



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN  
DE UN ROBOT HÁPTICO  
DE TRES GRADOS DE LIBERTAD**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Eléctrico Electrónico**

**PRESENTA**

Topiltzin Tonatiuh Vilchis Mendoza

**DIRECTOR DE TESIS:**

Dr. Marco Antonio Arteaga Pérez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



**JURADO:**

PRESIDENTE: Dr. Paul Rolando Maya Ortiz

VOCAL: Dr. Marco Antonio Arteaga Pérez

SECRETARIO: Dr. Edmundo Gabriel Rocha Cózatl

1ER. SUPLENTE: Dr. Marcos Ángel González Olvera

2DO. SUPLENTE: M.I. Mauro Gilberto López Rodríguez

**ASESOR:**

Dr. Marco Antonio Arteaga Pérez



# Agradecimientos

*Dedicado a  
mis padres*

Agradezco a mi querida Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme permitido formarme en ella y darme muchos de los mejores momentos de mi vida. A cada maestro por brindarme sus conocimientos y por cada una de sus enseñanzas.

Al Dr. Marco Antonio Arteaga Pérez por ofrecerme la oportunidad de trabajar en el Laboratorio de Robótica del Departamento de Control y darme las herramientas necesarias para concluir este trabajo.

Al M.I. Daniel Castro por su gran enseñanza, amistad y constancia como mentor durante la elaboración de este trabajo.

A mis amigos de la Facultad y del Laboratorio de Robótica por su ayuda y aportes a mi proyecto de tesis, al igual que todos los buenos momentos que hemos pasado.

A mi pareja Mónica García quien me apoyó en los momentos difíciles y me alentó a seguir adelante a lo largo de la carrera, brindándome sus mejores deseos y consejos.

A mi familia, especialmente a mis padres: Enrique Vilchis y Yetlanezi Mendoza por todo su apoyo, consejos y palabras de ánimo que me han dado a lo largo de la vida. Ya que sin ellos no podría haber llegado tan lejos.

Quiero agradecer a la UNAM, en especial agradezco al proyecto PAPIIT con número 1N114617 por la ayuda económica brindada.



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Estado de arte . . . . .	3
1.2. Motivación . . . . .	11
1.3. Objetivos de la tesis . . . . .	12
1.4. Contribuciones . . . . .	12
1.5. Organización de la tesis . . . . .	12
<b>2. Preliminares</b>	<b>15</b>
2.1. Aplicación del modelo V . . . . .	15
2.2. Bases teóricas para el análisis de robots . . . . .	18
2.2.1. Estructura mecánica de los robots . . . . .	18
2.2.2. Análisis cinemático de los robots . . . . .	20
2.2.3. El Jacobiano del manipulador . . . . .	21
2.2.4. Control de robots . . . . .	22
2.3. Fundamentos de sistemas de realidad virtual . . . . .	23
2.4. Comentarios del capítulo . . . . .	26
<b>3. Diseño y construcción del robot</b>	<b>27</b>
3.1. Etapa 1: Requerimientos . . . . .	27
3.1.1. Definición de la aplicación . . . . .	27
3.1.2. Análisis de interacción . . . . .	28
3.1.3. Requerimientos específicos . . . . .	30
3.2. Etapa 2: Selección de elementos y diseño del sistema . . . . .	31
3.2.1. Selección de la cinemática del robot . . . . .	31
3.2.2. Selección de los actuadores y mecanismos del sistema . . . . .	37
3.2.3. Selección de los sensores requeridos . . . . .	38
3.2.4. Tarjeta de adquisición de datos . . . . .	39
3.3. Etapa 3: Diseño y construcción cualitativa . . . . .	41
3.3.1. Diseño del mecanismo para el primer GDL . . . . .	42
3.3.2. Diseño del mecanismo para el segundo y tercer GDL . . . . .	43

<b>4. Funcionamiento del robot háptico</b>	<b>51</b>
4.1. Implementación del sistema de realidad virtual . . . . .	55
4.2. Resultados . . . . .	56
<b>5. Conclusiones</b>	<b>59</b>
5.1. Trabajos a futuro . . . . .	60
<b>A. Hojas de especificaciones</b>	<b>63</b>
A.1. Motores del robot Geomagic Touch . . . . .	64
A.2. Motor Maxon RE 30-Graphite Brushes 60 Watt . . . . .	66
A.3. Encoder incremental MR . . . . .	67
A.4. Sensor de Fuerza ATI Nano 17 . . . . .	68
A.5. Material de impresión Z-Ultrat . . . . .	71
<b>B. Cotizaciones</b>	<b>73</b>
<b>C. Planos</b>	<b>79</b>

# Capítulo 1

## Introducción

Desde sus inicios, los seres humanos han usado sus sentidos para percibir, conocer y relacionarse con su entorno. Gracias a ellos han logrado comunicarse con sus semejantes y expresar sus sentimientos e ideas. Sin embargo, a medida que la tecnología avanzó, fue necesario crear medios de comunicación capaces de transmitir información entre un continente y otro. De esta forma, en el Siglo XX se crearon dispositivos electrónicos capaces de estimular los sentidos de la vista y el oído, tales como la radio y la televisión, logrando así comunicar al mundo entero.

Actualmente, los avances tecnológicos han dado lugar a una nueva experiencia sensorial mediante la estimulación del tacto, revolucionando la forma de comunicación, tanto en teléfonos como pantallas e incluso videojuegos. Esto hace que el usuario sea capaz de percibir y relacionarse con un entorno artificial, introduciendo fuerzas y vibraciones al ambiente por medio de mecanismos electromecánicos. A la disciplina que se encarga de estudiar este fenómeno se le conoce con el nombre de háptica. Su origen se puede encontrar en las palabras griegas *haptikos* y *haptesthai*, que significan tocar y sujetar [5]. Se considera una mejora reciente en entornos virtuales ya que permite a los usuarios sentir objetos que no existen. Su estudio surgió de los avances en la realidad virtual y está evolucionando prometedoramente en algunos campos de aplicación como son la ingeniería, robótica, ciencia cognitiva, psicología del desarrollo e informática [1].

La realidad virtual es una interacción humano-máquina que provee un ambiente virtual que se puede explorar a través de los sentidos. Para ser capaces de interactuar con dicho ambiente, es necesaria una retroalimentación, ya sea visual, auditiva o táctil. Por ejemplo, el usuario debería poder tocar un objeto virtual y sentir su superficie ocurriendo en este caso una retroalimentación háptica [9].

En la interacción humano-máquina, la retroalimentación háptica se refiere a retroalimentación tanto táctil como de fuerza. La primera se aplica a las sensaciones en la piel. Esta permite a los usuarios sentir texturas, temperaturas y vibraciones. Por otro lado, la segunda reproduce las fuerzas direccionales que resultan al tratar de tocar un objeto, logrando identificar su mecánica, sus límites espaciales e inercia. Para ello, se usan los dispositivos

hápticos (o interfaces hápticas), los cuales son dispositivos mecánicos que intervienen en la comunicación entre el usuario y la computadora. Éstos permiten a los usuarios sentir y manipular objetos tridimensionales en entornos virtuales y sistemas teleoperados. Dispositivos como ratones y joysticks son muy comunes, pero al ser periféricos de entrada, únicamente siguen las manipulaciones físicas de un usuario pero no proporcionan retroalimentación de fuerza. Como resultado, la información fluye en una sola dirección, del periférico a la computadora. En cambio, los dispositivos hápticos son interfaces de entrada y salida, lo que significa que son manipulados físicamente por un usuario (entrada) y proporcionan sensaciones táctiles realistas (salida). La mayoría de ellos están equipados con motores, sensores y, en algunos casos, con elementos más sofisticados diseñados para aplicaciones industriales, médicas o científicas.

Las interfaces hápticas son dispositivos complejos. En el momento que el usuario manipula el efector final o mango del dispositivo háptico, la salida de los sensores de posición envían información a una interfaz de procesamiento a velocidades muy altas. Ésta procesa la información para determinar la posición de dicho efector final, que luego es enviada a la computadora y quien ejecuta una aplicación de software. En ella se establece en qué momento se deberá enviar una fuerza de reacción al dispositivo por medio de los actuadores (que en su mayoría son motores acoplados al dispositivo) y con base en los modelos matemáticos que simulan las fuerzas deseadas. Por ejemplo, si se quiere obtener la sensación de una pared rígida en un joystick, los motores dentro de éste aplicarán las fuerzas que simulan la rigidez de la pared. Mientras mayor fuerza aplique el usuario para penetrar dicha pared, mayor será la fuerza de los motores. El resultado final es la sensación artificial de un obstáculo.

Las interfaces hápticas comerciales de uso general utilizadas hoy en día se pueden clasificar como dispositivos con base fija o dispositivos basados en el cuerpo como guantes, trajes y exoesquelétos. El diseño más popular en el mercado es un sistema de eslabones que consiste en un brazo robótico conectado a una pluma tal como se observa en la Figura 1.1. El robot localiza la posición de la pluma a través de sus sensores de posición o encoders y es capaz de ejercer una fuerza sobre la punta de la pluma.

Para satisfacer las demandas hápticas necesarias para engañar el sentido del tacto, se requiere hardware y software sofisticados que determinen los ángulos y pares adecuados necesarios para ejercer un único punto de fuerza en la punta de la pluma. No sólo es difícil controlar la fuerza de salida, sino también hay que tener en cuenta la fuerza del usuario y la masa del robot, ya que ésta introduce una inercia al sistema que deben tenerse en cuenta. Como resultado, el costo de una interfaz háptica de este tipo en el mercado va desde los 10,000 hasta los 100,000 dólares, lo que muchas veces las hace incosteables para el usuario final.



Figura 1.1: *PHANTOM Desktop de SensAble Technologies*. Se trata de un popular dispositivo háptico. La posición y la orientación de la pluma se rastrean a través de encoders en el brazo robótico. Tres grados de fuerza en la dirección  $x$ ,  $y$  y  $z$ , se logran a través de motores que aplican pares en cada articulación (imagen obtenida del distribuidor *3D Systems*).

## 1.1. Estado de arte

En este apartado se pretende mostrar los diferentes avances que han sido llevados a cabo en el ámbito de la investigación sobre interfaces hápticas basadas en robots manipuladores. Además, se realizó una investigación del mercado presentando los dispositivos hápticos actuales, sus características y funciones principales. Por último, se darán a conocer las aplicaciones más importantes de estas interfaces y una visión a futuro. Todo esto permitirá tener un panorama más amplio de las diferentes tecnologías, con el fin de afrontar la tarea de diseñar e implementar un prototipo propio, tomando las ideas que mejor se adapten a los objetivos de este trabajo.

### **Evolución de los dispositivos hápticos**

En las modalidades de retroalimentación háptica que se mencionaron anteriormente, la retroalimentación de fuerza fue la primera en desarrollarse. Esta fue integrada por primera vez en el brazo electromecánico de Goertz, un robot manipulador de seis GDL (grados de libertad) para la manipulación teleoperada de materiales peligrosos en plantas nucleares, desarrollado en 1954 en el Laboratorio Nacional de Argonne [11]. Posteriormente, en la Universidad de Carolina, Brooks comenzó un proyecto para desarrollar un dispositivo visual-háptico de 6 GDL para interactuar con moléculas proteicas. De esta manera, en 1967 se desarrolló el sistema háptico llamado GROPE I que se muestra en la Figura

1.2, el cual empleaba una plataforma móvil de 2 GDL. Una pequeña perilla estaba unida a la plataforma y podía colocarse dentro de un plano horizontal de dos pulgadas cuadradas. Los potenciómetros de ésta eran usados para percibir la posición en  $(x, y)$ . Por otro lado, los servomotores ejercían las fuerzas deseadas, estando ambos conectados a la computadora, la cual integraba un pantalla que proporcionaba retroalimentación visual. Este fue el primer dispositivo háptico con un entorno virtual.

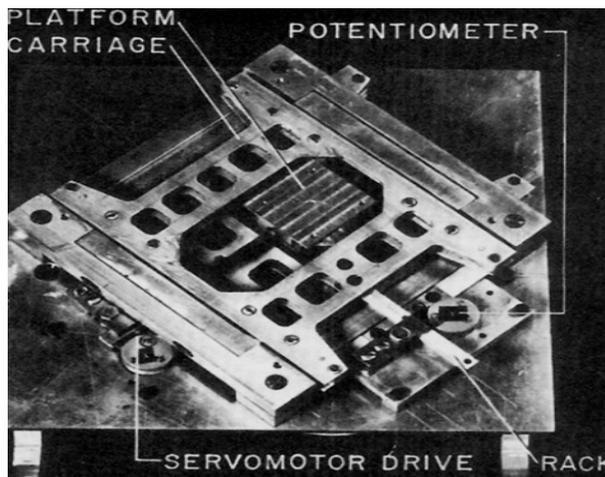


Figura 1.2: GROPE I, fabricado por Brooks en la Universidad de Carolina en 1967.  
[12]

Años después, el mismo grupo liderado por Brooks adaptó el brazo electromecánico de Argonne y le integró una pantalla estereoscópica. El sistema fue desarrollado para proporcionar retroalimentación de fuerza durante el acoplamiento molecular virtual. El resultado final que se muestra en la Figura 1.3, el GROPE III, demostró que la fuerza contribuye significativamente a la tarea, dando una energía potencial más baja que aquella de la combinación acoplada.

Más tarde, Burdea y sus colegas de la Universidad de Rutgers desarrollaron un dispositivo ligero y portable capaz de retroalimentar fuerzas, llamado Rutgers Masters-[13]. Que consistía en un guante mecánico con cuatro actuadores, uno para cada dedo de la mano, sin contar el dedo meñique. Posteriormente aparecieron los dispositivos hápticos comerciales, tales como el *PHANTOM* en 1994 [10], el guante *CyberCraspO* fabricado por *Virtual Technologies* en 1998, siendo el más popular de ellos el *PHANTOM*, fabricado después por *SensAble Technologies*. Como se puede apreciar en la Figura 1.4, este robot tiene 6 GDL, pero únicamente los primeros tres están actuados, proporcionando un nivel de fuerza máximo de 22 N, y 3 N de fuerza continua. El mayor inconveniente de este dispositivo es que sólo es capaz de aplicar fuerzas a un dedo y no puede aplicar pares. Sin embargo, una versión más reciente llamada *PHANTOM Premium 3.0* logra retroalimentar fuerzas y pares gracias a sus seis GDL actuados. Los pares máximos de éste son 640

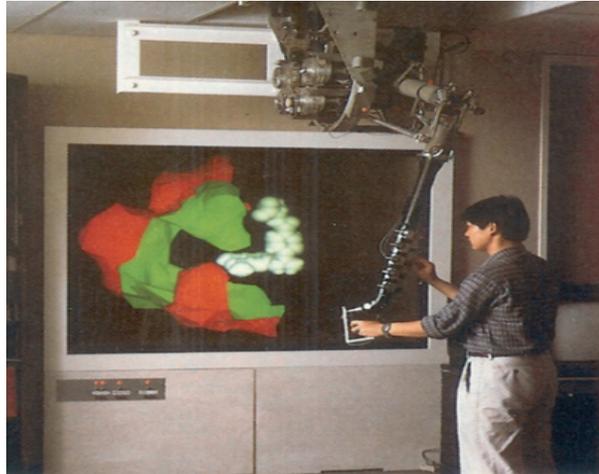


Figura 1.3: GROPE III, fabricado por Brooks en la Universidad de Carolina en 1990.  
[12]

mNm y 104 mNm de par continuo. Las características de este dispositivo lo hacen muy adecuado para la interacción puntual mediante un dedo o lápiz virtual.

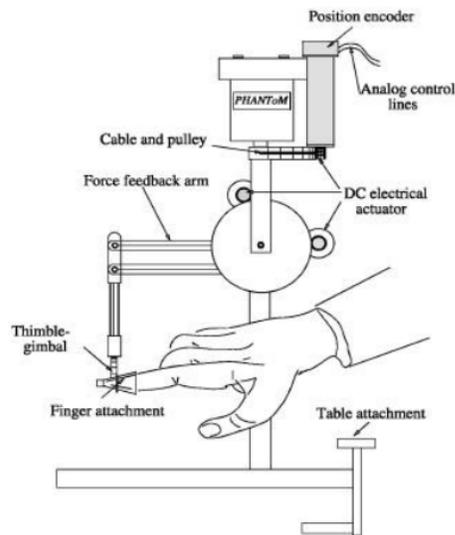


Figura 1.4: El robot *PHANTOM*  
[10]

En 2002 la Rutgers Master II fue diseñada en el laboratorio de la Universidad Rutgers. El dispositivo que se puede ver en la Figura 1.5 usa un pistón neumático de grafito y vidrio para cada dedo, reduciendo significativamente las fuerzas estáticas cuando no está

accionado. Los pistones están unidos directamente a los dedos y están localizados entre la palma de la mano y la punta de los mismos, proporcionando hasta 16 N de fuerza en cada dedo. Haciendo del dispositivo ligero y cómodo de llevar, con un peso de sólo 100 g. Éste cuenta con una unidad de control que contiene válvulas neumáticas, sensores de presión y toda la electrónica. Se utilizan sensores de efecto Hall para detectar el ángulo de los actuadores neumáticos de la palma y un sensor infrarrojo para detectar el movimiento del pistón. La posición de la yema de los dedos puede ser determinada basándose en el ángulo y la distancia medida. El principal problema del dispositivo es que, al tener los pistones en la palma de la mano, se limita el movimiento de los dedos del usuario.

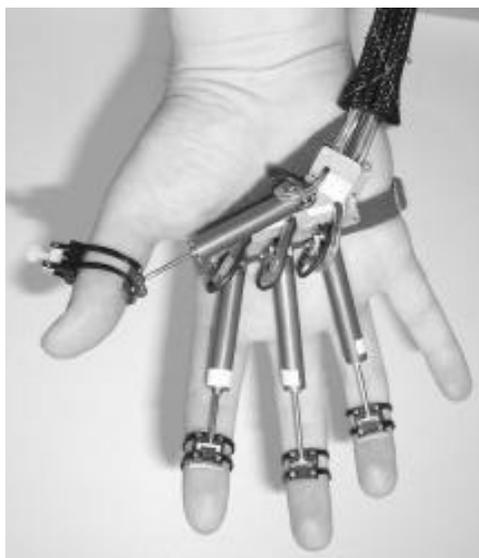


Figura 1.5: La Rutgers Master II—Nuevo diseño. Apariencia general del prototipo [14]

La mayoría de estos desarrollos se han llevado a cabo en universidades, sin embargo, fue cuestión de tiempo para que salieran al mercado. En la siguiente sección se describe el mercado actual de los sistemas hápticos, analizando el comportamiento de cada una de las interfaces, así como las nuevas propuestas que se llevan a cabo a partir de las necesidades de los usuarios.

### **Mercado Actual de los sistemas hápticos**

En el mundo hay diversas compañías desarrollando tecnología para interfaces hápticas en aspectos como programación, componentes electrónicos y mecánicos, sensores, actuadores y dispositivos hápticos como tal. En el panorama actual, existe un número importante de compañías, principalmente en Estados Unidos, mientras que, es importante destacarlo, no hay ninguna participación por parte de África, América del Sur y Centro América, tal

como se ilustra en la gráfica de la Figura 1.6.

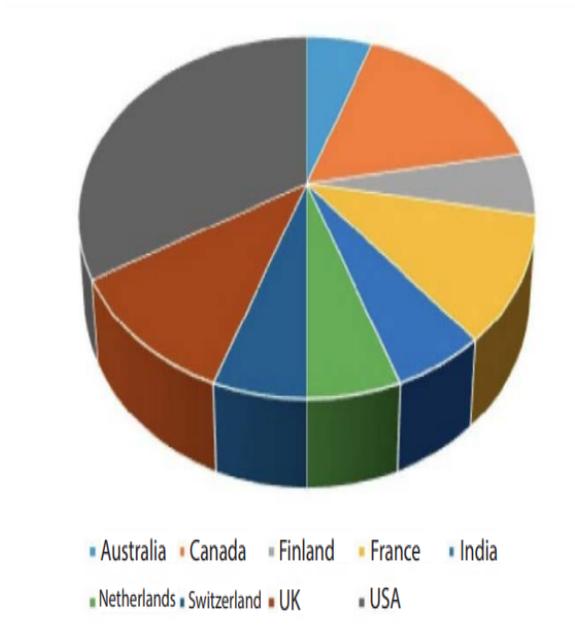


Figura 1.6: Distribución mundial de las compañías que desarrollan interfaces hápticas.  
[15]

Las compañías que lideran el mercado mundial de interfaces hápticas son tres: *Force Dimension*, *Quanser* y *SensAble Technologies*. Por ello es importante hablar de ellas, así como de las últimas interfaces que han desarrollado y que están en venta en el mercado. Esto se hace con el fin de introducir los diferentes diseños y sus características y así comenzar el desarrollo de un dispositivo propio.

### ***Force Dimension***

Fundada en 2001 a través de sus instalaciones de R&D (*Research and Development*) en Suiza, *Force Dimension* tiene más de una década de experiencia en tecnología háptica. Se ha ganado el conocimiento internacional por diseñar y fabricar interfaces de alta precisión que operan sistemas robóticos industriales y médicos. Sus productos estrella, pertenece a la familia de dispositivos hápticos paralelos Delta y Omega.

El robot Omega.3 que se muestra en la Figura 1.7, se basa en un diseño cinemático que ha sido optimizado para retroalimentación de fuerza de alta gama. Fabricado en Suiza, es específicamente diseñado para aplicaciones exigentes donde el rendimiento y la fiabilidad es crítica. Provee tres grados de retroalimentación de fuerza y es usado en un gran rango de aplicaciones, tales como robótica médica y espacial, consolas de teleoperación, simulaciones virtuales y sistemas de entrenamiento. Su precio ronda entre los 20 mil a 25 mil



Figura 1.7: Robot Omega.3 diseñado y fabricado por Force Dimension (imagen obtenida de la página oficial de la empresa Force Dimension).



Figura 1.8: Robot Sigma.7 diseñado y fabricado por Force Dimension (imagen obtenida de la página oficial de la empresa Force Dimension).

euros.

Por otra parte, el robot Sigma.7 con sus siete grados de libertad actuados que se muestran en la Figura 1.8, es el dispositivo háptico más avanzado diseñado por *Force Dimension*. Su efector final cubre el rango natural de movimiento del brazo humano y es compatible con el diseño de consola de teleoperación bimanual. Sus actuadores fueron diseñados para ofrecer un nivel muy alto de fuerzas y pares, mientras que la combinación de compensación de gravedad completa y calibración contribuye a tener una mayor comodidad y precisión del usuario. Su rango de precio ronda entre los 50 mil y 110 mil euros.

## **QUANSER**

*Quanser* se fundó en 1989 en Canadá con la iniciativa del desarrollo de plataformas de hardware para la enseñanza y la investigación en la educación, principalmente ingeniería. En la actualidad es uno de los líderes mundiales que han transformado la forma en se enseña la teoría, aplicación e implementación de controladores, robótica y mecatrónica. El enfoque de innovación, colaboración y educación de *Quanser* ha producido una serie de novedosas tecnologías en diversas áreas como plataformas para la investigación en control, drones, plataformas móviles para la enseñanza de ingeniería y desde luego dispositivos hápticos. Dentro de estos últimos se encuentran dos modelos: el HD2 *High Definition Haptic Device* y el *Omni Bundle*.

El HD2 *High Definition Haptic Device* que se puede ver en la Figura 1.9, es una interfaz háptica de alto rendimiento para la investigación avanzada en háptica y robótica.



Figura 1.9: El dispositivo háptico HD2 High Definition Haptic Device diseñado y contruido por Quanser(imagen obtenida de la página oficial de la empresa Quanser).



Figura 1.10: El dispositivo Omni Bundle de Quanser rediseñado a partir del robot Geomagic Touch de SenSable Technologies (imagen obtenida de la página oficial de la empresa Quanser).

Combinado con un controlador diseñado por investigadores de Quanser, hace de éste un dispositivo de pruebas flexible para varias aplicaciones emergentes, como simuladores médicos y teleoperación. El HD2 permite al usuario interactuar con entornos virtuales o remotos utilizando la retroalimentación de fuerza programable. En comparación con otros dispositivos hápticos disponibles en el mercado, el HD2 tiene un espacio de trabajo amplio y una dinámica baja. Por otra parte, los motores con los que es fabricado reducen la inercia al mismo tiempo que mantienen la rigidez del dispositivo.

