649579703936&lang=es&context=L](https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?vid=56UDC_INST:56UDC_INST&search_scope=MyInst_and_CI&tab=Everything&docid=alma991006649579703936&lang=es&context=L)
- [71] Mathia, K. (2010). *Robotics for Electronics Manufacturing. Principles and Applications in Cleanroom Automation*. (pp. 32-35, 48-53). Cambridge University. Estados Unidos.
- [72] IGUS. *Plastics for longer life<sup>®</sup>*. (s.f). *Rodamiento radial de bolas xiros<sup>®</sup>, xirodur B180, bolas de vidrio, jaula de xirodur*. Recuperado el 1 de junio de 2022 de: <https://www.igus.com.mx/product/460?artNr=BB-623-B180-30-GL>
- [73] Grainger. (2000). *Anillo de Retención para Trabajos Pesados, Tipo Externo, Para Diám. de Flecha 1 – 3/8”, Acero al Carbono, PK 10*. Recuperado el 3 de junio de 2022 de: <https://www.grainger.com.mx/producto/GRAINGER-APPROVED-Anillo-de-Retenci%C3%B3n-para-Trabajos-Pesados,-Tipo-Externo,-Para-Di%C3%A1m-de-Flecha-1-3-8%22,-Acero-al-Carbono,-PK-10/p/5CE49>
- [74] CEM. (s.f). *Anillos de Retención Externos (pulgadas)*. Recuperado el 3 de junio de 2022 de: <http://cem.com.mx/anillos-retencion-externo-pulgadas.php#>
- [75] Birt<sub>LH</sub>. *Métodos y equipos de medición superficial*. (s.f). *1.2.- Simbología aplicada a acabados superficiales (I)*. Recuperado el 1 de marzo de 2022 de: [https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/PPFM/VP/VP03/es\\_PPFM\\_VP03\\_Contenidos/website\\_12\\_simbologa\\_aplicada\\_a\\_acabados\\_superficiales\\_i.html#](https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/PPFM/VP/VP03/es_PPFM_VP03_Contenidos/website_12_simbologa_aplicada_a_acabados_superficiales_i.html#)
- [76] Biguri Zarraonandia, I. (s.f). *Signos superficiales. Dibujo Técnico. Interpretación gráfica para la Formación Profesional*. Recuperado el 3 de marzo de 2022 de: <https://ibiguridt.wordpress.com/temas/conjunto/signos-superficiales/#arriba>

- [77] Canales Sectoriales. Interempresas. (22 de noviembre de 2013). *La fabricación aditiva. La evidencia de una necesidad*. Recuperado el 4 de abril de 2022 de: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/116342-La-fabricacion-aditiva-La-evidencia-de-una-necesidad.html>
- [78] Fundación COTEC para la innovación tecnológica (2011). *Fabricación Aditiva*. (pp. 31-35, 91-100, 110-128). Gráficas Arias Montano, S. A. España.
- [79] INEO (s.f.). *Estereolitografía (SLA)*. Recuperado el 7 de marzo de 2022 de: <https://www.ineo.es/es/tecnologias-menuoff/estereolitografia-sla-menuoff>
- [80] Canales Sectoriales. Interempresas. (02 de abril de 2019). *Stratasys revoluciona la impresión 3D por estereolitografía tradicional con un nuevo sistema configurable a gran escala*. Recuperado el 25 de abril de 2022 de: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/242813-Stratasys-revoluciona-impresion-3D-estereolitografia-tradicional-sistema-configurable.html>
- [81] Formlabs (s.f.). *Definición de precisión, fiabilidad y tolerancia*. Recuperado el 23 de abril de 2022 de: <https://formlabs.com/es/blog/precision-fiabilidad-tolerancia-impresion-3d/>
- [82] Albisser, P. (8 de octubre de 2010). *Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing and Traditional Tooling Benefits from Huntsman's Latest Materials*. Process Industry Informer. Recuperado el 18 de abril de 2022 de: <https://www.processindustryinformer.com/rapid-prototyping-rapid-manufacturing-and-traditional-tooling-benefits-from-huntsmans-latest-materials/>
- [83] Huntsman. Enriching lives through innovation. (s.f.). *RenShape<sup>®</sup> SL Photopolymers Stereolithography Materials for High-quality Models and Prototypes*. Recuperado el 17 de abril de 2022 de: <http://www.3dpmpt.de/downloads/renshape-matlist.pdf>
- [84] Formlabs (2020). *SLA o DLP: guía comparativa de impresoras 3D de resina (edición de 2020)*. Recuperado el 20 de abril de 2022 de: <https://formlabs.com/es/blog/comparacion-impresoras-3d-resina-sla-dlp/>
- [85] Formlabs (2020). *FDM o SLA: guía comparativa de impresoras 3D de 2020*. Recuperado el 20 de abril de 2022 de: <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-comparacion-tipos-impresoras-3d/>
- [86] Torreblanca Díaz, D. (2016). Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos. *Iconofacto*, 12(18), 118-143. <http://dx.doi.org/10.18566/iconofac.v12n18.a07>

- [87] Materialise (s.f.). *¿Cómo funciona PolyJet?*. Recuperado el 23 de abril de 2022 de: <https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/polyjet>
- [88] Pixel Sistemas (s.f.). *Tecnología Polyjet. Materiales*. Recuperado el 06 de abril de 2022 de: <https://www.pixelsistemas.com/fabricacion-aditiva-impresion-3d/tecnologia-polyjet/materiales>
- [89] Stratasys (s.f.). *Design for Additive Manufacturing with PolyJet*. Recuperado el 23 de abril de 2022 de: [https://my.stratasys.com/SupportCenter/HTML5UserGuides/Design\\_DFAM\\_Guide\\_July\\_2020/Responsive%20HTML5/index.html#t=DOC-01103\\_x\\_Design-PJ-AM-Guide-HTML%2FDfAM\\_Guide-Chapter%2FDfAM\\_Guide-Chapter.htm](https://my.stratasys.com/SupportCenter/HTML5UserGuides/Design_DFAM_Guide_July_2020/Responsive%20HTML5/index.html#t=DOC-01103_x_Design-PJ-AM-Guide-HTML%2FDfAM_Guide-Chapter%2FDfAM_Guide-Chapter.htm)
- [90] Canales Sectoriales. Interempresas. (19 de febrero de 2019). *Fabricación aditiva con materiales líquidos*. Recuperado el 20 de abril de 2022 de: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/242813-Stratasys-revoluciona-impresion-3D-estereolitografia-tradicional-sistema-configurable.html>
- [91] Molero, B. (12 de mayo de 2018). *Procesos de Fabricación Aditiva (AM)*. Diseño Generativo con Solid Edge. Lo último en tecnología sobre Diseño Generativo y Optimización Topológica con Solid Edge. Recuperado el 21 de abril de 2022 de: <https://generativedesignpro.wordpress.com/2018/05/12/procesos-de-fabricacion-aditiva-am/>
- [92] Verkouteren, R. M; Verkouteren, J. R. (2009). Inkjet Metrology: High-Accuracy Mass Measurements of Microdroplets Produced by a Drop-on-Demand Dispenser *Analytical Chemistry*, 81(20), 8577-8584. <https://doi.org/10.1021/ac901563j>
- [93] Sculpteo (s.f.). *3D printing tolerances: All you need to know about the Accuracy of Additive Manufacturing*. Recuperado el 25 de abril de 2022 de: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/design-guidelines/3d-printing-tolerances/>
- [94] Sadeghian, H., Hojjat, Y., Ghodsi, M., et al. (2013). An approach to design and fabrication of a piezo-actuated microdroplet generator. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 1091-1099. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5371-5>
- [95] Ozbolat, I.T. (2017). Bioprinter Technologies. *3D Bioprinting Fundamentals, Principles and Applications*, 199-241. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803010-3.00007-X>
- [96] Hendrixson, S. (30 de diciembre de 2019). *AM 101: NanoParticle Jetting (NPJ)*. Additive Manufacturing. Recuperado el 29 de abril de 2022 de: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/am-101-nanoparticle-jetting-npj>

- [97] Langnau, L. (24 de abril de 2019). *What is NanoParticle Jetting?*. Make Parts Fast. Recuperado el 14 de abril de 2022 de: <https://www.makepartsfast.com/what-is-nanoparticle-jetting/>
- [98] Vaezi, M., Drescher, P., Seitz, H. (2020). Beamless Metal Additive Manufacturing. *Materials*, 13(922), 1-36. <https://doi.org/10.3390/ma13040922>
- [99] Boissonneault, T. (24 de julio de 2018). *An in depth look at XJET's NanoParticle Jetting technology for metal and ceramics*. 3D Printing Media Network. Recuperado el 14 de abril de 2022 de: <https://www.3dprintingmedia.network/xjet-nanoparticle-jetting-technology/>
- [100] Hubs. A Protolabs Company. (s.f.). *Dimensional accuracy of 3D printed parts*. Recuperado el 8 de abril de 2022 de: <https://www.hubs.com/knowledge-base/dimensional-accuracy-3d-printed-parts/#introduction>
- [101] Sinar, D. M. (2018). *Synthesis and Drop-on-Demand Deposition of Graphene Derivative Inks for Flexible Thin Film Electronics* [Tesis de Doctorado, Western University]. Electronic Thesis and Dissertation Repository-Western University.
- [102] Mau, R., Paasche, G., Lenarz, T., et al. (2018). Inkjet printing for localized coating and functionalization of medical devices. *Current Directions in Biomedical Engineering*, 4(1), 233-236. <https://doi.org/10.1515/cdbme-2018-0057>
- [103] Tofan, T., Jasevičius, R. (2021). Modelling of the Motion and Interaction of a Droplet of an Inkjet Printing Process with Physically Treated Polymers Substrates. *Applied Sciences*, 11(11465), 1-11. <https://doi.org/10.3390/app112311465>
- [104] Monzón, M., Ortega, Z., Hernández, A., et al. (2017). Anisotropy of Photopolymer Parts Made by Digital Light Processing. *Materials*, 10(1), 64. <https://doi.org/10.3390/ma10010064>
- [105] Lumpe, T. S., Mueller, J., Shea, K. (2019). Tensile properties of multi-material interfaces in 3D printed parts. *Materials & Design*, 162, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.024>
- [106] Maroti, P., Varga, P., Abraham, H., Falk, G., et al. (2018). Printing orientation defines anisotropic mechanical properties in additive manufacturing of upper limb prosthetics. *Materials Research Express*, 6(3), 1-9. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaf5a9>
- [107] Pérez Jiménez, M. (2018). *Análisis comparativo de la calidad superficial de piezas fabricadas mediante mecanizado y fabricación aditiva* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Jaen]. [https://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/9359/1/TFG\\_Mercedes%20Perez%20Jimenez.pdf](https://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/9359/1/TFG_Mercedes%20Perez%20Jimenez.pdf)
- [108] Mata-Cabrera, F., Hanafi, I., Khamlichi, A., et al. (2013). Predicción de rugosidad en maquinado de compuestos con base de Peek usando metodología de superficie

de respuesta. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 14(4), 463-474. <https://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/2013/v14n4-01.pdf>

- [109] 1. ERIKS. Know-how to make the difference. (s.f.). *PEEK*. Recuperado el 7 de junio de 2022 de: <https://solutions-in-plastics.info/en/products/high-performance-plastics/peek/>  
2. Roboze. (s.f.). *Roboze PEEK 3D printing*. Recuperado el 7 de junio de 2022 de: <https://www.roboze.com/en/resources/roboze-peek-3d-printing.html>  
3. Ensinger. (s.f.). *TECAPEEK HT black*. Recuperado el 8 de junio de 2022 de: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/products/tecapeek-ht-black>  
4. Curbell Plastics. (2016). *PEEK Strong, stiff plastic with outstanding chemical resistance; performs over a wide range of temps*. Recuperado el 8 de junio de 2022 de: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/PEEK-Data-Sheet>
- [110] 1. MIDSA. (2013). *Ketron<sup>®</sup> PEEK (Polietereetercetona)*. Recuperado el 26 de mayo de 2022 de: <http://www.midsa.com.mx/esp-Ketron-PEEK.php>  
2. Complex Plastics Inc. (2020). *PRODUCTS LIST & TECHNICAL DATA*. Recuperado el 27 de mayo de 2022 de: <http://www.complexplastics.com/>
- [111] Shive, T. (23 de enero de 2019). *Take a Peak at PEEK*. CCT Precision Machining. Recuperado el 6 de junio de 2022 de: <https://www.cctprecision.com/take-a-peak-at-peek/>
- [112] Hony. Professionals in engineering plastics. (s.f.). *Peek Gears Mecanizado CNC Peek Parts para bomba*. Recuperado el 7 de junio de 2022 de: <https://es.honyplastic.com/peek-machined-parts/60008667.html>
- [113] Ye, R. (18 de marzo de 2021). *Machining PEEK: Tips, advantages & applications*. Recuperado el 7 de junio de 2022 de: <https://www.3erp.com/blog/machining-peek-tips-advantages-applications/>
- [114] Calvo Correa, M. P. (2016). *Calidad geométrica en el mecanizado de superficies en polietereetercetona (PEEK) para aplicación en implantes individualizados* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56752/1030570180.2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [115] Indiamart. (s.f.). *Machined Component Peek Machined Components*. Recuperado el 7 de junio de 2022 de: <https://www.indiamart.com/proddetail/peek-machined-components-4410682555.html>
- [116] Autodesk. (2021). *Autodesk Education. Inventor Professional*. Recuperada la cita el 14 de junio de 2022 de: <https://www.autodesk.mx/education/edu-software/overview?sorting=featured&filters=individual#card-invprosa>

- [117] Rodríguez Galbarro, H. (s.f.). *Ajustes y Tolerancias en los Procesos de Mecanizado*. Ingemecánica. Recuperado el 31 de mayo de 2022 de: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn19.html>
- [118] Aguilar Torres, F. J., Carvajal Ramírez, F., Agüera Vega, F. (1999). *Fundamentos para el diseño gráfico de maquinaria e industrias agrarias*. (pp. 145-172) Universidad de Almería. España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=196041>
- [119] ALL3DP (s.f.). *How to 3D Print With Wax*. Recuperado el 29 de abril de 2022 de: <https://all3dp.com/2/wax-3d-printing-how-to-3d-print-wax/>

# APÉNDICE

## APÉNDICE A - Programas utilizados en el presente trabajo

1. Autodesk Inventor Professional 2021 versión estudiantil, es una aplicación de diseño asistido por computadora para diseño mecánico 3D, simulación, visualización y documentación desarrollada por Autodesk®. Para consultar el programa, ver [116].

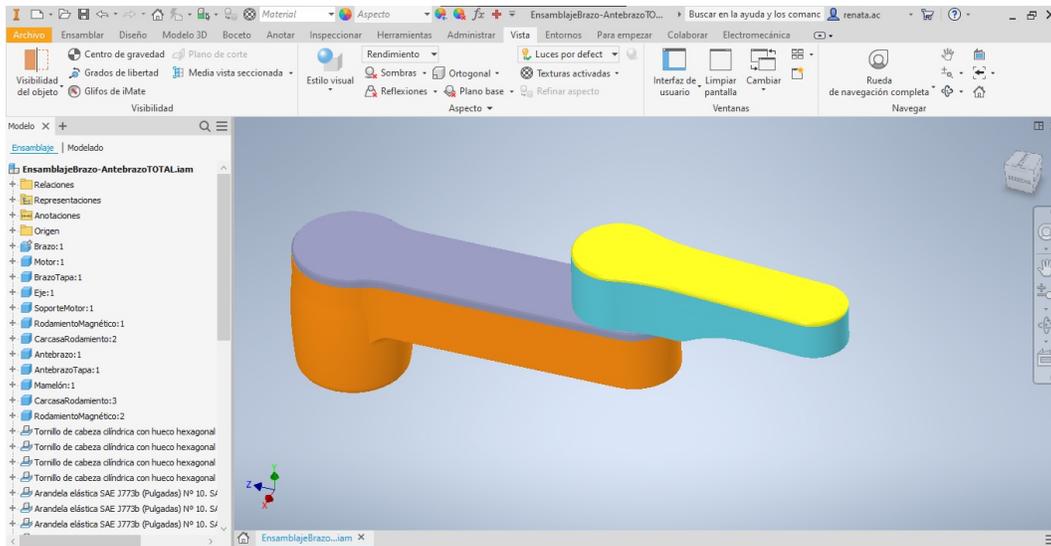


Figura A1. Utilización del programa Inventor Professional 2021 para el diseño de los componentes de la propuesta de diseño.

2. El programa de cálculo de transmisión Optibelt® CAP 6.0 se utiliza para el cálculo y diseño de transmisiones por correa. Para consultar el programa, ver [66].

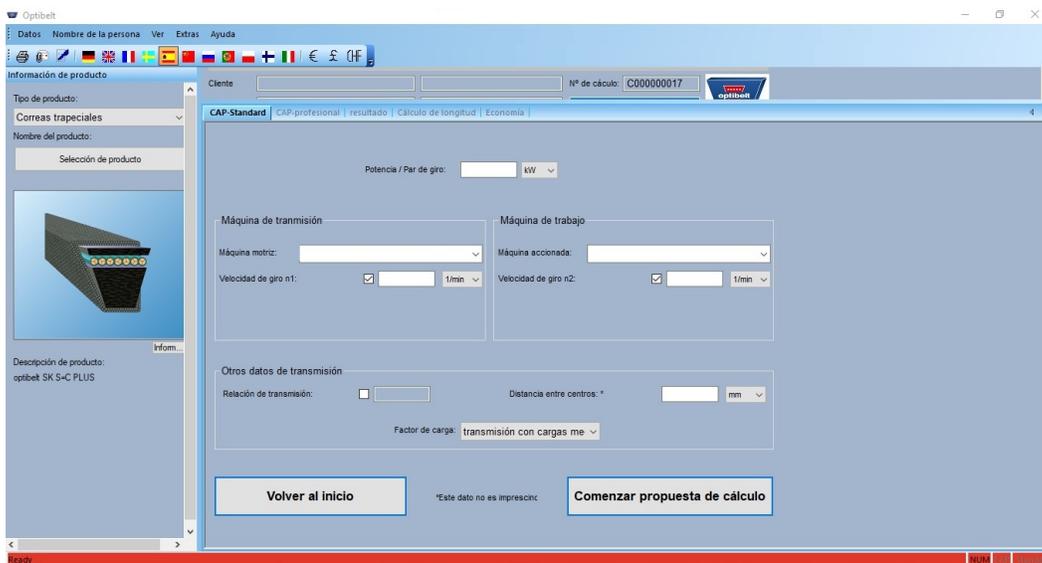


Figura A2. Utilización del programa Optibelt CAP 6.0 para el diseño de la transmisión por bandas dentadas.

3. El catálogo de poleas para transmisión por banda de la empresa Optibelt® CAD permite descargar dibujos CAD (Computer Aided Design) diseñados en 2D y 3D entre una variedad de formatos de archivo. Para consultar el programa, ver [66].

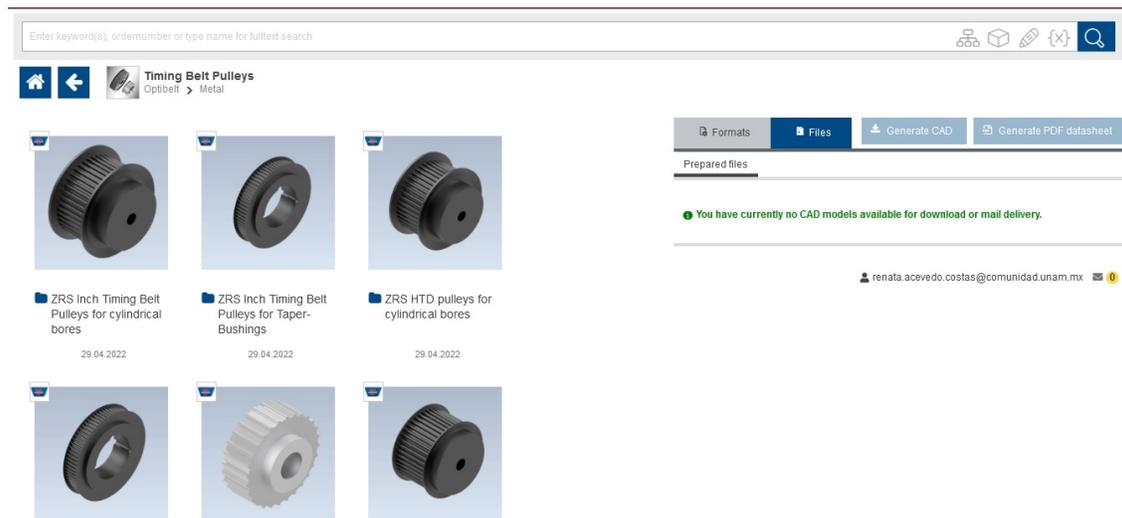


Figura A3. Catálogo de descarga de poleas de distribución en formato 2D y 3D de la empresa Optibelt.

4. MESYS AG desarrolla software libre para cálculos técnicos en ingeniería mecánica. La empresa proporciona un apartado de cálculos gratuitos de dimensiones de ajuste, utilizando las tolerancias según ISO 286 (2010); mostrando además de las desviaciones del eje y el cubo, se muestra como resultado la luz, el juego o la interferencia del ajuste. Para consultar el programa, ver [68].

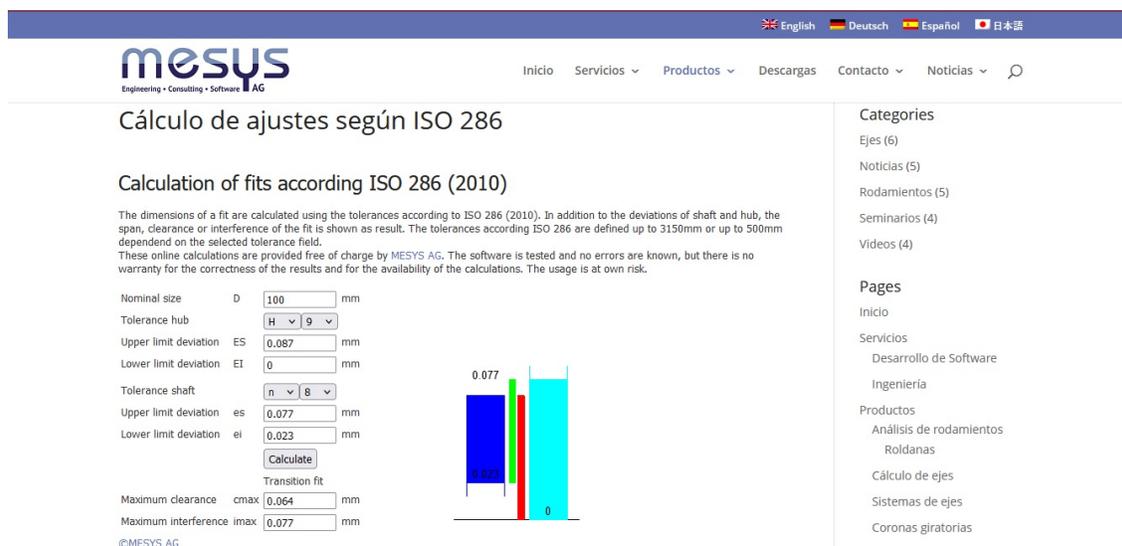
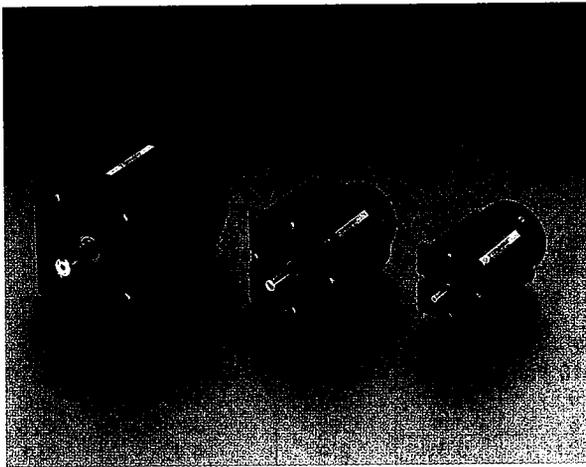


Figura A4. Cálculo en línea de ajustes por Mesys AG.