El *Omni Bundle* de la Figura 1.10, es un dispositivo que es usado para probar conceptos relacionados con la robótica y la háptica. La combinación del dispositivo háptico *Geomagic Touch* (diseñado por *SensAble Technologies* y adquirido por Quanser) con el software de control Quarc y el desarrollo tecnológico de Quanser, permite a los usuarios traducir fácilmente la teoría del control y la robótica a una experiencia práctica. El dispositivo háptico *Geomagic Touch* es un robot de 6 GDL, tres de estos actuados. Las últimas tres, no actuadas, pertenecen su muñeca esférica. Los tres motores pueden mover el efector final, la punta del lápiz, a través de toda la región  $x$ ,  $y$  y  $z$  en su espacio de trabajo. La medición de posición de  $x$ ,  $y$  y  $z$  se realiza utilizando encoders, mientras que la medición de las rotaciones sobre estos ejes (roll, pitch y yaw) se realiza mediante potenciómetros.

### ***SensAble Technologies***

La empresa *SensAble Technologies* fue fundada por Anthony Cirurgiao 1993 en Massachusetts, Estados Unidos. Cuenta con una línea de dispositivos hápticos de retroalimen-

tación de fuerza y soluciones de software a los que llamo Phantom. Su dispositivo háptico es el *Phantom Premium* (anteriormente *Sensable Phantom Premium*) evolucionado de la investigación de Massie y Salisbury en 1994. Fue diseñado para proveer una interfaz como resultado de sus investigaciones que fuera capaz de mostrar imágenes hápticas de un ambiente virtual o remoto. Los creadores del *Phantom* diseñaron un mecanismo de bajo peso, poca fricción, gran rigidez y buena manipulación. Esto es lo que le permite entregar una sensación háptica convincente al contacto, con una superficie definida, textura y otros atributos mecánicos. El *Phantom* se convirtió en uno de los dispositivos hápticos más usados debido a su diseño mecánico, facilidad de uso y su paquetería de software flexible al usuario. Con un rango de movimiento que se aproxima al movimiento del brazo, puede ser usado para una gran variedad de aplicaciones hápticas, como investigación en simulaciones médicas y visualización de componentes virtuales. La línea *Phantom Premium* de dispositivos hápticos se compone de tres modelos: *Premium 1.0*, *Premium 1.5* y *Premium 3.0* los cuales se observan en la Figura 1.11 . Cada uno fue diseñado con diferentes rangos de movimiento y especificaciones, pudiendo adquirirlos con tres GDL o seis GDL totalmente actuados. Su rango de precio ronda entre los 50 mil y 100 mil dólares.



Figura 1.11: La línea de dispositivos hápticos Phantom Premium por SensAble Technologies. A la derecha el Phantom Premium 3.0 (imagen obtenida de la página oficial del distribuidor 3D Systems).

## 1.2. Motivación

Dentro del Laboratorio de Robótica del Departamento de Control y Robótica de la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM se cuenta con varios dispositivos electromecánicos, tales como el robot serial Geomagic Touch y el robot Novint Falcon, mostrado en la Figura 1.12. Estos dos son pequeños robots comerciales, diseñados para diferentes aplicaciones de entretenimiento e investigación. Sin embargo, en el Laboratorio de Robótica al igual que en otros laboratorios alrededor del mundo, se extendió su uso al estudio de sistemas de control y de realidad virtual con retroalimentación háptica [16].



(a) Robot Geomagic Touch de la empresa Seansable Technologies      (b) Robot Novint Falcon de la empresa Novint.

Figura 1.12: Dispositivos hápticos con los que cuenta el Laboratorio de Robótica del Departamento de Control de la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM

Aunque dichos dispositivos han sido utilizados en una cantidad considerable de experimentos, debido a su arquitectura cerrada y limitaciones mecánicas no ha sido posible realizar modificaciones sin dañar su estructura e instrumentación. Esto es un problema ya que continuamente se requiere reemplazar piezas de fábrica de los robots, o bien añadir otras más para adaptar elementos externos (como por ejemplo sensores de fuerza), consumiendo tiempo y recursos que podrían dedicarse a labores de investigación. Una de las soluciones que se planteó en el Laboratorio fue adquirir el robot Phantom Premium 3.0 de tres GDL de la empresa Sensable Technologies. Sin embargo, debido a su alto costo (que ronda los 1.5 millones de pesos) y a que sigue siendo un robot de arquitectura cerrada se descartó esta opción. Es por ello que se plantea en este trabajo de tesis el diseño y construcción de un robot de tres grados de libertad que sea accesible, versátil y fácil de modificar de acuerdo a las necesidades de investigación que se tengan.

### 1.3. Objetivos de la tesis

Mediante este trabajo de tesis, el Laboratorio de Robótica busca contar con un robot de arquitectura abierta, un espacio de trabajo más grande y que produzca fuerzas mayores a las del robot serial Geomagic Touch. Para cumplir con este objetivo se necesita:

1. Investigar los diferentes tipos de actuadores hápticos para la selección de motores.
2. Definir la configuración del robot a través de los diferentes artículos encontrados.
3. Diseñar y fabricar a detalle las piezas que constituirán al manipulador, para posteriormente comenzar la construcción de éste.
4. Llevar a cabo el análisis de la cinemática directa y cinemática inversa del robot construido.
5. Realizar una aplicación háptica que demuestre el funcionamiento del dispositivo.
6. Crear una interfaz virtual capaz de lograr una retroalimentación visual de los movimientos del usuario.

### 1.4. Contribuciones

Las principales contribuciones de esta tesis son:

- Diseño y construcción de un robot háptico de tres grados de libertad para el Laboratorio de Robótica del Departamento de Control para su uso en investigación.
- La obtención de las ecuaciones que describan el comportamiento cinemático del robot construido.
- Puesta en marcha del robot mediante el software Visual Studio y hardware especializado.
- Creación de una interfaz de realidad virtual que muestre el funcionamiento y la aplicación del robot obtenido.

### 1.5. Organización de la tesis

La estructura de este trabajo se divide en cinco capítulos que muestran los pasos necesarios para llevar a cabo el diseño, construcción e implementación de un robot de tres grados de libertad para fines hápticos. De esta forma, en el Capítulo 2, se revisa el proceso de desarrollo así como las bases matemáticas necesarias para realizar el análisis y

control de los robots manipuladores. En el Capítulo 3 se presenta el diseño y construcción del robot, comenzando desde la búsqueda y selección de los componentes idóneos para la implementación del sistema háptico. Posteriormente, en el Capítulo 4 se implementan los esquemas de control y los resultados obtenidos, para verificar el funcionamiento del robot, así como una aplicación y los resultados finales de éste. Finalmente en el Capítulo 5 se muestran las conclusiones del trabajo así como algunas consideraciones para desarrollos futuros.



# Capítulo 2

## Preliminares

Diseñar y construir un robot háptico implica una gran variedad de conocimientos. Se deben conocer conceptos básicos de robótica para el análisis matemático de éste, así como las metodologías de desarrollo de interfaces hombre-máquina. Es por eso que en este capítulo se presentan los conceptos generales de cinemática directa e inversa y control de robots, además del Modelo V, que es una metodología basada en procesos de desarrollo mecatrónico [5]. De dicho método se derivan una serie de etapas recomendadas para el diseño de sistemas hápticos, así como sus objetivos generales, los cuales incluyen robustez, calidad y usabilidad. Por último, se da una breve introducción a los sistemas de realidad virtual.

### 2.1. Aplicación del modelo V

El Modelo V para la implementación de sistemas mecatrónicos fue originalmente desarrollado en la República Federal de Alemania durante la década de los años 1980, para utilizarse en el diseño de software. Posteriormente, fue adaptado a otros procesos de desarrollo de tecnología dentro de los que se encuentra el diseño de sistemas hápticos. En [5] aparece un esquema similar al que se muestra en la la Figura 2.1 y con base en éste se derivan cinco etapas generales para el diseño de dichos sistemas. A continuación se describirán puntualmente estas etapas.

- Etapa 1: Requerimientos

La primera etapa consiste en la especificación completa de todos los requerimientos del sistema y se divide en tres aspectos importantes:

1. **Definición de la aplicación.** Como en todo sistema háptico, se debe definir una tarea específica para éste. Usualmente esta idea es brindada por un cliente, de acuerdo a sus requerimientos.

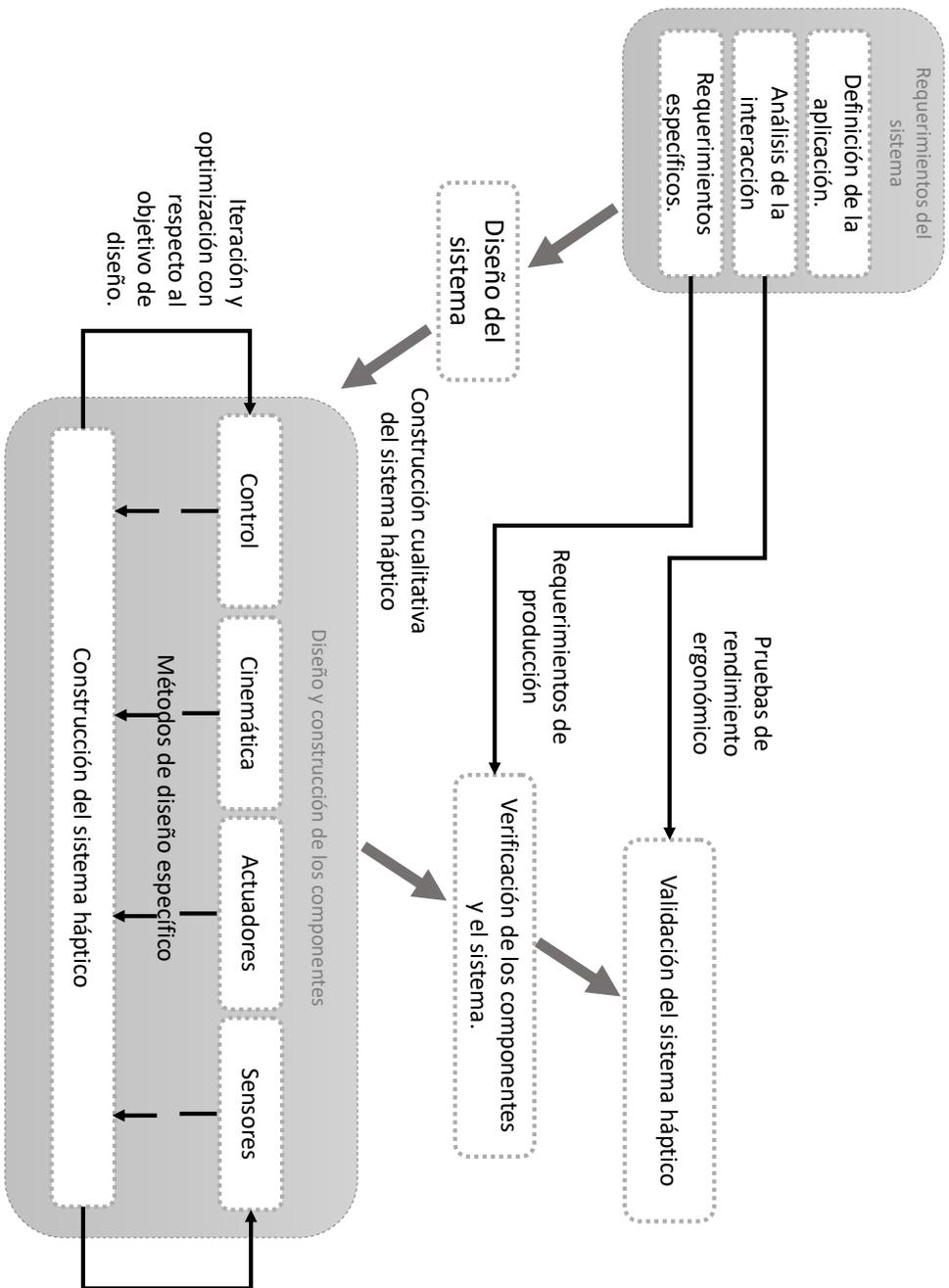


Figura 2.1: Adaptación del Modelo V para diseño de sistemas hápticos.

2. **Análisis de la interacción.** Con base en la definición detallada de la aplicación, se debe analizar la interacción prevista entre el usuario y el sistema háptico. Otro resultado en esta fase son las pruebas de rendimiento de la tarea y la ergonomía para su aplicación.
3. **Requerimientos específicos.** Se realiza un análisis de los requisitos técnicos del sistema háptico. Esto debe incluir todos los parámetros relevantes para cada componente, es decir, actuadores, sensores, estructuras cinemáticas, interfaces, estructura de control y diseño de software. El resultado de esta etapa es la obtención de una lista detallada de requisitos.

- Etapa 2. Selección de elementos y diseño del sistema

En esta etapa se seleccionan los componentes del sistema, así como la forma general del diseño mecánico. El procedimiento recomendado se explica detalladamente en [5], sin embargo se puede resumir todo en cuatro pasos que se explican a continuación:

1. Selección de la cinemática del robot basada en el espacio de trabajo deseado y las fuerzas o pares requeridos.
2. Selección del par de los actuadores con base en la estructura del mecanismo.
3. Selección de los sensores de posición, velocidad y fuerza según los requerimientos especificados en la Etapa 1.
4. Diseño de la electrónica para el control de los actuadores.

- Etapa 3. Construcción cualitativa

En la Etapa 3 se presenta un diseño final de acuerdo a las decisiones tomadas anteriormente. Esto da lugar a la construcción del sistema háptico, incluyendo la elaboración de componentes, su posterior ensamble y finalmente su instrumentación.

- Etapa 4. Verificación de los componentes y el sistema en general.

Esta etapa del proceso se concentra en las pruebas de funcionamiento de los componentes de forma individual y el sistema háptico de manera global, con base en los requerimientos de la Etapa 1. Se llevan a cabo pruebas de movilidad de los actuadores, funcionamiento de los sensores, establecimiento de los rangos de pares y fuerzas, idoneidad del esquema de control y diseño de software.

- Etapa 5. Validación del sistema háptico

Por último, al comprobar el correcto funcionamiento del sistema háptico, se procede a su validación al realizar pruebas de interacción con el usuario. Es necesario asegurarse de cubrir ciertos requisitos de rendimiento y calidad.

## 2.2. Bases teóricas para el análisis de robots

Dado que el diseño de sistemas hápticos combina varias áreas de conocimiento, entre ellas la del control de robots, se debe contar con las bases teóricas de esta disciplina. Esta sección proporciona dichas bases, dentro de las que se encuentran el análisis cinemático y el diseño de controladores.

### 2.2.1. Estructura mecánica de los robots

La Figura 2.2 muestra los elementos básicos de un robot; su base, sus eslabones, articulaciones y efector final. A continuación se describen cada uno de ellos:

- La base es la parte del mecanismo que permanece estática con respecto al movimiento del robot. Esto significa que los cálculos que se realicen para diseñar un mecanismo, así como los ejecutados durante su funcionamiento (posición, velocidad y aceleración) se dan con respecto a dicha base.

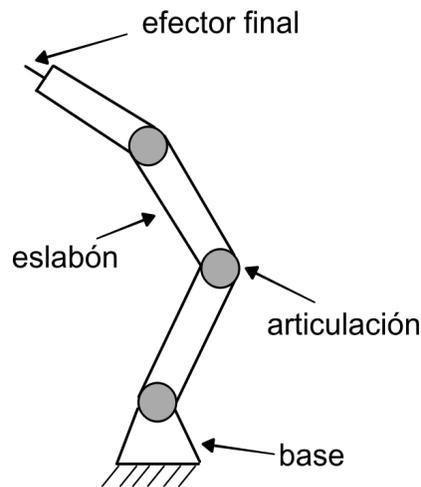


Figura 2.2: Elementos básicos de un manipulador.

- El efector final es el punto de interacción entre el mecanismo y el ambiente. Es capaz de moverse a través del espacio con un cierto número de grados de libertad (GDL). En el caso de las interfaces hápticas, la retroalimentación de fuerza y la interacción con el usuario suelen realizarse a través de este punto.
- Mientras un eslabón es un cuerpo rígido que posee dos nodos en sus extremos, una articulación es la unión de dos o más eslabones. Ambos se unen para conformar una cadena cinemática que une la base del robot con el efector final.

De acuerdo a su cadena cinemática, los robots pueden clasificarse de la siguiente forma:

1. Serial: cadena cinemática abierta.
2. Paralelo: cadena cinemática cerrada.
3. Híbrido: la combinación de un mecanismo serial y paralelo.

La Figura 2.3 muestra las tres diferentes clasificaciones de cadenas cinemáticas:

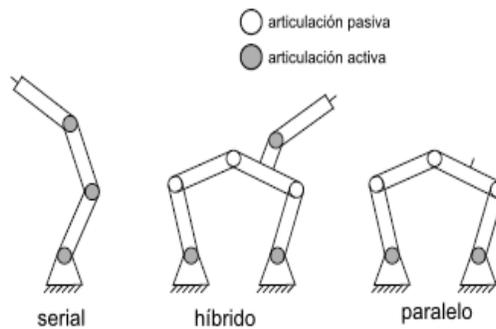


Figura 2.3: Clasificación de las cadenas cinemáticas de los robots.

Los robots seriales se utilizan ampliamente en todo tipo de aplicaciones. Un ejemplo clásico son los robots de montaje en serie en una línea de producción automatizada. Los mecanismos puramente seriales no incluyen articulaciones pasivas, es decir que éstas poseen actuadores que están en serie dentro de una sola cadena cinemática. Las ventajas de estos mecanismos es su diseño simple y su largo espacio de trabajo. Por otra parte, son más fáciles de controlar, especialmente en tareas de seguimiento de trayectorias debido a que su análisis cinemático es sencillo. El mayor inconveniente de dichos mecanismos es su comportamiento dinámico, debido a que todo el peso es levantado por una sola cadena cinemática. Además, éste es restringido por las masas relativamente altas, debidas al peso de los eslabones y los actuadores, lo que provoca una menor rigidez estructural con respecto a su propio peso. En contraste, esta es la ventaja de los mecanismos paralelos, los actuadores se encuentran en la base del robot, por lo que la única carga que deben soportar es el peso propio de los eslabones. Adicionalmente el peso es dividido en las diversas cadenas cinemáticas, lo que permite al diseño ser ligero, pero con una estructura mecánica rígida. La desventaja los mecanismos paralelos es que tienen menor espacio de trabajo en comparación con los mecanismos seriales. Además, que el análisis cinemático de estos suele ser mucho más complejo.

### 2.2.2. Análisis cinemático de los robots

El análisis cinemático se encarga de estudiar el movimiento del robot basándose únicamente en su geometría. Consiste en encontrar las expresiones matemáticas correspondientes a dos cinemáticas, la directa y la inversa. A continuación se abordará, de manera general, el cálculo de ambas.

#### Cinemática directa

El problema de la cinemática directa se puede expresar de la siguiente forma: dadas las variables de las articulaciones, obtener la posición y orientación del efector final. En este caso, las variables de las articulaciones son los ángulos entre los eslabones en el caso de una articulación rotacional, o bien el desplazamiento en el caso de una articulación prismática. Estas variables son denotadas como  $q_n$ , donde  $n$  es el número de articulaciones del manipulador.

La convención de Denavit-Hartenberg (D-H), es utilizada para resolver dicho problema. Dicha convención trata de un algoritmo mediante el cual se sitúan los sistemas de coordenadas de cada articulación. De esta forma se obtienen los parámetros  $\theta_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$  y  $\alpha_i$  (el ángulo, offset, longitud y ángulo de torsión respectivamente) para sustituirlos en la matriz de transformación homogénea:

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

donde  ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$  denota la transformación de coordenadas del sistema de referencia  $i$  al sistema de referencia  $i - 1$ . Así, al multiplicar cada transformación homogénea de la forma

$$\mathbf{T} = {}^0\mathbf{A}_1 {}^1\mathbf{A}_2 \dots {}^{n-1}\mathbf{A}_n, \quad (2.2)$$

se obtiene  $\mathbf{T}$ , que es la matriz que da la posición y la orientación del sistema de coordenadas del efector final en función a las variables articulares y expresado en coordenadas del sistema base.

#### Cinemática inversa

Al contrario que la cinemática directa, la cinemática inversa determina el valor de las variables articulares en función de la posición y orientación del efector final. El problema general de la cinemática inversa puede establecerse como sigue: dada una transformación homogénea de  $4 \times 4$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \in E(3), \quad (2.3)$$

con  $\mathbf{R} \in SO(3)$  (conjunto de todas las matrices de rotación de  $3 \times 3$ ), encontrar una o todas las soluciones que satisfagan la ecuación:

$${}^0\mathbf{T}_n(q_1, q_2, \dots, q_n) = \mathbf{H}, \quad (2.4)$$

donde

$${}^0\mathbf{A}_1 {}^1\mathbf{A}_2 \dots {}^{n-1}\mathbf{A}_n = \mathbf{H}. \quad (2.5)$$

Sin embargo, al desarrollar la ecuación (2.4), se obtienen doce ecuaciones no lineales con  $n$  variables desconocidas. Es por ello que se opta por usar un método geométrico para relacionar dichas variables.

### 2.2.3. El Jacobiano del manipulador

La relación entre las velocidades en el espacio cartesiano y las velocidades articulares, esta determinada por el Jacobiano de la función definida de las ecuaciones de la cinemática directa. Esta relación se expresa como

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}, \quad (2.6)$$

donde  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  es el Jacobiano del manipulador y  $\dot{\mathbf{x}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  es el vector de velocidad en el espacio cartesiano. Otra utilidad muy importante del Jacobiano, que servirá en los próximos capítulos, es la transformación de fuerzas en el espacio cartesiano a pares, esto se determina a través de la ecuación

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F} \quad (2.7)$$

donde  $\boldsymbol{\tau}$  son los pares de cada articulación y  $\mathbf{F}$  representa las fuerzas en el espacio cartesiano. Sin embargo estas ecuaciones se utilizan unicamente para robots seriales, puesto que para un robot paralelo la matriz Jacobiana corresponde al Jacobiano inverso de un robot serial [16]. De esta forma, las ecuaciones (2.6) y (2.7) quedan como:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} \quad (2.8)$$

y

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q})\mathbf{F} \quad (2.9)$$

#### Cálculo del Jacobiano geométrico

El Jacobiano de un manipulador tiene la forma

$${}^0\mathbf{J}_n = [{}^0\mathbf{J}_1 \quad {}^1\mathbf{J}_2 \quad \dots \quad {}^{n-1}\mathbf{J}_n], \quad (2.10)$$

donde la  $i$ -ésima columna  $\mathbf{J}_i$  está dada por

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i-1}x(\mathbf{O}_n - \mathbf{O}_{i-1}) \\ \mathbf{z}_{i-1} \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

si la  $i$ -ésima articulación es de revolución y

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_{i-1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

si la  $i$ -ésima articulación es prismática.

Se puede observar que las únicas cantidades necesarias para calcular el Jacobiano son los vectores unitarios  $\mathbf{z}_i$  y los vectores del origen  $\mathbf{O}_0$  a los orígenes  $\mathbf{O}_1, \dots, \mathbf{O}_n$ . Dichos vectores están dados por los tres primeros elementos de la tercera y cuarta columna de  ${}^0\mathbf{T}_i$  respectivamente.

### Cálculo del Jacobiano analítico

Si la orientación del efector final se ha representado con un número mínimo de parámetros, entonces es posible calcular el Jacobiano al derivar el vector  $\mathbf{p}$  respecto al tiempo. Quedando el Jacobiano como

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{q}}, \quad (2.13)$$

donde  $\mathbf{p}$  es el vector de posición del efector final con respecto a la base del robot.

### 2.2.4. Control de robots

El control de posición es el más simple de todos los problemas, siendo el seguimiento de trayectoria cuando el robot se encuentra controlado en posición y velocidad simultáneamente. También se pueden usar sensores externos para realizar control de fuerza, control por impedancias y control mediante retroalimentación visual.

Si  $\mathbf{q}_d$  representa el vector de posiciones deseadas que el usuario quiere que siga el robot y  $\mathbf{q}$  el vector de la posición actual del robot, el objetivo de control para el sistema es

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\dot{\mathbf{q}}^T(t), \tilde{\mathbf{q}}^T(t)]^T = \mathbf{0} \quad (2.14)$$

donde  $\dot{\mathbf{q}}$  es la velocidad de las articulaciones y  $\tilde{\mathbf{q}} = \mathbf{q}_d - \mathbf{q}$  el vector de errores de posición. El algoritmo de control trata de llevar en forma asintótica ambas variables a cero se representa mediante la variable  $\boldsymbol{\tau}$ , que es el vector de pares aplicado a las articulaciones del robot. Esto hace que el robot pueda moverse desde su posición inicial a una posición final, siguiendo una trayectoria deseada. La Figura 2.4 muestra el diagrama de bloques del control de posición explicado.