## **APÉNDICE B - Especificaciones técnicas y planos generados de piezas y ensambles**

Los planos presentados en este apéndice fueron generados con el programa Autodesk Inventor Professional 2021. Además, se anexan especificaciones técnicas sobre el motor y las poleas de transmisión contempladas en la propuesta de diseño.

# BLD BRUSHLESS SERVO MOTORS



## Features:

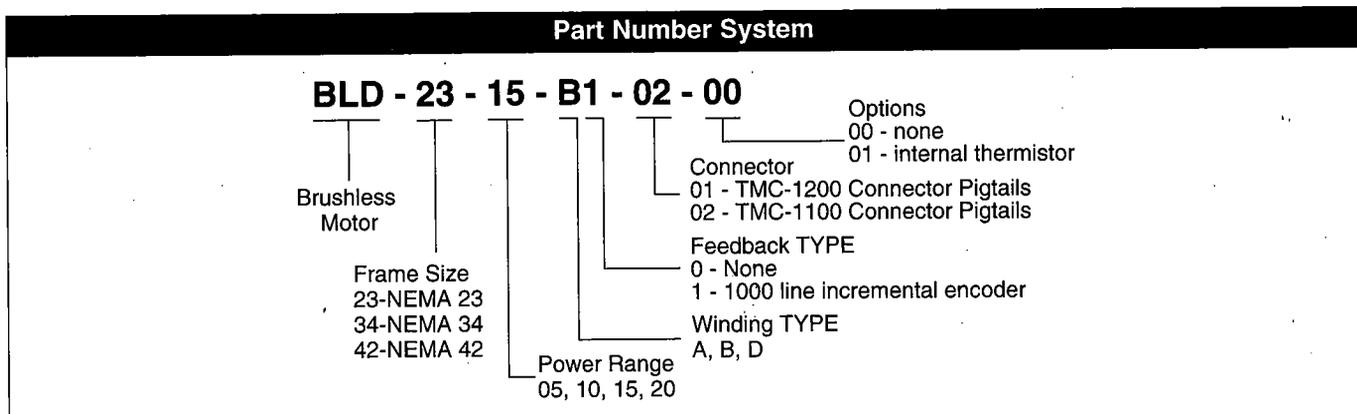
- brushless design uses internal Hall effect devices for commutation
- no brushes to wear out, fail, service, spark or create dust.
- available in NEMA flange sizes 23, 34, and 42 for a bolt all Thomson linear motion systems
- rare earth magnets for extremely high torque to inertia ratio
- integrated 1000 line encoder (4000 count quadrature) with differential line driver
- extremely smooth motion at all speeds
- a perfect match to the TD-50 brushless amplifier

Thomson BLD series brushless servo motors represent the leading edge of high performance motor design. High energy rare earth magnets provide an extremely high torque to inertia ratio, while odd slot count laminations and skewing of the stator assembly mean no magnetic induced cogging providing extremely smooth motion at all speeds. The finned extruded aluminum housing gives a low thermal resistance for higher continuous torque operation.

BLD brushless servo motors have an integral 1000 line (4000 count quadrature) encoder which uses a rugged etched stainless steel disc instead of the more fragile glass or plastic design. Internal Hall effect devices are used for six-step "trapezoidal" commutation and are easily interfaced to any industry standard 3 phase amplifier. In addition, there is a matched TD-50 Brushless Amplifier and cable available for each BLD motor which enables an immediately installed solution with no engineering, tuning, adjustments or fabrication required.

BLD brushless servo motors are available with NEMA 23, 34 and 42 mounting flanges and use TENV construction. Each size is available with several different windings to accommodate various application environments. Motors come with 15" pigtails terminated with CPC connectors.

## Part Numbering

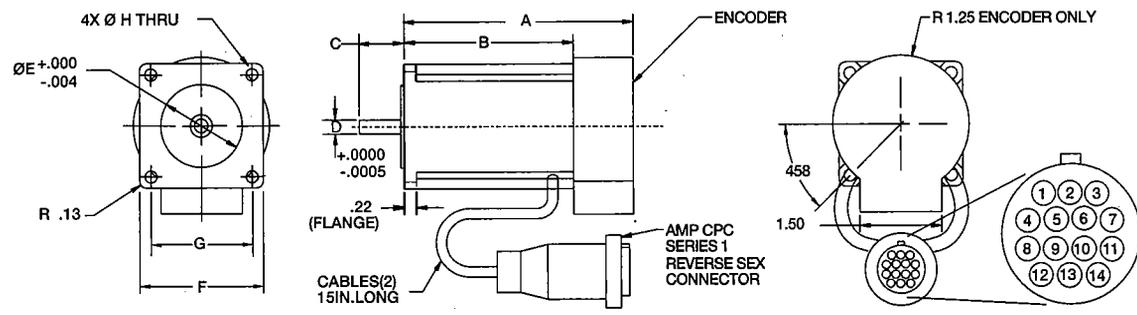


# Specifications

PARAMETER	SYMBOL	UNITS	BLD23-10		BLD23-15		BLD34-05	BLD34-10		BLD34-15			BLD42-20	
Cont. Stall Torque	$T_C$	oz. in.	52.0		69.1		89	154		209		613		
		Nm	0.37		0.49		0.63	1.1		1.5		4.33		
Peak Torque	$T_P$	oz. in.	179		267		331	659		994		3400		
		Nm	1.26		1.89		2.3	4.7		7.0		24.0		
Motor Constant	$K_m$	oz. in./ $\sqrt{w}$	8.6		11.4		12.4	21.4		29.1		66.6		
		Nm/ $\sqrt{w}$	0.06		0.08		0.09	0.15		0.21		0.47		
Electrical Time Constant	$t_c$	m sec.	0.89		1.10		0.99	1.50		1.80		2.50		
Mechanical Time Constant	$t_m$	m sec.	1.43		1.11		1.94	1.24		0.97		1.32		
Thermal Resistance	$\emptyset$	$^{\circ}C/W$	2.36		2.36		1.68	1.68		1.68		1.02		
Inertia	$J_m$	oz. in. sec <sup>2</sup>	0.75x10 <sup>-3</sup>		1.03x10 <sup>-3</sup>		2.1x10 <sup>-3</sup>	4.0x10 <sup>-3</sup>		5.89x10 <sup>-3</sup>		41.0x10 <sup>3</sup>		
		gm-cm <sup>2</sup>	52.8		72.6		147	280		415		2898		
Damping Coefficient ( $\frac{K_T K_E}{R_T}$ )	$K_D$	oz. in./KRPM	54.6		83.5		114	339		630		3276		
		Nm/KRPM	0.39		0.59		0.81	2.4		4.4		23.1		
Bearing Friction	$T_F$	oz. in.	1		1		1	1		1		2		
		Nm.	.007		.007		.007	.007		.007		.014		
Core Loss (1000 RPM)	$P_C$	watts	0.49		0.74		0.78	1.6		2.37		895		
Weight	$W$	oz.	22		26		39	48		57		86		
		kgm.	0.62		0.74		1.11	1.36		1.62		2.44		
Number of Poles	-	-	6		6		8	8		8		12		

WINDING			B		D		A		B		D		A		B	
Torque Constant	$K_T$	oz. in./amp.	24.4	12.2	50.5	29.2	18.3	17.8	45.3	28.3	92.2	53.3	33.4	101	58.2	
		Nm/amp	0.17	0.09	0.36	0.21	0.13	0.13	0.32	0.20	0.65	0.38	0.24	0.71	0.41	
Voltage Constant	$K_E$	V/KRPM	18.1	9.0	37.4	21.6	13.5	13.2	33.5	21.0	68.3	39.3	24.6	74.6	43.1	
		V/rad./sec.	0.17	0.09	0.36	0.21	0.13	0.13	0.32	0.20	0.65	0.38	0.24	0.71	0.41	
Resistance (cold)	$R_{TTC}$	ohm	8.1	2.0	19.6	6.3	2.6	2.1	4.5	1.8	10.0	3.4	1.3	2.30	0.77	
		(hot)	$R_{TTH}$	12.2	3.0	25.4	9.8	3.9	3.1	6.8	2.6	15.0	5.0	2.0	3.45	1.16
Inductance	$L_T$	mH	7.3	1.8	20.0	6.7	2.7	2.0	6.3	2.6	18.0	6.0	2.4	5.80	1.90	
Design Voltage	$V_A$	volts	160	48	300	160	48	48	160	48	300	160	48	300	160	
Cont. Stall Current	$I_{CS}$	amps.	2.1	4.3	1.4	2.4	3.8	5.0	3.4	5.4	2.3	3.9	6.3	6.1	10.5	
Peak Current	$I_P$	amps.	7.3	14.7	5.3	9.1	14.6	18.6	14.5	23.3	10.8	18.6	29.8	33.7	58.4	

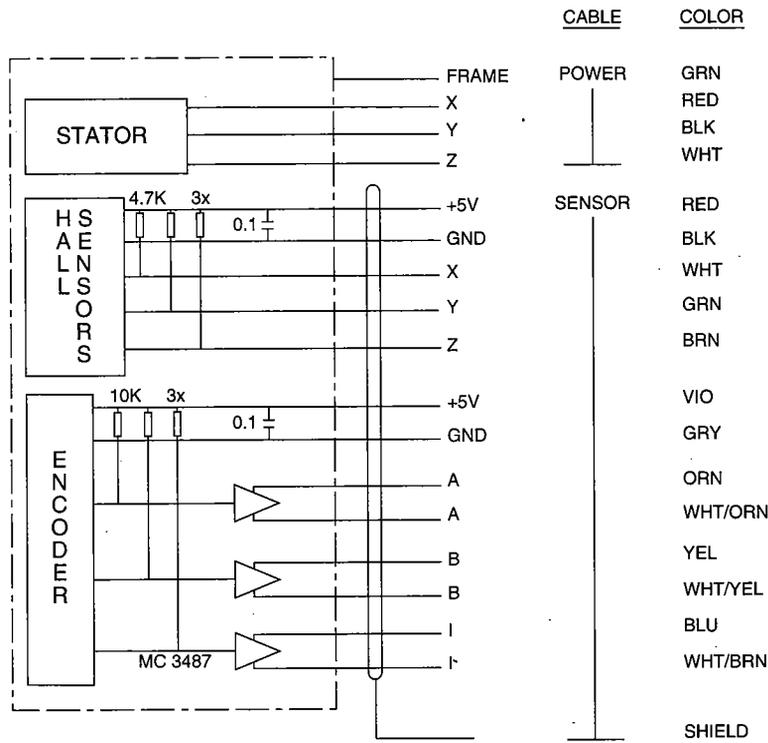


Motor Series Part Number	A in (mm)	B in (mm)	C in (mm)	D in (mm)	E in (mm)	F in (mm)	G in (mm)	H in (mm)
<b>BLD-23</b>	4.2 (106,7)	3.1 (78,7)	.82 (20,8)	.250 (6,35)	1.502 (38,2)	2.27 (57,7)	1.856 (47,1)	0.20 (5,08)
<b>BLD-34</b>	4.40 (111,8)	3.3 (83,8)	1.23 (31,2)	.375 (9,53)	2.875 (73,0)	3.40 (86,4)	2.740 (69,6)	0.22 (5,59)
<b>BLD-42</b>	5.95 (151,1)	4.7 (119,4)	1.38 (35,1)	.625 (15,9)	2.187 (55,5)	4.20 (106,7)	3.5 (88,9)	0.28 (7,11)

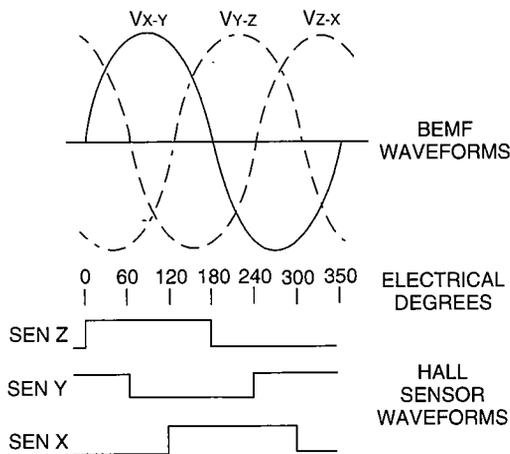
Motion Control

# BLD MOTOR SPECIFICATIONS

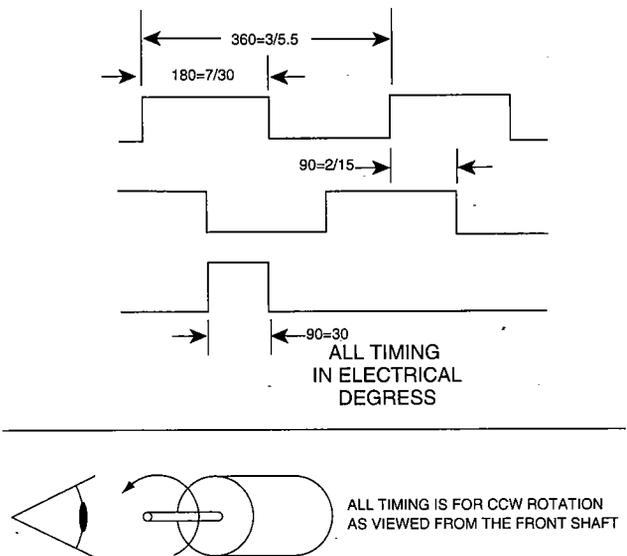
## Schematic



## Motor Signal Timing



## Encoder Timing

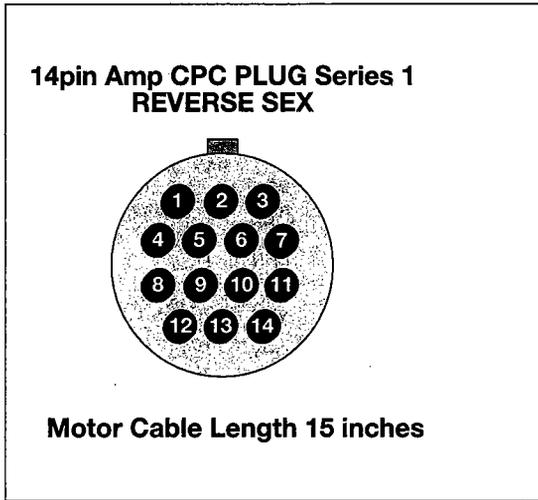


## NOTES

1. Thermal resistance (winding to ambient) is for the motor mounted on a 6" x 6" x 1/2" aluminum plate for the BLD23 and BLD34 motors and on a 8" x 8" x 1/2" aluminum plate for the BLD42 motor.
2. Continuous rated stall torque is with motor mounted per Note 1, in a 25 deg.C ambient, with winding at 155 deg.C.
3. Actual winding temperature for an application will depend on peak and RMS currents and duty cycle as determined by analyzing the system.
4. The design voltages shown were chosen to minimize peak to peak ripple current to 600 milliamps when driving with a 20 kHz PWM amplifier. Higher and lower voltages can be used for particular applications.

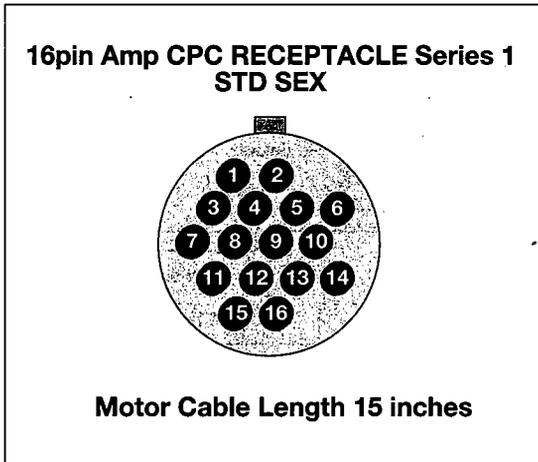
# BLD MOTOR SPECIFICATIONS

## TMC-1200 Motor Connection Data

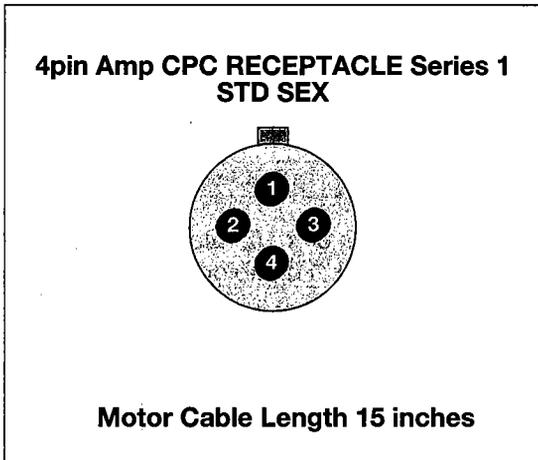


PIN	SIGNAL
1	MOTOR PHASE Y
2	MOTOR PHASE Z
3	MOTOR PHASE X
4	+5V
5	GROUND
6	ENCODER + INDEX
7	ENCODER - INDEX
8	ENCODER + A
9	ENCODER - A
10	ENCODER + B
11	ENCODER - B
12	HALL 1
13	HALL 2
14	HALL 3

## TMC-1100 Motor Connection Data

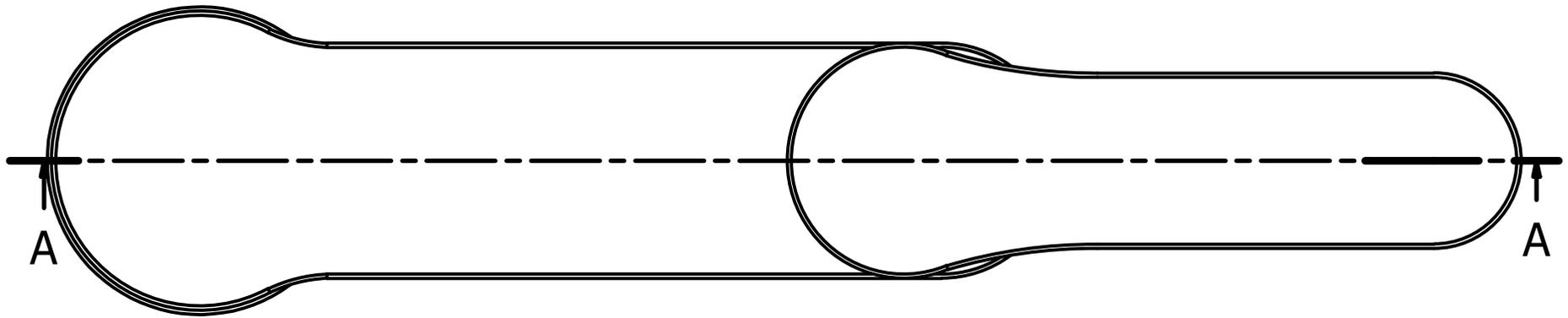


PIN	SIGNAL
1	ENC A+
2	ENC A-
3	ENC B+
4	ENC B-
5	ENC I+
6	ENC I-
7	ENC 5V
8	ENC GND
9	HALL VCC
10	HALL GND
11	HALL X
12	HALL Y
13	HALL Z
14	PTC+
15	PTC-
16	SHIELD

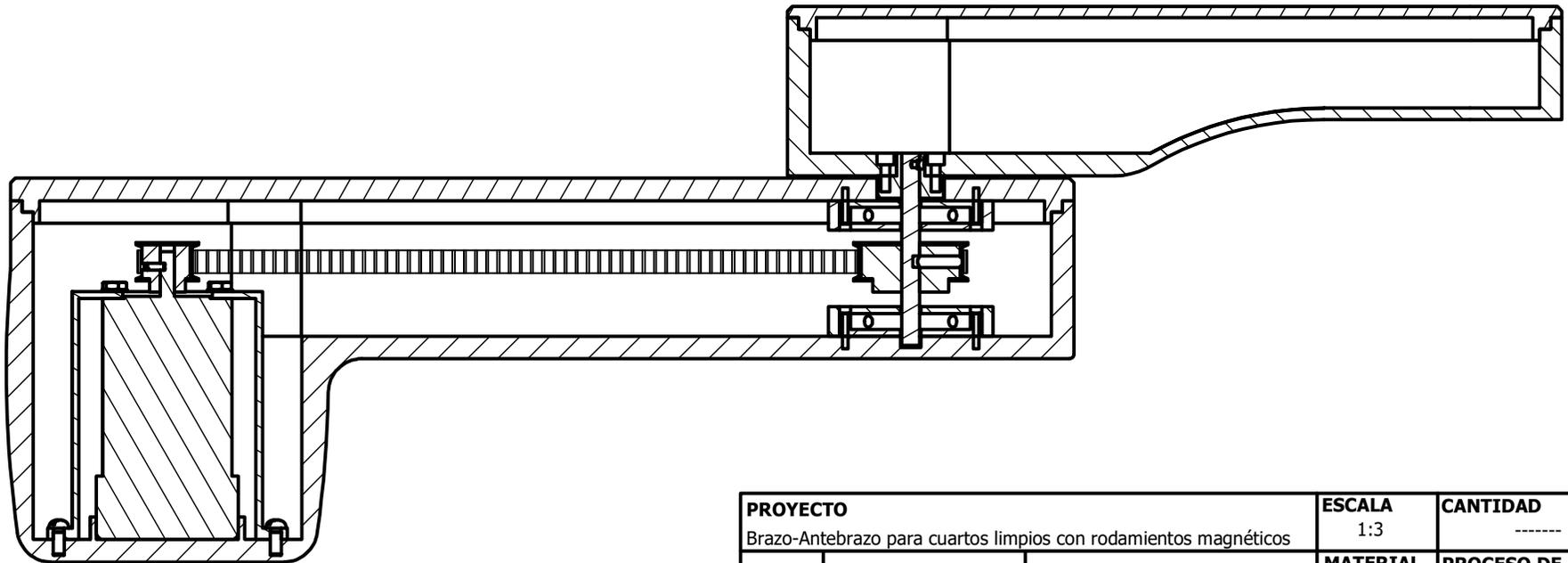


PIN	SIGNAL
1	MOTOR PHASE X
2	MOTOR PHASE Y
3	MOTOR PHASE Z
4	MOTOR GND

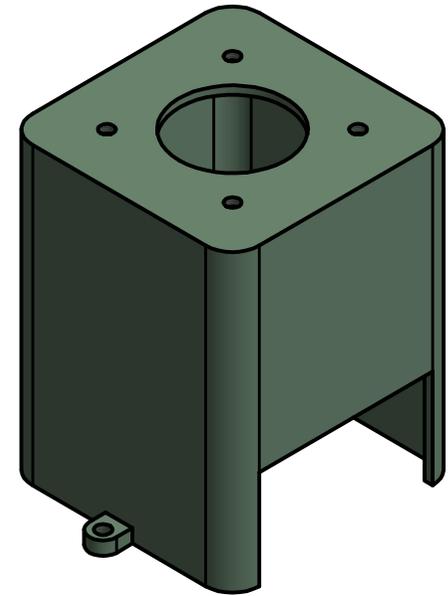
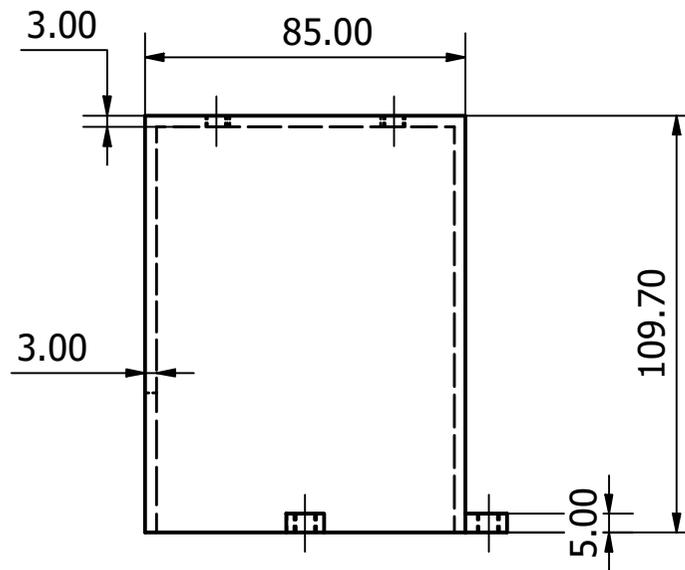
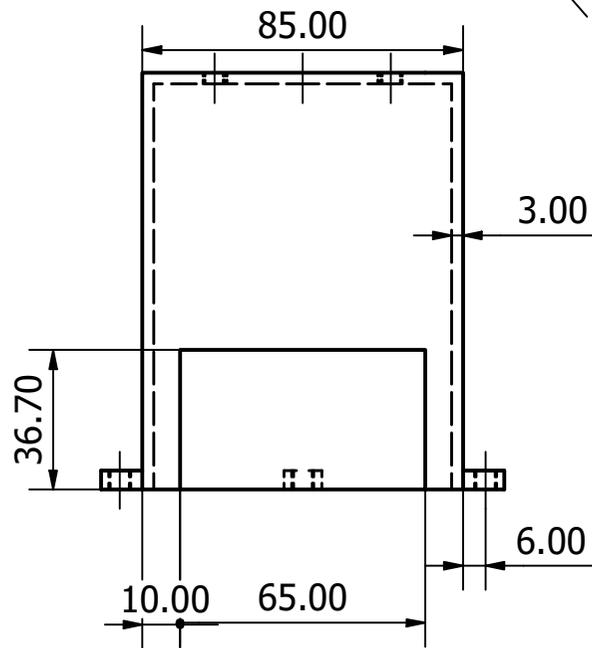
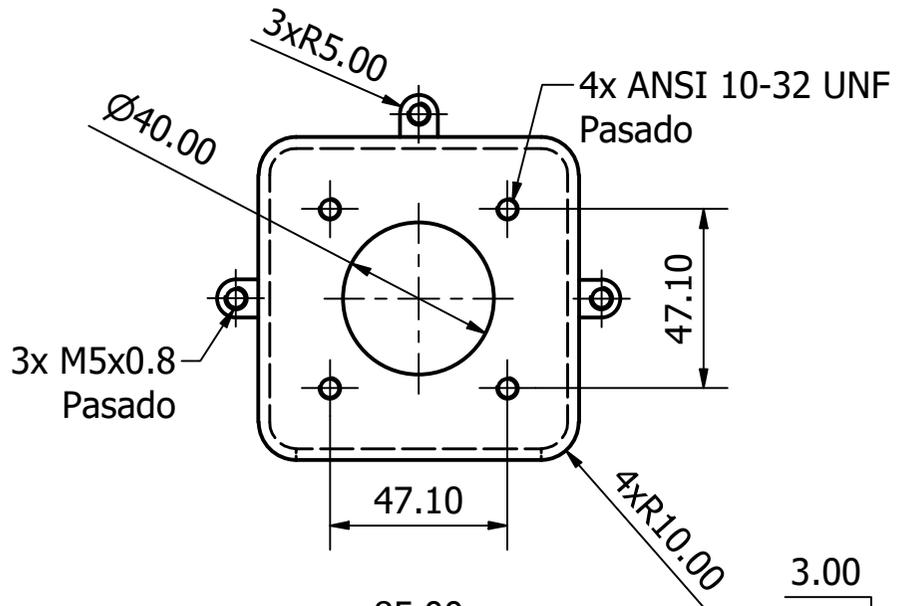
Motion Control



A-A ( 1:3 )



<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> -----	
 UNAM	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> -----	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> -----
<b>PIEZA</b> Corte Ensamble Brazo-Antebrazo		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm	<b>NO. PLANO</b> 1



<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:2	<b>CANTIDAD</b> 1	
 UNAM	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet)
<b>PIEZA</b> SoporteMotor			<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
				<b>NO. PLANO</b> 2

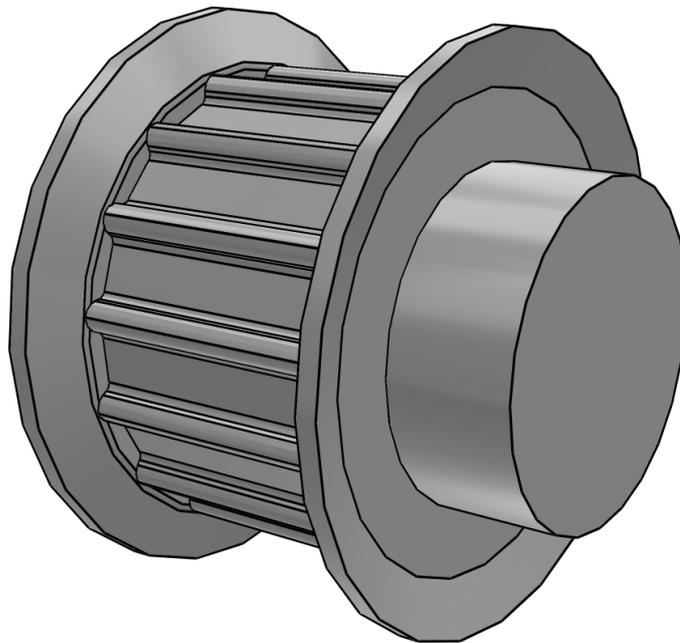
# 21 AT5 / 15-2

optibelt ZRS Metric Timing Belt Pulleys for cylindrical bores  
Profile acc. to ISO 17396



## 3D-View

To activate the interactive 3D view, you must trust this document (see hint on the top) in Adobe Acrobat and click on the question mark.



### Zoom

Moves you toward or away from objects in the scene when you drag vertically. You can also zoom with the hand tool by holding down Shift as you drag.

### Pan

Moves the model vertically and horizontally only. You can also pan with the hand tool: Ctrl-drag.

### Rotate

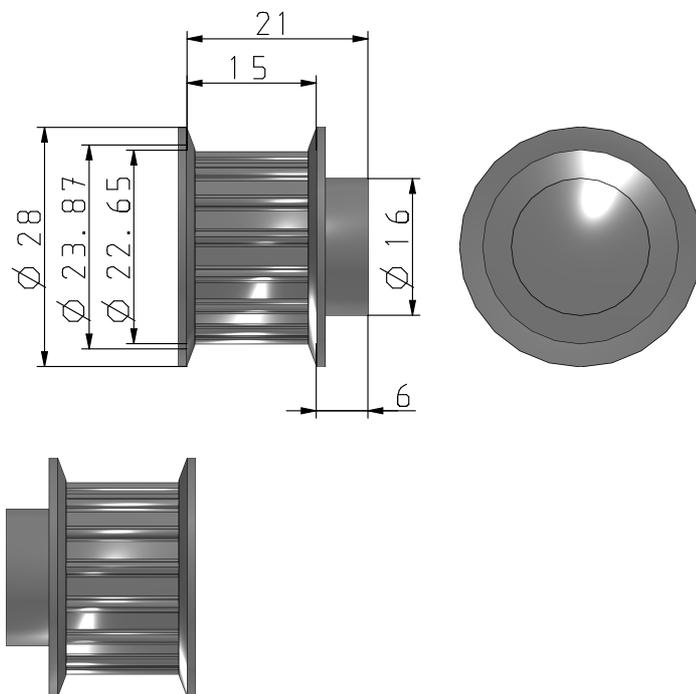
Turns 3D objects around relative to the screen. How the objects move depends on the starting view, where you start dragging and the direction in which you drag.

# 21 AT5 / 15-2

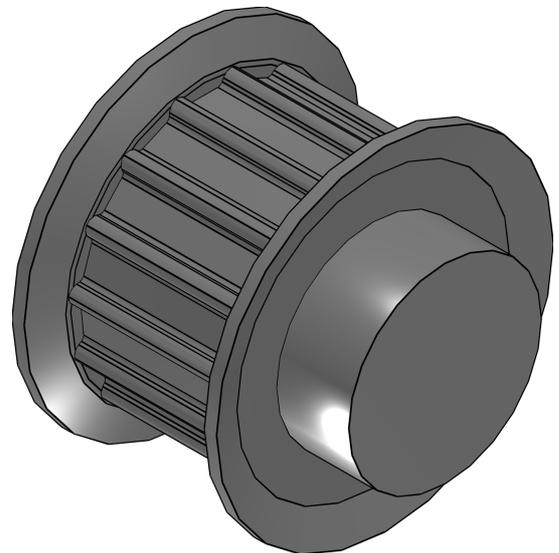
optibelt ZRS Metric Timing Belt Pulleys for cylindrical bores  
Profile acc. to ISO 17396



2D-View



ISO-View



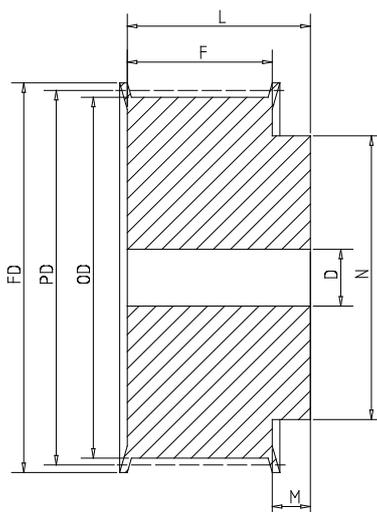
# 21 AT5 / 15-2

optibelt ZRS Metric Timing Belt Pulleys for cylindrical bores  
Profile acc. to ISO 17396

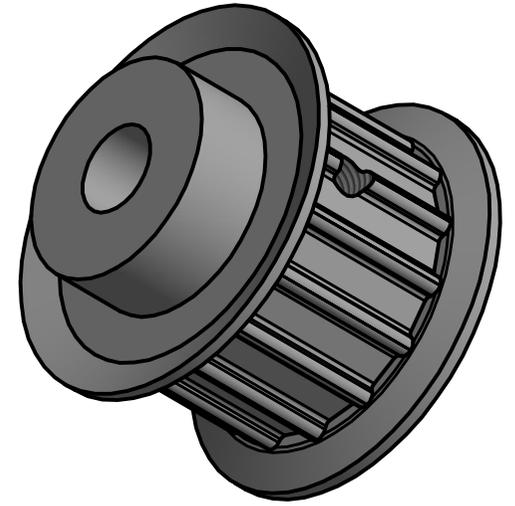
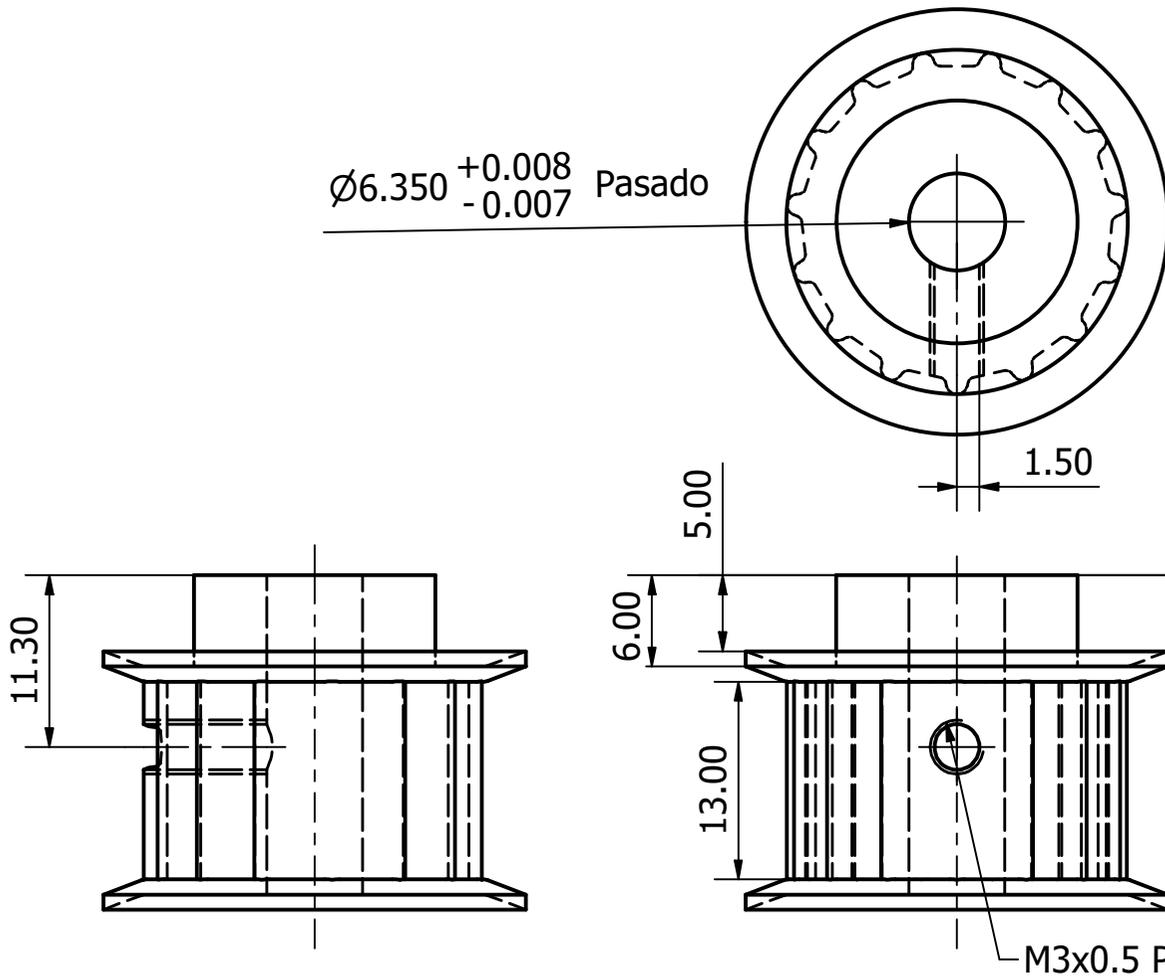


## Technical Data

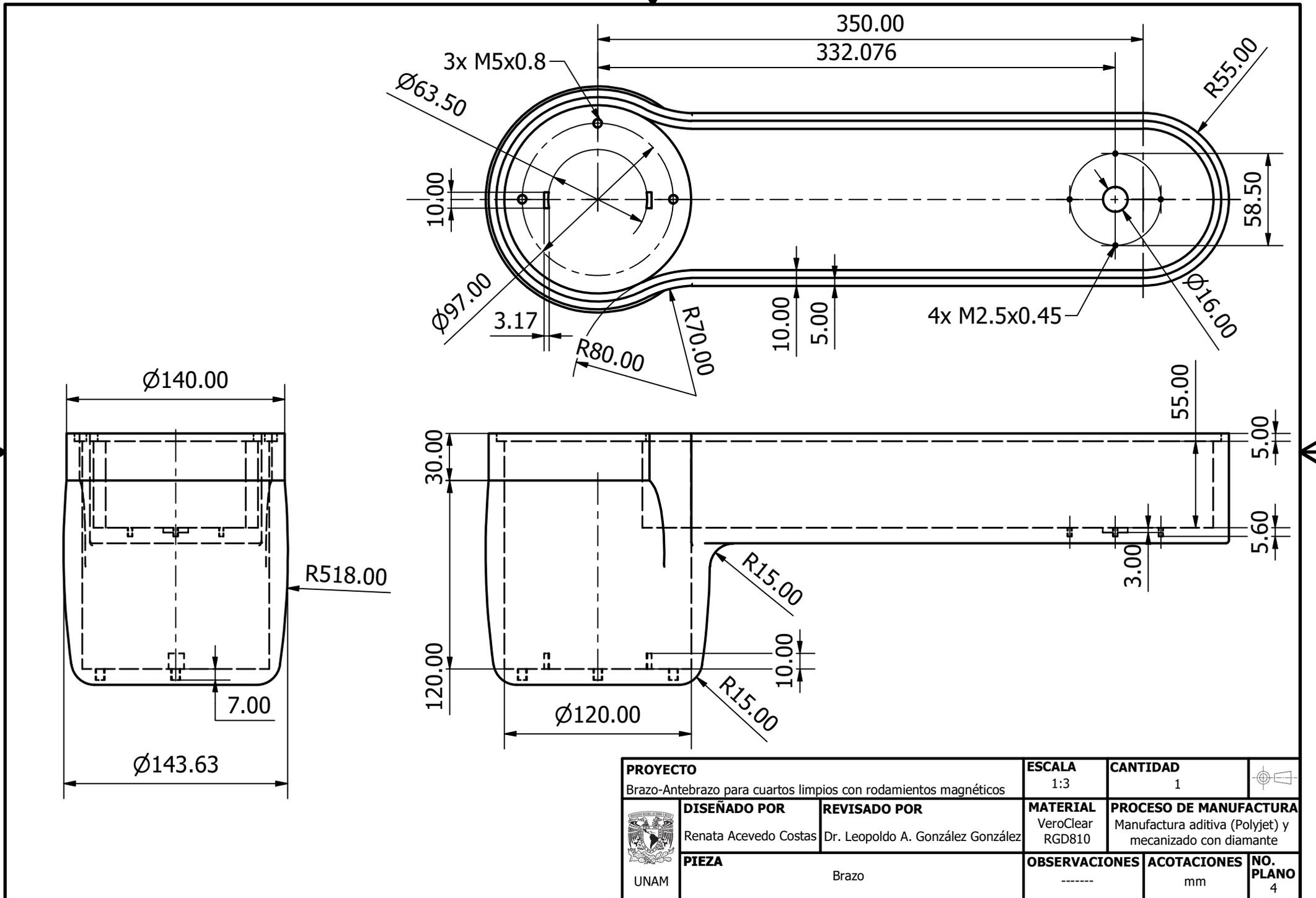
BEZ (Designation Sales)	21 AT5 / 15-2
ANR (Part ID)	1784315
GTIN (Global Trade Item Number)	4014486231168
ZAE (Number of Teeth)	15
AUSFNR (Type ID)	6F
ABSN (Number of Flanges)	2
PD (Pitch Diameter / mm)	23.87
OD (Outside Diameter / mm)	22.65
FD (Flange Diameter / mm)	28
F (Face Width / mm)	15
K (K / mm)	0
L (L / mm)	21
M (M / mm)	6
N (N / mm)	16
J (J / mm)	0
D (Pilot Bore / mm)	0
DBMAX (max. Bore Diameter / mm)	10
AUSF (Type)	Solid pulley
MATERIAL (Material)	Aluminum 6082 T6
MATBS (Material Flange)	Steel
GEWICHT (Weight / kg)	0.02
OF (Surface Treatment)	-
WG (Balancing Grade)	Not Balanced
QS (Quality Standard)	acc. to ISO 254



We reserve the right to make technical changes. Additional information can be found in the Technical Manual Rubber / Polyurethane Timing Belts. Profiles not to scale, measurements may vary.

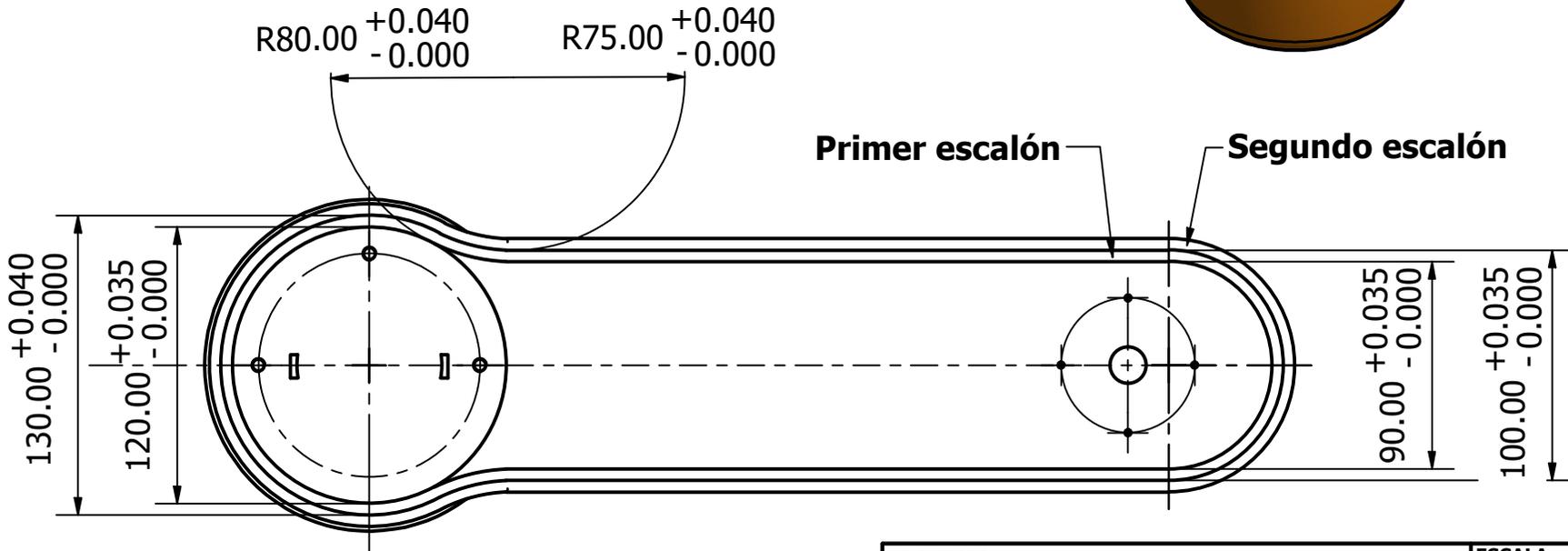
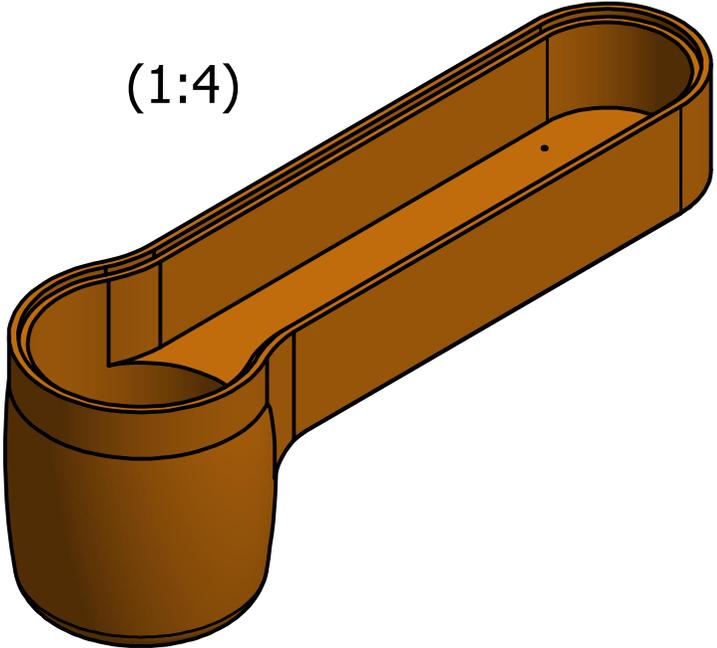


<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 2:1	<b>CANTIDAD</b> 1	
 UNAM	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> Aluminio 6082 T6	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Compra, maquinado y rectificado
	<b>PIEZA</b> PoleaMotriz		<b>OBSERVACIONES</b> # Dientes: 15 Paso: 5mm	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 3	

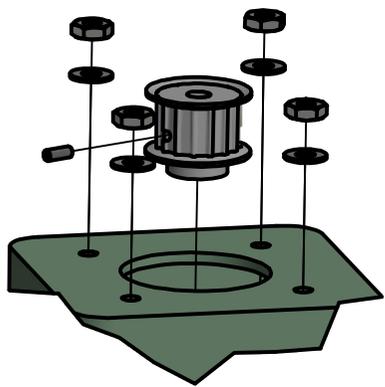


<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> 1	
 UNAM	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado con diamante
<b>PIEZA</b> Brazo			<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
				<b>NO. PLANO</b> 4