### Control PID

El control PID (Proporcional-Integrativo-Derivativo) es el algoritmo de control más usado en un gran número de aplicaciones. Esto es debido a su facilidad de uso ya que,

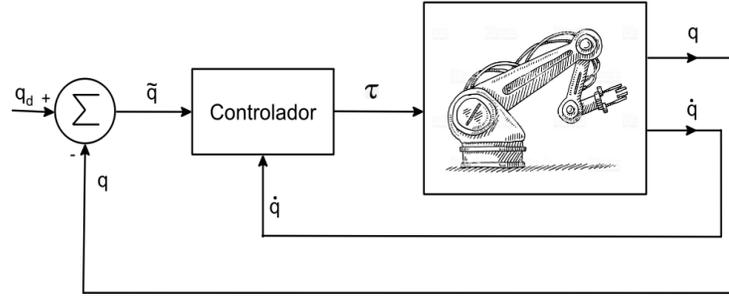


Figura 2.4: Sistema de control.

a diferencia de muchos controladores, el control PID no requiere del modelo del sistema. En cuestiones de robótica, este algoritmo se puede escribir de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_P \tilde{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_I \int_0^t \tilde{\mathbf{q}} dt + \mathbf{K}_D \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (2.15)$$

Donde  $\boldsymbol{\tau}$  es la variable de control (el par aplicado a las articulaciones del robot) y  $\tilde{\mathbf{q}}$  es el error de posición, como ya se mencionó anteriormente. Dicha variable de control esta compuesta por tres términos: el término proporcional, el término integral y el término derivativo, todos calculados respecto a  $\tilde{\mathbf{q}}$ . Finalmente,  $\mathbf{K}_P$ ,  $\mathbf{K}_I$  y  $\mathbf{K}_D$  son matrices diagonales de ganancias correspondientes a cada término.

En resumen, el término proporcional hará que la acción de control sea mayor entre más grande sea el error, el término integral se asegura que el error de estado estacionario se haga cero y el término derivativo permite predecir el error futuro y de esta forma compensarlo.

## 2.3. Fundamentos de sistemas de realidad virtual

Las aplicaciones de Realidad Virtual (RV) tratan de simular ambientes reales o imaginarios con los que un usuario pueda interactuar y observar el efecto de sus acciones en tiempo real. Idealmente se trata de incorporar los cinco sentidos, sin embargo, actualmente se trabaja únicamente con la vista, el oído y recientemente con el tacto. La Figura 2.5 muestra la estructura general de una aplicación de RV con retroalimentación visual, auditiva y háptica. Sus elementos principales son:

- Software de simulación, responsable de calcular el comportamiento del entorno virtual a lo largo del tiempo.

- Algoritmos de renderización visual, auditiva y háptica, que calculan los gráficos, el sonido y la fuerza del entorno virtual hacía el usuario.
- Transductores, que convierten señales digitales de la computadora a una forma visual, auditiva o háptica que el operador pueda percibir.

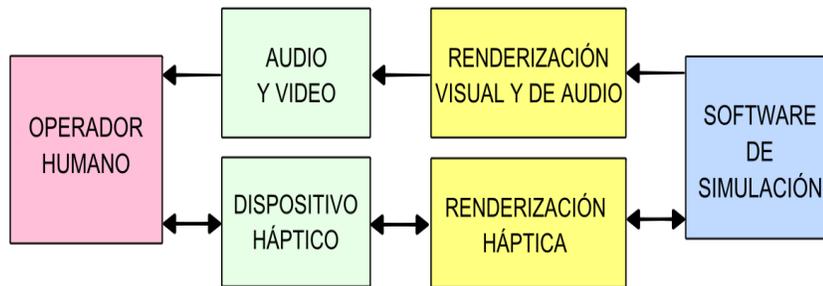


Figura 2.5: Arquitectura básica de una aplicación de realidad virtual incorporando retroalimentación visual, auditiva y háptica

Normalmente el operador humano sostiene el dispositivo háptico y percibe la retroalimentación de audio por medio de bocinas o audífonos y visual por medio de monitores o lentes de realidad virtual. Mientras que estos medios tienen un canal de información y un flujo de energía unidireccional (del software de simulación al operador), la renderización háptica intercambia información y energía de manera bidireccional, desde y hacia el usuario. Sus algoritmos calculan las fuerzas de interacción entre la representación de la interfaz háptica y de los objetos dentro del entorno virtual. Además, se encarga de que el dispositivo represente correctamente dichas fuerzas sobre el operador humano.

El avatar es la representación del dispositivo en el ambiente virtual y a través del cual el usuario interactúa dentro del mismo. En una aplicación determinada, el usuario puede elegir entre diferentes avatares. Por ejemplo, una herramienta quirúrgica puede tratarse como un objeto volumétrico que intercambia fuerzas y posiciones con el usuario en un espacio 6D o como un punto que representa la punta de la herramienta en un espacio 3D.

Por otra parte, los componentes de un algoritmo de renderización háptica típico se dividen en tres y se muestran en la Figura 2.6.

- El algoritmo de detección de colisiones detecta las interacciones entre los objetos y el avatar en el entorno virtual, proporcionando información sobre dónde y cuando surge el contacto entre ellos. También se encarga de proporcionar la magnitud de la penetración y el área de contacto.

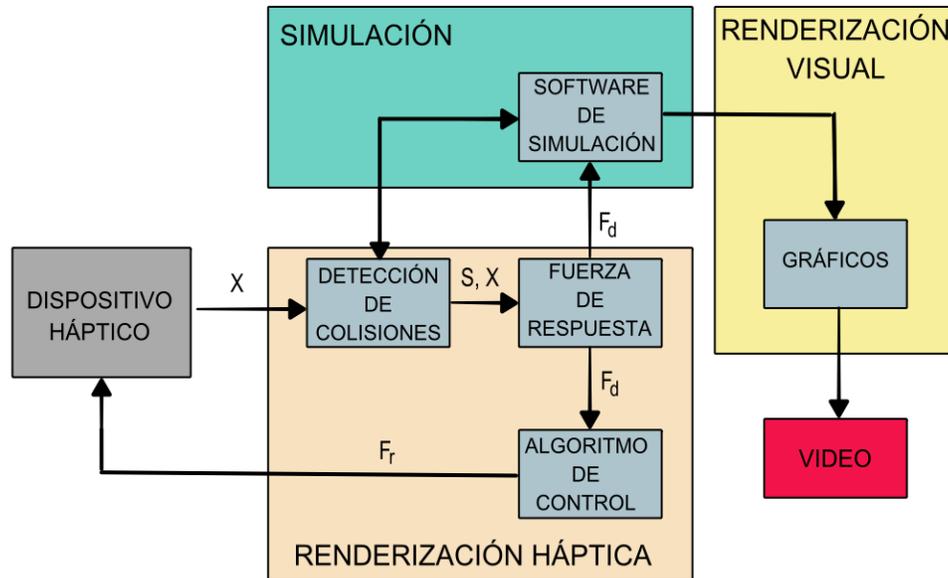


Figura 2.6: Los tres bloques que componen la renderización háptica, detección de colisión, respuesta de fuerza y el algoritmo de control.

- Los algoritmos de respuesta de fuerza calculan la interacción entre la interfaz y el objeto virtual cuando se detecta una colisión. Estas fuerzas se deben aproximar lo más posible a las fuerzas que normalmente surgirían durante el contacto con objetos reales. Sus valores de retorno son normalmente vectores de fuerza y par que se aplican en el efector final.
- El algoritmo de control minimiza el error entre fuerzas ideales y aplicables. Los vectores de par y fuerza calculados alimentan a éste y, como resultado, envían las señales que se mandarían al dispositivo háptico.

Un lazo háptico consiste de la siguiente secuencia de eventos:

1. Los algoritmos de control de bajo nivel muestrean las posiciones de los sensores de cada articulación del dispositivo háptico.
2. Posteriormente estos algoritmos combinan la información recopilada de cada sensor para obtener la posición del efector final en el espacio cartesiano, es decir, la posición del avatar dentro de la interfaz virtual.

3. El algoritmo de detección de colisiones utiliza la información de posición para definir el contacto entre objetos y el avatar.
4. El bloque de respuesta de fuerza calcula las fuerzas de interacción entre el avatar y el objeto virtual involucrado.
5. Finalmente, se envían dichas fuerzas al algoritmo de control, el cual se encarga de aplicarlas al operador por medio del dispositivo háptico.

## 2.4. Comentarios del capítulo

En este capítulo se sentaron las bases matemáticas y los conocimientos necesarios en el análisis del movimiento del robot, el control del mismo, la retroalimentación de fuerza y el funcionamiento de los sistemas de realidad virtual. Con el objetivo de que en los capítulos posteriores, se logre comprender el funcionamiento del robot construido. Para finalmente, desarrollar una aplicación de realidad virtual incorporando renderización visual y háptica.

# Capítulo 3

## Diseño y construcción del robot

En el Capítulo 1 se conoció la perspectiva del mercado de las interfaces hápticas, dando a conocer las características y ventajas de los distintos diseños que se han realizado hasta la actualidad. Es con esta información que se pueden sentar las bases de la funcionalidad del robot que se desarrolla en este trabajo y de esta forma presentar las primeras tres etapas de la metodología del Modelo V. Primeramente, se comenzará por definir los requerimientos de diseño del dispositivo, teniendo en cuenta los objetivos del mismo. A continuación, se seleccionarán los componentes electrónicos y mecánicos del sistema de acuerdo a dichos requerimientos y se justificará la estructura mecánica y diseño cinemático del robot háptico. Finalmente, se mostrará su proceso de diseño, construcción y ensamble.

### 3.1. Etapa 1: Requerimientos

Como se describió en el Capítulo 2, esta etapa se divide en tres aspectos que se abordaron de acuerdo al estudio de las características de los dispositivos hápticos más recientes en el mercado y a los problemas con los que cuentan los robots hápticos usados en el Laboratorio de Robótica.

#### 3.1.1. Definición de la aplicación

Como especificaciones del Laboratorio de Robótica del Departamento de Control y Robótica de la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, este proyecto se inició con la idea de que la interfaz construida tuviera la tarea específica de ser usada como un sistema de pruebas para las diversas investigaciones académicas que se desarrollan dentro de dicho laboratorio. Por eso mismo, se pretende que el robot háptico construido pueda usarse en diversas aplicaciones, tales como:

- Pruebas en sistemas de realidad virtual.
- Sistemas de teleoperación.

- Simulaciones médicas.
- Pruebas de algoritmos de control.
- Aplicaciones educativas para la materia de Control de Robots Industriales.

De esta forma, se pretende construir un robot que sea capaz de adaptarse, de la mejor manera, a la aplicación que cada uno de los usuarios decida. La arquitectura de un sistema que permita alcanzar este objetivo es la que se puede ver en la Figura 3.1. El robot

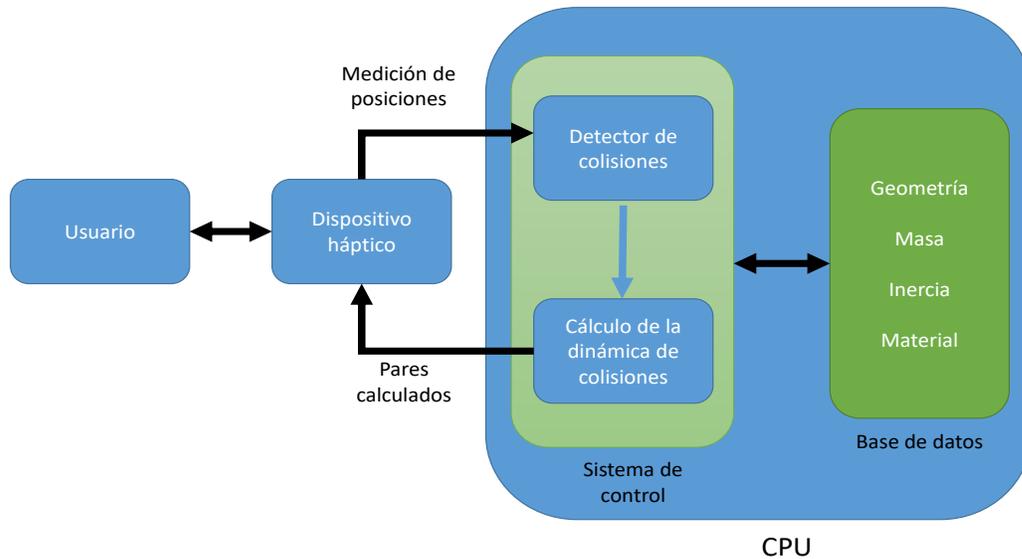


Figura 3.1: Esquema del sistema háptico.

registra las posiciones angulares de cada articulación y las transmite al CPU, calculando las reacciones de interacción con los objetos virtuales. Además, cuenta con una base de datos, donde se encuentran recogidas las geometrías, las propiedades de los objetos (masa, inercia) y las propiedades de los materiales (textura, elasticidad) de los objetos virtuales; de este modo, combinando estos datos, el sistema de control es capaz de calcular la dinámica de la colisión. Una vez realizado esto, el CPU envía al robot las variables dinámicas (pares) mediante sus actuadores, los cuales retroalimentan fuerzas al usuario para recrear la sensación de inmersión en el entorno virtual.

### 3.1.2. Análisis de interacción

Como se mencionó en el Estado del Arte, gran parte de los dispositivos hápticos actuales interactúan con el usuario mediante efectores finales con estructuras fáciles de manipular como se puede observar en la Figura 3.2.



Figura 3.2: Efector final de diferentes dispositivos hápticos (a) *Geomagic Touch*, b) *Omega.3* y c) *Phantom Premium 1.5*.

Sin embargo, el problema de estos robots comerciales y que contrasta con la las necesidades generales de los investigadores, nace en su arquitectura cerrada del diseño. Que si bien la interacción entre el usuario y la interfaz se adapta a diversas aplicaciones, resulta muy complicado modificar o añadir otros componentes, tales como sensores, a dicha interfaz. Un claro ejemplo lo anterior sucedió con el robot *Geomagic Touch* de la Figura 3.2-a, al cual se le tuvo que añadir un sensor de fuerza. Esto ocasionó que se tuviera que reemplazar su efector final, quedando como se observa en la Figura 3.3. Dicha modificación hizo imposible volver a ocupar la pluma original del robot, por eso mismo se plantea que el efector final del nuevo diseño sea capaz de intercambiarse y adaptarse de acuerdo a las necesidades que se tenga. Sin embargo, como robot háptico para usarse en aplicaciones generales se eligió que tuviera un efector final tipo pluma.



Figura 3.3: *Geomagic Touch* con el sensor de fuerza adaptado.

[17]

Otra parte de la interacción entre el usuario y la interfaz se realiza a través de la retro-

alimentación visual, por lo que se plantea desarrollar una aplicación en la cual el usuario sea capaz de interactuar con el dispositivo a través de la pantalla de la computadora.

### 3.1.3. Requerimientos específicos

Para un primer análisis de los requerimientos específicos que se desean para el robot háptico, es imprescindible basarse en las limitaciones actuales que se tienen con el robot Geomagic Touch y en las características del Phantom Premium 1.5, al ser el dispositivo con el que se deseaba contar en el Laboratorio de Robótica. Es por eso que en la Tabla 3.1 se muestran las especificaciones de dichos robots.

Especificaciones	Geomagic Touch	Phantom Premium 1.5
<b>Espacio de trabajo</b>	160 × 120 × 70 mm	381 × 267 × 191 mm
<b>Posición nominal de resolución</b>	0.055 mm	0.03 mm
<b>Fuerza y torque máxima</b>	3.3 N	8.5 N Traslacional 170 mNm Rotacional
<b>Resistencia al movimiento</b>	de 1.02 a 2.31 N/mm	3.5 N/mm
<b>Retroalimentación de fuerza</b>	$x, y, z$	$x, y, z, Tx, Ty, Tz$
<b>Sensado de posición</b>	$x, y, z$ (encoder digital) roll,pitch,yaw (potencio- metro lineal)	$x, y, z, roll, pitch, yaw$
<b>Interfaz</b>	USB 2.0	Puerto Paralelo

Tabla 3.1: Especificaciones de los robots Geomagic Touch y Phantom Premium

Como se puede observar, la gran diferencia entre ambos robots son sus grados de libertad actuados ya que las demás especificaciones únicamente aumentan sus magnitudes, como es el caso del espacio de trabajo, la fuerza y la resolución de posición. Se tiene la visión a futuro de que este trabajo de tesis sea el comienzo para la construcción de un robot de seis GDL totalmente actuados, por lo que las especificaciones que se buscan obtener son:

1. Un mayor espacio de trabajo que el del robot Geomagic Touch.
2. Una fuerza mayor a 3.3 N capaz de levantar una muñeca esférica de 0.3 [kg].
3. Retroalimentación de fuerza en  $x, y, z$ .
4. Sensado de posición en  $x, y, z$  con una resolución entre 0.055 mm y 0.03 mm.
5. Diseño con una arquitectura abierta, susceptible a futuras modificaciones.

## 3.2. Etapa 2: Selección de elementos y diseño del sistema

La mecánica y la electrónica juegan un papel importante en el desarrollo de dispositivos hápticos. Mediante el estudio de los requerimientos necesarios para obtener el mejor diseño en términos de ergonomía, precio, fuerza, movilidad y cumplimiento de los objetivos propuestos, en este apartado se profundizará en la selección de los componentes, la estructura del mecanismo y el software a utilizar.

### 3.2.1. Selección de la cinemática del robot

Con base en la teoría vista en el Capítulo 2 se concluyó que la mejor elección para el diseño del robot consiste en una cadena cinemática paralela. Esto es debido a que los actuadores se encuentran en la base del robot, y por lo tanto, el único peso que debe cargar es el propio de los eslabones. Adicionalmente, el peso es dividido en las diversas cadenas cinemáticas, lo que permite al diseño ser ligero, pero con una estructura mecánica rígida, llevando al comportamiento dinámico a tener una transmisión más transparente en la retroalimentación de fuerza. Estas ventajas, hacen que los mecanismos paralelos sean convenientes para el diseño de interfaces hápticas [5]. Es por eso que se optó por tomar como base la cinemática del robot Phantom [10], el cual se muestra en la Figura 3.4. Se puede ver que éste posee una cadena cinemática híbrida donde su primera articulación esta en serie y las otras dos están en paralelo.

Con la finalidad de obtener las distancias de  $l_1$  y  $l_2$  que logren que el espacio de trabajo sea el especificado, se calcularán las cinemáticas directa e inversa, las cuales nos servirán para mapear todas las posibles posiciones del robot. Posteriormente estos valores servirán para el desarrollo de una aplicación de realidad virtual.

#### Cinemática directa

La cinemática directa del robot háptico se obtuvo a través de la convención de Denavit-Hartenberg. Para ello, en la Figura 3.5 se muestra de forma esquemática el robot, siguiendo los pasos del algoritmo en cuanto a la asignación de los sistemas de referencia de cada articulación. En la Tabla 3.2 se muestra el valor de los cuatro parámetros y, de acuerdo a ellos, se construyen las matrices de transformaciones homogéneas  ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$ , con  $i = 1, \dots, 3$ , las cuales representan la transformaciones necesarias para llegar del sistema  $i-1$  al sistema  $i$ .

$${}^0\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

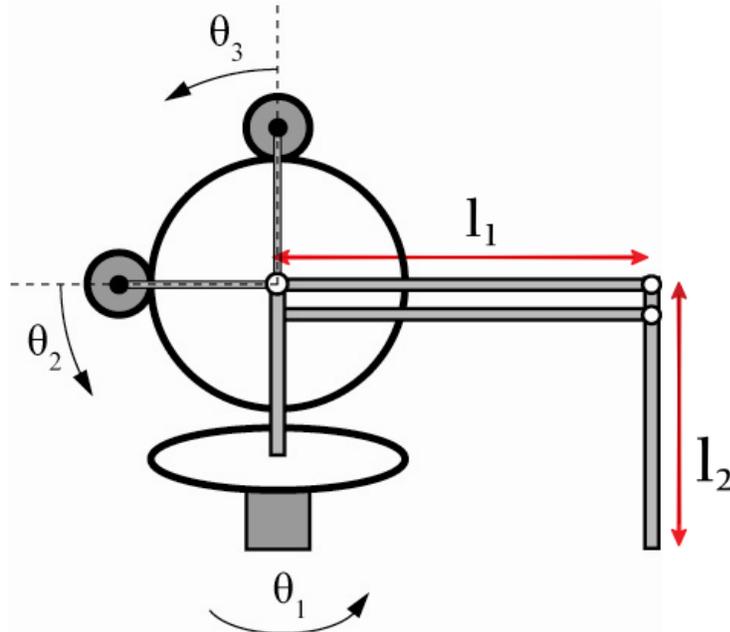


Figura 3.4: Diseño de la cinemática y ejes de rotación del robot Phantom

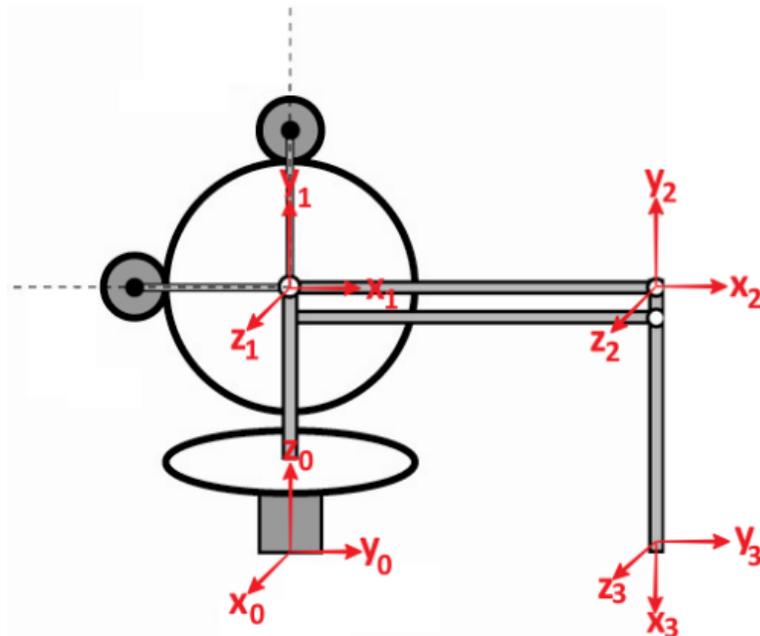


Figura 3.5: Asignación de los sistemas de referencia a partir del algoritmo de Denavith Hartenberg (D-H).