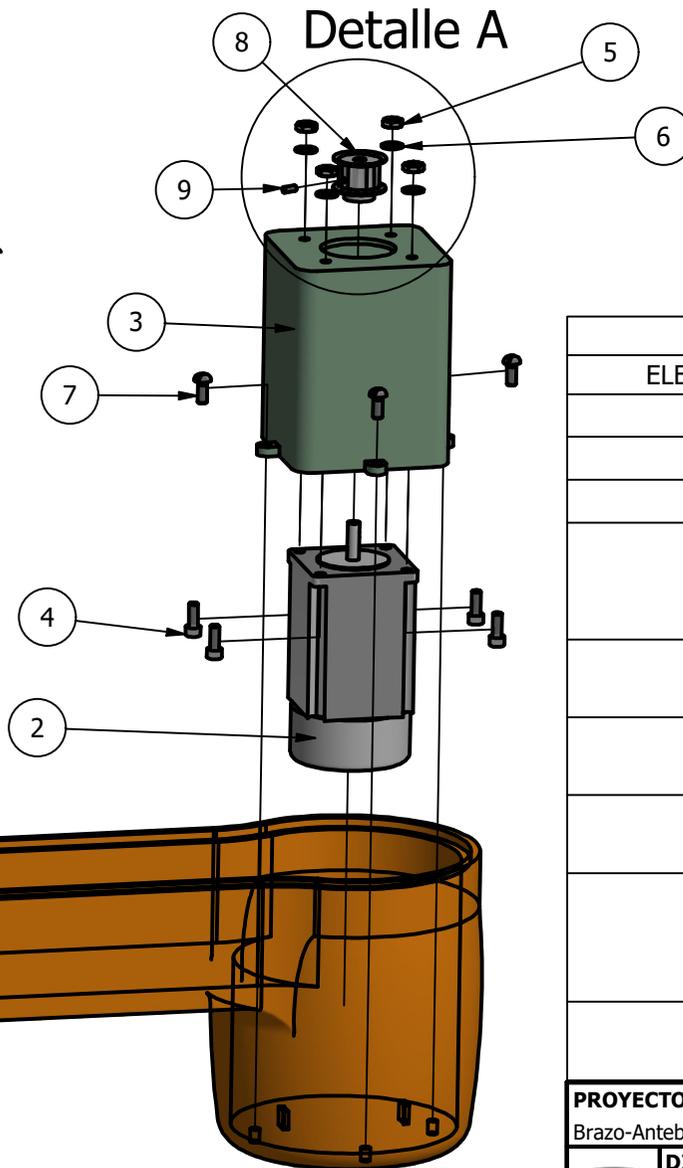
(1:4)



<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> 1	
 UNAM	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado con diamante
<b>PIEZA</b> Brazo		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm	<b>NO. PLANO</b> 4.1



Detalle A ( 1 : 2 )

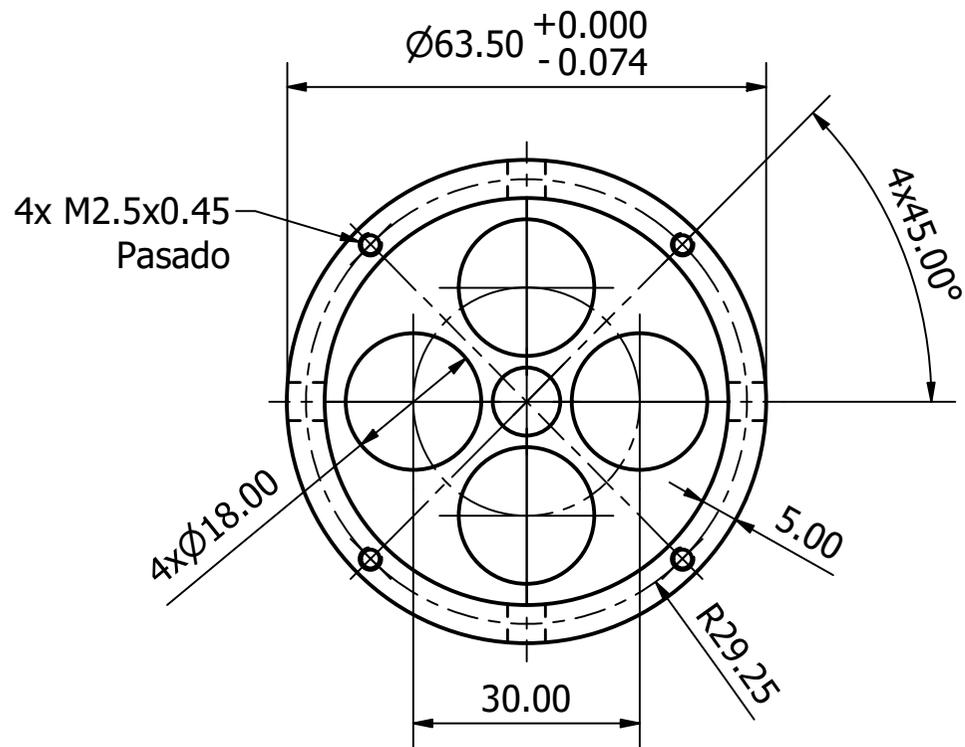


ORDEN DE ENSAMBLE  
 -Motor con el SoporteMotor.  
 -PoleaMotriz.  
 -Brazo.

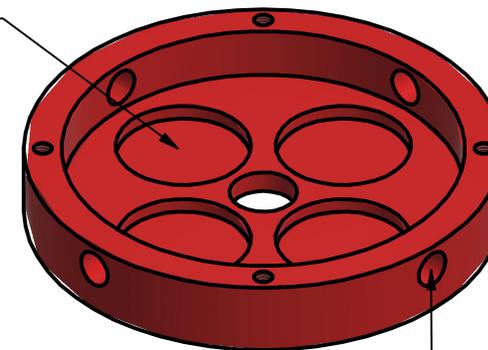
LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Brazo	
2	1	Motor	
3	1	SoporteMotor	
4	4	Tornillo ANSI 10-32 UNF - 0.5 HS	Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal
5	4	Tuerca ANSI 10 - 32 UNF	Tuerca hex. para maquinaria
6	4	Arandela Nº 10. SAE Tipo L. Fino	Rondana elástica
7	3	Tornillo CNS 9671 - M5x12	Tornillos de cabeza con cara ranurada
8	1	PoleaMotriz	Tipo AT5- Polea para transmisión 21 AT5 / 15-2 Aluminio 6082 T6
9	1	Tornillo DIN EN 24766 - M3x8	Tornillo de cabeza perdida ranurado - Punta plana

<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:4	<b>CANTIDAD</b> -----	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> -----	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> -----
<b>PIEZA</b> UNAM	Ensamble Motor-SoporteMotor-Brazo-PoleaMotriz		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 5	

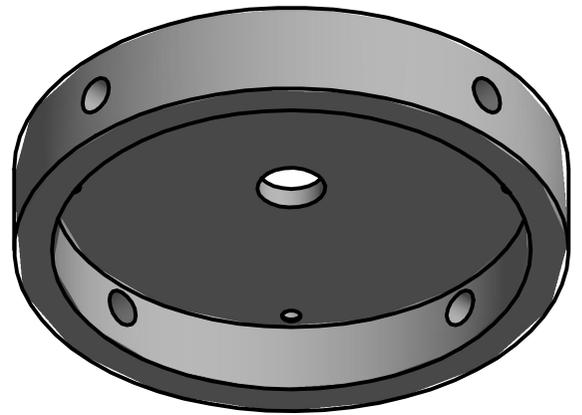
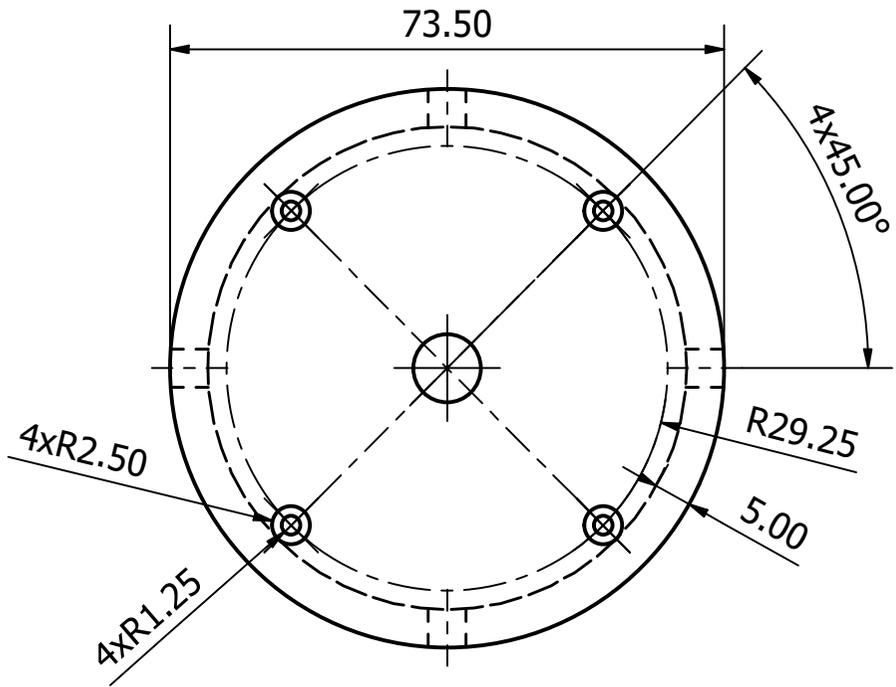


Espacio para bobina

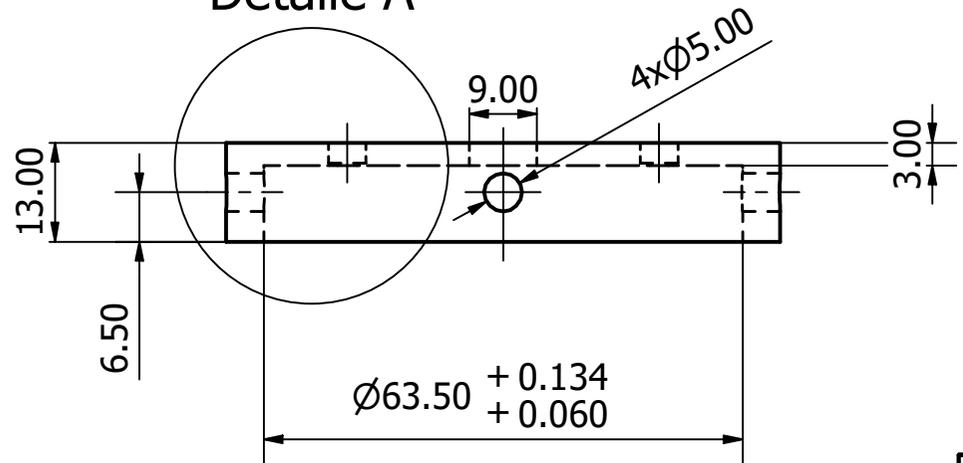


Espacio para cables

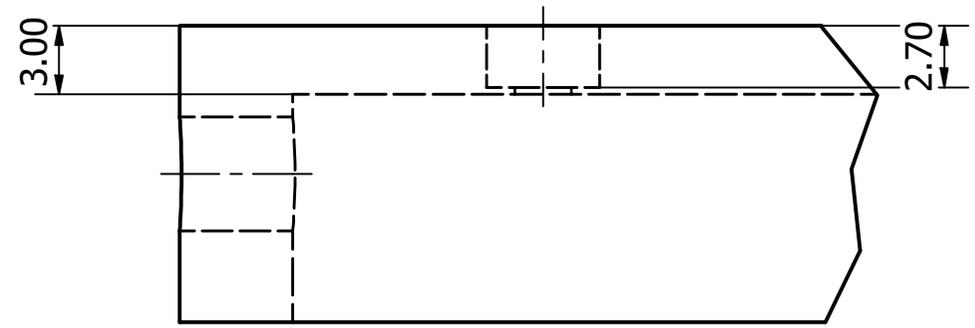
<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:1	<b>CANTIDAD</b> 2	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado con diamante
	<b>PIEZA</b> RodamientoMagnético		<b>OBSERVACIONES</b> El material es aislante eléctrico	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 6	



Detalle A



Detalle A ( 3 : 1 )



<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:1	<b>CANTIDAD</b> 2	
 UNAM	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado de diamante
<b>PIEZA</b> CarcasaRodamiento		<b>OBSERVACIONES</b> El material es aislante eléctrico	<b>ACOTACIONES</b> mm	<b>NO. PLANO</b> 7

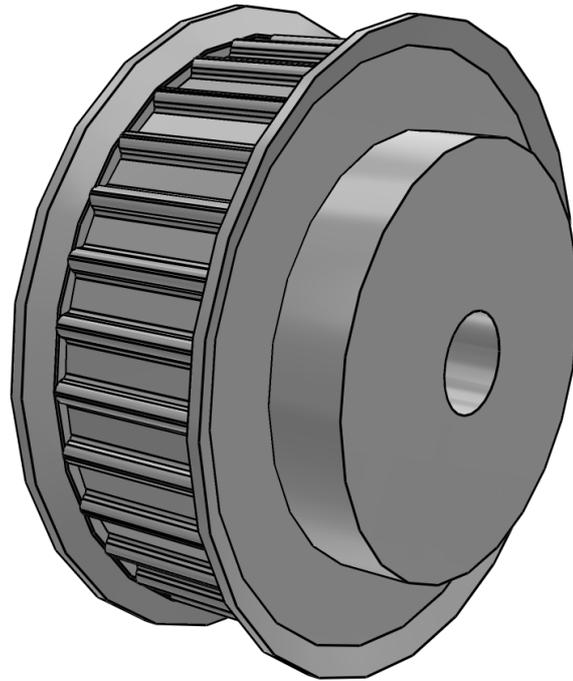
# 21 AT5 / 30-2

optibelt ZRS Metric Timing Belt Pulleys for cylindrical bores  
Profile acc. to ISO 17396



## 3D-View

To activate the interactive 3D view, you must trust this document (see hint on the top) in Adobe Acrobat and click on the question mark.



### Zoom

Moves you toward or away from objects in the scene when you drag vertically. You can also zoom with the hand tool by holding down Shift as you drag.

### Pan

Moves the model vertically and horizontally only. You can also pan with the hand tool: Ctrl-drag.

### Rotate

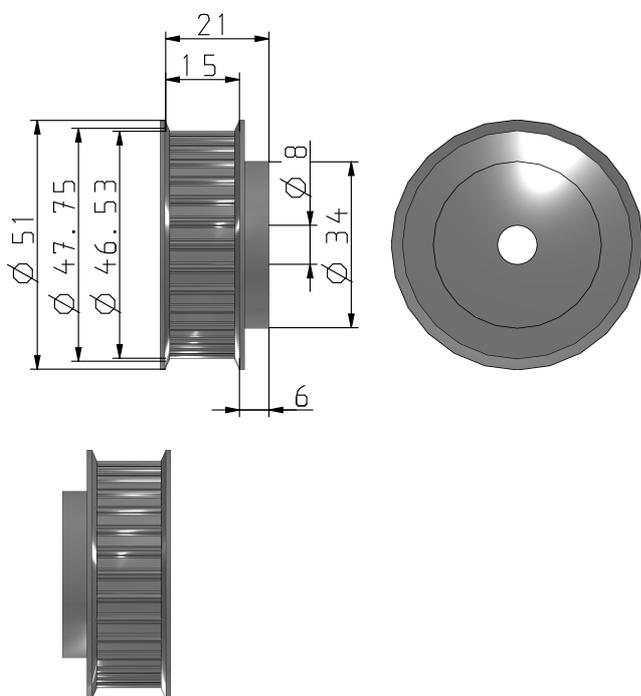
Turns 3D objects around relative to the screen. How the objects move depends on the starting view, where you start dragging and the direction in which you drag.

# 21 AT5 / 30-2

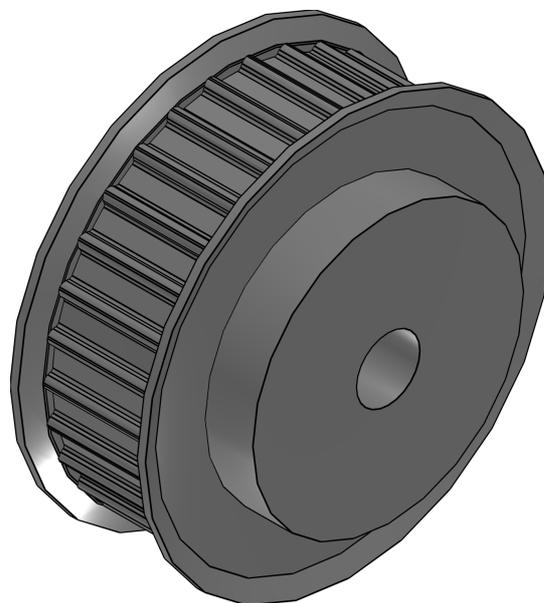
optibelt ZRS Metric Timing Belt Pulleys for cylindrical bores  
Profile acc. to ISO 17396



2D-View



ISO-View



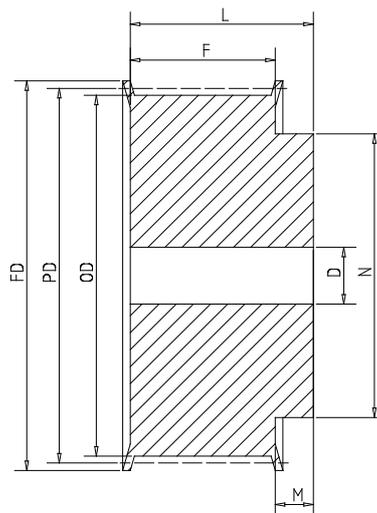
# 21 AT5 / 30-2

optibelt ZRS Metric Timing Belt Pulleys for cylindrical bores  
Profile acc. to ISO 17396



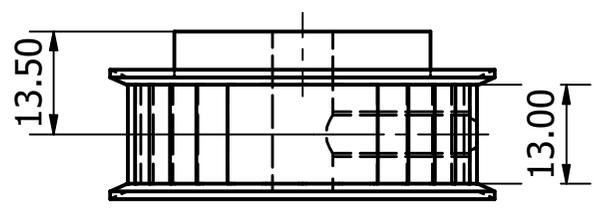
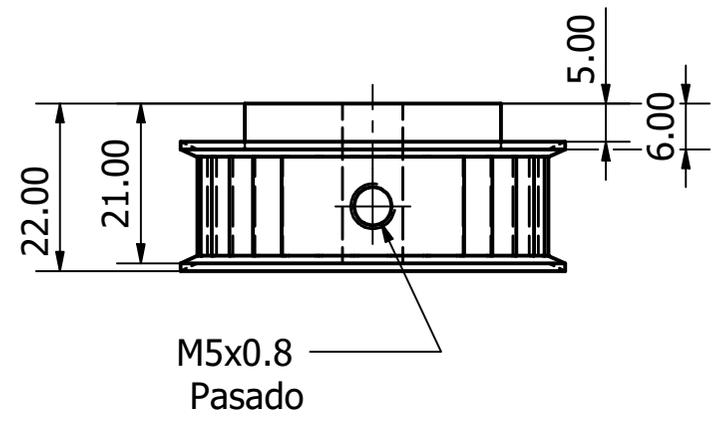
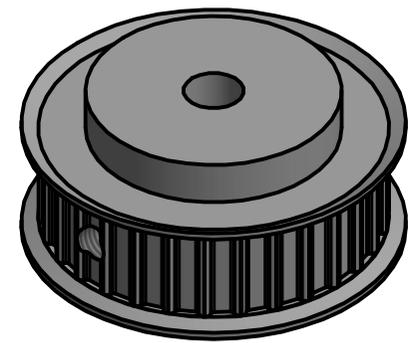
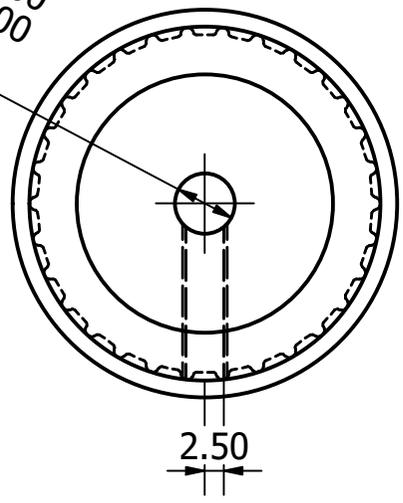
## Technical Data

BEZ (Designation Sales)	21 AT5 / 30-2
ANR (Part ID)	1715706
GTIN (Global Trade Item Number)	4014486231496
ZAE (Number of Teeth)	30
AUSFNR (Type ID)	6F
ABSN (Number of Flanges)	2
PD (Pitch Diameter / mm)	47.75
OD (Outside Diameter / mm)	46.53
FD (Flange Diameter / mm)	51
F (Face Width / mm)	15
K (K / mm)	0
L (L / mm)	21
M (M / mm)	6
N (N / mm)	34
J (J / mm)	0
D (Pilot Bore / mm)	8
DBMAX (max. Bore Diameter / mm)	18
AUSF (Type)	Solid pulley
MATERIAL (Material)	Aluminum 6082 T6
MATBS (Material Flange)	Steel
GEWICHT (Weight / kg)	0.08
OF (Surface Treatment)	-
WG (Balancing Grade)	Not Balanced
QS (Quality Standard)	acc. to ISO 254

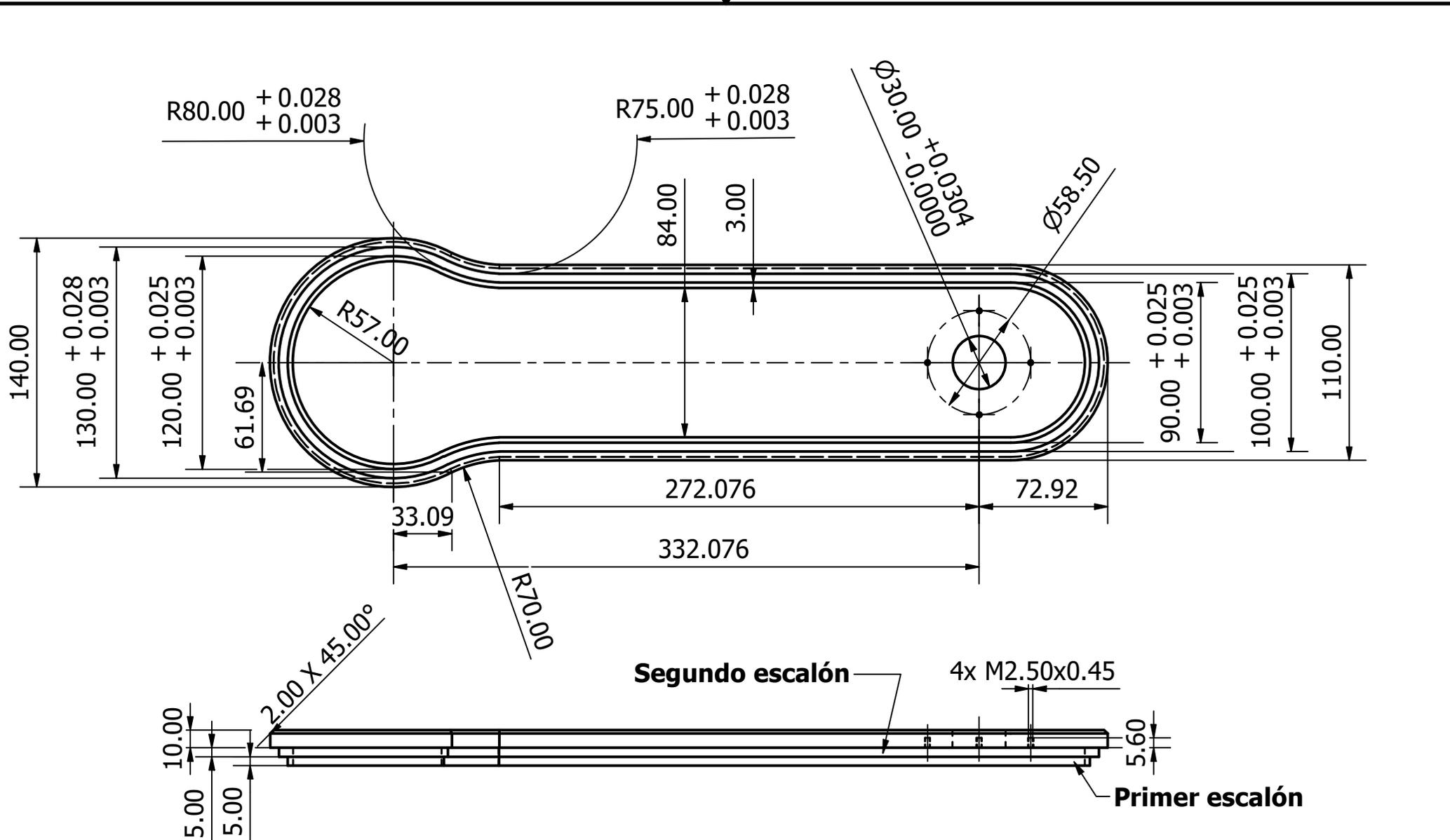


We reserve the right to make technical changes. Additional information can be found in the Technical Manual Rubber / Polyurethane Timing Belts. Profiles not to scale, measurements may vary.