Eslabón	$a_i$ [mm]	$d_i$ [mm]	$\alpha_i$ [°]	$\theta_i$ [°]
<b>1</b>	0	$l_2$	90	$\theta_1^*$
<b>2</b>	$l_1$	0	0	$\theta_2^*$
<b>3</b>	$l_2$	0	0	$\theta_3^*$

Tabla 3.2: Parámetros del Denavit Hartenberg del robot háptico, donde \* indica que es un valor variable.

$${}^1\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_1 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_1 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$${}^2\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_2 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_2 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Al multiplicar todas las matrices se obtiene  ${}^0\mathbf{T}_3$ , que representa la acumulación de todas las transformaciones necesarias para conocer la orientación y posición del efector final del robot.

$${}^0\mathbf{T}_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 & -\sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 (l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \cos \theta_2) \\ \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 & -\sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_1 & -\cos \theta_1 & \sin \theta_1 (l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \cos \theta_2) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & l_2 + l_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

### Cinemática inversa

Como se mencionó en el Capítulo 2, la cinemática inversa estudia el mapeo de coordenadas cartesianas a variables articulares. En este caso, dada la posición del efector final  $P(x_c, y_c, z_c)$  se calcula un conjunto de tres ángulos ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$ ). Para el primero a través de la vista superior mostrada en la Figura 3.6, es posible calcularlo por inspección, obteniendo

$$\theta_1 = \text{atan2}(y_c, x_c) \quad (3.5)$$

Considerando la una vista lateral de la Figura 3.7 y una serie de variables auxiliares se obtendrán los valores de  $\theta_2$  y  $\theta_3$ . De esta forma se comienza por obtener las variables auxiliares  $r$  y  $S$

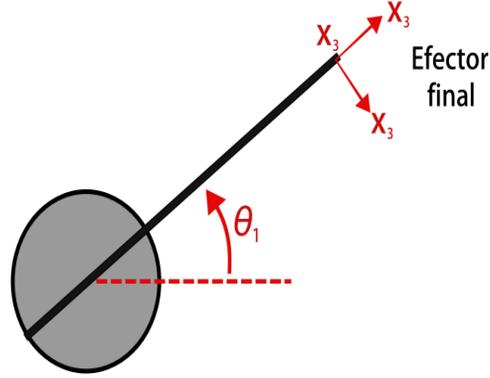


Figura 3.6: Vista superior del robot háptico.

$$r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}, \quad (3.6)$$

$$S = z_c - d_1 \quad (3.7)$$

Mediante (3.6) y (3.7) se obtiene  $d_2$

$$d_2 = \sqrt{r^2 + S^2}, \quad (3.8)$$

De esta forma mediante la ley de cosenos se obtienen los ángulos auxiliares  $\beta_1$  y  $\beta_2$

$$S^2 = r^2 + d_2^2 - 2rd_2 \cos(\beta_1) \quad (3.9)$$

$$l_2^2 = l_1^2 + d_2^2 - 2l_1d_2 \cos(\beta_2) \quad (3.10)$$

Despejando (3.9) y (3.10)

$$\cos(\beta_1) = \frac{S^2 - r^2 - d_2^2}{-2rd_2} \quad (3.11)$$

$$\cos(\beta_2) = \frac{l_2^2 - l_1^2 - d_2^2}{-2l_1d_2} \quad (3.12)$$

Y de esta forma

$$\beta_1 = \text{atan2} \left( \sqrt{1 - \frac{l_2^2 - l_1^2 - d_2^2}{-2l_1d_2}}, \frac{l_2^2 - l_1^2 - d_2^2}{-2l_1d_2} \right) \quad (3.13)$$

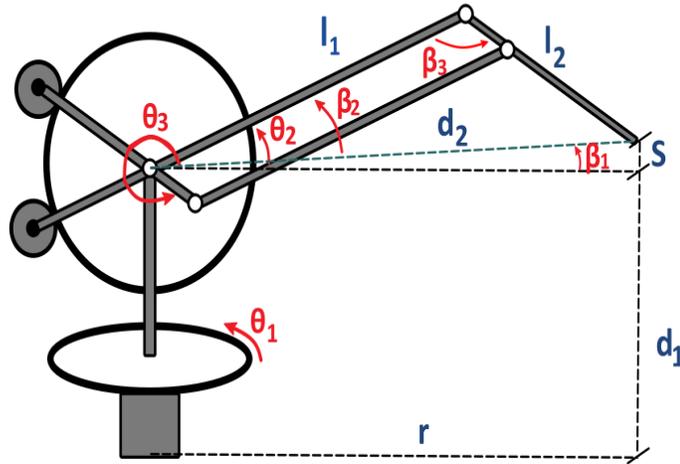


Figura 3.7: Vista lateral del robot háptico. Usando la ley de cosenos se muestran las variables a encontrar.

$$\beta_2 = \text{atan2} \left( \sqrt{1 - \frac{l_2^2 - l_1^2 - d_2^2}{-2l_1d_2}}, \frac{l_2^2 - l_1^2 - d_2^2}{-2l_1d_2} \right) \quad (3.14)$$

Por la tanto:

$$\theta_2 = \beta_1 + \beta_2 \quad (3.15)$$

Para poder calcular  $\theta_3$  únicamente falta encontrar  $\beta_3$ , la cual por ley de cosenos queda de la forma

$$d_2^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(\beta_3) \quad (3.16)$$

$$\beta_3 = \text{atan2} \left( \sqrt{1 - \frac{d_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{-2l_1l_2}}, \frac{d_2^2 - l_1^2 - l_2^2}{-2l_1l_2} \right) \quad (3.17)$$

Por último,  $\theta_3$  es igual a

$$\theta_3 = \pi + \beta_3 + \theta_2 \quad (3.18)$$

### Espacio de trabajo

Utilizando la cinemática directa y definiendo los valores  $l_1 = 0.20$  [m] y  $l_2 = 0.20$  [m], se hará un mapeo con una resolución de un grado, de cada punto alcanzable del robot. Lo que da como resultado un esquema completo del espacio de trabajo, el cual se muestra en la Figura 3.8. Cabe mencionar que los ángulo máximos y mínimos de cada articulación son de  $-90$  [°] a  $90$  [°] para  $\theta_1$ , de  $-20$  [°] a  $70$  [°] para  $\theta_2$  y de  $230$  [°] a  $320$  [°] para  $\theta_3$ . Logrando con estos valores cumplir con la especificaciones del espacio de trabajo deseado.

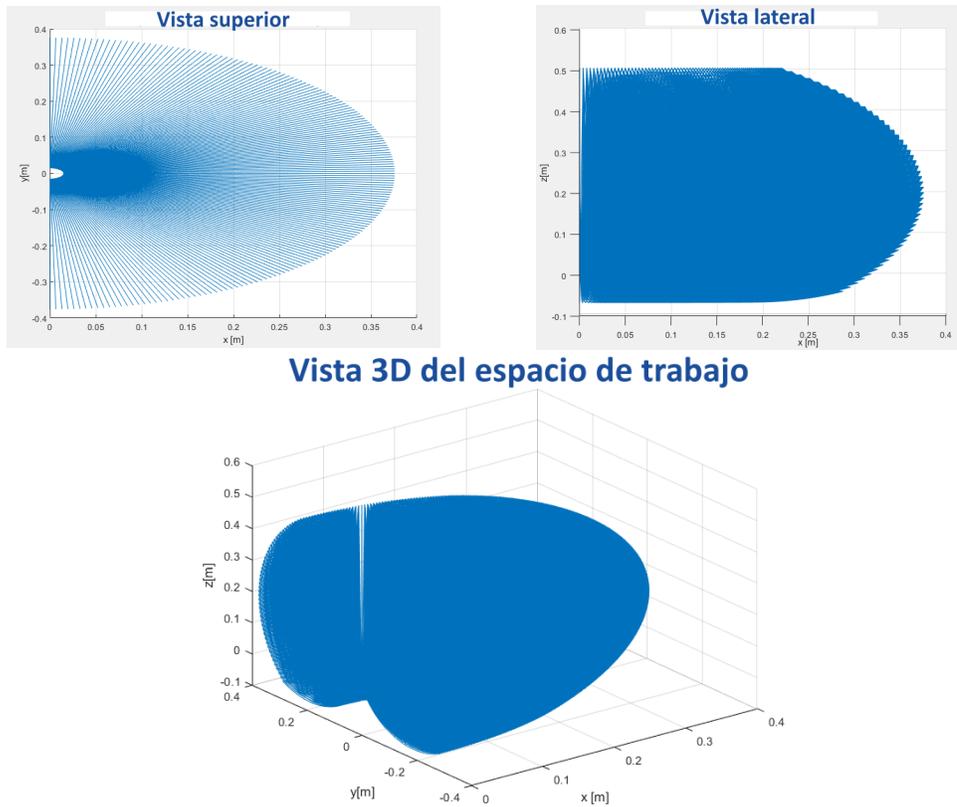


Figura 3.8: Espacio de trabajo del robot háptico (gráfica realizada mediante el software MATLAB).

Se puede observar que el espacio de trabajo es parecido a una semiesfera. Sus máximo valores son  $x = 0.37$  [m],  $y = 0.37$  [m] y  $z = 0.5$  [m], lo que resulta en unas dimensiones mayores al robot Phantom Premium.

### 3.2.2. Selección de los actuadores y mecanismos del sistema

Para la búsqueda de los actuadores adecuados, se realizó una investigación de los tipos de motores que utilizaban las interfaces hápticas comerciales. Sin embargo, por restricciones de las compañías, fue difícil adquirir esta información. Es por eso que únicamente se contó con los datos específicos del Geomagic Touch. De éste se sabe que contiene tres motores RS-455PA de la compañía MABUCHI MOTOR, cuyas hojas de especificaciones se anexan en el Apéndice A. Éstos son pequeños motores de DC con escobillas de carbono, ideales para sistemas de control por su baja inercia y con un par máximo de 15.8 [mNm]. Con estos parámetros se inició la búsqueda y fue con los distribuidores de Maxon Motors que se encontró el motor RE 30 Graphite Brushes de 60 Watts, el cual se puede apreciar en la Figura 3.9.



Figura 3.9: Motor RE 30 Graphite Brushes de 60 Watts seleccionado para la retoalimentación de fuerza(imagen obtenida desde la página oficial de Maxon).

La familia de los motores RE 30 EB fue lanzada por Maxon en el año 2013, predestinados específicamente para aplicaciones hápticas. El motor de escobillas de metales preciosos RE 30 de 60 Watts es conocido por una resistencia de contacto baja y constante durante toda la vida útil, una característica que facilita mucho el control. Éste también presenta un bajo voltaje de arranque, incluso después de un largo período de inactividad. Con un par nominal de 85 [mNm], el motor es muy potente a pesar de la conmutación de metales preciosos. Por estas características fue que se seleccionaron y se adquirieron tres de estos motores. Su hoja de especificaciones se pueden observar en el Apéndice A.

Si se toma la corriente de arranque (39[A]) como la corriente máxima que soporta el motor y se multiplica por la constante de par (25.9 [mNm]), se obtiene un par máximo

de 1010 [mNm]. Esto significa que aún se tendría que amplificar éste para obtener una fuerza de retroalimentación similar al robot *Phantom Premium*. Por ello se propone un arreglo de poleas para producir una amplificación de diez veces, calculando un par final de 10.1 [Nm] y satisfaciendo así las especificaciones requeridas.

### 3.2.3. Selección de los sensores requeridos

Como sensores de posición, se usaron encoders incrementales para medir las variables articulares. Normalmente acoplados al motor, éstos proveen un número específico de pulsos por revolución (PPR) equitativamente espaciados. Se utiliza un solo canal de salida para aplicaciones donde el sentido de dirección de movimiento no es importante (unidireccional). Cuando se requiere el sentido de dirección, se utiliza la salida de cuadratura (bidireccional), con dos canales desfasados  $90^\circ$  y en donde el circuito del sensor determina la dirección de movimiento basado en la fase de relación entre ellas.

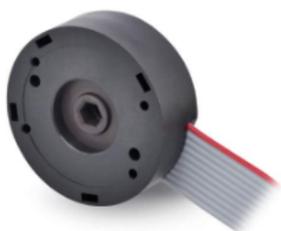


Figura 3.10: Encoder acoplado al motor RE 30 de 1024 pulsos por vuelta(imagen obtenida desde la página oficial de Maxon).



Figura 3.11: Sensor de fuerza ATI Nano 17. (imágen obtenida desde la página oficial de ATI).

La empresa Maxon se encarga de ensamblar el motor con el encoder, es por eso que se seleccionó el modelo MR, tipo L, de 1024 vueltas por revolución, el cual se muestra en la Figura 3.10. En una configuración de cuadratura, la resolución de éste es de  $0.087^\circ$ , proponiendo para el presente proyecto una de  $0.03$  [mm]. Se supone dicho valor como la longitud de arco de un determinado ángulo y un radio de  $20$  [mm] que corresponde al largo de los eslabones del robot. En donde el ángulo será igual a la resolución especificada en grados. Con estos valores se tiene que la resolución especificada en grados es de  $0.0087^\circ$ . La solución a este problema fue resuelto como consecuencia de la amplificación del par pues la relación de radios entre las poleas, además de determinar su ganancia,

también determina la relación de velocidad angular. De esta forma, es posible aumentar la resolución del encoder, la cual finalmente sería de  $0.0087^\circ$ .

Para la medición de fuerza se utilizará el sensor Nano 17 de la empresa ATI mostrado en la Figura 3.11, el cual es un pequeño transductor que cuenta con galgas extensiométricas de silicio que mide las fuerzas y pares en los seis ejes ( $F_x, F_y, F_z$ ) y ( $T_x, T_y, T_z$ ). Éste se colocará en el efector final del robot y mediante él se medirá la retroalimentación de fuerzas que proporcioné el sistema. Las hojas de especificaciones de estos sensores se encuentra en el Apéndice A.

### 3.2.4. Tarjeta de adquisición de datos

Debido a que la tarea de diseñar e implementar la electrónica de un dispositivo háptico es muy extensa, se optó por trabajar con un Controlador CompactRIO para la parte de la adquisición y envío de datos. El modelo con el que se contaba en el Laboratorio de Robótica es el cRIO-9014, el cual se muestra en la Figura 3.12, se trata de un controlador embebido en tiempo real diseñado para aplicaciones avanzadas de monitoreo y control. Éste consta de una variedad de puertos de conectividad incluyendo un Ethernet, un USB y uno serial.



Figura 3.12: Controlador cRIO-9014 de la empresa National Instrument (imagen obtenida de la página oficial de NI).



Figura 3.13: Módulo controlador de Servo motor DC de la serie C, con Escobillas y Puente H Completo (imagen obtenida de la página oficial de NI).

Por si solo, el cRIO-9014 no incluye ranuras para módulos de Entradas/Salidas, es por eso que se adquirieron tres módulos NI-9505, los cuales son interfaces para servo motores DC, con escobillas y puente H completos. una de estas piezas se muestra en la Figura 3.13, conteniendo dentro una interfaz para el encoder y un sensor de corriente integrados, lo que brinda conectividad directa a actuadores del robot. El NI 9505 trabaja en conjunto con el módulo LabVIEW FPGA, el cual funge como controlador de los motores o bien un amplificador para los actuadores. En la Figura 3.14 se ilustra el funcionamiento de ambos elementos.

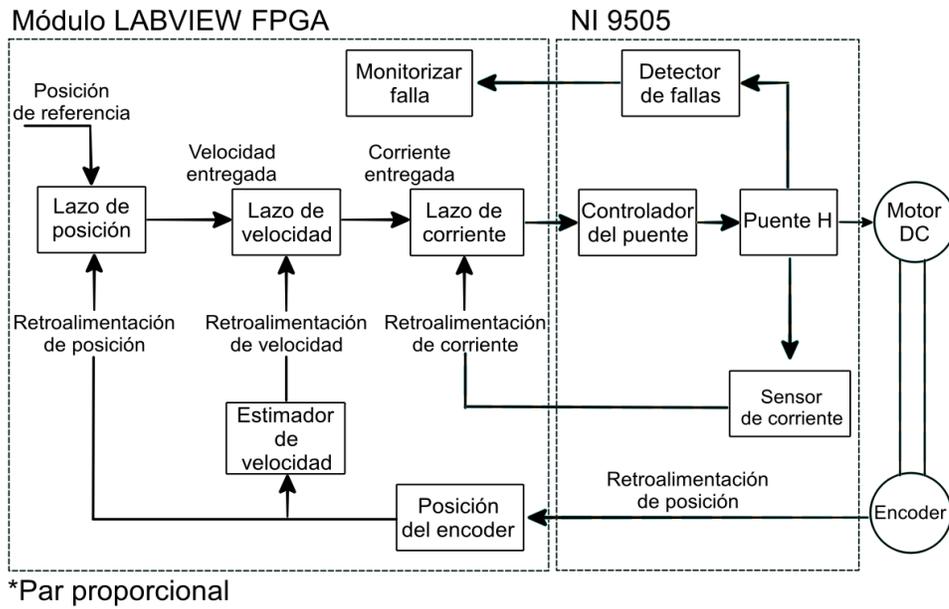


Figura 3.14: Diagrama de bloques del funcionamiento del módulo NI 9505 (imagen editada y traducida del manual de operación y especificaciones del NI-9505).

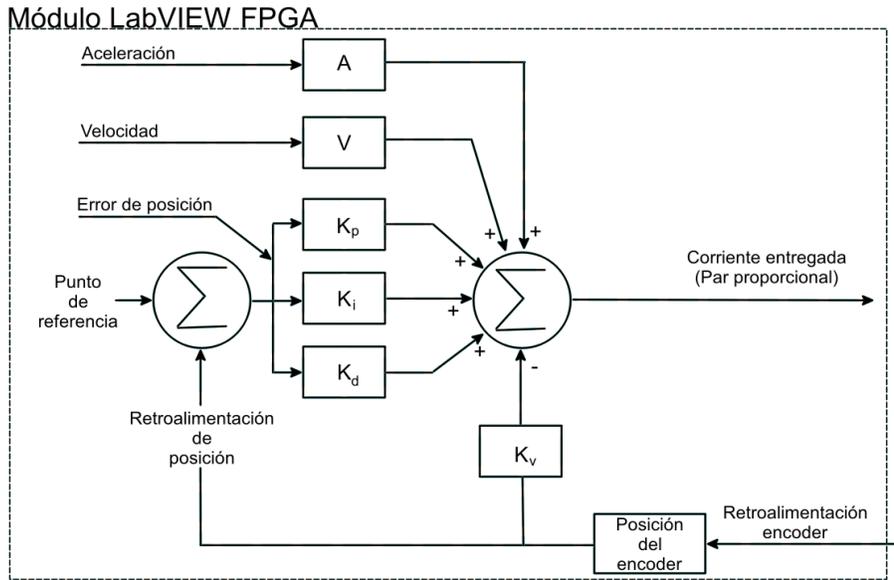


Figura 3.15: Módulo LabVIEW FPGA NI 9505 Lazo PID (imagen editada y traducida del manual de operación y especificaciones del NI-9505).

Por otro lado, las Figuras 3.15 y 3.16 muestran más a detalle el funcionamiento de los lazos de control de posición, velocidad y corriente implementados. Se observa que la señal del encoder de cuadratura pasa a través del NI-9505 y es procesada por el módulo LabVIEW FPGA para la retroalimentación del sistema de control. Posteriormente éste genera una señal PWM proporcional al par deseado que se quiere enviar a los motores, donde, a mayor incremento del ciclo de trabajo, mayor será la corriente y por ende el par enviado. Por último, el módulo NI 9505 se encarga de entregar dicha señal al actuador. Recapitulando, como resultados de esta etapa, se logró definir la estructura cinemática

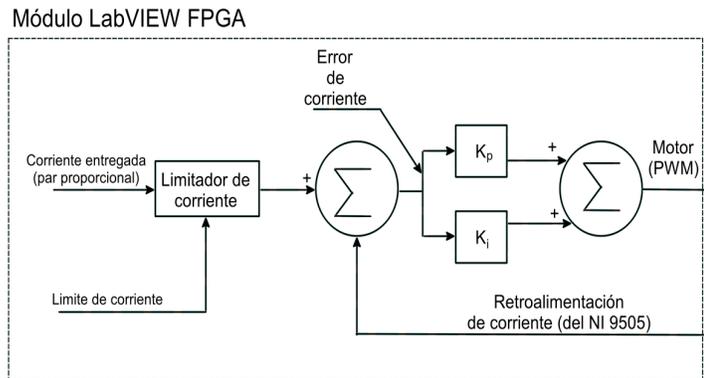


Figura 3.16: Módulo LabVIEW FPGA NI 9505 lazo de corriente (imagen editada y traducida del manual de operación y especificaciones del NI-9505).

del robot, las medidas de los eslabones para un óptimo espacio de trabajo y los elementos que compondrán al sistema (actuadores, sensores y componentes electrónicos). Mediante todos ellos se dimensionarán las piezas a desarrollar en la siguiente sección, en la cual también se resolverá el diseño y construcción de robot háptico.

### 3.3. Etapa 3: Diseño y construcción cualitativa

Una de las tecnologías de creciente incorporación en la industria de diseño e investigación son los dispositivos de manufactura aditiva, comúnmente llamados impresoras 3D. Se tratan de herramientas fundamentales en el desarrollo de productos ya que permiten elaborar todo tipo de piezas. La principal ventaja de esto es que se puedan detectar errores de diseño, permitiendo elaborar el prototipo nuevamente, verificando dimensiones y estética. Tomando en consideración que el robot háptico desarrollado en este proyecto es

un primer prototipo, se decidió construir éste con algunas piezas dibujadas en SolidWorks 2016 e impresas en 3D. Los planos de dichas piezas se encuentran en el Apéndice C .



Figura 3.17: Impresora Zortrax M-200 Plus del Laboratorio de Robótica.

La impresora M-200 Plus de la marca Zortrax que se muestra en la Figura 3.17 fue proporcionada por el Laboratorio de Robótica para maquinar las piezas del robot. Así mismo, se proporcionó el filamento Z-Ultrat, un material fabricado mediante una combinación de Nylon con plástico ABS (Acrilonitrino Butadieno Estireno), el cual presenta una durabilidad y resistencia a impactos aceptable para prototipos y cuyas hojas de especificaciones se muestran en el Apéndice A. Por último, se usó el software Z-Suite que cuenta con la ventaja de tomar el diseño virtual desde cualquier CAD 3D para colocarlo en el área de trabajo para posteriormente analizar la trayectoria del extrusor y anticipar la cantidad de material y tiempo que llevará imprimir una pieza. Cabe mencionar que se hizo un estudio de la flexión y tensión de las piezas, para determinar la dirección de la manufactura aditiva, ya que sus propiedades de resistencia dependen de ésta.

### 3.3.1. Diseño del mecanismo para el primer GDL

Una vez seleccionada la cinemática del robot, se comenzó por idear las diversas soluciones para cada articulación. En el caso de la primera, se tiene un mecanismo en serie que une las dos siguientes. De esta forma, para el diseño de la base del robot se propuso

un pieza en la cual se acoplara uno de los motores y el mecanismo de la polea, obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 3.18. Como componente adicional, se insertó un balero KFL12 para el movimiento de la primer articulación y para disminuir la fricción del giro de ésta.

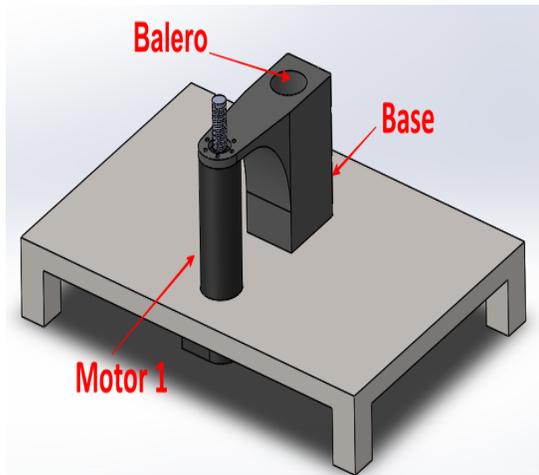


Figura 3.18: Base del primer motor y rodamiento para la polea del primer GDL.

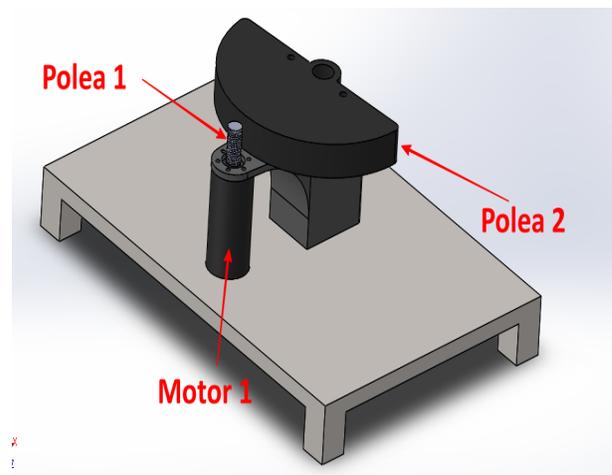


Figura 3.19: Arreglo de poleas para el primer GDL.

En la Figura 3.19 se observa el sistema completo del primer GDL y en donde el motor es el encargado de mover la primera polea, contando con un de radio 1 [cm], la cual a través de un cable transmitirá la potencia a la segunda polea, la cual posee un radio de 10 [cm], logrando una relación de 1:10. Cabe notar que el movimiento máximo de la primer articulación va de  $-90$  a  $90$  [°].

### 3.3.2. Diseño del mecanismo para el segundo y tercer GDL

En un principio, se había pensado fijar los actuadores de las siguientes articulaciones en la base de la primera polea como suele ser la configuración típica de los robots paralelos de dos GDL. Sin embargo, a medida que se fue desarrollando la idea, se optó por basarse en la patente del PHANTOM presentada en [10], debido a que su diseño presenta diversas ventajas mecánicas. De esta manera, en la Figura 3.20 y 3.21 se presenta la solución para el mecanismo. Como se puede apreciar en las imágenes, se tiene una cadena cinemática paralela con un arreglo de poleas de 1:10 y, a diferencia de la primera articulación, en ésta serán los motores los que realicen el movimiento, manteniendo la polea 3 fija. Como resultado, el diseño tiene varias ventajas que se describen a continuación:

- Como se había mencionado anteriormente, un arreglo paralelo distribuye las cargas de peso en sus diversas cadenas cinemáticas, permitiendo al diseño ser ligero y tener mayor rigidez.

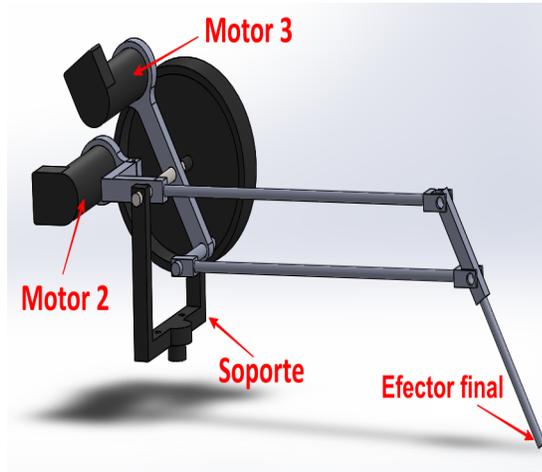


Figura 3.20: Vista frontal del mecanismo para el segundo y tercer GDL (imagen generada en SolidWorks 2016).

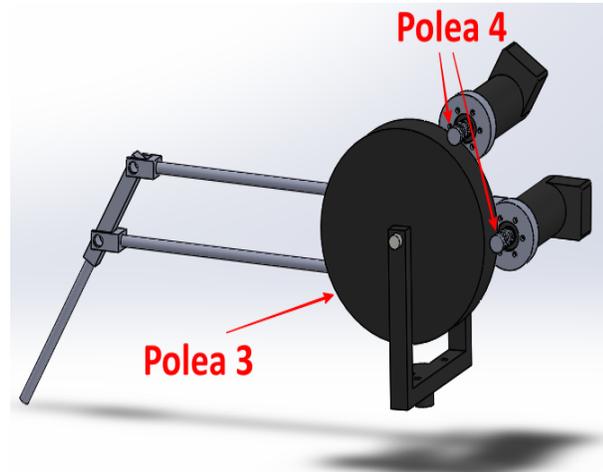


Figura 3.21: Vista posterior del mecanismo para el segundo y tercer GDL (imagen generada en SolidWorks 2016).

- El diseño del mecanismo de las poleas esta pensado con tres finalidades:
  1. En vez de tener un arreglo de poleas por cada motor, se combinaron en uno sólo, logrando reducir espacio y peso del mecanismo.
  2. El motor 2 ayuda a balancear el peso de los eslabones y del efector final, fungiendo el rol de una palanca. Para esto, se sabe que la ecuación que cumple el comportamiento de una es:

$$F_1 * d_1 = F_2 * d_2 \quad (3.19)$$

donde  $F_1$  y  $F_2$  es el valor de cada fuerza y  $d_1$  y  $d_2$  son las distancias que hay desde la respectiva fuerza hasta el punto de apoyo, tal como se observa en la Figura 3.22. De esta forma, al saber el peso del motor y las dimensiones de cada eslabón, simplemente se ajustó el peso del efector final de tal forma que balanceara por completo el sistema, calculando un peso de 65 [g] para éste.

3. El balanceo del mecanismo logra una sensación suave y transparente en el dispositivo, debido a que la fuerza que debe aplicar el usuario para mover el dispositivo es mínima.

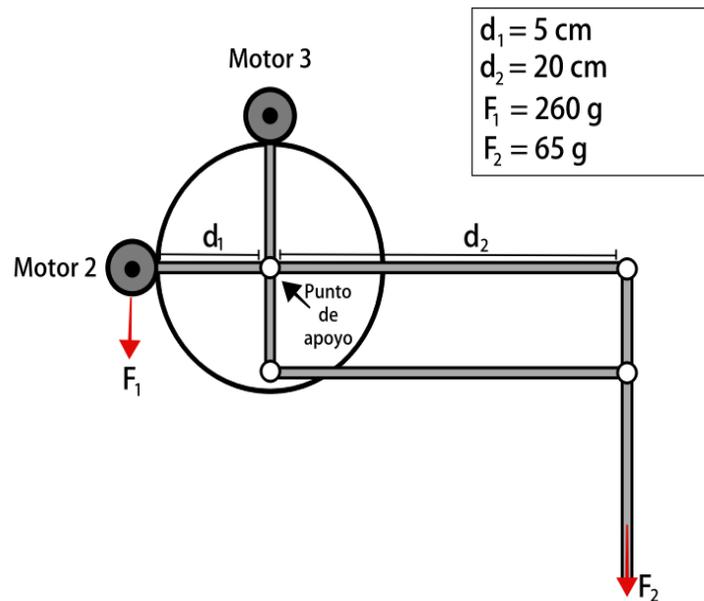


Figura 3.22: Sistema de palanca del robot háptico.

Por último, se necesitaba colocar el sensor de fuerza. Para ello, en la Figura 3.23 se muestra el diseño del efector final, el cual consta de dos piezas: la primera que va fija al último eslabón del robot y en la cual se fija el sensor; y la segunda, que tiene la forma de una pluma, mediante la cual el usuario moverá el dispositivo.

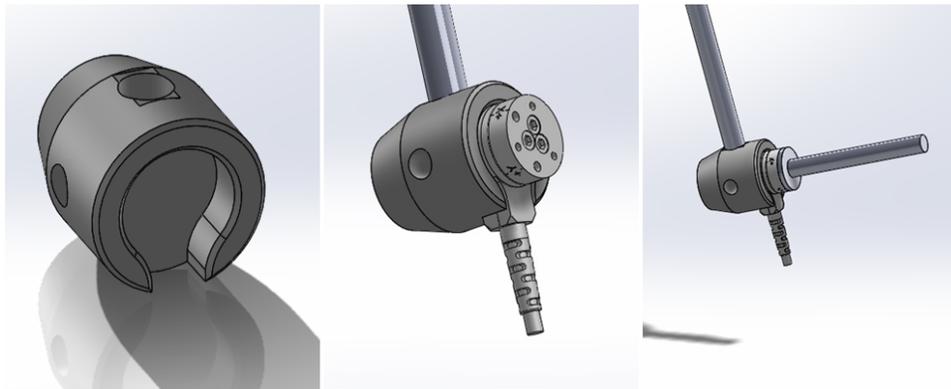


Figura 3.23: Diseño del efector final del robot, utilizado para fijar el sensor de fuerza

En la Figura 3.24 y 3.25 se muestra el ensamble final del robot háptico. Una vez terminado, se comenzó la manufactura de cada una de las piezas y se compraron los elementos necesarios para su construcción, tales como una barra de acero lisa de 8 [mm] para los ejes del arreglo paralelo, los tornillos necesarios para fijar las piezas y las cuerdas

para cada una de las poleas. En el Apéndice C se muestra un dibujo en el que se observa el proceso de ensamble de cada una de los elementos.

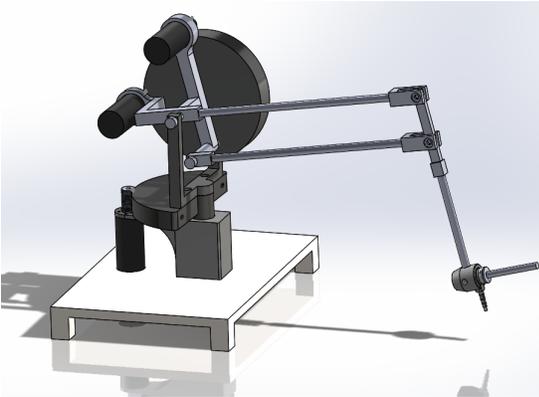


Figura 3.24: Vista frontal del diseño del robot háptico terminado.

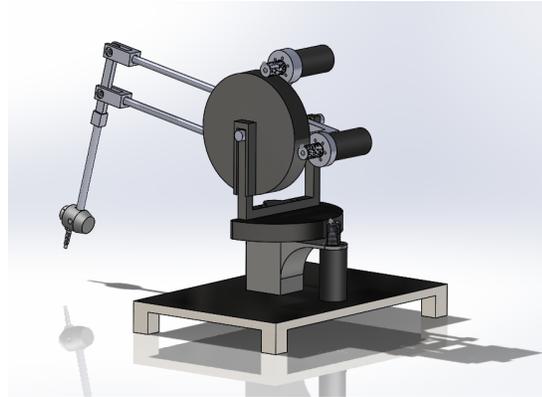


Figura 3.25: Vista posterior del diseño del robot háptico terminado.

En la Figura 3.26 se muestra el robot háptico ya construido físicamente, en el que se observa una base de acrílico de 9 [mm] diseñada con unas dimensiones tales que fuera capaz de albergar el cRIO-9014. El tiempo total de manufactura de las piezas impresas fue 43 horas, mientras que el ensamblaje final se llevó a cabo en cuatro semanas y el costo final de producción se presenta en la Tabla 3.3.

Finalmente, para concluir con la Etapa 3 se realizaron las conexiones de los motores y sus respectivos sensores con el cRIO 9014, el cual está conectado vía Ethernet a la computadora. De tal forma que la información fluye tal como se observa en el diagrama de bloques de la Figura 3.27 y donde:

1. El robot háptico envía la señal de los encoders y recibe la señal de control en forma de corriente hacía los actuadores mediante el cRIO.
2. El cRIO 9014 se encarga de la parte de adquisición de datos obteniendo la posición de los encoders y enviándola a la computadora. Esta información se usará para el sistema de control. Aparte de eso, recibe la señal de salida del control, para posteriormente enviarla a los motores en forma de corriente.
3. El CPU procesa la información recibida del cRIO y se encarga de la renderización háptica y visual del sistema.

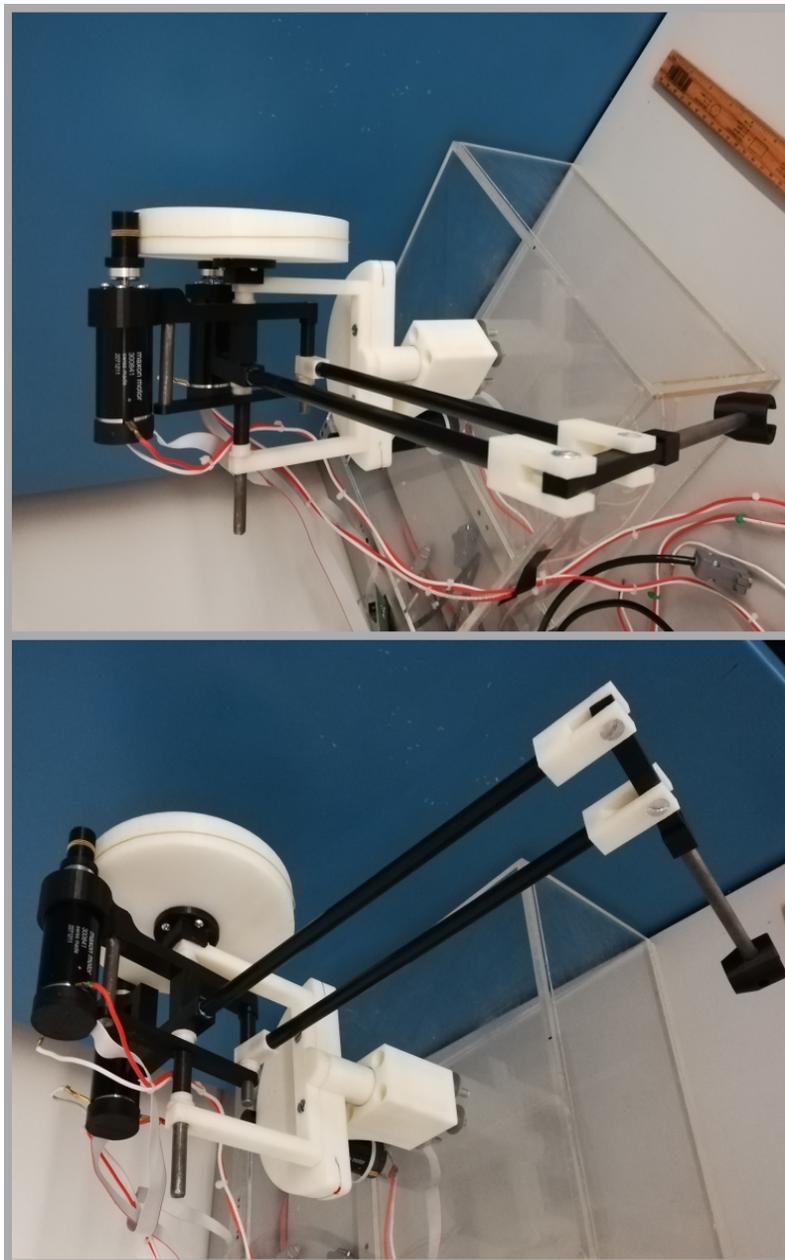


Figura 3.26: Construcción final del robot háptico de tres GDL

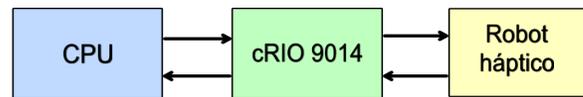


Figura 3.27: Secuencia de información del sistema háptico.

Componente	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Motores Maxon RE 30 mm 60 Watts	3 piezas	6,696.85	20,090.50
Encoder MR, 1024 PPV, 3 canales	3 piezas	2,266.85	6,800.50
cRIO 9014	1 pieza	63,978.21	63,978.21
NI 9505	3 pieza	10,805	32,415
Filamento Z-Ultrat Ivory	2 piezas	1,200	2,400
Barra lisa de acero 8 mm de diámetro	100 cm	4.60	460
Barra fibra de vidrio 10 mm diámetro	1 metro	67.76	67.76
Acoplador universal-5mm	3 piezas	120	360
Tornillos M3x10 mm largo,Phillips	25	1.5	357.5
Tuerca hexagonal M3	25	1	25
Tornillos y tuercas 4-40	25	5	125
Tornillo Cabeza redonda 1/420x1”	10	2.5	25
Cuerda de guitarra	5	56	280
Cable UTP 1 m de longitud	2 metros	16	32
Adaptador molex de 10 pines	3	18	54
Cable de seguridad 18 AWG	3 metros	12	36
Conectores DB-9 macho	3	8	24
Conchas DB-9	3	10	30
Lamina de Acrílico 60x60 cm y 8mm de grosor	2 piezas	870	1740
<b>Costo Total</b>			<b>129,300.47</b>

Tabla 3.3: Tabla de costos del robot háptico de tres grado de libertad.



# Capítulo 4

## Funcionamiento del robot háptico

Siguiendo con la metodología del Modelo V, para la Etapa 4 se desarrolló una aplicación en el software Microsoft Visual Studio 2015, la cual se hizo en MFC (*Microsoft Foundation Class Library*) en lenguaje C++, misma que proporciona gran parte del código necesario para administrar ventanas, menús y cuadros de diálogo; operaciones de entrada/salida; almacenar colecciones de objetos de datos; y más. Así, mediante ésta se programó una interfaz de usuario como la que se observa en la Figura 4.1. Esto permitió realizar las pruebas de funcionamiento del robot háptico y servir de base para el programa final. En un principio, comprobó la movilidad de los eslabones al enviar una señal senoidal a cada uno de los actuadores. Posteriormente, se incluyó la cinemática directa del robot en el código del programa y se realizó un experimento en movimiento libre. En éste se observó que las mediciones de los encoders y las coordenadas calculadas del efector final fueran correctas.

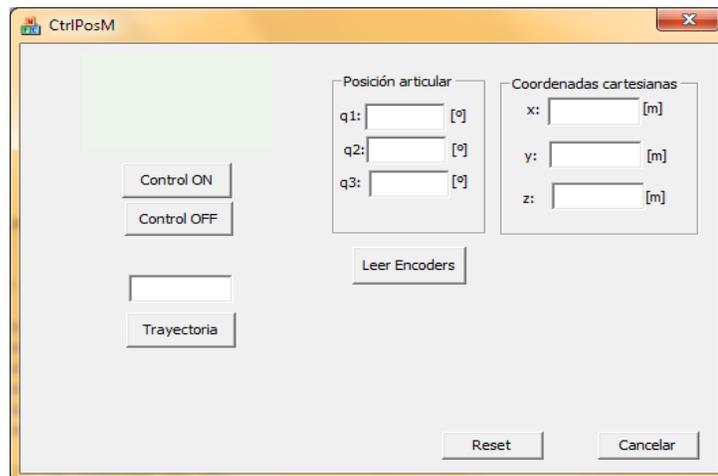


Figura 4.1: Interfaz de la aplicación para comprobar el funcionamiento del robot háptico

Una vez finalizadas las pruebas de movimiento y comprobando la correcta medición

de los sensores, se diseñó el programa encargado de la renderización háptica, cuyo funcionamiento se puede visualizar en el diagrama de flujo de la Figura 4.2.

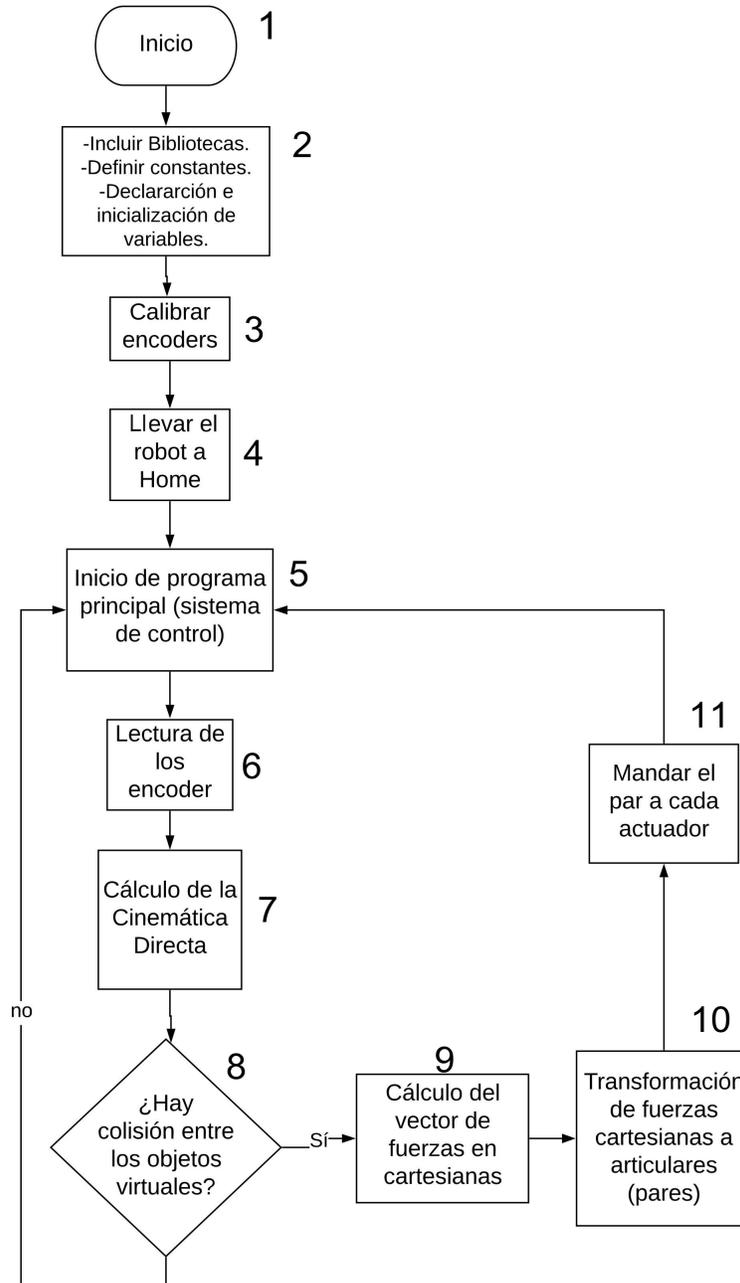


Figura 4.2: Diagrama de flujo del programa encargado de la renderización háptica.

A continuación, se explica el funcionamiento de cada parte del diagrama de flujo:

- Inicialmente se deberá mover el robot manualmente a una posición de calibración (la cual es determinada por el usuario). Una vez ubicado en dicha posición se procede a presionar el botón *Reset* en la interfaz de la aplicación, con el fin de reiniciar las cuentas de los encoders, bloque 3.
- Una vez calibrado, es necesario llevar el robot a una posición de *Home* para comenzar los experimentos. Para esto, se implementó un control de trayectoria, el cual consiste en describir el movimiento deseado del manipulador como una secuencia de puntos en el espacio. Posteriormente, se interpola el camino deseado mediante funciones polinomiales y se genera una secuencia de puntos a lo largo del tiempo. Esto da como posición inicial la actual del robot y como final la posición de *Home*, logrando que el robot regrese a la posición deseada desde cualquier punto en donde éste se encuentre, bloque 4.
- El programa principal comienza al momento de presionar el botón *Control On*. Una vez iniciado, se entra en el lazo de control el cual lee los encoders y hace el cálculo de la cinemática directa en tiempo real, bloque 5, 6 y 7.
- El bloque 8 detecta las colisiones entre el avatar y el objeto virtual. Para esto se usa la ecuación de una esfera con centro en  $C = (x_c, y_c, z_c)$  y radio  $r$  igual a

$$r^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 \quad (4.1)$$

y donde las variables  $(x, y, z)$  son la posición del efector final en coordenadas cartesianas. Posteriormente, se escoge un radio de la esfera virtual  $r_{virtual}$  y, de esta forma, cuando  $r$  sea menor o igual a  $r_{virtual}$  se detectará una colisión y se realizará el cálculo de la fuerza de reacción. En caso contrario se regresa al inicio del programa principal.

- En caso de haber una colisión, se calcula la magnitud de respuesta mediante un control PID de la forma

$$F_n = \mathbf{K}_P \tilde{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_I \int_0^t \tilde{\mathbf{q}} dt + \mathbf{K}_D \dot{\tilde{\mathbf{q}}} \quad (4.2)$$

siendo ésta la magnitud de la fuerza normal a la superficie virtual y en donde el error se define como  $\tilde{\mathbf{q}} = r_{virtual} - r$ . Posteriormente se divide dicha fuerza normal en cada una de sus componentes cartesianas sabiendo que

$$\mathbf{F}_n = F_n \left( \frac{x}{r_{virtual}} + \frac{y}{r_{virtual}} + \frac{z}{r_{virtual}} \right), \quad (4.3)$$

y obteniendo así

$$F_x = F_n \left( \frac{x}{r_{virtual}} \right), \quad (4.4)$$

$$F_y = F_n \left( \frac{y}{r_{virtual}} \right), \quad (4.5)$$

y

$$F_z = F_n \left( \frac{z}{r_{virtual}} \right), \quad (4.6)$$

que son las componentes de fuerza en coordenadas cartesianas.

- Por último, se hace la transformación de fuerzas en el espacio Cartesiano a articular con ayuda de la ecuación (2.7), sabiendo que  $\mathbf{F} = (F_x, F_y, F_z)$  y que el Jacobiano inverso es igual a

$$\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \frac{-\sin(\theta_1)}{(l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \cos(\theta_2))} & \frac{\cos(\theta_1)}{(l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \cos(\theta_2))} & 0 \\ \frac{(\cos(\theta_2 + \theta_3) \cos(\theta_1))}{(l_1 \sin(\theta_3))} & \frac{(\cos(\theta_2 + \theta_3) \sin(\theta_1))}{l_1 \sin(\theta_3)} & \frac{\sin(\theta_2 + \theta_3)}{l_1 \sin(\theta_3)} \\ \frac{-(\cos(\theta_1)(l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \cos(\theta_2)))}{(l_1 l_2 \sin(\theta_3))} & \frac{-(\sin(\theta_1)(l_2 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \cos(\theta_2)))}{(l_1 l_2 \sin(\theta_3))} & \frac{-(l_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_1 \sin(\theta_2))}{(l_1 l_2 \sin(\theta_3))} \end{bmatrix}$$

- Finalmente, la magnitud de los pares calculados son enviados al cRIO, el cual se encarga de enviar la corriente necesaria a cada motor.

Como resultado se logró sentir la esfera propuesta, cumpliendo el objetivo de funcionamiento del robot háptico. Sin embargo, con la intención de tener una aplicación de RV completa se optó por realizar una interfaz virtual para poder tener una retroalimentación visual de la interacción entre el avatar y el objeto virtual, tal como se propone en el diagrama de bloques de la Figura 2.5 del Capítulo 2.

## 4.1. Implementación del sistema de realidad virtual

Hasta este punto se han verificado los componentes y el sistema completo de manera exitosa, comprobando la funcionalidad del robot háptico. Finalmente, para la validación de dicho sistema, se desea implementar un ambiente virtual e interactivo para el usuario, mediante el cual se puedan evaluar los criterios de calidad y transparencia del dispositivo. La interfaz de realidad virtual desarrollada para dicho propósito se observa en la Figura 4.3 y se basa en una esfera ubicada en el centro de la pantalla y una pequeña esfera de color rojo, la cual representa el avatar. Para lograr esto se utilizó la librería OpenGL 4.5 (*Open Graphics Library*) y la biblioteca GLUT, la cual es una especificación estándar que define una interfaz de programación de aplicaciones multilenguaje y multiplataforma que producen gráficos 2D y 3D.

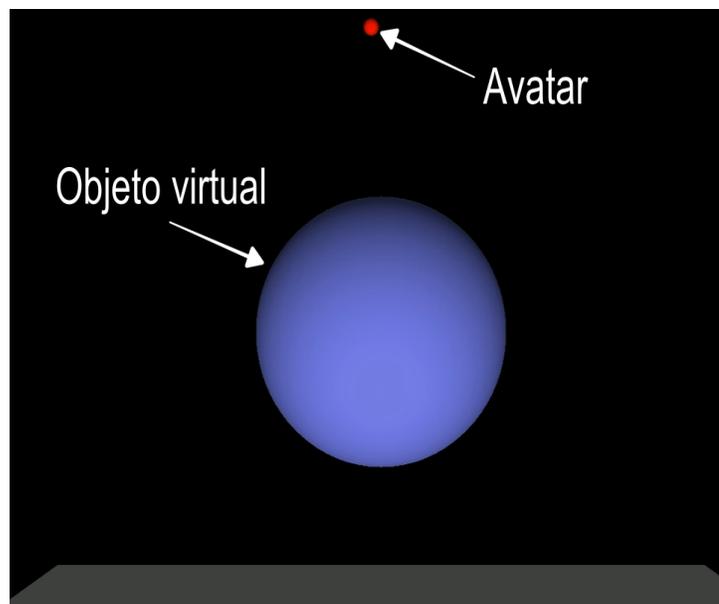


Figura 4.3: Interfaz virtual

De esta forma, mediante unas funciones comunes de la librería, se programa la esfera virtual en el centro de la pantalla y el avatar de coordenadas variables. Dichas variables serán las posiciones del robot háptico escaladas a los píxeles del ambiente virtual, lo que hace posible la visualización del efecto de colisión con el objeto.