Ø8.00 +0.000  
Pasado -0.000

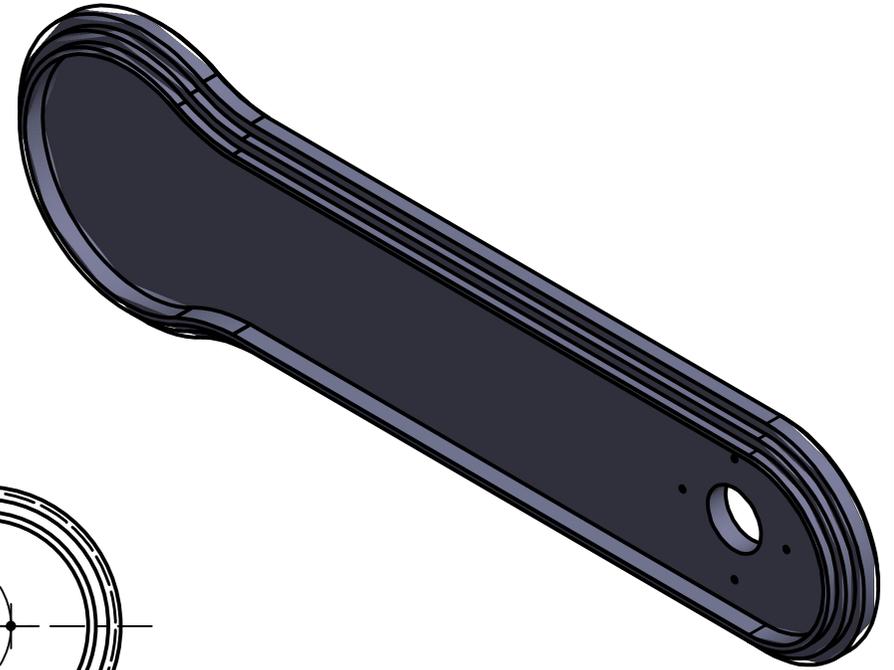
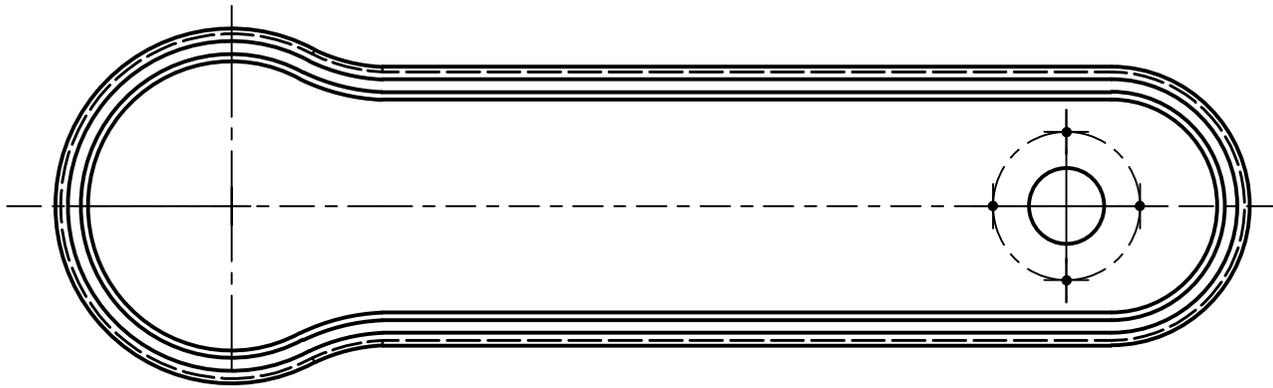


<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:1	<b>CANTIDAD</b> 1	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> Aluminio 6082 T6	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Compra y maquinado
<b>PIEZA</b> UNAM	PoleaConducida		<b>OBSERVACIONES</b> # Dientes: 30 Paso: 5mm	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 8	

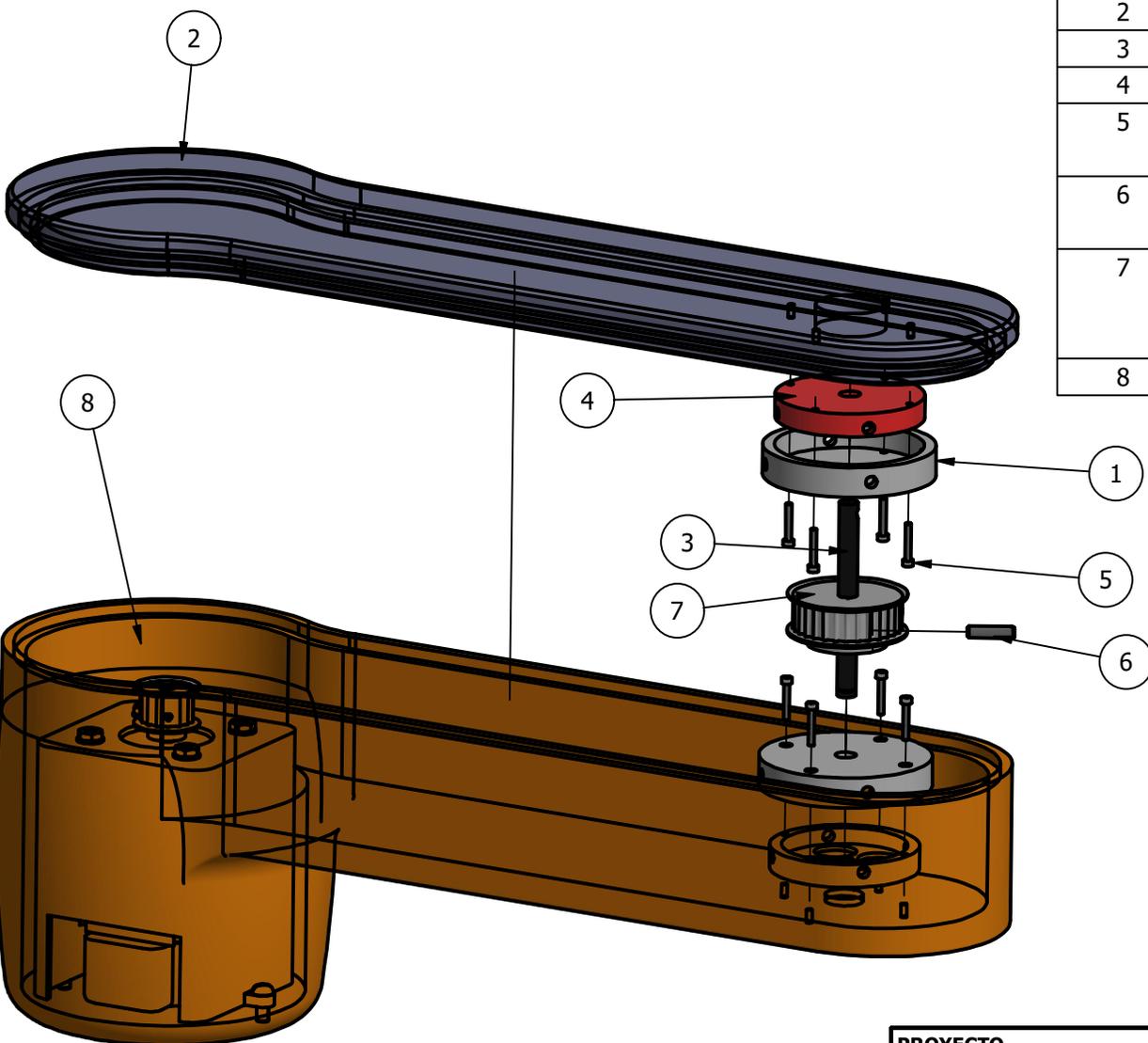


<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> 1	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado con diamante
<b>PIEZA</b> UNAM	BrazoTapa		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 9	

Este plano no contiene acotaciones,  
únicamente es para visualizar las vistas incluida la isométrica.



<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> 1	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado con diamante
	<b>PIEZA</b> BrazoTapa		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 9.1	



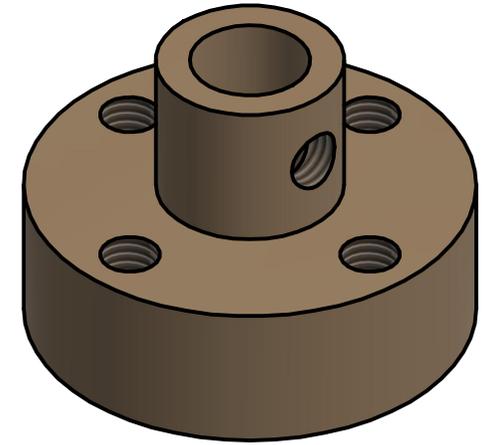
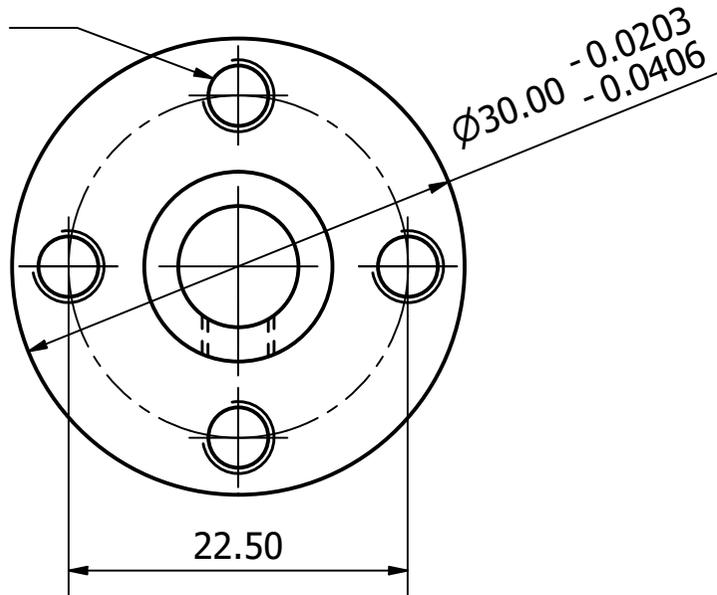
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	CarcasaRodamiento	
2	1	BrazoTapa	
3	1	Eje	
4	2	RodamientoMagnético	
5	8	Tornillos BS 4168 - M2.5x16	Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal
6	1	Tornillo DIN EN 24766 - M5x20	Tornillo de cabeza perdida ranurado - Punta plana
7	1	PoleaConducida	Tipo AT5- Polea para transmisión 21 AT5 / 30-2 Aluminio 6082 T6
8	1	Brazo	

**ORDEN DE ENSAMBLE**

- Primer piso del rodamiento con el Brazo.
- Eje con PoleaMotriz.
- Segundo piso del rodamiento con BrazoTapa.
- BrazoTapa con Brazo.

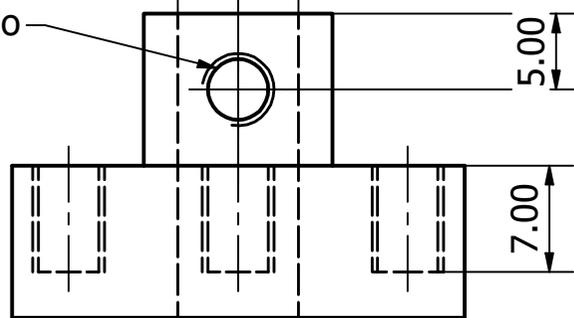
<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> -----	
 UNAM	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> -----	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> -----
<b>PIEZA</b> Ensamble Brazo-Rodamientos-Carcasas-Eje-PoleaConducida-BrazoTapa	<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm	<b>NO. PLANO</b> 10	

4x M4x0.7

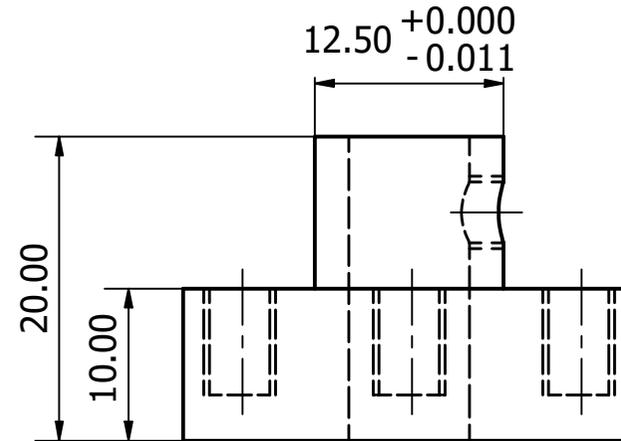


$\varnothing 8.00^{+0.0080}_{-0.0070}$ , pasado

M4x0.7 pasado

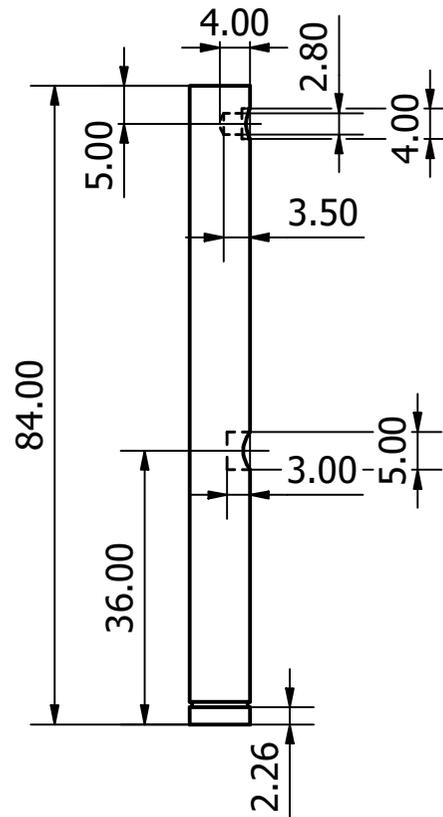
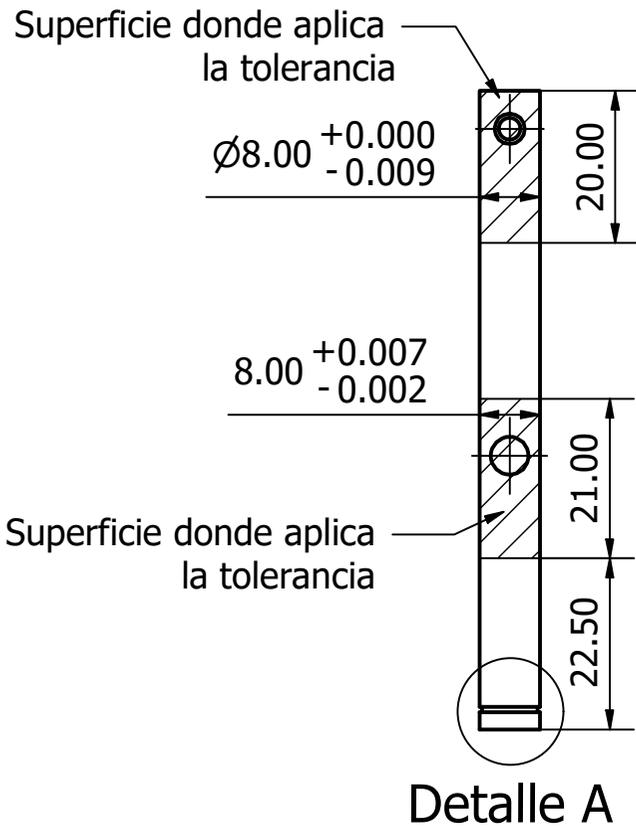


$12.50^{+0.000}_{-0.011}$

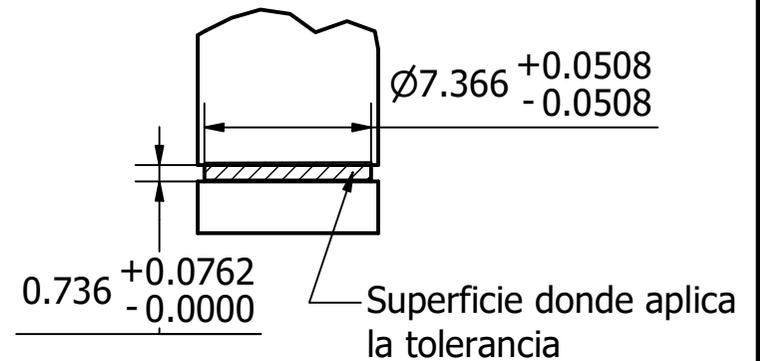


<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 2:1	<b>CANTIDAD</b> 1	
 UNAM	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> PEEK natural	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Mecanizado con diamante
<b>PIEZA</b> Mamelón		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm	<b>NO. PLANO</b> 11

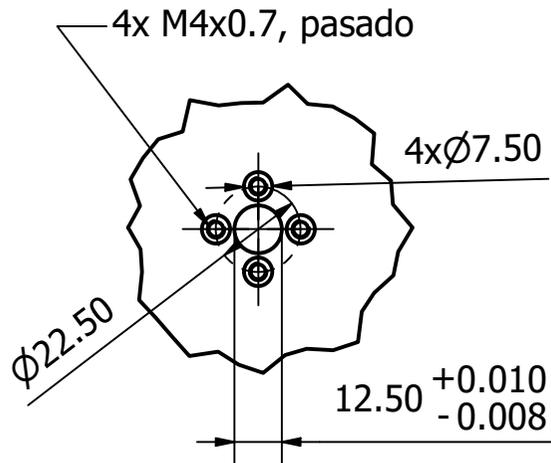
R2.21



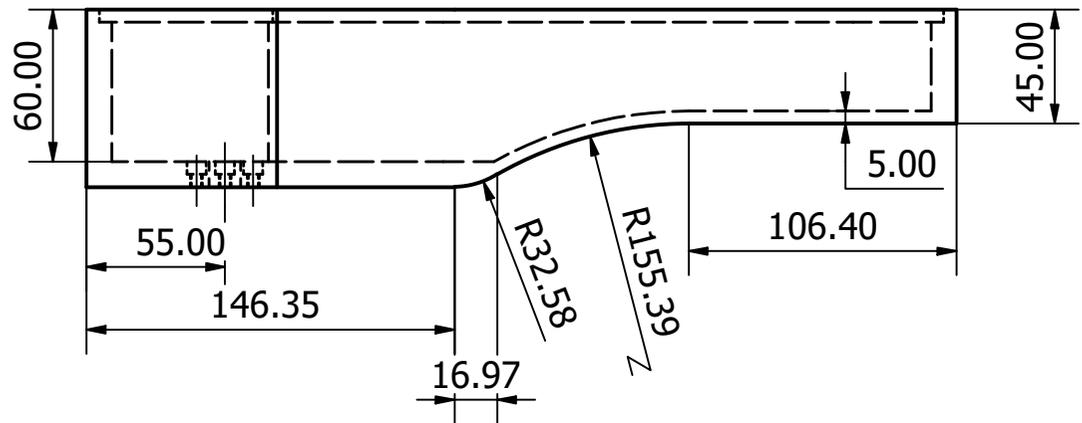
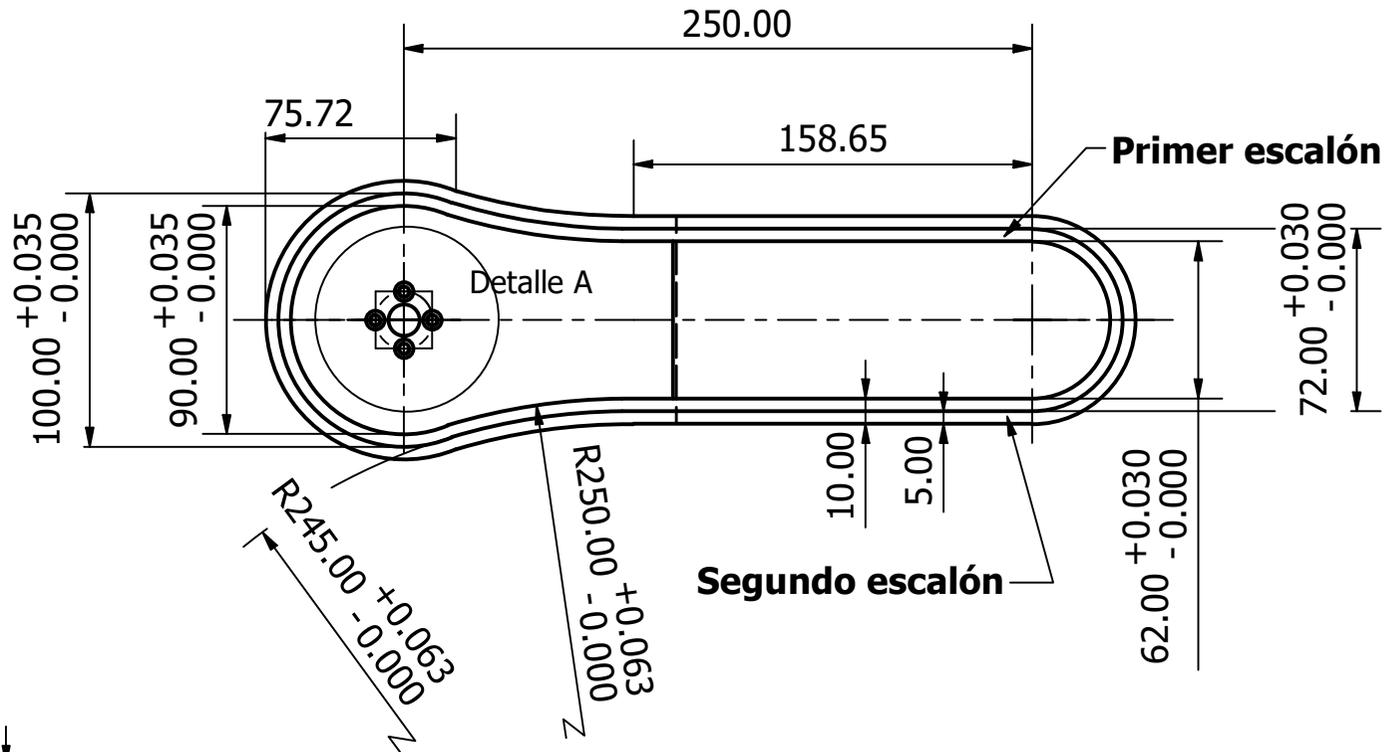
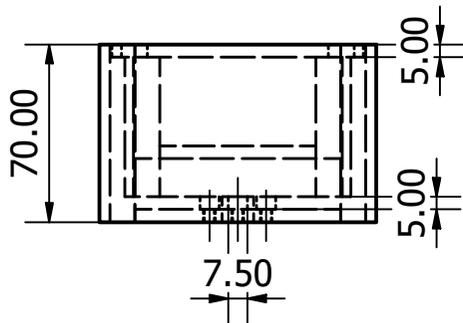
Detalle A ( 3 : 1 )



<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:1	<b>CANTIDAD</b> 1	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> Acero inoxidable 430	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Compra, torneado y rectificado
	<b>PIEZA</b> Eje		<b>OBSERVACIONES</b> Barra redonda de 3/8" (9.525 mm)	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 12	

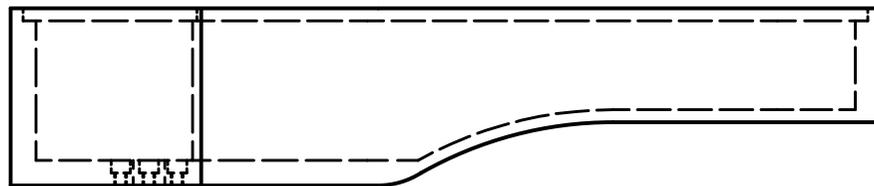
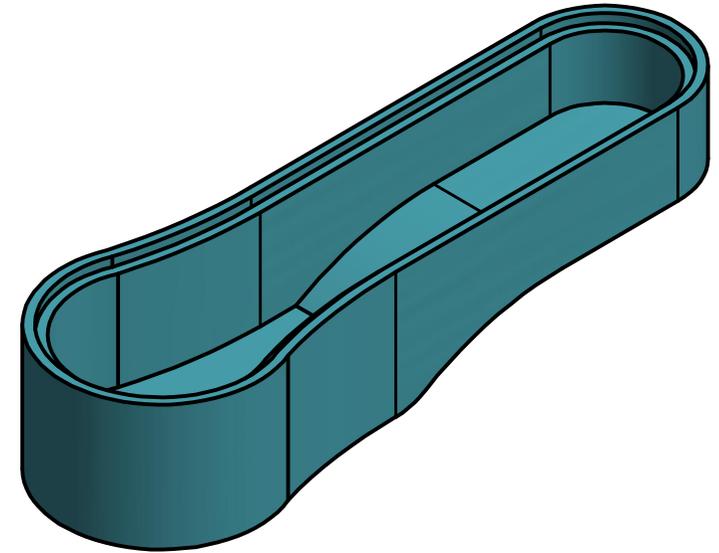
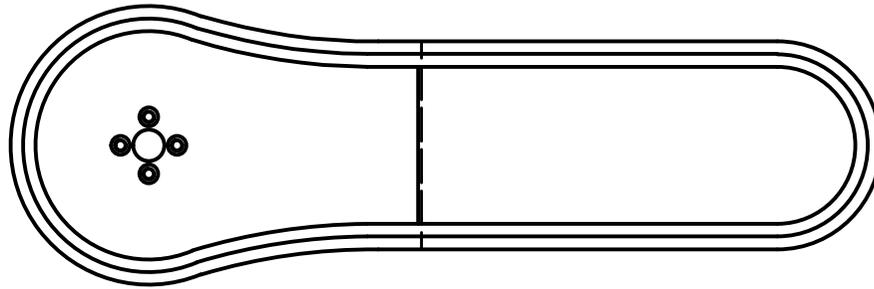