## 4.2. Resultados

Continuando con la validación del sistema háptico, en esta sección se presentan las gráficas del comportamiento del robot durante las pruebas de interacción. Para ello, el usuario realizó una trayectoria, empezando por la posición inicial del robot para seguir posteriormente el contorno de la esfera virtual, tal y como se muestra en la Figura 4.4. Logrando apreciar los cambios que se dan al chocar con la superficie virtual en cuanto a los pares enviados a los actuadores del robot y las fuerzas medidas.

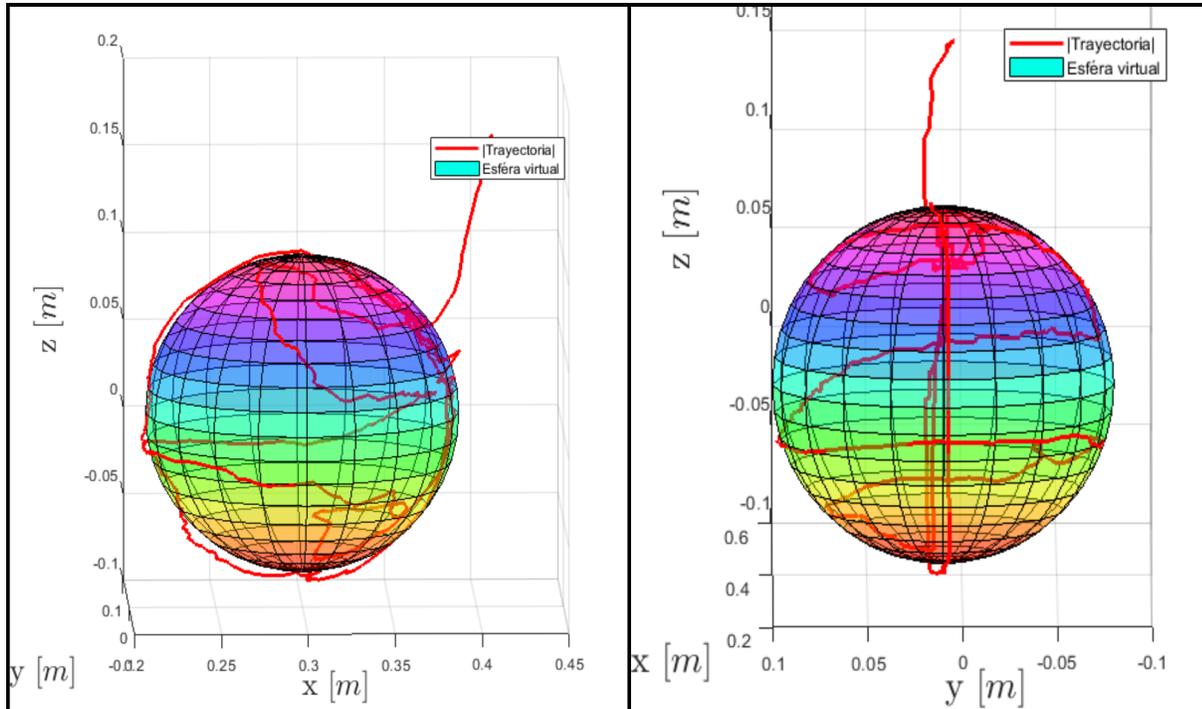


Figura 4.4: Trayectoria realizada por el usuario

La forma de apreciar los cambios de fuerza que percibe el operador se logra a través del sensor ATI Nano, mismos que se muestran en la Figura 4.5. En ésta se observa que en todo momento existe una fuerza debido al usuario y que es a partir del segundo 15 donde se aprecia un cambio considerable debido a la colisión con el objeto virtual.

En la Figura 4.6 se presentan los pares calculados por el control PID, se aprecia que la señal permanece en cero hasta el momento del contacto con la superficie virtual en el segundo 15, en donde comienza la trayectoria por el contorno de la esfera. Cabe destacar que a partir del segundo 40, la trayectoria realizada rodea la esfera en el plano  $x, y$  y sube por el eje  $z$ . Ésto provoca un aumento en el par del primer motor y una disminución en el trabajo de los otros.

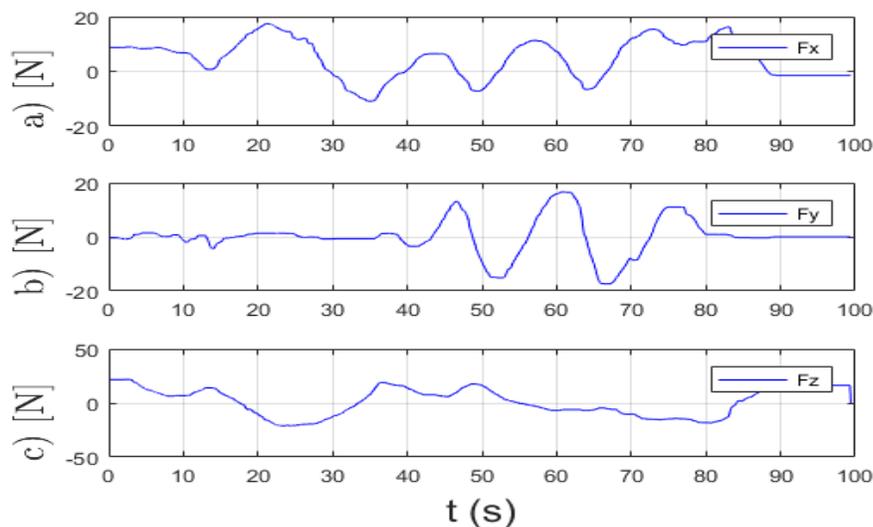


Figura 4.5: Fuerzas leídas a través del el sensor de fuerza.

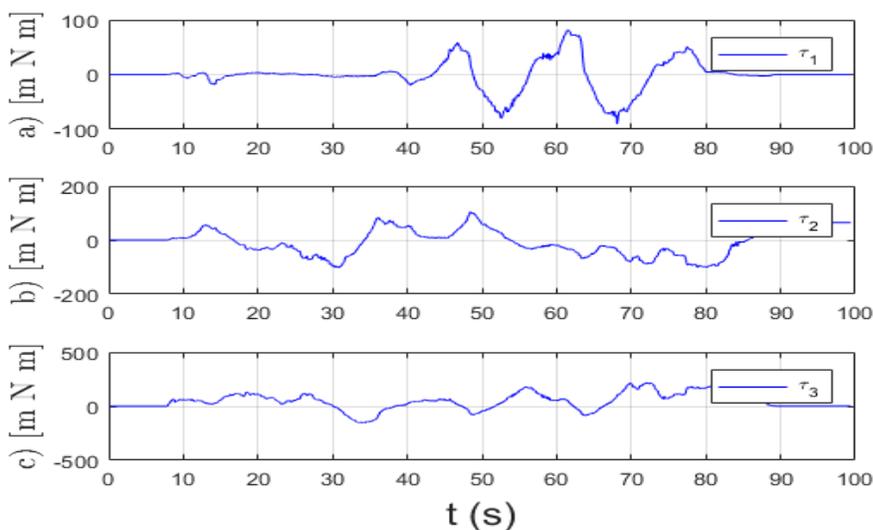


Figura 4.6: Pares calculados por el control PID

El comportamiento de las variables articulares se muestra en la Figura 4.7. En ésta se puede ver el cambio de la trayectoria seguida, donde en un inicio  $q_1$  no presenta grandes cambios, debido a que el dispositivo se movió únicamente en el plano  $x, z$ . Posteriormente, al igual que se alcanzó a percibir en los pares calculados, a partir del segundo 40 se nota el cambio en  $q_1$ .

Por último, con ayuda de la cinemática directa, se obtiene la posición del efector final

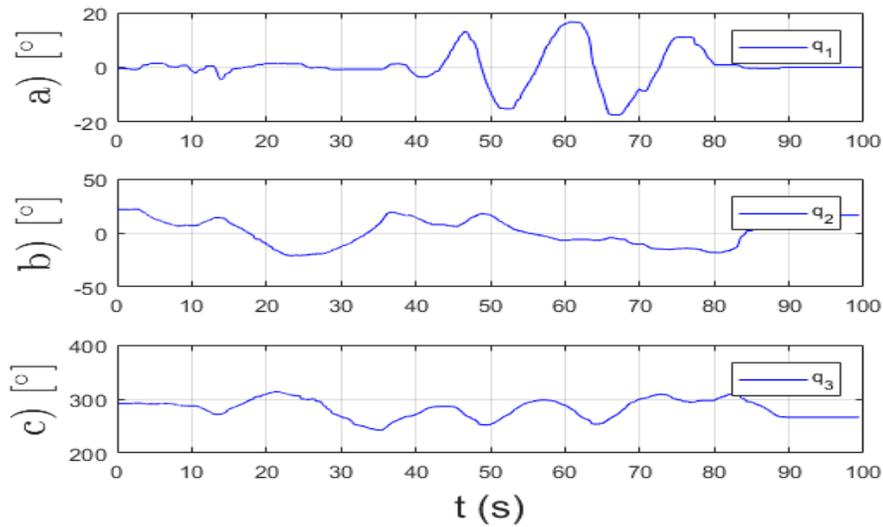


Figura 4.7: Posición de las variables articulares.

en coordenadas cartesianas, las cuales se pueden observar en la Figura 4.8. Al igual que en la Figura 4.7, se puede ver como se mantiene la posición en el eje  $y$  en los primeros segundos y es hasta el segundo 40, en donde se nota un cambio considerable debido a la trayectoria.

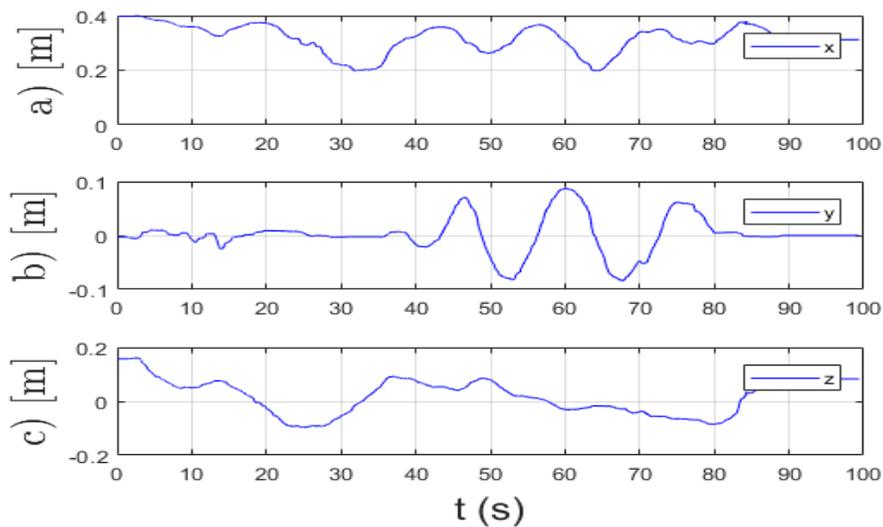


Figura 4.8: Posición del efector final en coordenadas cartesianas

# Capítulo 5

## Conclusiones

Mediante el trabajo realizado se logró el objetivo primordial que fue diseñar y construir un robot de tres GDL funcional cumpliendo con los requerimientos específicos que se plantearon en el Capítulo 3. Como se puede apreciar, éste tiene un diseño versátil y permanecerá en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, siendo susceptible a posibles mejoras, con el fin de obtener el máximo provecho. Es importante destacar que no se tendrán las limitaciones de movilidad y fuerza que se tenían con el Geomagic Touch, lo que beneficiará a los integrantes del Laboratorio de Robótica para el desarrollo de nuevas aplicaciones de realidad virtual o sistemas de control. Además, mediante la documentación generada, cualquier estudiante o investigador que haga uso del robot podrá entender a fondo su funcionamiento y arquitectura, con la idea de darle seguimiento al proyecto. La forma de hacerlo podría ser añadiendo más grados de libertad o desarrollando una electrónica propia.

Aunque se han cumplido con las expectativas que se tenían, se debe recordar que se desarrolló un primer prototipo de lo que podría llegar a ser un robot háptico comercial. Por ello, es imprescindible detectar las fallas y posibles mejoras a futuro. En primer lugar, se debe tratar de reforzar el diseño de tal forma que la base que sujeta las últimas dos articulaciones sea más rígida, evitando movimientos no deseados que puedan afectar, sobre todo, las cuentas de los encoders. Una forma de realizar esto podría ser el uso de otro material para ciertas piezas ya que muchas de éstas fueron impresas mediante una impresora 3D, usando un material flexible. Otra mejora sería la implementación de baleros para cada articulación ya que sólo se implementaron en el primer GDL. Mediante estos, la transparencia de interacción entre el usuario y el robot sería mayor. Finalmente, para poder realizar un producto terminado se tendría que mejorar el diseño visual y la ergonomía, sobre todo en el cableado y en algunas piezas que, a primera vista, podrían darle una apariencia anti-estética.

El ambiente de realidad virtual desarrollado mediante Open GL logra cumplir con el objetivo, de validar el sistema háptico. A partir de los resultados obtenidos, se demostró que el funcionamiento, rendimiento y precisión de del sistema fueron satisfactorios y acorde

a las expectativas y los cálculos realizados. Con ello, se sientan las bases para futuras aplicaciones hápticas de mayor complejidad y con una renderización visual y háptica más realista. Por último, cabe mencionar que la realización de este proyecto fue un trabajo multidisciplinario que involucró amplios conocimientos de mecánica, electrónica, robótica y computación, mismos que el autor de esta tesis fue adquiriendo a lo largo de la carrera y durante su estancia en el Laboratorio de Robótica.

## 5.1. Trabajos a futuro

El sistema háptico construido en este trabajo demuestra la capacidad de la UNAM de poder lograr grandes avances en el área de la robótica, háptica y realidad virtual. Se sienta así un precedente para próximos proyectos que se deseen realizar en el futuro. Algunas de las actividades para lograrlo son:

- Cálculo del modelo dinámico del robot para la implementación de diferentes controladores.
- Pruebas de teleoperación entre el robot fabricado en este trabajo y otro con diferente estructura cinemática.
- Experimentos con nuevas plataformas de realidad virtual.

Por otro lado, en un futuro se desea tener un robot háptico de 6 GDL, para lo cual se requieren realizar los siguientes trabajos:

- Diseño y construcción de una muñeca esférica actuada, adaptando el sensor de fuerza ATI Nano17 para futuros experimentos.
- Adaptación e implementación de dicha muñeca esférica en el robot háptico construido, con lo que se obtendrá un manipulador de 6 GDL totalmente actuado.
- Análisis matemático y obtención de los modelos cinemático y dinámico del robot de 6 GDL.
- Diseño y desarrollo de la tarjeta de adquisición de datos y electrónica de potencia del robot de 6 GDL.

# Bibliografía

- [1] E. S.R., *What are virtual environments?* IEEE Computer Graphics and Applications, 1994, vol. 14.
- [2] M. T.S. and S. T, *Virtual reality applications in manufacturing process simulation. Journal of materials processing technology.* Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, 2004, vol. 33.
- [3] I. Sutherland, *The Ultimate Display.* Proceedings IFIP Congress, 1965.
- [4] G. C. Burdea, *Force and touch feedback for virtual reality.* NewYork, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [5] T. A. K. Christian Hatzfeld, *Engineering Haptic Devices, A Beginner's Guide*, 2nd ed. Verlag London: Springer, 2014.
- [6] S. B. O. C., *Robotics modelling, planning and control*, 2nd ed. Verlag London: Springer, 2009.
- [7] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot modelling and control*, 1st ed. JOHN WILEY & SONS, INC., 2005.
- [8] R. y. V. S. Kelly, *Control de Movimiento de Robots Manipuladores*, 1st ed. Madrid; España: Pearson Prentice Hall, 2003.
- [9] J. J. Berkley, *Haptic Devices*, 2nd ed. Seattle, WA: Mimic Technologies Inc., 2003.
- [10] T. H. Massie and J. K. Salisbury, *The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects.* Department of Mechanical Engineering Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts: Dynamic Systems and Control:Volume 1, 1994.
- [11] R. Goertz and R. Thompson, *“Electronically controlled manipulator”.* Nucleonics, 1954.
- [12] M. Grunwald, *Human Haptic Perception: Basics and Applications*, 1st ed. Birkhäuser Basel: Springer, 2008.

- [13] B. G. and N. Langrana, *A Portable Dextrous Master with Force Feedback*. Nueva Jersey: Presence, 1992.
- [14] G. B. Mourad Bouzit and G. Popescu, *The Rutgers Master II—New Design Force-Feedback Glove*. Nueva Jersey: IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, 2002.
- [15] V. Pérez Ariza, *Haptica Interfaces: Kinesthetic VS. Tactil Systems*. Universidad EIA, Envigado (Colombia): Revista EIA,13(26),July-December, 2016.
- [16] I. T. Rodríguez, *Puesta en funcionamiento del robot paralelo Novint Falcon*. Ciudad Universitaria Cd. Mx.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.
- [17] E. M. Fernández, *Diseño e implementación de un mecanismo en configuración de muñeca esférica para experimentos en control de fuerza en superficies virtuales*. Ciudad Universitaria Cd. Mx.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.



# Apéndice A

## Hojas de especificaciones

### A.1. Motores del robot Geomagic Touch



**RS-455PA**

**MABUCHI MOTOR**  
Carbon-brush motors

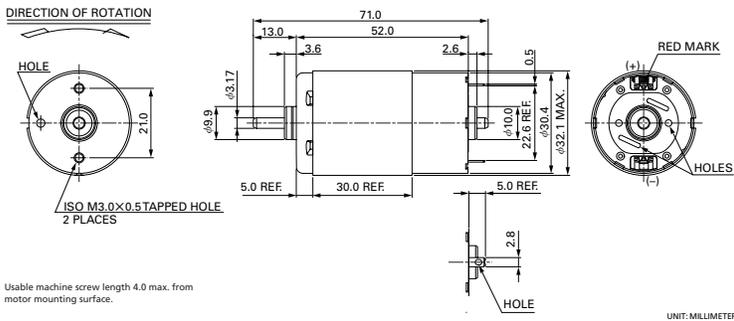
OUTPUT : 3.0W~65W (APPROX)

WEIGHT : 145g (APPROX)

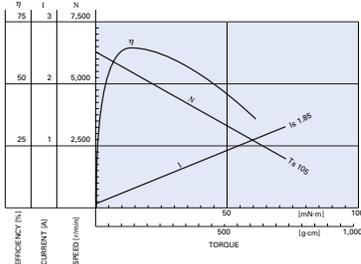
Typical Applications Office Automation Equipment : Printer

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY				STALL			
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED rpm	CURRENT A	SPEED rpm	CURRENT A	TORQUE mNm	OUTPUT W	TORQUE mNm	CURRENT A		
RS-455PA-15200	12~42	*42V CONSTANT	6300	0.058	5350	0.33	15.8	161	8.83	105	1070	1.85
RS-455PA-18140	12~30	21V CONSTANT	4500	0.078	3730	0.38	13.0	132	5.06	76.0	775	1.84

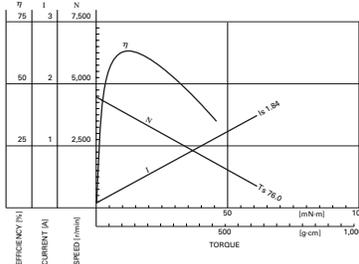
\*This operating voltage indicates the peak value in case of pulse-width modulation (PWM) power supply. Besides, as withstand voltage, 1800V for one second can not be guaranteed.



**RS-455PA-15200** 42.0V



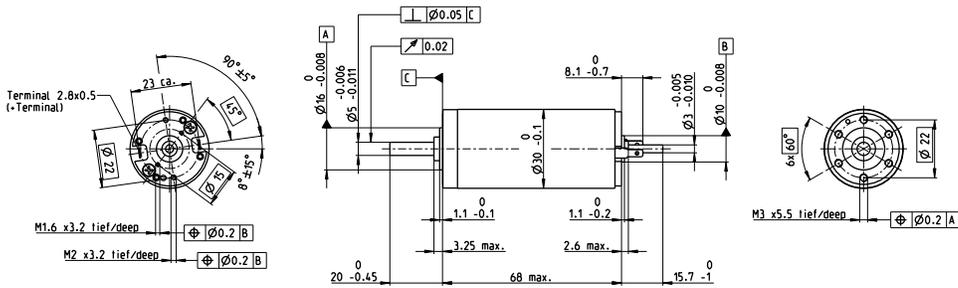
**RS-455PA-18140** 21.0V





# A.2. Motor Maxon RE 30-Graphite Brushes 60 Watt

## RE 30 Ø30 mm, Graphite Brushes, 60 Watt



maxon RE motor

M 1:2

Legend	Part Numbers
Stock program	310005, 310006, 310007, 310008, 310009
Standard program	268193, 268213, 268214, 268215, 268216
Special program (on request)	

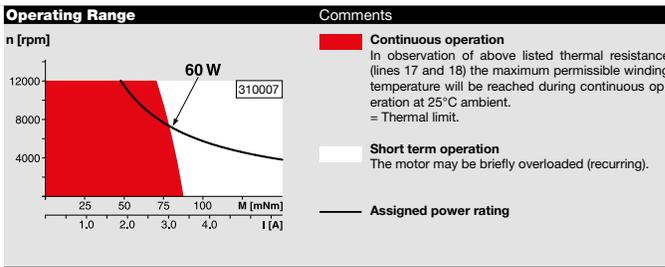
according to dimensional drawing shaft length 15.7 shortened to 8.7 mm

Motor Data	310005	310006	310007	310008	310009	
<b>Values at nominal voltage</b>						
1 Nominal voltage	V	12	18	24	36	48
2 No load speed	rpm	8170	8590	8810	8590	8490
3 No load current	mA	301	213	165	106	78.6
4 Nominal speed	rpm	7630	7910	8050	7840	7760
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	51.6	75.5	85.6	86.6	89.7
6 Nominal current (max. continuous current)	A	4	4	3.47	2.28	1.74
7 Stall torque	mNm	853	1000	1020	1000	1050
8 Stall current	A	61.1	50.3	39.3	25.2	19.6
9 Max. efficiency	%	85	87	87	87	88
<b>Characteristics</b>						
10 Terminal resistance	Ω	0.196	0.358	0.611	1.43	2.45
11 Terminal inductance	mH	0.034	0.07	0.119	0.281	0.513
12 Torque constant	mNm/A	13.9	19.9	25.9	39.8	53.8
13 Speed constant	rpm/V	685	479	369	240	178
14 Speed / torque gradient	rpm/mNm	9.64	8.61	8.7	8.61	8.09
15 Mechanical time constant	ms	3.4	3.24	3.05	2.98	2.94
16 Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	33.7	35.9	33.5	33.1	34.7

Specifications	Value
<b>Thermal data</b>	
17 Thermal resistance housing-ambient	6.0 K/W
18 Thermal resistance winding-housing	1.7 K/W
19 Thermal time constant winding	16.3 s
20 Thermal time constant motor	593 s
21 Ambient temperature	-30...+100°C
22 Max. winding temperature	+125°C
<b>Mechanical data (ball bearings)</b>	
23 Max. speed	12000 rpm
24 Axial play	0.05 - 0.15 mm
25 Radial play	0.025 mm
26 Max. axial load (dynamic)	5.6 N
27 Max. force for press fits (static)	110 N
(static, shaft supported)	1200 N
28 Max. radial load, 5 mm from flange	28 N
<b>Other specifications</b>	
29 Number of pole pairs	1
30 Number of commutator segments	13
31 Weight of motor	260 g

Values listed in the table are nominal. Explanation of the figures on page 64.

**Option**  
Preloaded ball bearings



**maxon Modular System** Overview on page 28-36

<p><b>Planetary Gearhead</b> Ø32 mm 0.75 - 6.0 Nm Page 342-349</p> <p><b>Koaxdrive</b> Ø32 mm 1.0 - 4.5 Nm Page 352</p> <p><b>Screw Drive</b> Ø32 mm Page 374-378</p>		<p><b>Recommended Electronics:</b> Page 30</p> <p><b>Notes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ESCON 36/2 DC 444</li> <li>ESCON Module 50/5 445</li> <li>ESCON 50/5 447</li> <li>EPOS4 50/5 453</li> <li>EPOS4 Mod./Comp. 50/5 453</li> <li>EPOS2 P 24/5 464</li> <li>MAXPOS 50/5 468</li> </ul>	<p><b>Encoder MR</b> 256 - 1024 CPT, 3 channels Page 420</p> <p><b>Encoder HED_ 5540</b> 500 CPT, 3 channels Page 429/431</p>
---	--	---	---

# A.3. Encoder incremental MR

25/11/2019

maxon - Online Shop

We use cookies to optimize the design of this website and constantly enhance your experience. By continuing to use this website, you are agreeing to the use of cookies. Further information is available in our [data privacy notice](#).

OK

DETAILS
✕

**Encoder MR, Type L, 1024 CPT, 3 Channels, with Line Driver**  
Part number 225787

PRICE SCALES	Quantity	Price per unit
Prices excluding VAT and shipping costs	1-4	<b>€92.91</b>
	5-19	<b>€81.91</b>
	20-49	<b>€69.18</b>
	from 50	<b>On request</b>

! Sensors can be purchased only as a component of a combination.



Specifications
Description
Downloads

Specifications	
GENERAL INFORMATION	
Counts per turn	1024
Number of channels	3
Line Driver	Yes
Max. mechanical speed	18750 rpm
TECHNICAL DATA	
Supply voltage $V_{cc}$	4.7...5.2 V
Driver used logic	TTL
Output current per channel	0...5 mA
Phase shift	90 °e
Phase shift, inaccuracy	45 °e
Index synchronized to AB	Yes
Max. moment of inertia of code wheel	1.7 gcm <sup>2</sup>
Operating temperature	-25...+85 °C

## A.4. Sensor de Fuerza ATI Nano 17

### NANO17

#### Product Advantages

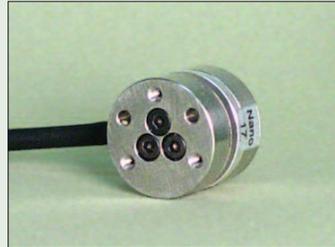
**One of the Smallest 6-Axis Sensors in the World:** The Nano17 fits into restricted spaces of research applications.

#### Extremely High Strength:

- EDM wire-cut from high-yield-strength stainless steel.
- Maximum allowable single-axis overload values are 3.1 to 13 times rated capacities.

**High Signal-to-Noise Ratio:** Silicon strain gages provide a signal 75 times stronger than conventional foil gages. This signal is amplified, resulting in near-zero noise distortion.

**IP65 and IP68 (4m) Versions Available:** The IP65 version of the transducer is available for use in wet environments. The IP68 version is for underwater environments to a maximum depth of 4 meters in fresh water. Contact ATI Industrial Automation for drawings and more information.



**The Nano17 F/T transducer**

The transducer is made of hardened stainless steel, with integral interface plates made from high-strength aircraft aluminum.

#### Typical Applications

- Dental research
- Robotic surgery
- Robotic hand research
- Finger-force research

	SENSING RANGES		Calibrations				
	Axes		US-3-1		US-6-2	US-12-4	
ENGLISH CALIBRATIONS	Fx, Fy ( $\pm$ lbf)		3		6	12	
	Fz ( $\pm$ lbf)		4.25		8.5	17	
	Tx, Ty ( $\pm$ lbf-in)		1		2	4	
	Tz ( $\pm$ lbf-in)		1		2	4	
	<b>RESOLUTION</b>		System Type*				
Axes		CTL	Net/DAQ	CTL	Net/DAQ	CTL	Net/DAQ
Fx, Fy (lbf)		1/640	1/1280	1/320	1/640	1/160	1/320
Fz (lbf)		1/640	1/1280	1/320	1/640	1/160	1/320
Tx, Ty (lbf-in)		1/4000	1/8000	1/2000	1/4000	1/1000	1/2000
Tz (lbf-in)		1/4000	1/8000	1/2000	1/4000	1/1000	1/2000
	SENSING RANGES		Calibrations				
	Axes		SI-12-0.12		SI-25-0.25	SI-50-0.5	
METRIC CALIBRATIONS	Fx, Fy ( $\pm$ N)		12		25	50	
	Fz ( $\pm$ N)		17		35	70	
	Tx, Ty ( $\pm$ Nmm)		120		250	500	
	Tz ( $\pm$ Nmm)		120		250	500	
	<b>RESOLUTION</b>		System Type*				
Axes		CTL	Net/DAQ	CTL	Net/DAQ	CTL	Net/DAQ
Fx, Fy (N)		1/160	1/320	1/80	1/160	1/40	1/80
Fz (N)		1/160	1/320	1/80	1/160	1/40	1/80
Tx, Ty (Nmm)		1/32	1/64	1/16	1/32	1/8	1/16
Tz (Nmm)		1/32	1/64	1/16	1/32	1/8	1/16

\*CTL: Controller F/T System; Net: Net F/T System; DAQ: 16-bit DAQ F/T System. The resolution is typical for most applications and can be improved with filtering. Resolutions quoted are the effective resolution after dropping four counts of noise (Net/DAQ) or eight counts of noise (CTL). All sensors calibrated by ATI. Applied loads must be within range in each of the six axes for the F/T sensor to measure correctly (refer to the transducer manual for complex loading information).

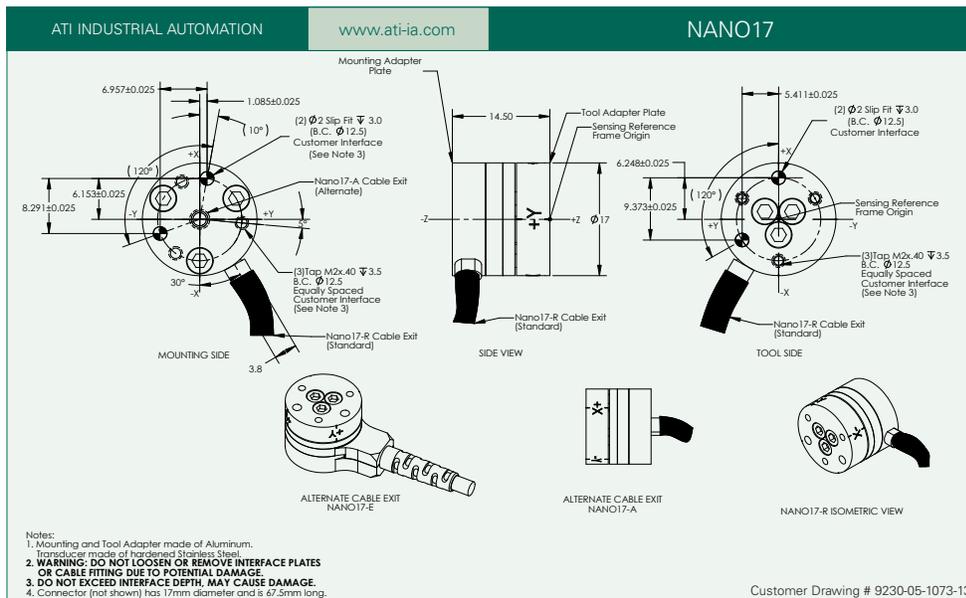


Single-Axis Overload	English	Metric
Fxy	±56 lbf	±250 N
Fz	±110 lbf	±480 N
Txy	±14 lbf-in	±1.6 Nm
Tz	±16 lbf-in	±1.8 Nm
Stiffness (Calculated)	English	Metric
X-axis & Y-axis force (Kx, Ky)	4.7x10 <sup>4</sup> lb/in	8.2x10 <sup>6</sup> N/m
Z-axis force (Kz)	6.5x10 <sup>4</sup> lb/in	1.1x10 <sup>7</sup> N/m
X-axis & Y-axis torque (Ktx, Kty)	2.1x10 <sup>3</sup> lbf-in/rad	2.4x10 <sup>2</sup> N/m/rad
Z-axis torque (Ktz)	3.4x10 <sup>3</sup> lbf-in/rad	3.8x10 <sup>2</sup> N/m/rad
Resonant Frequency (Non-IP rated, Measured)		
Fx, Fy, Tz	7200 Hz	
Fz, Tx, Ty	7200 Hz	
Physical Specifications	English	Metric
Weight*	0.02 lb	0.00907 kg
Diameter*	0.669 in	17 mm
Height*	0.571 in	14.5 mm

*"I used the Nano17 in a recent design application. The support I received from ATI for my special application was excellent. The documentation was well-written, the installation and set-up was easy and the sensor proved to be robust and highly accurate for my application."*

Peter W. Johnson, PhD  
 President  
 Ergonomic Research and Consulting, Inc.

\*Specifications are for non-IP rated models. Diameter excludes any connector or cable features.





## A.5. Material de impresión Z-Ultrat

### TECHNICAL DATA SHEET

Date of issue: 01.08.2014 | Update: 03.01.2018 | Version: 2.00

# Z-ULTRAT

### Durability Comes in Colors

Z-ULTRAT is a material characterized by high impact resistance, which gives your models a uniform surface texture. This all-purpose material allows you to 3D print elements requiring durability, such as end-use parts, which, after continued use, keep their initial shape over time. With Z-ULTRAT, you can produce objects with properties comparable to those of models manufactured using injection molding technology, including functional prototypes, test casings, and mechanical parts. Z-ULTRAT allows you to test your tailor-made projects in unlimited ways, in one of twenty-two shades.



Mechanical Properties	Metric	English	Test Method
Tensile Strength	32.60 MPa	4730 psi	ISO 527:1998
Breaking Stress	30.70 MPa	4450 psi	ISO 527:1998
Elongation at max Tensile Stress	3.78%	3.78%	ISO 527:1998
Elongation at Break	4.87%	4.87%	ISO 527:1998
Bending Stress	54.00 MPa	7830 psi	ISO 178:2011
Flexural Modulus	1.85 GPa	268 ksi	ISO 178:2011
Izod Impact, Notched	5.26 kJ/m <sup>2</sup>	2.50 ft-lb/in <sup>2</sup>	ISO 180:2004
Thermal Properties	Metric	English	Test Method
Glass Transition Temperature	106.40° C	224° F	ISO 11357-3:2014
Other Properties	Metric	English	Test Method
Melt Flow Rate	43.88 g/10 min Load 5 kg Temperature 260° C	0.0968 lb/10 min Load 11 lb Temperature 500° F	ISO 1133:2006
Specific Density	1.179 g/cm <sup>3</sup>	9.84 lb/gal	ISO 1183-3:2003
Shore Hardness (D)	73.4	73.4	ISO 868:1998

## TECHNICAL DATA SHEET

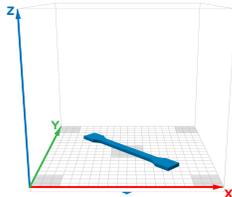
## Z-ULTRAT

Compatible with	Layer Thickness Range		Available Colors					
ZORTRAX M200	0.09 mm	0.0035 in	 blue	 yellow	 green	 gray	 ivory	
	0.14 mm	0.0055 in	 black	 red	 nude	 magenta	 olive	
	0.19 mm	0.0075 in	 brown	 neon blue	 neon green	 neon yellow	 neon orange	 neon red
			 neon pink	 pastel yellow	 pastel pink	 pastel purple	 pastel blue	 pastel turquoise

The data presented in this document are intended for information and comparison purposes only. They should not be used for project specifications or its quality evaluation. The material's actual properties depend on the printing process conditions, the design structure and its purpose, test conditions, etc.

Samples of Z-ULTRAT used to carry out the tests were built on Zortrax M200. The general print parameters utilized are noted below:

Z-SUITE: v2.2.0.0  
 Layer thickness: 0.19 mm;  
 Quality: High;  
 Seam: Normal;  
 Infill: Solid,  
 Fan Speed: Auto;  
 Surface Layers:  
 - Top: 7 (default);  
 - Bottom: 4 (default);



Product specifications are subject to change without notice.

Each user is responsible for complying with product safety standards, its intended use as well as the law and waste disposal (and recycling) rules for electrical and electronic equipment. Zortrax does not make any express or implied warranties, including but not limited to implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose.

**zortrax**

Zortrax S.A.  
 Lubelska 34  
 10-409 Olsztyn, Poland  
 NIP: 7393864289  
 REGON: 281551179

**Contact**  
 Office: office@zortrax.com  
 Sales Department: sales@zortrax.com  
 Support: support@zortrax.com

©2017 Zortrax S.A. All rights reserved. 'Zortrax', 'Zortrax M200', 'Zortrax M300', 'Zortrax Inventure', 'Zortrax DSS', 'Z-ABS', 'Z-ASA Pro', 'Z-ESD', 'Z-GLASS', 'Z-HIPS', 'Z-PCABS', 'Z-PETG', 'Z-PLA', 'Z-PLA Pro', 'Z-SEMIFLEX', 'Z-SUPPORT', 'Z-SUPPORT Plus', 'Z-ULTRAT', 'Z-ULTRAT Plus', 'Z-SUITE' are trademarks of Zortrax.

www.zortrax.com



# Apéndice B

## Cotizaciones

**maxon motor**

driven by precision

Proyecto:

**Motores para robot háptico 6GDL UNAM****Contenido**

- Sinopsis
- Especificaciones del producto
- Información sobre los precios incluyendo la tabla de fijación de precios

**Acerca de este documento:**

Este documento no constituye una oferta vinculante de maxon motor. Se reserva el derecho a modificar los precios y la información de los productos. La privacidad de datos es muy importante para nosotros. Los datos específicos del proyecto no serán ni almacenados, ni consultados por nuestra parte. Podrá consultar aquí más detalles sobre la privacidad de datos y las condiciones generales del contrato.

Proyecto: Motores para robot háptico 6GDL UNAM

Combinación				
Unidad motriz	Datos técnicos	Precio por unidad	Cantidad	Precio total
motor				
	RE 30 Ø30 mm, Escobillas de grafito, 60 Vatios N° de artículo: 310007	Diámetro exterior: 30 mm Tipo de potencia: 60 W Tensión nominal: 24 V Velocidad en vacío: 8810 rpm Par nominal (máx. par en continuo): 85.6 mNm Certificado de Conformidad: No		\$348,25
Sensor				
	Encoder HEDL 5540, 500 ppv, 3 canales, con line driver RS 422 N° de artículo: 110512	Número de pulsos por vuelta: 500 Número de canales: 3 Line Driver: DS26LS31		\$117,88
		<b>Importe parcial (montado)</b>	<b>3</b>	<b>\$1.398,39</b>
			<a href="#">Detalles</a>	<a href="#">Añadir al carrito</a>

Combinación				
Unidad motriz	Datos técnicos	Precio por unidad	Cantidad	Precio total
	N° de artículo: B7A135370BA0	> <a href="#">Especificaciones técnicas (3D-PDF)</a> Certificado de Conformidad: No		\$293,50
		<b>Importe parcial (montado)</b>	<b>3</b>	<b>\$880,50</b>
			<a href="#">Detalles</a>	<a href="#">Añadir al carrito</a>

<b>Importe de carrito de la compra</b>	<b>\$2.278,89</b>
Costes de envío y embalaje previstos	\$41,81

<b>Importe total</b>	<b>\$2.320,70</b>
----------------------	-------------------

Impuestos y aranceles  
En Suiza y Alemania las mercancías se suministran libres de aranceles. Nosotros aplicamos y liquidamos el IVA. No existen costes adicionales por tal concepto. Para el envío fuera de Suiza y Alemania, su país podría exigirle el pago de IVA, tasas de aduana u otras tasas.

Proyecto: **Motores para robot háptico 6GDL UNAM**

### Encoder HEDL 5540, 500 pppv, 3 canales, con line driver RS 422

N° de artículo: 110512



Detalles

#### Tablas de precios

1-4	\$117,88
5-19	\$102,88
20-49	\$87,75
de 50	Solicitado (en proceso)

Precios sin IVA, más gastos de envío

#### Especificaciones del producto

Tipo	
Número de pulsos por vuelta	500
Número de canales	3
Line Driver	DS26LS31
Máx. velocidad	12000 rpm
Diámetro del eje	3 mm
Datos técnicos	
Tensión de alimentación Vcc	5.0V $\pm$ 10.0%
Lógica de driver de salida	EIA RS 422
Máx. aceleración angular	250000 rad / s <sup>2</sup>
Corriente por canal	-20...20 mA
Tiempo del flanco de subida	180 ns
Condición de medición del tiempo del flanco de subida	CL=25pF, RL=2.7kOhm,
Tiempo del flanco de bajada	40 ns
Condición de medición del tiempo del flanco de bajada	CL=25pF, RL=2.7kOhm,
Desfase	90 °e
Imprecisión por desfase	45 °e
Canal index sincronizado con AB	Yes
Máx. momento de inercia del disco del encoder	0.6 gcm <sup>2</sup>
Temperatura de funcionamiento	-40...+100 °C
Posición de la salida del cable del encoder respecto al montaje del motor	-1 °

Proyecto: Motores para robot háptico 6GDL UNAM

## RE 30 Ø30 mm, Escobillas de grafito, 60 Vatios

N° de artículo: 310007



Detalles

### Tablas de precios

1-4	\$348,25
5-19	\$286,63
20-49	\$224,00
de 50	Solicitado (en proceso)

Precios sin IVA, más gastos de envío

### Especificaciones del producto

#### Valores a tensión nominal

Tensión nominal	24 V
Velocidad en vacío	8810 rpm
Corriente en vacío	165 mA
Velocidad nominal	8050 rpm
Par nominal (máx. par en continuo)	85.6 mNm
Corriente nominal (máx. corriente en continuo)	3.47 A
Par de arranque	1020 mNm
Corriente de arranque	39.3 A
Máx. rendimiento	87 %

#### Datos característicos

Resistencia entre terminales	0.611 $\Omega$
Inductancia en terminales	0.119 mH
Constante de par	25.9 mNm/A
Constante de velocidad	369 rpm/V
Relación velocidad/par	8.7 rpm/mNm
Constante mecánica de tiempo de arranque	3.05 ms
Momento de inercia del rotor	33.5 gcm <sup>2</sup>

#### Datos térmicos

Resistencia térmica carcasa-ambiente	6 K/W
Resistencia térmica bobinado-carcasa	1.7 K/W
Constante de tiempo térmica del bobinado	16.3 s
Constante de tiempo térmica del motor	593 s
Temperatura ambiente	-30...+100 °C
Máx. temperatura de bobinado	+125 °C

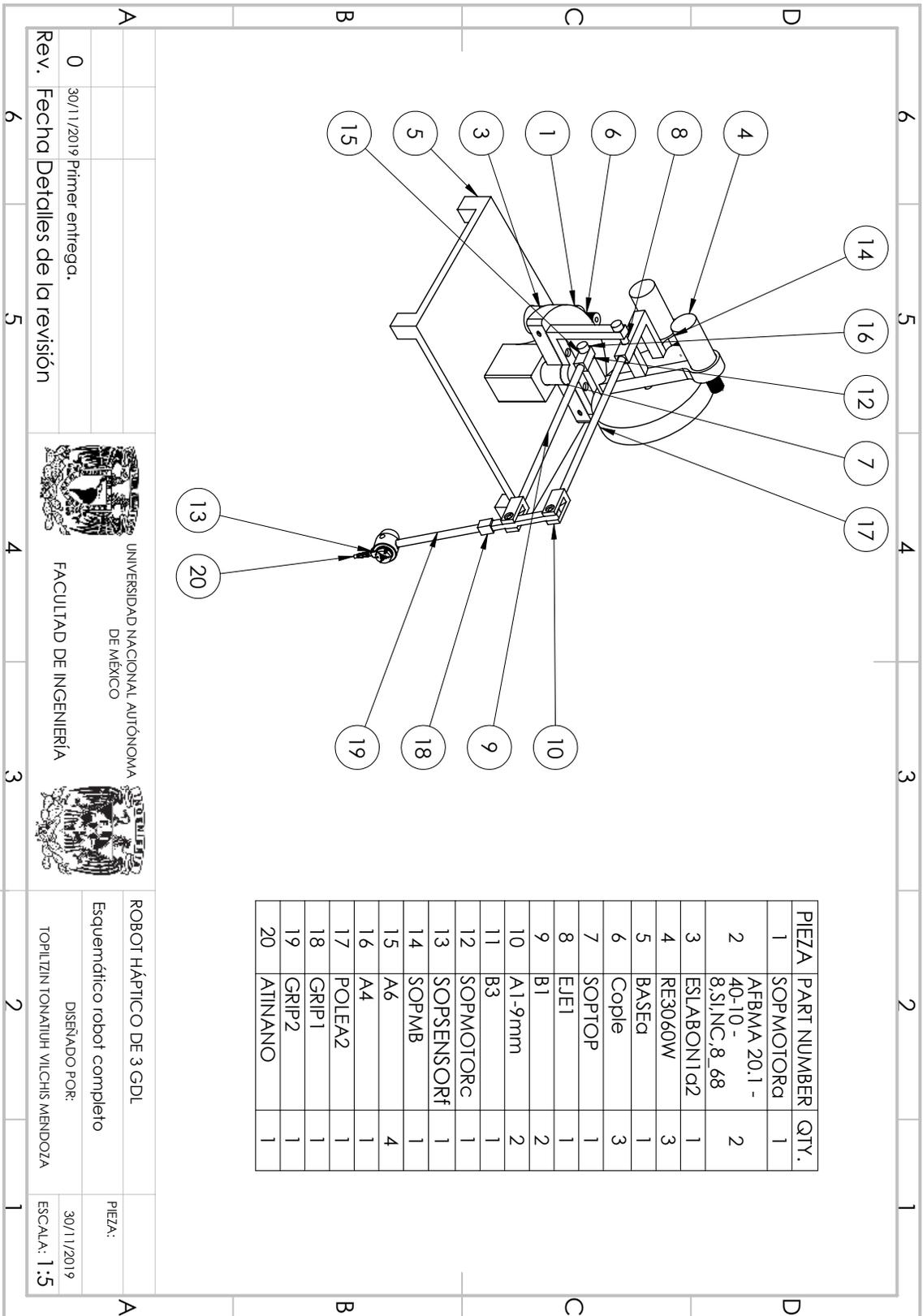
#### Datos mecánicos

Tipo de rodamiento/cojinete	Rodamiento de bolas
Velocidad límite	12000 rpm
Juego axial	0.05 - 0.15 mm
Juego radial	0.025 mm
Máx. carga axial (dinámica)	5.6 N
Máx. fuerza axial de montaje a presión (estática)	110 N
(estático, eje apoyado)	1200 N
Máx. carga radial	28 N, 5 mm desde la brida