Detalle A ( 1:2 )

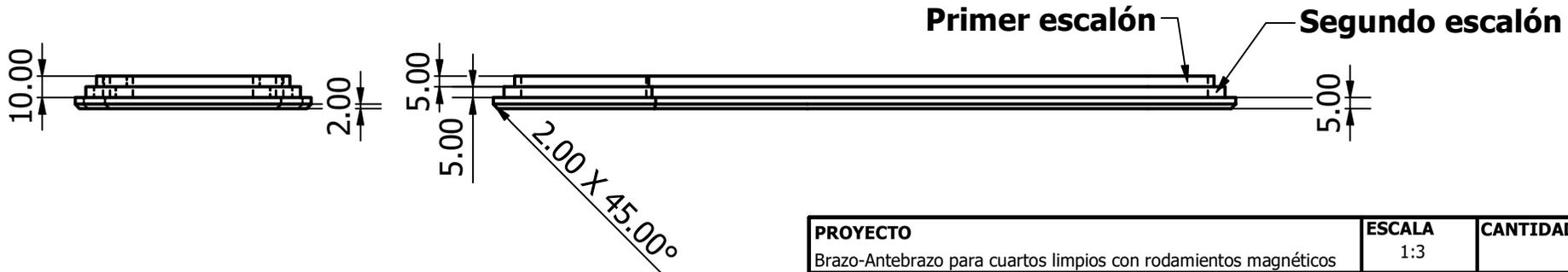
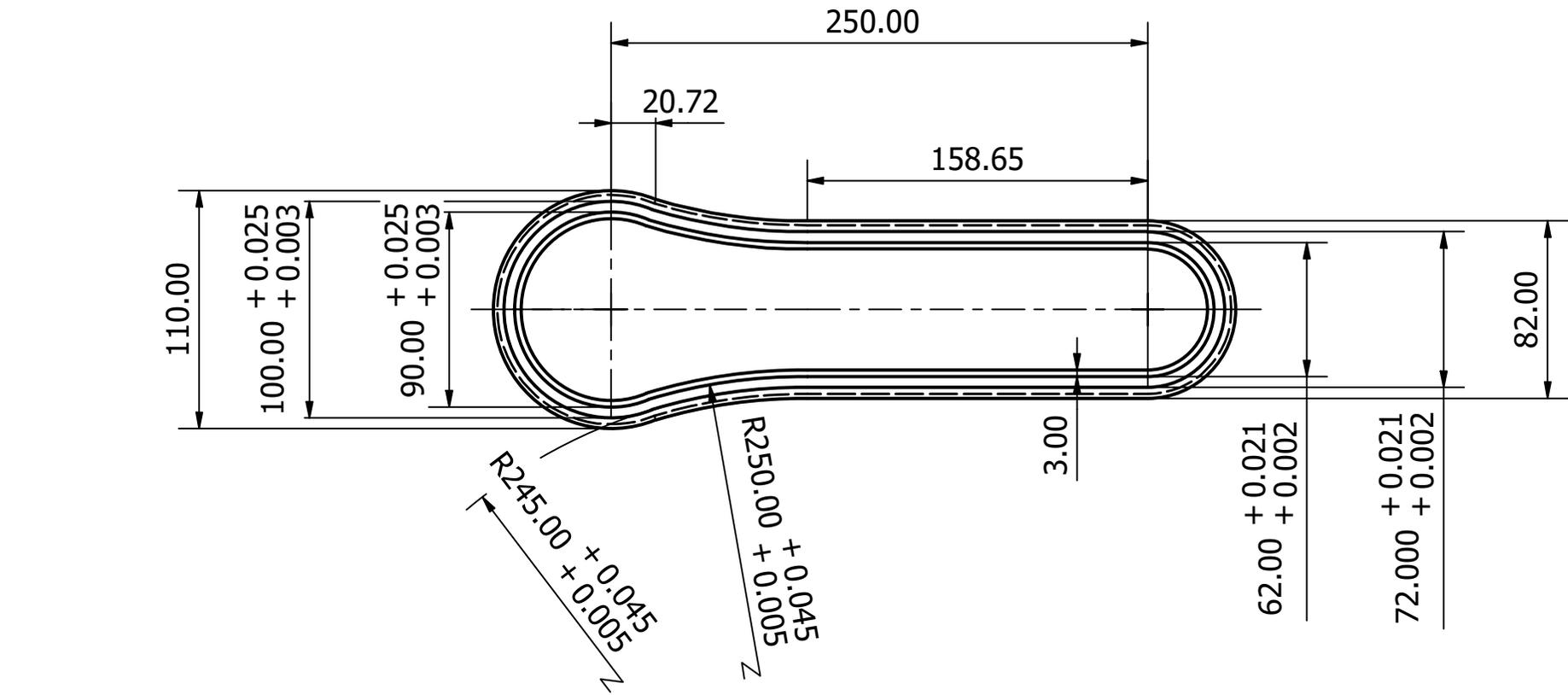


<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> 1	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado con diamante
<b>PIEZA</b> UNAM	Antebrazo		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 13	

Este plano no contiene acotaciones, únicamente es para visualizar las vistas incluida la isométrica.

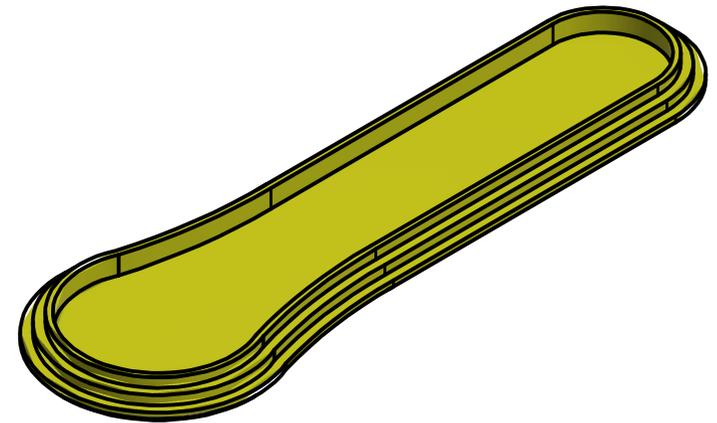
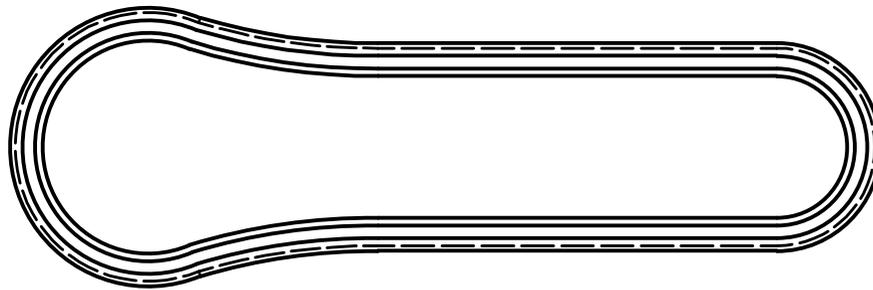


<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> 1	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado con diamante
<b>PIEZA</b> UNAM	Antebrazo		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 13.1	



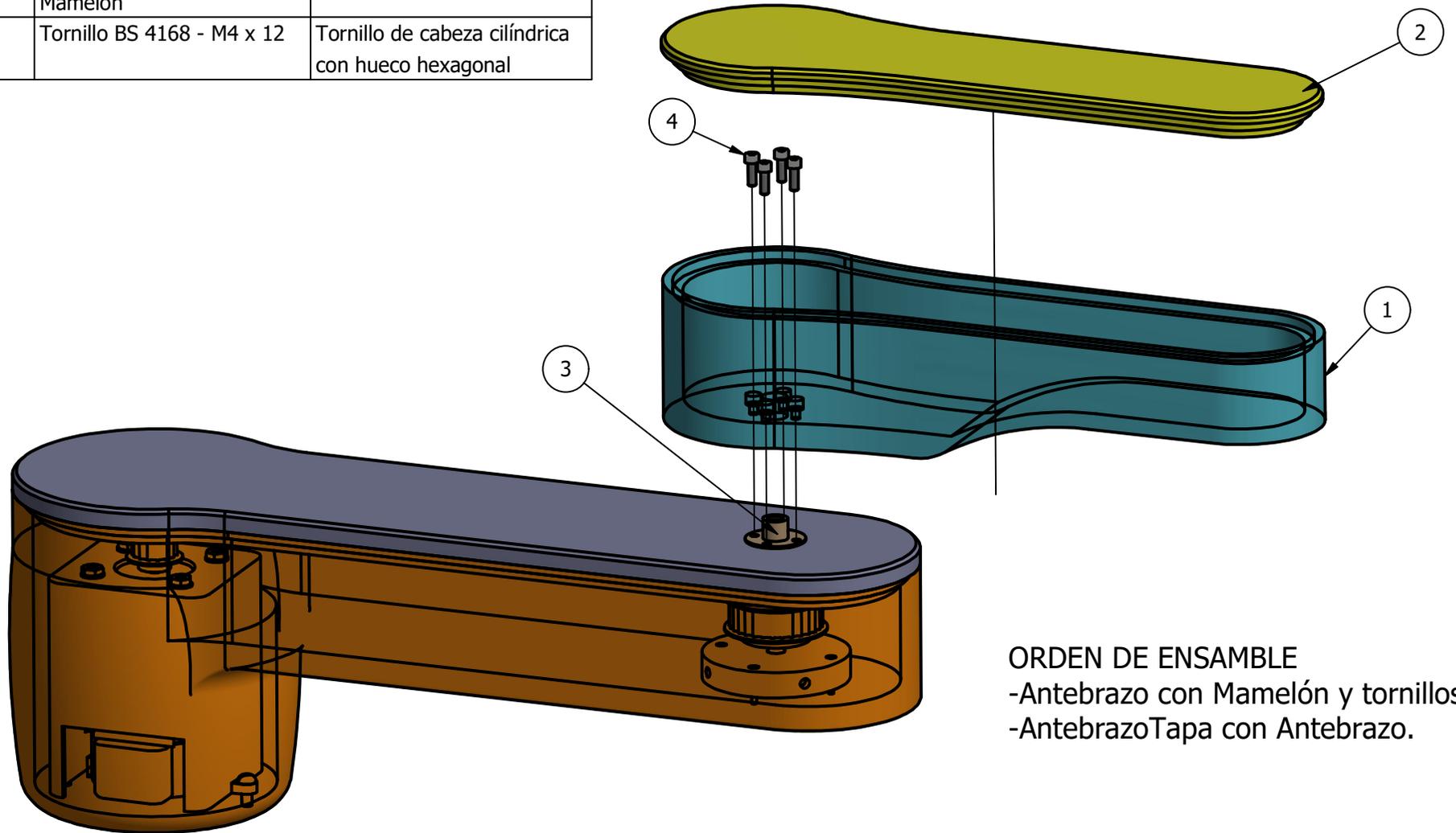
<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> 1	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado con diamante
<b>PIEZA</b> UNAM	AntebrazoTapa		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 14	

Este plano no contiene acotaciones,  
únicamente es para visualizar las vistas incluida la isométrica.



<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> 1	
 UNAM	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> VeroClear RGD810	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> Manufactura aditiva (Polyjet) y mecanizado con diamante
	<b>PIEZA</b> AntebrazoTapa		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
			<b>NO. PLANO</b> 14:1	

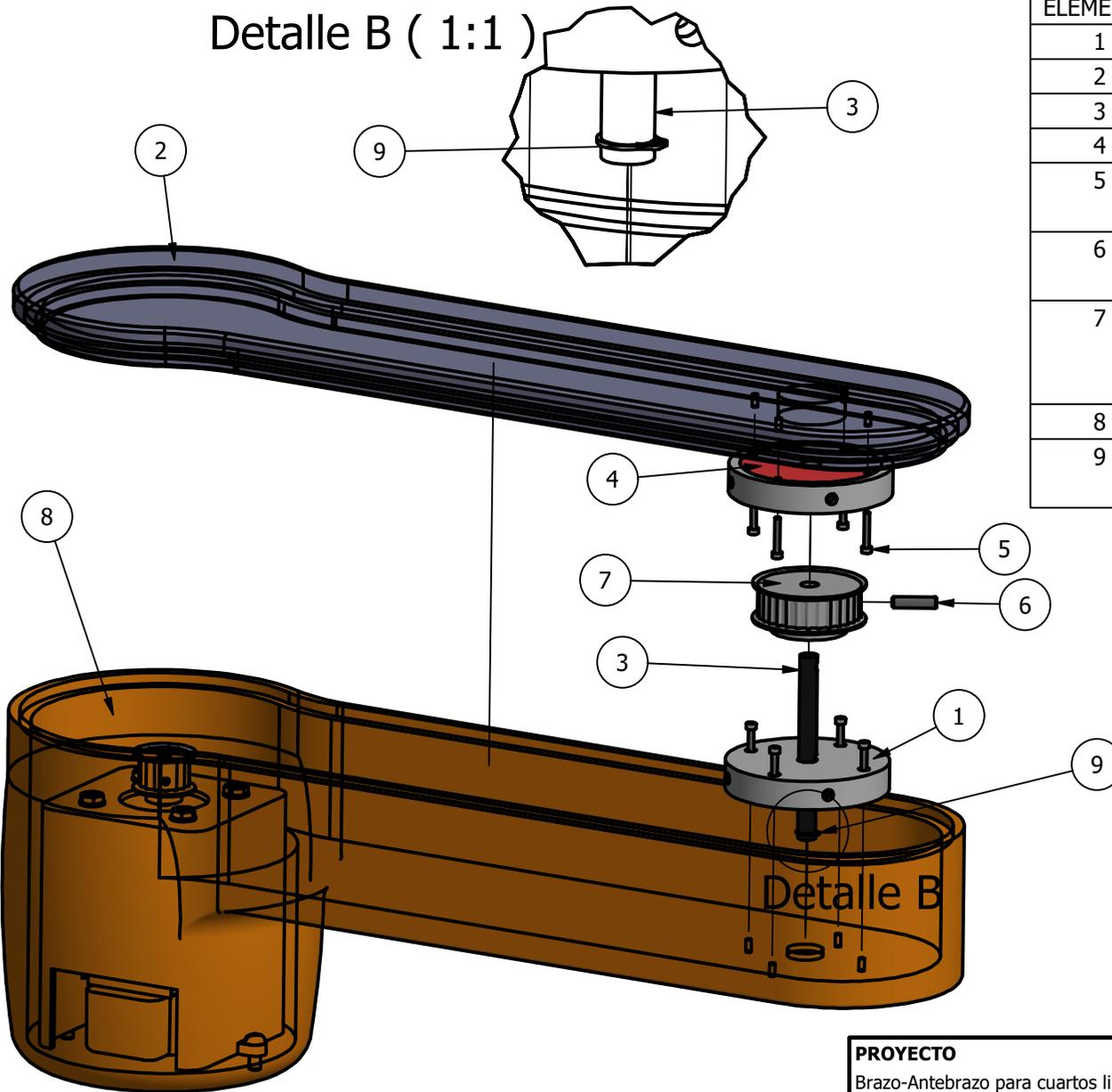
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Antebrazo	
2	1	AntebrazoTapa	
3	1	Mamelón	
4	4	Tornillo BS 4168 - M4 x 12	Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal



ORDEN DE ENSAMBLE  
 -Antebrazo con Mamelón y tornillos.  
 -AntebrazoTapa con Antebrazo.

<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> -----	
	<b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> -----	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> -----
<b>PIEZA</b> UNAM	Ensamble Mamelón-Antebrazo-AntebrazoTapa		<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm
				<b>NO. PLANO</b> 15

Detalle B ( 1:1 )



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	2	CarcasaRodamiento	
2	1	BrazoTapa	
3	1	Eje	
4	2	RodamientoMagnético	
5	8	Tornillos BS 4168 - M2.5x16	Tornillo de cabeza cilíndrica con hueco hexagonal
6	1	Tornillo DIN EN 24766 - M5x20	Tornillo de cabeza perdida ranurado - Punta plana
7	1	PoleaConducida	Tipo AT5- Polea para transmisión 21 AT5 / 30-2 Aluminio 6082 T6
8	1	Brazo	
9	1	ASME B18.27.1 NA1 - 5/16	Anillo de retención externo Acero inoxidable 440C

ORDEN DE ENSAMBLE

- Eje con anillo de retención, en el Brazo.
- Primer piso del rodamiento con el Brazo.
- PoleaMotriz con Eje.
- Segundo piso del rodamiento con BrazoTapa.
- BrazoTapa con Brazo.

<b>PROYECTO</b> Brazo-Antebrazo para cuartos limpios con rodamientos magnéticos		<b>ESCALA</b> 1:3	<b>CANTIDAD</b> -----	
 <b>DISEÑADO POR</b> Renata Acevedo Costas	<b>REVISADO POR</b> Dr. Leopoldo A. González González	<b>MATERIAL</b> -----	<b>PROCESO DE MANUFACTURA</b> -----	
<b>PIEZA</b> UNAM	Ensamble Brazo-Rodamientos-Carcasas-Eje-PoleaConducida-BrazoTapa-AnilloRetención	<b>OBSERVACIONES</b> -----	<b>ACOTACIONES</b> mm	<b>NO. PLANO</b> 16

## **APÉNDICE C - Cálculo de la transmisión**

En el presente apéndice se muestra el resumen del cálculo de transmisión por poleas y bandas dentadas que proporciona el programa CAP 6.0 de la empresa Optibelt® al finalizar la selección de la transmisión.



Remitente

Teléfono :		Teléfono :	
Telefax :		Telefax :	
e-mail :		e-mail :	
internet :		internet :	

## Calculo de transmisión

### Accionamiento con dos poleas dentadas

Núm. de calculo :	C000000018	datos :	30.08.2022	Nº de serie :	11155837
Proyecto :	0001	Nº de plano :	0001	Transmisión :	0001

Apreciados señores:

Según conversación telefónica, hemos realizado los cálculos partiendo de los datos técnicos que Uds. nos han facilitado.

La transmisión está dimensionada con:

- Optibelt ALPHA Correas dentadas 6 AT5/780
- Optibelt-ZRS Polea dentada 21 AT 5/15-2
- Agujero cilíndrico
- Optibelt-ZRS Polea dentada 21 AT 5/30-2
- Agujero cilíndrico

En caso de tener alguna duda sobre nuestras recomendaciones rogamos contacte con nosotros en el nº de teléfono indicado.

Atentamente

Con relación a la responsabilidad sobre el cálculo, nos remitimos a nuestras condiciones generales de venta.



### Calculo de transmisión

#### Accionamiento con dos poleas dentadas

Núm. de calculo : C000000018      datos : 30.08.2022      Nº de serie : 11155837  
 Proyecto : 0001      Nº de plano : 0001      Transmisión : 0001

La transmisión está dimensionada con:

- Optibelt ALPHA Correas dentadas 6 AT5/780
- Optibelt-ZRS Polea dentada 21 AT 5/15-2
- Agujero cilíndrico
- Optibelt-ZRS Polea dentada 21 AT 5/30-2
- Agujero cilíndrico

<b>Polea motriz</b>	: Motor eléctrico		
<b>Polea conducida</b>	: Lavadoras		
<b><u>Datos de la correa dentada</u></b>			<b><u>Observaciones</u></b>
Paso	t :	5,000 mm	
Ancho	b :	6,00 mm	
Desarrollo primitivo calculado	Lwth :	782,93 mm	
Desarrollo primitivo estándar	Lw :	780,00 mm	--- mm
Número de deintes	zr :	156	
Velocidad	v :	0,02 m/s	
<b><u>Datos de las poleas dentadas</u></b>		<b>Polea 1 (fuerza motriz)</b>	<b>Polea 2 (accionada)</b>
<b>Número de deintes</b>	z :	<b>15</b>	<b>30</b>
Diámetro de desarrollo	dw :	23,87 mm	47,75 mm
Anchura de la polea dentada	b1 :	15,00 mm	15,00 mm
<b>Nº de giros</b>	n :	<b>15,0 1/min</b>	<b>7,5 1/min</b>
Número de dientes engranados	ze :	7	15
Momento de giro	M :	1 Nm	3 Nm
Ejecución estándar	:	6F	6F
Nº de poleas	:	2	2
Material de trabajo	:	Al	Al
alineación de los ejes	:	horizontal	
<b><u>Datos de la transmisión realizados</u></b>			<b><u>Observaciones</u></b>
<b>Potencia calculada</b>	PB :	<b>0.003 kW</b>	
Potencia de máquina motriz	P :	0.002 kW	
Potencia nominal corregida	PÜ :	0.003 KW	
<b>Factor de carga real</b>	c2 :	<b>1.43</b>	
Relación de transmisión efectiva	i :	2.00	--- %
<b>Entreeje real</b>	a :	<b>333,54 mm *</b>	<b>-1.464 mm</b>
Recorrido libre para montaje	y : ≧	17,00 mm	
Recorrido para tensado/montaje	x : ≧	1,33 mm	
Fuerza tangencial efectiva	Sn3 :	106 N	
Fuerza estática sobre eje	Sa :	116 N	
Longitud del ramal	L :	333.32 mm	

\* Indicación: Distancia entre ejes no recomendable!

#### Recomendaciones de pretensado

Para c2 recalculado = 1.40		<b>Primer montaje</b>	<b>Posteriores</b>
		Correas nuevas	Posteriores retensados
1.	Fuerza estática en el ramal :	67 N	58 N
2.	Medición de la flecha de pretensado. Fuerza de ensayo de carga :	6 N	5 N
	Profundidad de presión :	6.67 mm	6.67 mm
3.	optibelt TT - medición de frecuencia ( 1 Hz - 600 Hz) de frecuencias :	85.82 1/s	80.03 1/s

Con relación a la responsabilidad sobre el cálculo, nos remitimos a nuestras condiciones generales de venta.

# APÉNDICE D - Tablas de ajustes, calidades dimensionales y tolerancias dimensionales

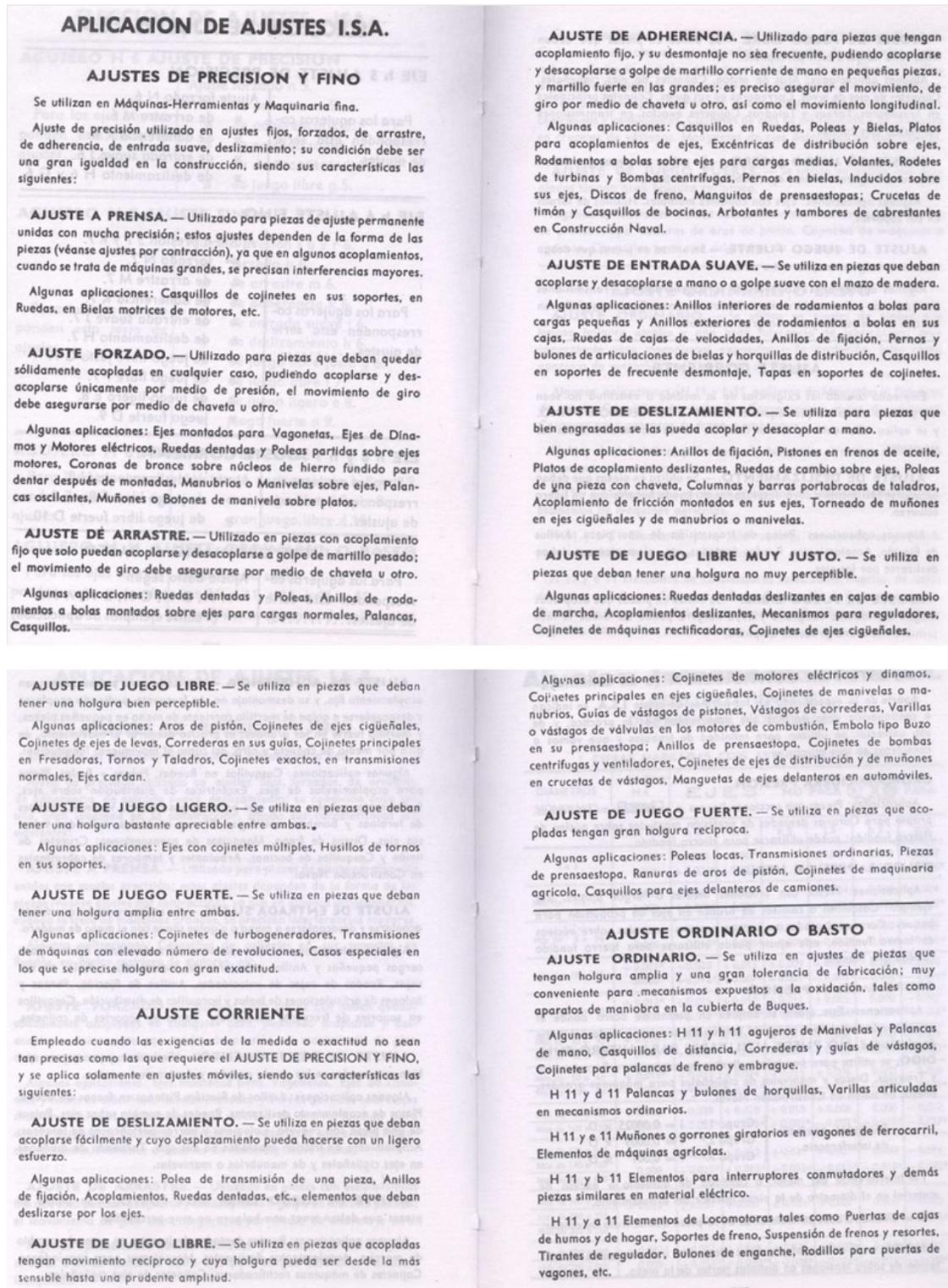


Figura D1. Aplicación de ajustes. Obtenido de [117].

ELECCION DE AJUSTES «ISA»	
<b>AGUJERO H 6 AJUSTE DE PRECISION</b>	
Para los ejes corresponden esta serie de ajustes.....	Ajuste forzado n 5. » de arrastre m 5. » de adherencia k 5. » de entrada suave j 5. » de deslizamiento h 5. » de juego libre g 5.
<b>AGUJERO H 7 AJUSTE FINO</b>	
Para los ejes corresponden esta serie de ajustes.....	Ajuste a presión s 6 y r 6. » forzado n 6. » de arrastre m 6. » de adherencia k 6. » de entrada suave j 6. » de deslizamiento h 6. » de juego libre justo g 6. » de juego libre f 7. » de juego ligero e 8. » juego fuerte d 9.
<b>AGUJERO H 8 AJUSTE CORRIENTE</b>	
Para los ejes corresponden esta serie de ajustes.....	Ajuste con deslizamiento h 8 y h 9. » con juego libre f 8 y e 9. » gran juego libre d 10.
<b>AGUJERO H 11 AJUSTE ORDINARIO O BASTO</b>	
Para los ejes corresponden esta serie de ajustes.....	Ajuste basto según h 11, d 11, e 11, b 11, a 11. (Véanse ejemplos de aplicación)
ELECCION DE AJUSTES I.S.A.	
<b>EJE h 5 AJUSTE DE PRECISION</b>	
Para los agujeros corresponden esta serie de ajustes.....	Ajuste forzado N 6. » de arrastre M 6. » de adherencia K 6. » de entrada suave J 6. » de deslizamiento H 6 y G 6.
<b>EJE h 6 AJUSTE FINO</b>	
Para los agujeros corresponden esta serie de ajustes.....	Ajuste a presión S 7 y R 7. » forzado N 7. » de arrastre M 7. » de adherencia K 7. » de entrada suave J 7. » de deslizamiento H 7. » de juego libre justo G 7. » de juego libre F 7. » de juego ligero E 8. » juego fuerte D 9.
<b>EJE h 8 y h 9 AJUSTE CORRIENTE</b>	
Para los agujeros corresponden esta serie de ajustes.....	Ajuste de deslizamiento H 8. » de juego libre F 8 y E 9. » de juego libre fuerte D 10.
<b>EJE h 11 AJUSTE ORDINARIO O BASTO</b>	
Para los agujeros corresponden esta serie de ajustes.....	Ajuste basto según H 11, D 11, C 11, B 11, A 11. (Véanse ejemplos de aplicación)

Figura D2. Elección de ajustes. Obtenido de [117].

Grupos de Diámetros (mm)	CALIDADES																	
	IT 01	IT 0	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16
d ≤ 3	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600
3 < d ≤ 6	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750
6 < d ≤ 10	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900
10 < d ≤ 18	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100
18 < d ≤ 30	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300
30 < d ≤ 50	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600
50 < d ≤ 80	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900
80 < d ≤ 120	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200
120 < d ≤ 180	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500
180 < d ≤ 250	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900
250 < d ≤ 315	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200
315 < d ≤ 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600
400 < d ≤ 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000
	Ultraprecisión		Calibre y piezas de gran precisión			Piezas o elementos destinados a ajustar						Piezas o elementos que no han de ajustar						

Tabla D1. Valores fundamentales en micras ( $\mu\text{m}$ ) para cada una de las calidades y para cada uno de los trece grupos de dimensiones. Obtenido de [117].

Tipo de Ajuste	Agujero Único		Eje Único		Clase	Características	Ejemplos de Aplicación			
	Ag.	Ej.	Ag.	Ej.						
Preciso o Fino	H7	s6/r6	S7/R7	h6	Prensado	Montaje a presión sin necesidad de seguro de giro	Casquillos y coronas de bronce, acoplamientos en extremos de ejes, engranajes de máquinas			
		n6	N7		Muy forzado. Montaje a martillo	Montaje complicado Necesidad de seguro de giro	Casquillos de bronce, manguitos en cubos			
		k6	K7		Forzado medio. Montaje a martillo	Necesita seguro de giro y de deslizamiento	Rodamientos, discos de levas, poleas y volantes, manivelas			
		j6	J7		Forzado ligero. Montaje a mano	Necesita seguro de giro y de deslizamiento	Elementos de máquinas herramienta u otros con alta frecuencia de montaje-desmontaje			
		h6	H7		Deslizante	Necesidad de Lubricación	Engranajes, piezas de máquinas herramienta			
		g6	G7					Giratorio sin juego apreciable	Juego pequeño de rodamientos	Émbolos de freno, bridas, anillos
		f7	F8					Giratorio con poco juego	Juego mediano	Cojinetes de bielas, ruedas dentadas, cajas de cambio
Nivel medio de precisión	H8	h9	H9	h9	Deslizante	Sin lubricación	Poleas fijas, manivelas, acoplamientos deslizantes sobre ejes			
		e8	E9		Giratorio	Juego mediano	Piezas de motores, bombas, ventiladores (bielas, cojinetes, etc.)			
		d9	D10		Giratorio	Mucho juego	Soportes de ejes			
Acabado Basto	H11	c11	C11	h9	Holgado		Cojinetes de maquinaria agrícola			
	H11	h11	H11		h11	Deslizante	Ajustes ordinarios	Piezas varias de maquinaria agrícola		
		d9	D10			Giratorio	Juego mediano	Ejes de movimiento longitudinal, aros, palancas y manivelas desmontables		
		e11	E11			Holgado	Mucho juego	Cojinetes de máquinas domésticas		
		a11	A11			Muy holgado	Juego muy amplio	Piezas de locomotoras, cojinetes de ejes de freno, avellanados, taladro de tornillos		

Tabla D2. Valores Aplicaciones recomendadas de ajustes. Obtenida de [118].

Posición	a	b	c	cd	d	e	ef	f	fg	g	h	j			k	
Calidad												5 y 6	7	8	>4 y ≤ 7	<4 y >7
Diferencia fundamental	Diferencia superior ds											Diferencia inferior di				
$m \leq 3$	-270	-140	-60	-34	-20	-14	-10	-6	-4	-2	0	-2	-4	-6	0	0
$3 < m \leq 6$	-270	-140	-70	-46	-30	-20	-14	-10	-6	-4	0	-2	-4	-	+1	0
$6 < m \leq 10$	-280	-150	-80	-56	-40	-25	-18	-13	-8	-5	0	-2	-5	-	+1	0
$10 < m \leq 14$	-290	-150	-95	-	-50	-32	-	-16	-	-6	0	-3	-6	-	+1	0
$14 < m \leq 18$																
$18 < m \leq 24$	-300	-160	-110	-	-65	-40	-	-20	-	-7	0	-4	-8	-	+2	0
$24 < m \leq 30$																
$30 < m \leq 40$	-310	-170	-120	-	-80	-50	-	-25	-	9	0	-5	-10	-	+2	0
$40 < m \leq 50$	-320	-180	-130													
$50 < m \leq 65$	-340	-190	-140	-	-100	-60	-	-30	-	-10	0	-7	-12	-	+2	0
$65 < m \leq 80$	-360	-200	-150													
$80 < m \leq 100$	-380	-220	-170	-	-120	-72	-	-36	-	-12	0	-9	-15	-	+3	0
$100 < m \leq 120$	-410	-240	-180													
$120 < m \leq 140$	-460	-260	-200													
$140 < m \leq 160$	-520	-280	-210	-	-145	-85	-	-43	-	-14	0	-11	-18	-	+3	0
$160 < m \leq 180$	-580	-310	-230													
$180 < m \leq 200$	-660	-340	-240													
$200 < m \leq 225$	-740	-380	-260	-	-170	-100	-	-50	-	-15	0	-13	-21	-	+4	0
$225 < m \leq 250$	-820	-420	-280													
$250 < m \leq 280$	-920	-460	-300	-	-190	-110	-	-56	-	-17	0	-16	-26	-	+4	0
$280 < m \leq 315$	-1050	-540	-330													
$315 < m \leq 355$	-1200	-600	-360	-	-210	-125	-	-62	-	-18	0	-18	-28	-	+4	0
$355 < m \leq 400$	-1350	-680	-400													
$400 < m \leq 450$	-1500	-760	-440	-	-230	-135	-	-68	-	-20	0	-20	-32	-	+5	0
$450 < m \leq 500$	-1650	-840	-480													

Tabla D3. Diferencias fundamentales expresadas en micras aplicables a ejes. Obtenida de [117].

Posición	m	n	p	r	s	t	u	v	x	y	z	za	zb	zc
Calidad	Todas las calidades													
Diferencia fundamental	Diferencia inferior di													
$m \leq 3$	+2	+4	+6	+10	+14	-	+18	-	+20	-	+26	+32	+40	+60
$3 < m \leq 6$	+4	+8	+12	+15	+19	-	+23	-	+28	-	+35	+42	+50	+80
$6 < m \leq 10$	+6	+10	+15	+19	+23	-	+28	-	+34	-	+42	+52	+67	+97
$10 < m \leq 14$	+7	+12	+18	+23	+28	-	+33	-	+40	-	+50	+64	+90	+130
$14 < m \leq 18$								+39	+45	-	+60	+77	+108	+150
$18 < m \leq 24$	+8	+15	+22	+28	+35	-	+41	+47	+54	+63	+73	+98	+136	+188
$24 < m \leq 30$						+41	+48	+55	+64	+75	+88	+118	+160	+218
$30 < m \leq 40$	+9	+17	+26	+34	+43	+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200	+274
$40 < m \leq 50$						+54	+70	+81	+97	+114	+136	+180	+242	+325
$50 < m \leq 65$	+11	+20	+32	+41	+53	+66	+87	+102	+122	+144	+172	+226	+300	+405
$65 < m \leq 80$				+43	+59	+75	+102	+120	+146	+174	+210	+274	+360	+480
$80 < m \leq 100$	+13	+23	+37	+51	+71	+91	+124	+146	+178	+214	+258	+335	+445	+585
$100 < m \leq 120$				+54	+79	+104	+144	+172	+210	+254	+310	+400	+525	+690
$120 < m \leq 140$				+63	+92	+122	+170	+202	+248	+300	+365	+470	+620	+800
$140 < m \leq 160$	+15	+27	+43	+65	+100	+134	+190	+228	+280	+340	+415	+535	+700	+900
$160 < m \leq 180$				+68	+108	+146	+210	+252	+310	+380	+465	+600	+780	+1000
$180 < m \leq 200$				+77	+122	+166	+236	+284	+350	+425	+520	+670	+880	+1150
$200 < m \leq 225$	+17	+31	+50	+80	+130	+180	+258	+310	+385	+470	+575	+740	+960	+1250
$225 < m \leq 250$				+84	+140	+196	+284	+340	+425	+520	+640	+820	+1050	+1350
$250 < m \leq 280$	+20	+34	+56	+94	+158	+218	+315	+385	+475	+580	+710	+920	+1200	+1550
$280 < m \leq 315$				+98	+170	+240	+350	+425	+525	+650	+790	+1000	+1300	+1700
$315 < m \leq 355$	+21	+37	+62	+108	+190	+268	+390	+475	+590	+730	+900	+1150	+1500	+1900
$355 < m \leq 400$				+114	+208	+294	+435	+530	+660	+820	+1000	+1300	+1650	+2100
$400 < m \leq 450$	+23	+40	+68	+126	+232	+330	+490	+595	+740	+920	+1100	+1450	+1850	+2400
$450 < m \leq 500$				+132	+252	+360	+540	+660	+820	+1000	+1250	+1600	+2100	+2600

Diferencias fundamentales expresadas en micras aplicables a ejes (continuación de la Tabla D3.)

Posición	A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H
Calidad	Todas las calidades										
Medida Nominal	Diferencia inferior $D_i$										
$m \leq 3$	+270	+140	+60	+34	+20	+14	+10	+6	+4	+2	0
$3 < m \leq 6$	+270	+140	+70	+46	+30	+20	+14	+10	+6	+4	0
$6 < m \leq 10$	+280	+150	+80	+56	+40	+25	+18	+13	+8	+5	0
$10 < m \leq 18$	+290	+150	+95	-	+50	+32	-	+16	-	+6	0
$18 < m \leq 30$	+300	+160	+110	-	+65	+40	-	+20	-	+7	0
$30 < m \leq 40$	+310	+170	+120	-	+80	+50	-	+25	-	+9	0
$40 < m \leq 50$	+320	+180	+130								
$50 < m \leq 65$	+340	+190	+140	-	+100	+60	-	+30	-	+10	0
$65 < m \leq 80$	+360	+200	+150								
$80 < m \leq 100$	+380	+220	+170	-	+120	+72	-	+36	-	+12	0
$100 < m \leq 120$	+410	+240	+180								
$120 < m \leq 140$	+460	+260	+200								
$140 < m \leq 160$	+520	+280	+210	-	+145	+85	-	+43	-	+14	0
$160 < m \leq 180$	+580	+310	+230								
$180 < m \leq 200$	+660	+340	+240								
$200 < m \leq 225$	+740	+380	+260	-	+170	+100	-	+50	-	+15	0
$225 < m \leq 250$	+820	+420	+280								
$250 < m \leq 280$	+920	+480	+300	-	+190	+110	-	+56	-	+17	0
$280 < m \leq 315$	+1050	+540	+330								
$315 < m \leq 335$	+1200	+600	+360	-	+210	+125	-	+62	-	+18	0
$335 < m \leq 400$	+1350	+680	+400								
$400 < m \leq 450$	+1500	+760	+440	-	+230	+135	-	+68	-	+20	0
$450 < m \leq 500$	+1650	+840	+480								

Diferencias fundamentales expresadas en micras aplicables a agujeros. (continuación de la Tabla D3).

Posición	J			K				M					N					P			
Calidad	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8	≥9	5	6	7	8	≥9	5	6	7	≥8
Medida Nominal	Diferencia superior D <sub>s</sub>																				
m ≤ 3	+2	+4	+6	0	0	0	0	-2	-2	-2	-2	-2	-4	-4	-4	-4	-4	-6	-6	-6	-6
3 < m ≤ 6	+5	+6	+10	0	+2	+3	+5	-3	-1	0	+2	-4	-7	-5	-4	-2	0	-11	-9	-8	-12
6 < m ≤ 10	+5	+8	+12	+1	+2	+5	+6	-4	-3	0	+1	-6	-8	-7	-4	-3	0	-13	-12	-9	-15
10 < m ≤ 18	+6	+10	+15	+2	+2	+6	+8	-4	-4	0	+2	-7	-9	-9	-5	-3	0	-15	-15	-11	-18
18 < m ≤ 30	+8	+12	+20	+1	+2	+6	+10	-5	-4	0	+4	-8	-12	-11	-7	-3	0	-19	-18	-14	-22
30 < m ≤ 40	+10	+14	+24	+2	+3	+7	+12	-5	-4	0	+5	-9	-13	-12	-8	-3	0	-22	-21	-17	-26
40 < m ≤ 50																					
50 < m ≤ 65	+13	+18	+28	+3	+4	+9	+14	-6	-5	0	+5	-11	-15	-14	-9	-4	0	-27	-26	-21	-32
65 < m ≤ 80																					
80 < m ≤ 100	+16	+22	+34	+2	+4	+10	+16	-8	-6	0	+6	-13	-18	-16	-10	-4	0	-32	-30	-24	-37
100 < m ≤ 120																					
120 < m ≤ 140																					
140 < m ≤ 160	+18	+26	+41	+3	+4	+12	+20	-9	-8	0	+8	-15	-21	-20	-12	-4	0	-37	-36	-28	-43
160 < m ≤ 180																					
180 < m ≤ 200																					
200 < m ≤ 225	+22	+30	+47	+2	+5	+13	+22	-11	-8	0	+9	-17	-25	-22	-14	-5	0	-44	-41	-33	-50
225 < m ≤ 250																					
250 < m ≤ 280	+25	+36	+55	+3	+5	+16	+25	-13	-9	0	+9	-20	-27	-25	-14	-5	0	-49	-47	-36	-56
280 < m ≤ 315																					
315 < m ≤ 335	+29	+39	+60	+3	+7	+17	+28	-14	-10	0	+11	-21	-30	-26	-16	-5	0	-55	-51	-41	-62
335 < m ≤ 400																					
400 < m ≤ 450	+33	+43	+66	+2	+8	+18	+29	-16	-10	0	+11	-23	-33	-27	-17	-6	0	-61	-55	-45	-68
450 < m ≤ 500																					

Diferencias fundamentales expresadas en micras aplicables a agujeros (continuación de la Tabla D3).

Posición	R				S				T				U			
	5	6	7	≥ 8	5	6	7	≥ 8	5	6	7	≥ 8	5	6	7	≥ 8
Medida Nominal	Diferencia superior D <sub>s</sub>															
m ≤ 3	-10	-10	-10	-10	-14	-14	-14	-14	-	-	-	-	-18	-18	-18	-18
3 < m ≤ 6	-14	-12	-11	-15	-18	-16	-15	-19	-	-	-	-	-22	-20	-19	-23
6 < m ≤ 10	-17	-16	-13	-19	-21	-20	-17	-23	-	-	-	-	-26	-25	-22	-28
10 < m ≤ 14	-20	-20	-16	-23	-25	-25	-21	-28	-	-	-	-	-30	-30	-26	-33
14 < m ≤ 18																
18 < m ≤ 24	-25	-24	-20	-28	-32	-31	-27	-35	-	-	-	-	-38	-37	-33	-41
24 < m ≤ 30									-38	-37	-33	-41	-45	-44	-40	-48
30 < m ≤ 40	-30	-29	-25	-34	-39	-38	-34	-43	-44	-43	-39	-48	-56	-55	-51	-60
40 < m ≤ 50									-50	-49	-45	-54	-66	-65	-61	-70
50 < m ≤ 65	-36	-35	-30	-41	-48	-47	-42	-53	-61	-60	-55	-66	-82	-81	-76	-87
65 < m ≤ 80	-38	-37	-32	-43	-54	-53	-48	-59	-70	-69	-64	-75	-97	-96	-91	-102
80 < m ≤ 100	-46	-44	-38	-51	-66	-64	-58	-71	-86	-84	-78	-91	-119	-117	-111	-124
100 < m ≤ 120	-49	-47	-41	-54	-74	-72	-66	-79	-99	-97	-91	-104	-139	-137	-131	-144
120 < m ≤ 140	-57	-56	-48	-63	-86	-85	-77	-92	-116	-115	-107	-122	-164	-163	-155	-170
140 < m ≤ 160	-59	-58	-50	-65	-94	-93	-85	-100	-128	-127	-119	-134	-184	-183	-175	-190
160 < m ≤ 180	-62	-61	-53	-68	-102	-101	-93	-108	-140	-139	-131	-146	-204	-203	-195	-210
180 < m ≤ 200	-71	-68	-60	-77	-116	-113	-105	-122	-160	-157	-149	-166	-230	-227	-219	-236
200 < m ≤ 225	-74	-71	-63	-80	-124	-121	-113	-130	-174	-171	-163	-180	-252	-249	-241	-258
225 < m ≤ 250	-78	-75	-67	-84	-134	-131	-123	-140	-190	-187	-179	-196	-278	-275	-267	-284
250 < m ≤ 280	-87	-85	-74	-94	-151	-149	-138	-158	-211	-209	-198	-218	-308	-306	-295	-315
280 < m ≤ 315	-91	-89	-78	-98	-163	-161	-150	-170	-233	-231	-220	-240	-343	-341	-330	-350
315 < m ≤ 355	-101	-97	-87	-108	-183	-179	-169	-190	-261	-257	-247	-268	-383	-379	-369	-390
355 < m ≤ 400	-107	-103	-93	-114	-201	-197	-187	-208	-287	-283	-273	-294	-428	-424	-414	-435
400 < m ≤ 450	-119	-113	-103	-126	-225	-219	-208	-232	-323	-317	-307	-330	-483	-477	-467	-490
450 < m ≤ 500	-125	-119	-109	-132	-245	-239	-229	-252	-353	-347	-337	-360	-533	-527	-517	-540

Diferencias fundamentales expresadas en micras aplicables a agujeros (continuación de la Tabla D3).

Posición	V				X				Y			Z			ZA	ZB	ZC	
Calidad	5	6	7	≥ 8	5	6	7	≥ 8	6	7	≥ 8	6	7	≥ 8	7	≥ 8	≥ 8	≥ 8
Medida Nominal	Diferencia superior Ds																	
m ≤ 3	-	-	-	-	-20	-20	-20	-20	-	-	-	-26	-26	-26	-32	-32	-40	-60
3 < m ≤ 6	-	-	-	-	-27	-25	-24	-28	-	-	-	-32	-31	-35	-38	-42	-50	-80
6 < m ≤ 10	-	-	-	-	-32	-31	-28	-34	-	-	-	-39	-36	-42	-46	-52	-67	-97
10 < m ≤ 14	-	-	-	-	-37	-37	-33	-40	-	-	-	-47	-43	-50	-57	-64	-90	-130
14 < m ≤ 18	-36	-36	-32	-39	-42	-42	-38	-45	-	-	-	-57	-53	-60	-70	-77	-108	-150
18 < m ≤ 24	-44	-43	-39	-47	-51	-50	-46	-54	-59	-55	-63	-69	-65	-73	-90	-98	-136	-188
24 < m ≤ 30	-52	-51	-47	-55	-61	-60	-56	-64	-71	-67	-75	-84	-80	-88	-110	-118	-160	-218
30 < m ≤ 40	-64	-63	-59	-68	-76	-75	-71	-80	-89	-85	-94	-107	-103	-112	-139	-148	-200	-274
40 < m ≤ 50	-77	-76	-72	-81	-93	-92	-88	-97	-109	-105	-114	-131	-127	-136	-171	-180	-242	-325
50 < m ≤ 65	-97	-96	-91	-102	-117	-116	-111	-122	-138	-133	-144	-166	-161	-172	-215	-226	-300	-405
65 < m ≤ 80	-115	-114	-109	-120	-141	-140	-135	-146	-168	-163	-174	-204	-199	-210	-263	-274	-360	-480
80 < m ≤ 100	-141	-139	-133	-146	-173	-171	-165	-178	-207	-201	-214	-251	-245	-258	-322	-335	-445	-585
100 < m ≤ 120	-167	-165	-159	-172	-205	-203	-197	-210	-247	-241	-254	-303	-297	-310	-387	-400	-525	-690
120 < m ≤ 140	-196	-195	-187	-202	-242	-241	-233	-248	-293	-285	-300	-358	-350	-365	-455	-470	-620	-800
140 < m ≤ 160	-222	-221	-213	-228	-274	-273	-265	-280	-333	-325	-340	-408	-400	-415	-520	-535	-700	-900
160 < m ≤ 180	-246	-245	-237	-252	-304	-303	-295	-310	-373	-365	-380	-458	-450	-465	-585	-600	-780	-1000
180 < m ≤ 200	-278	-275	-267	-284	-344	-341	-333	-350	-416	-408	-425	-511	-503	-520	-653	-670	-880	-1150
200 < m ≤ 225	-304	-301	-293	-310	-379	-376	-368	-385	-461	-453	-470	-566	-558	-575	-723	-740	-960	-1250
225 < m ≤ 250	-334	-331	-323	-340	-419	-416	-408	-425	-511	-503	-520	-631	-623	-640	-803	-820	-1050	-1350
250 < m ≤ 280	-378	-376	-365	-385	-468	-466	-455	-475	-571	-560	-580	-701	-690	-710	-900	-920	-1200	-1550
280 < m ≤ 315	-418	-416	-405	-425	-518	-516	-505	-525	-641	-630	-650	-781	-770	-790	-980	-1000	-1300	-1700
315 < m ≤ 355	-468	-464	-454	-475	-583	-579	-569	-590	-719	-709	-730	-889	-879	-900	-1129	-1150	-1500	-1900
355 < m ≤ 400	-523	-519	-509	-530	-653	-649	-639	-660	-809	-799	-820	-989	-979	-1000	-1279	-1300	-1650	-2100
400 < m ≤ 450	-588	-582	-572	-595	-733	-727	-717	-740	-907	-897	-920	-1087	-1077	-1100	-1427	-1450	-1850	-2400
450 < m ≤ 500	-653	-647	-637	-660	-813	-807	-797	-820	-987	-977	-1000	-1237	-1227	-1250	-1577	-1600	-2100	-2600

Diferencias fundamentales expresadas en micras aplicables a agujeros (continuación de la Tabla D3).

Piezas a ensamblar	Tipo de ajuste	Tolerancias	Holgura
PoleaMatriz y eje del motor	Eje único 6.35 h6/I7 Entrada suave	Eje: $6.35^{+0.000}_{-0.009}$ Agujero: $6.35^{+0.008}_{-0.007}$	Máxima=0.017 Interferencia=0.007
Motor y SoporteMotor	Eje único 63.5 h9/E9 De juego libre	Eje: $63.5^{+0.000}_{-0.074}$ Agujero: $63.5^{+0.134}_{+0.060}$	Máxima=0.060 Interferencia=0.208
Rodamiento Magnético y CarcasaRodamiento	Eje único 63.5 h9/E9 De juego libre	Eje: $63.5^{+0.000}_{-0.074}$ Agujero: $63.5^{+0.134}_{+0.060}$	Máxima=0.060 Interferencia=0.208
Brazo y Brazotapa	Agujero único de adherencia <u>Primer escalón</u> 90 H7/K6	Eje: $90^{+0.025}_{+0.003}$ Agujero: $90^{+0.035}_{+0.000}$	Máxima=0.032 Interferencia=0.025
	120 H7/K6	Eje: $120^{+0.025}_{+0.003}$ Agujero: $120^{+0.035}_{+0.000}$	Máxima=0.032 Interferencia=0.025
	160 H7/K6	Eje: $160^{+0.028}_{+0.003}$ Agujero: $160^{+0.040}_{+0.000}$	Máxima=0.037 Interferencia=0.028
	<u>Segundo escalón</u> 100 H7/K6	Eje: $100^{+0.025}_{+0.003}$ Agujero: $100^{+0.035}_{+0.000}$	Máxima=0.032 Interferencia=0.025
	130 H7/K6	Eje: $130^{+0.028}_{+0.003}$ Agujero: $130^{+0.040}_{+0.000}$	Máxima=0.037 Interferencia=0.028
	150 H7/K6	Eje: $150^{+0.028}_{+0.003}$ Agujero: $150^{+0.040}_{+0.000}$	Máxima=0.037 Interferencia=0.028

Tabla D4. Resumen de las tolerancias y ajustes utilizados para algunos de los ensambles en la propuesta de diseño. NOTA: todas las unidades están en [mm].

Piezas a ensamblar	Tipo de ajuste	Tolerancias	Holgura	
Antebrazo y AntebrazoTapa	Agujero único de adherencia <u>Primer escalón</u> 62 H7/K6	Eje: $62^{+0.021}_{+0.002}$	Máxima=0.028	
		Agujero: $62^{+0.030}_{+0.000}$	Interferencia=0.021	
		90 H7/K6	Eje: $90^{+0.025}_{+0.003}$	Máxima=0.032
		Agujero: $90^{+0.035}_{+0.000}$	Interferencia=0.025	
		500 H7/K6	Eje: $500^{+0.045}_{+0.005}$	Máxima=0.058
		Agujero: $500^{+0.063}_{+0.000}$	Interferencia=0.045	
	<u>Segundo escalón</u> 72 H7/K6	Eje: $72^{+0.021}_{+0.002}$	Máxima=0.028	
		Agujero: $72^{+0.030}_{+0.000}$	Interferencia=0.021	
		100 H7/K6	Eje: $100^{+0.025}_{+0.003}$	Máxima=0.032
		Agujero: $100^{+0.035}_{+0.000}$	Interferencia=0.025	
		490 H7/K6	Eje: $490^{+0.045}_{+0.005}$	Máxima=0.058
		Agujero: $490^{+0.063}_{+0.000}$	Interferencia=0.045	
PoleaConducida y eje	Eje único 8.0 H7/j6 Entrada suave	Eje: $8.0^{+0.007}_{-0.002}$ Agujero: $8.0^{+0.015}_{-0.000}$	Máxima=0.017 Interferencia=0.007	
Mamelón y eje	Eje único 8.0 h6/J7 Entrada suave	Eje: $8.0^{+0.000}_{-0.009}$ Agujero: $8.0^{+0.008}_{-0.007}$	Máxima=0.017 Interferencia=0.007	
Mamelón y BrazoTapa	Agujero único RCH Estrecho de deslizamiento	Eje: $30^{-0.0203}_{-0.0406}$ Agujero: $8.0^{+0.0304}_{+0.0000}$	Máxima=0.07112 Interferencia=0.0203	

Tabla D4. Continuación.

<b>Piezas a ensamblar</b>	<b>Tipo de ajuste</b>	<b>Tolerancias</b>	<b>Holgura</b>
Antebrazo y Mamelón	Eje único 12.5 h6/J7 Entrada suave	Eje: $12.5^{+0.000}_{-0.011}$ Agujero: $12.5^{+0.010}_{-0.008}$	Máxima=0.021 Interferencia=0.008

Tabla D4. Continuación.

# APÉNDICE E - Tablas de medidas de anillos de retención

RING NO.	SHAFT DIAMETER			GROOVE SIZE					RING SIZE & WEIGHT					CLEARANCE DIA.			1 THRUST LD.(lbs.)	
				DIAMETER		WIDTH		DEPTH	FREE DIAMETER		THICKNESS***		Weight Per 1000 pcs.	Ex-panded over Shaft	Re-leased in Groove	Ring Safety Factor of 4	Groove Safety Factor of 2	
	Ds DEC	Ds FRAC	Ds mm	Dg	Tol.	W	Tol.	d	DI	Tol.	Y	Tol.						L1
**SH-12	125	1/8	3.2	1.17		.012		.004	.112		.010		±.001	0.18	222	214	112	35
**SH-15	156	5/32	4.0	1.46		.012		.005	.142		.010			.037	27	260	132	55
**SH-18	188	3/16	4.8	1.75	±.0015	.018	+ .002	.006	.168	+ .002	.015			.059	298	286	244	80
**SH-19	197	-	5.0	1.85	.0015*	.018	-.000	.006	.179	-.004	.015			.063	319	307	254	85
**SH-21	219	7/32	5.6	2.05		.018		.007	.196		.015			.074	338	324	284	110
**SH-23	236	15/64	6.0	2.22		.018		.007	.215		.015			.086	355	341	315	120
SH-25	250	1/4	6.4	2.30		.029		.010	.225		.025			21	45	43	599	175
SH-27	276	-	7.0	2.55		.029		.010	.250		.025			23	48	46	660	195
SH-28	281	9/32	7.1	2.61		.029		.010	.256		.025			24	49	47	670	200
SH-31	312	5/16	7.9	2.90		.029		.011	.281		.025			27	54	52	751	240
SH-34	344	11/32	8.7	3.21	±.002	.029		.011	.309		.025			31	57	55	812	265
SH-35	354	-	9.0	3.30	.002*	.029		.012	.320	+ .002	.025			35	59	57	832	300
SH-37	375	3/8	9.5	3.52		.029		.012	.338	-.005	.025			39	61	59	883	320
SH-39	394	-	10.0	3.69		.029		.012	.354		.025			42	62	60	954	335
SH-40	406	13/32	10.3	3.82		.029		.012	.366		.025			43	63	61	964	350
SH-43	438	7/16	11.1	4.12		.029		.013	.395		.025			50	66	64	1035	400
SH-46SP1	461	-	11.7	4.35		.029		.013	.420		.025			51	68	66	1110	460
SH-46	469	15/32	11.9	4.43		.029		.013	.428		.025	±.002		54	68	66	1117	450
SH-50	500	1/2	12.7	4.68	±.002	.039	+ .003	.016	.461		.035			91	77	74	1675	550
SH-55	551	-	14.0	5.19	.004*	.039	-.000	.016	.509		.035			90	81	78	1800	600
SH-56	562	9/16	14.3	5.30		.039		.016	.521		.035			1.1	82	79	1878	650
SH-59	594	19/32	15.1	5.59		.039		.017	.550		.035			1.2	86	83	1979	750
SH-62	625	5/8	15.9	5.88		.039		.018	.579		.035			1.3	90	87	2091	800
SH-66	669	-	17.0	6.29		.039		.020	.621	+ .005	.035			1.4	93	89	2233	950
SH-66	672	43/64	17.1	6.31		.039		.020	.621	-.010	.035			1.4	93	89	2233	950
SH-68	688	11/16	17.5	6.46		.046		.021	.635		.042			1.8	1.01	.97	3451	1000
SH-75	750	3/4	19.0	7.04	±.003	.046		.023	.693		.042			2.1	1.09	1.05	3756	1200
SH-78	781	25/32	19.8	7.33	.004*	.046		.024	.722		.042			2.2	1.12	1.08	3959	1300
SH-81	812	13/16	20.6	7.62		.046		.025	.751		.042			2.5	1.15	1.10	4060	1450
SH-84	844	-	21.4	7.91		.046		.026	.780		.042			2.7	1.18	1.13	4200	1500
SH-87	875	7/8	22.2	8.21		.046		.027	.810		.042			2.8	1.21	1.16	4365	1650
SH-93	938	15/16	23.8	8.82		.046		.028	.867		.042			3.1	1.34	1.29	4720	1850
SH-98	984	63/64	25.0	9.26		.046		.029	.910		.042			3.5	1.39	1.34	4923	2000
SH-100	1.000	1	25.4	9.40		.046		.030	.925		.042			3.6	1.41	1.35	5024	2100
SH-102	1.023	-	26.0	9.61		.046		.031	.946		.042			3.9	1.43	1.37	5126	2250
SH-106	1.062	1-1/16	27.0	9.98	±.004	.056	+ .004	.032	.982	+ .010	.050			4.8	1.50	1.44	6293	2400
SH-112	1.125	1-1/8	28.6	1.059	.005*	.056	-.000	.033	1.041	-.015	.050			5.1	1.55	1.49	6699	2600

(a)

RING NO.	SHAFT DIAMETER			GROOVE SIZE					RING SIZE & WEIGHT					CLEARANCE DIA.			1 THRUST LD.(lbs.)	
				DIAMETER		WIDTH		DEPTH	FREE DIAMETER		THICKNESS***		Weight Per 1000 pcs.	Ex-panded over Shaft	Re-leased in Groove	Ring Safety Factor of 4	Groove Safety Factor of 2	
	Ds DEC	Ds FRAC	Ds mm	Dg	Tol.	W	Tol.	d	DI	Tol.	Y	Tol.						L1
SH-118	1.188	1-3/16	30.2	1.118		.056		.035	1.098		.050			5.6	1.61	1.54	7105	2950
SH-125	1.250	1-1/4	31.7	1.176		.056		.037	1.156		.050			5.9	1.69	1.62	7460	3250
SH-131	1.312	1-5/16	33.3	1.232	±.004	.056		.040	1.214	+ .010	.050	±.002		6.8	1.75	1.67	7866	3700
SH-137	1.375	1-3/8	34.9	1.291	.005*	.056		.042	1.272	-.015	.050			7.2	1.80	1.72	8222	4100
SH-143	1.438	1-7/16	36.5	1.350		.056		.044	1.333		.050			8.1	1.87	1.79	8628	4500
SH-150	1.500	1-1/2	38.1	1.406		.056		.047	1.387		.050			9.0	1.99	1.90	8932	5000
SH-156	1.562	1-9/16	39.7	1.468		.068		.047	1.446		.062			12.4	2.10	2.01	11571	5200
SH-162	1.625	1-5/8	41.3	1.529		.068	+ .004	.048	1.503		.062			13.2	2.17	2.08	12028	5500
SH-168	1.688	1-11/16	42.9	1.589		.068	-.000	.049	1.560		.062			14.8	2.24	2.15	12535	5850
SH-175	1.750	1-3/4	44.4	1.650	±.005	.068		.050	1.618	+ .013	.062			15.3	2.31	2.21	12992	6200
SH-177	1.772	-	45.0	1.669	.005*	.068		.051	1.637	-.020	.062			15.4	2.33	2.23	13144	6400
SH-181	1.812	1-13/16	46.0	1.708		.068		.052	1.675		.062			15.6	2.38	2.28	13449	6650
SH-187	1.875	1-7/8	47.6	1.769		.068		.053	1.735		.062			17.3	2.44	2.34	13906	7000
SH-196	1.969	1-31/32	50.0	1.857		.068		.056	1.819		.062			18.0	2.57	2.46	14585	7800
SH-200	2.000	2	50.8	1.886		.068		.057	1.850		.062			19.0	2.60	2.49	14819	8050
SH-206	2.062	2-1/16	52.4	1.946		.086		.058	1.906		.078			25.0	2.68	2.57	19234	8450
SH-212	2.125	2-1/8	54.0	2.003		.086		.061	1.964		.078			26.1	2.78	2.66	19793	9150
SH-215	2.156	2-5/32	54.8	2.032		.086		.062	1.993		.078			26.3	2.81	2.69	20097	9450
SH-225	2.250	2-1/4	57.1	2.120		.086		.065	2.081	+ .015	.078	±.003		27.7	2.88	2.76	21011	10350
SH-231	2.312	2-5/16	58.7	2.178		.086		.067	2.139	-.025	.078			28.0	2.94	2.81	21518	10950
SH-237	2.375	2-3/8	60.3	2.239		.086		.068	2.197		.078			29.2	3.06	2.93	22127	11400
SH-243	2.438	2-7/16	61.9	2.299		.086		.069	2.255		.078			29.5	3.07	2.94	22736	11900
SH-250	2.500	2-1/2	63.5	2.360		.086		.070	2.313		.078			29.7	3.17	3.03	23345	12350
SH-255	2.559	-	65.0	2.419		.086		.070	2.377		.078			33.9	3.18	3.04	23853	12650
SH-262	2.625	2-5/8	66.7	2.481	±.006	.086	+ .005	.072	2.428		.078			35.0	3.30	3.16	24462	13350
SH-268	2.688	2-11/16	68.3	2.541	.006*	.086	-.000	.073	2.485		.078			36.0	3.37	3.23	25071	13850
SH-275	2.750	2-3/4	69.8	2.602		.103		.074	2.543		.093			42.5	3.48	3.34	30551	14400
SH-287	2.875	2-7/8	73.0	2.721		.103		.077	2.659		.093			48.5	3.60	3.45	31973	15650
SH-293	2.938	2-15/16	74.6	2.779		.103		.079	2.717	+ .020	.093			50.0	3.66	3.51	32683	16400
SH-300	3.000	3	76.2	2.838		.103		.081	2.775	-.030	.093			52.0	3.60	3.44	33394	17200
SH-306	3.062	3-1/16	77.8	2.898		.103		.082	2.832		.093			47.5	3.74	3.58	34003	17750
SH-312	3.125	3-1/8	79.4	2.957		.103		.084	2.892		.093			58.0	3.85	3.69	34815	18550
SH-315	3.156	3-5/32	80.2	2.986		.103		.085	2.920		.093			59.0	3.88	3.71	35119	18950
SH-325	3.250	3-1/4	82.5	3.076		.103		.087	3.006		.093			62.0	3.93	3.76	36134	20000
SH-334	3.346	3-11/32	85.0	3.166		.103		.090	3.092		.093			64.0	4.02	3.85	37251	21000
SH-343	3.438	3-7/16	87.3	3.257		.103		.090	3.179		.093			66.0	4.14	3.96	38268	21900
SH-350	3.500	3-1/2	88.9	3.316		.120		.092	3.237		.109			72.0	4.16	3.98	45574	22800

(b)

La tabla continúa en la siguiente página.

RING NO.	SHAFT DIAMETER			GROOVE SIZE						RING SIZE & WEIGHT					CLEARANCE DIA.			i THRUST LD.(lbs.)	
				DIAMETER		WIDTH		DEPTH		FREE DIAMETER		THICKNESS***		Weight Per 1000 pcs.	Ex-panded over Shaft	Re-leased in Groove	Sqr. Corner Abutment	Ring Safety Factor of 4	Groove Safety Factor of 2
	Ds DEC	Ds FRAC	Ds mm	Dg	Tol.	W	Tol.	d	Df	Tol.	T	Tol.	L1						
SH-354	3.543	-	90.0	3.357	.120			.093	3.277		.109		73.0	4.25	4.07	46183	23300		
SH-362	3.625	3-5/8	92.1	3.435	.120			.095	3.352		.109		76.0	4.36	4.17	47299	24300		
SH-368	3.688	3-11/16	93.7	3.493	.120			.097	3.410		.109		80.0	4.33	4.31	48010	25300		
SH-375	3.750	3-3/4	95.2	3.552	±.006	.120	+.006	.099	3.468	+.020	.109	±.003	83.0	4.52	4.33	48822	26200		
SH-387	3.875	3-7/8	98.40	3.673	.006*	.120	-.000	.101	3.584	-.030	.109		88.0	4.64	4.44	50446	27700		
SH-393	3.938	3-15/16	100.0	3.734	.120			.102	3.642		.109		95.0	4.70	4.50	51359	28400		
SH-400	4.000	4	101.6	3.792	.120			.104	3.700		.109		101.0	4.76	4.56	52171	29400		
SH-412	4.125	4-1/8	104.8	3.915	.120			.105	3.800		.109		101.2	5.00	4.78	53200	29800		
SH-425	4.250	4-1/4	108.0	4.065	.120			.092	3.989		.109		112.0	4.98	4.80	55419	27600		
SH-437	4.375	4-3/8	111.1	4.190	.120			.092	4.106		.109		115.0	5.22	5.04	57043	28400		
SH-450	4.500	4-1/2	114.3	4.310	.120			.095	4.223		.109		132.0	5.37	5.18	58667	30200		
SH-475	4.750	4-3/4	120.6	4.590	.120			.100	4.458		.109		113.0	5.74	5.52	61915	33600		
SH-500	5.000	5	127.0	4.790	.120			.105	4.692		.109		149.0	5.85	5.64	65163	37100		
SH-525	5.250	5-1/4	133.3	5.090	.139			.110	4.927		.125		190.0	6.17	5.95	78460	40800		
SH-550	5.500	5-1/2	139.7	5.265	±.007	.139	+.006	.117	5.162	+.020	.125	±.004	202.5	6.63	6.39	82215	45500		
SH-575	5.750	5-3/4	146.0	5.505	.006*	.139	-.000	.122	5.396	-.040	.125		220.0	6.93	6.69	85971	49600		
SH-600	6.000	6	152.4	5.745	.139			.127	5.631		.125		210.0	7.21	6.95	89625	53800		
SH-625	6.250	6-1/4	158.7	5.985	.174			.132	5.866		.156		282.0	7.48	7.22	116522	58300		
SH-650	6.500	6-1/2	165.1	6.225	.174			.137	6.100	+.020	.156		330.0	7.60	7.45	121191	62900		
SH-675	6.750	6-3/4	171.4	6.465	.174			.142	6.335	-.050	.156		356.0	8.10	7.82	125860	67700		
SH-700	7.000	7	177.8	6.705	.174			.147	6.570		.156		371.0	8.23	7.94	130529	72700		
SH-725	7.250	7-1/4	184.2	6.942	.209			.154	6.775		.187		510.0	8.70	8.40	162096	78900		
SH-750	7.500	7-1/2	190.5	7.180	.209			.160	7.009		.187		534.0	8.98	8.66	167678	84800		
SH-775	7.750	7-3/4	196.9	7.420	±.008	.209	+.008	.165	7.243	+.050	.187	±.005	545.0	9.21	8.88	173261	90450		
SH-800	8.000	8	203.2	7.660	.006*	.209	-.000	.170	7.478	-.130	.187		640.0	9.61	9.26	178943	95100		
SH-825	8.250	8-1/4	209.6	7.900	.209			.175	7.712		.187		665.0	9.87	9.52	184426	102100		
SH-850	8.500	8-1/2	215.9	8.140	.209			.180	7.947		.187		692.0	10.12	9.76	190008	108100		
SH-875	8.750	8-3/4	222.3	8.380	.209			.185	8.181		.187		712.0	10.40	10.00	195591	114450		
SH-900	9.000	9	228.6	8.620	.209			.190	8.415		.187		737.0	10.60	10.22	201173	120800		
SH-925	9.250	9-1/4	234.9	8.860	.209			.195	8.650		.187		760.0	10.85	10.50	206756	128225		
SH-950	9.500	9-1/2	241.3	9.100	.209			.200	8.885		.187		785.0	11.10	10.70	212338	134200		
SH-975	9.750	9-3/4	247.6	9.338	.209			.206	9.120		.187		845.0	11.35	10.95	217921	142000		
SH-1000	10.000	10	254.0	9.575	.209			.212	9.355		.187		910.0	11.60	11.20	223503	149800		

\* F.I.M. (FULL INDICATOR MOVEMENT)- MAXIMUM ALLOWABLE DEVIATION OF CONCENTRICITY BETWEEN GROOVE & SHAFT.  
i BASED ON HOUSINGS/SHAFTS MADE OF COLD ROLLED STEEL. FOR AN EXPLANATION OF FORMULAS USED TO DERIVE THRUST LOAD AND OTHER PERFORMANCE DATA CONTACT THE ROTOR CLIP ENGINEERING DEPARTMENT.  
\*\*\* FOR PLATED RINGS ADD .002" TO THE LISTED MAXIMUM THICKNESS. MAXIMUM THICKNESS WILL BE A MINIMUM OF .0002" LESS THAN THE LISTED GROOVE WIDTH (W) MINIMUM.

HARDNESS RANGES: STAINLESS STEEL RINGS (PH 15-7MO)			
RING TYPE	SIZE RANGE	SCALE	ROCKWELL HARDNESS
SH	25-81	30N	63-69.5
	87+	C	44-51

(c)

Tabla E. Tabla de especificaciones para Anillos de Retención Externos (pulgadas). Obtenido de [74].