# Apéndice C

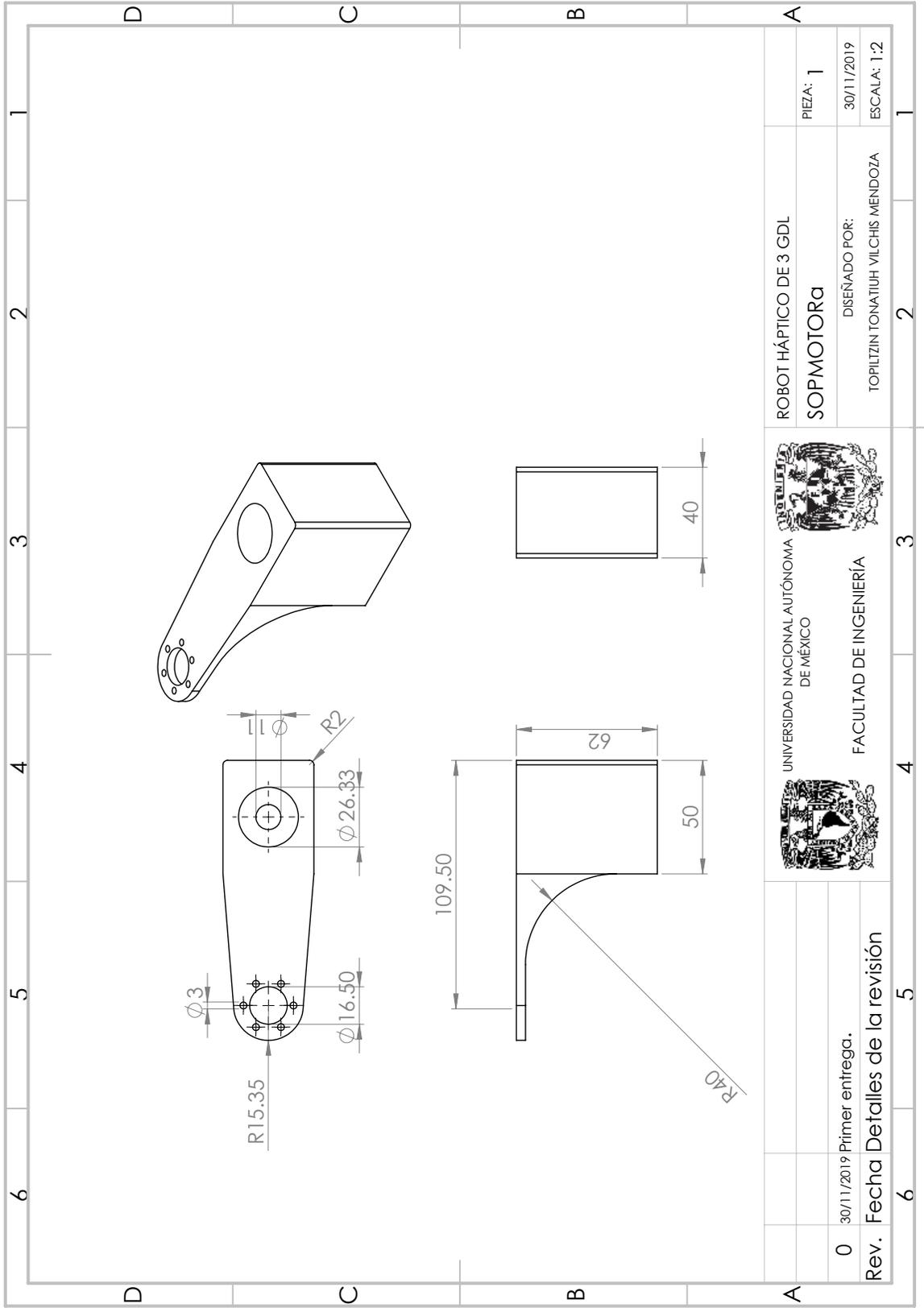
## Planos

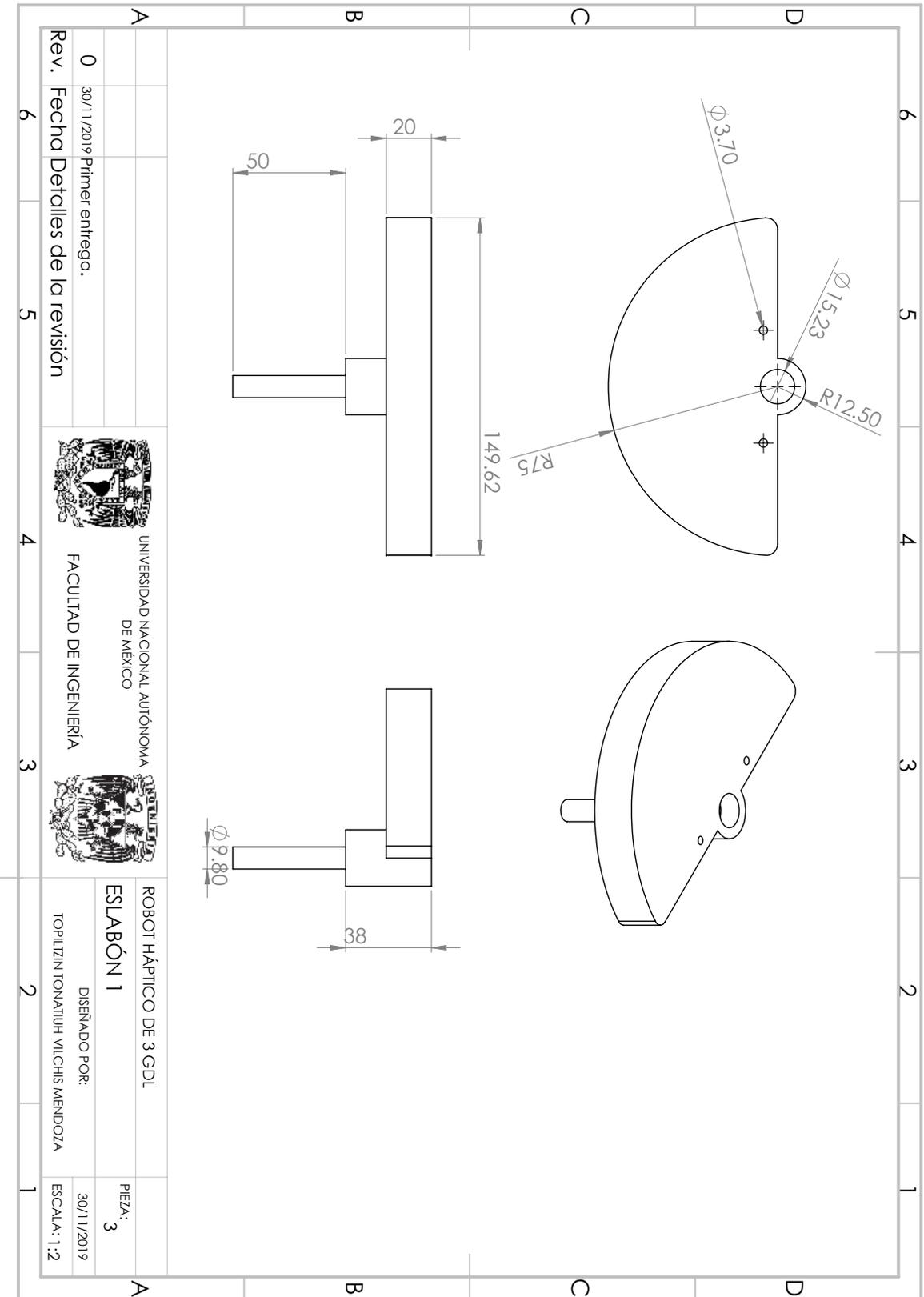


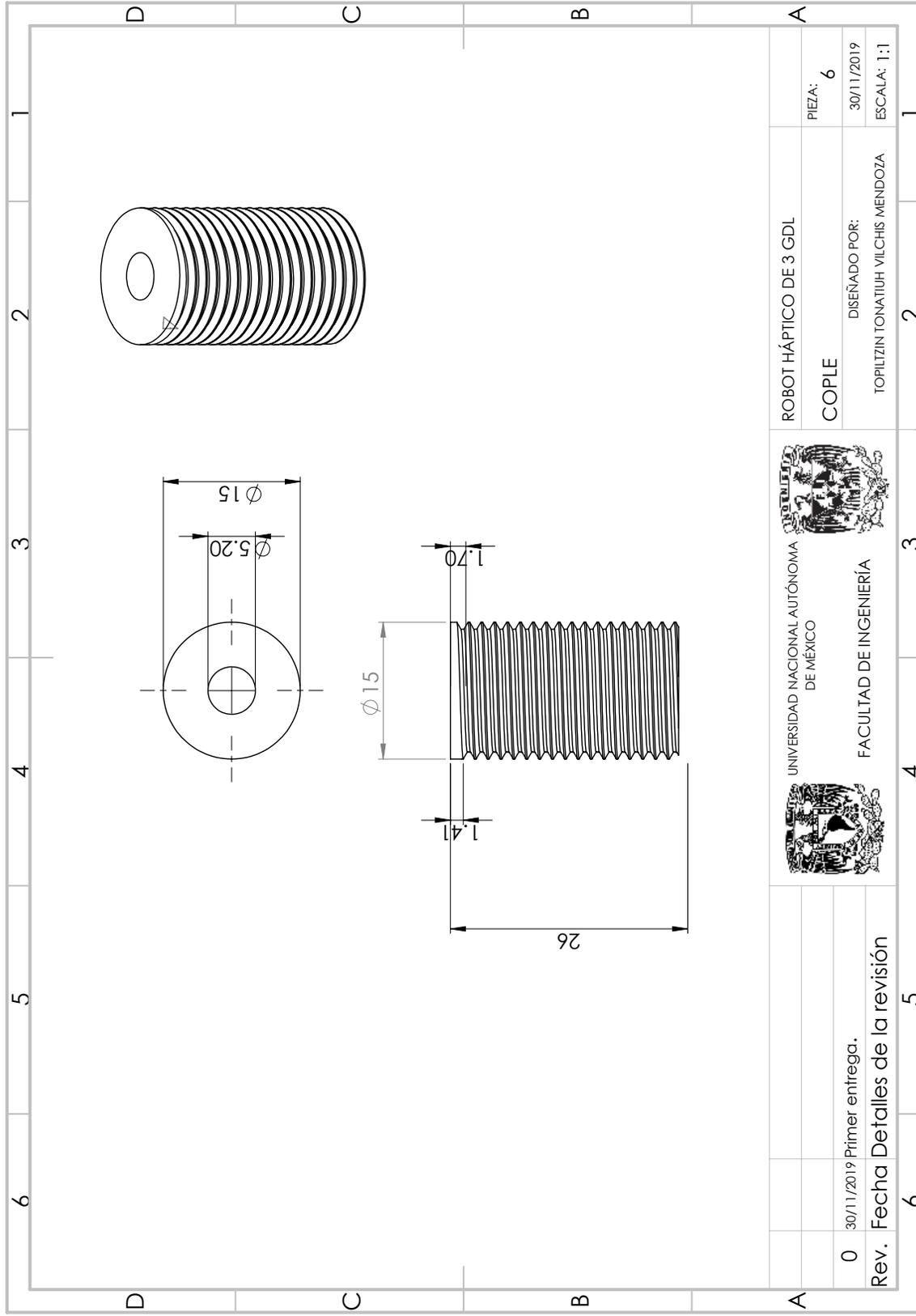
Rev. 0 30/11/2019 Primer entrega.  
 Fecha Detalles de la revisión



ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL  
 Esquemático robot completo  
 DISEÑADO POR: TOPILTZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA  
 PIEZA: 30/11/2019  
 ESCALA: 1:5





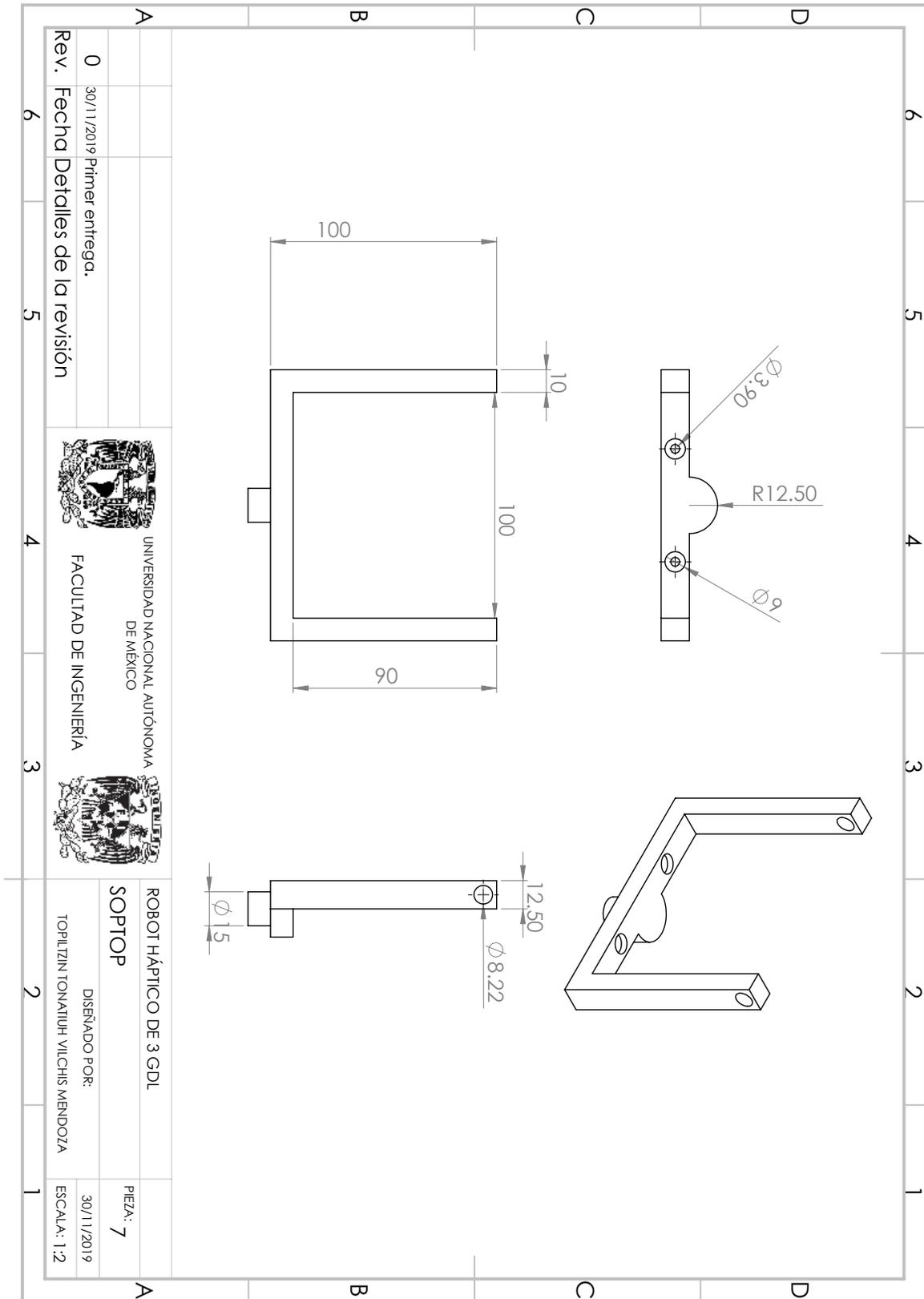


ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL  
 COPLER  
 DISEÑADO POR:  
 TOPILTZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA



0	30/11/2019	Primer entrega.
Rev. Fecha Detalles de la revisión		

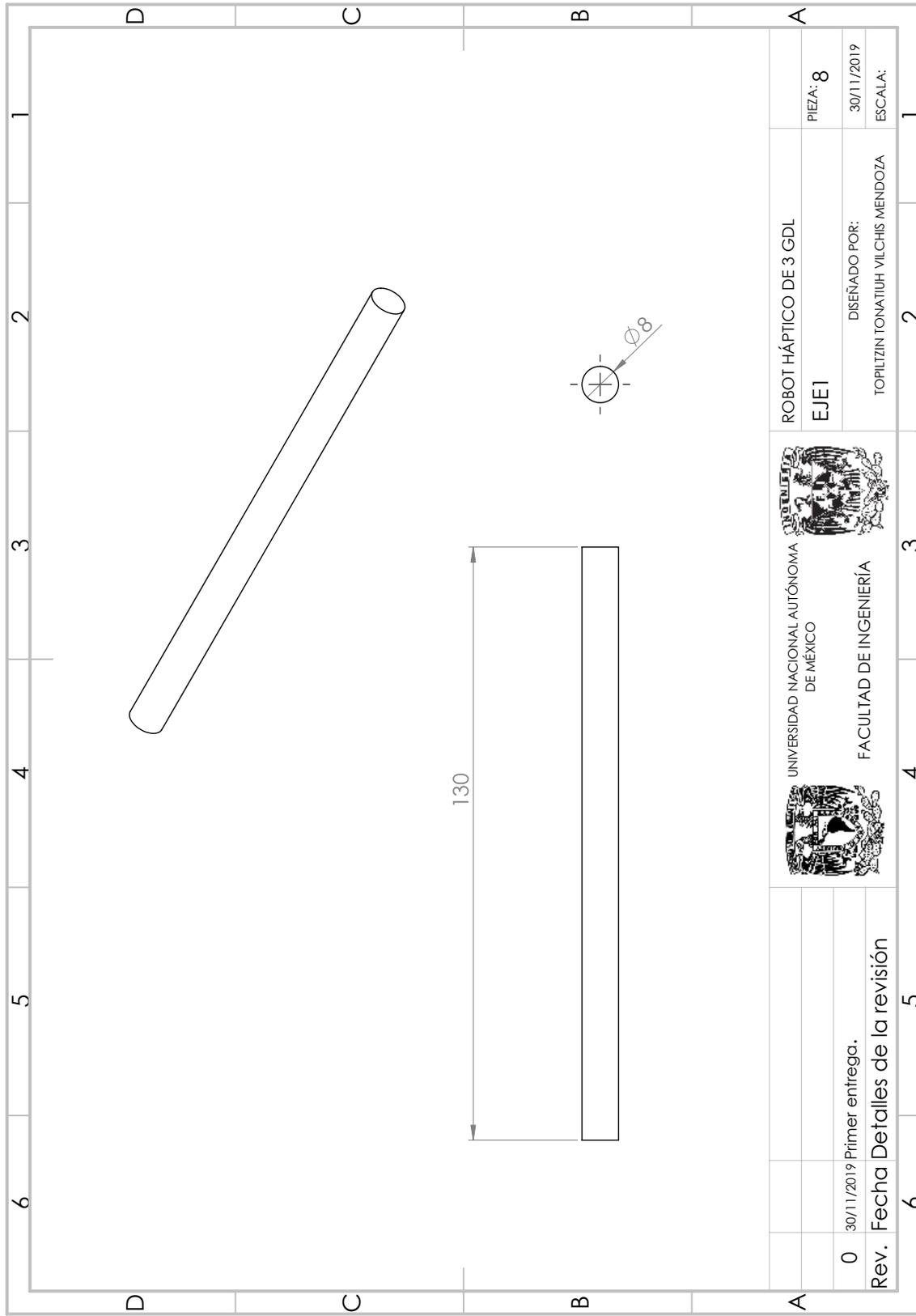
PIEZA: 6  
 30/11/2019  
 ESCALA: 1:1



Rev.	0	30/11/2019	Primer entrega.
Rev.			Detalles de la revisión



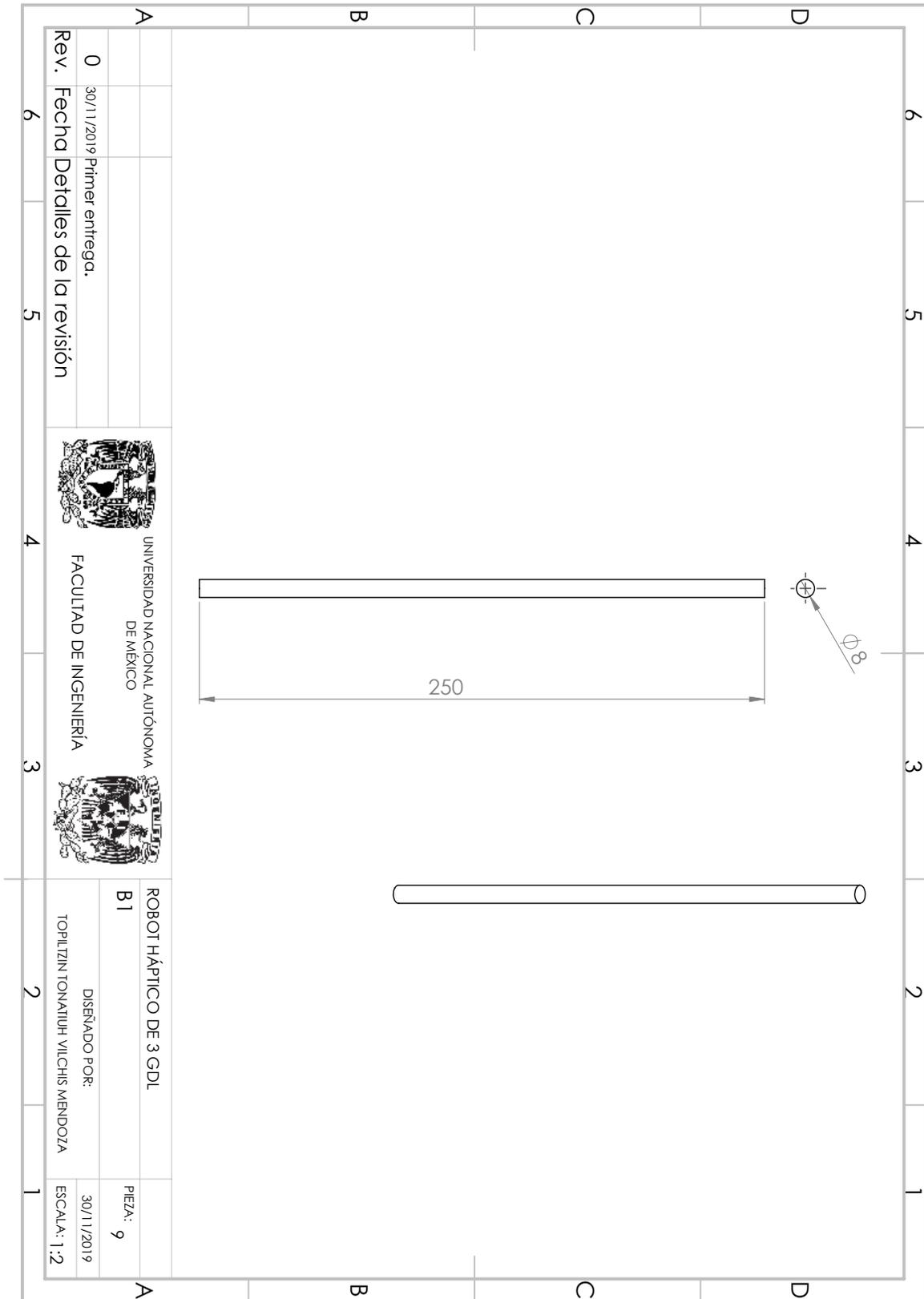
ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL  
SOPTOP  
DISEÑADO POR:  
TOPILTZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA  
PIEZA: 7  
30/11/2019  
ESCALA: 1:2

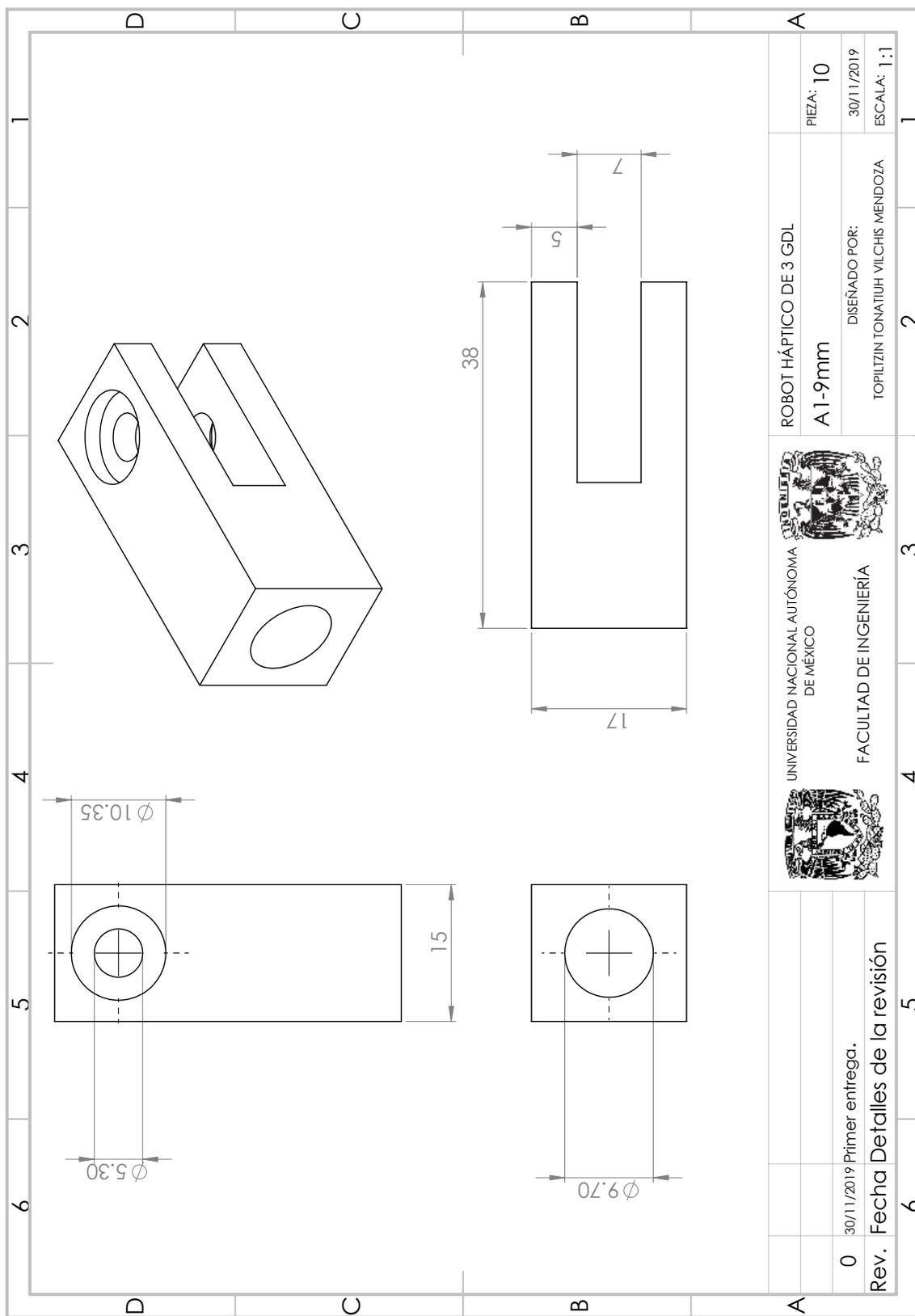


ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL	PIEZA: 8
EJE1	
DISEÑADO POR: TOPILTZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA	30/11/2019
	ESCALA:

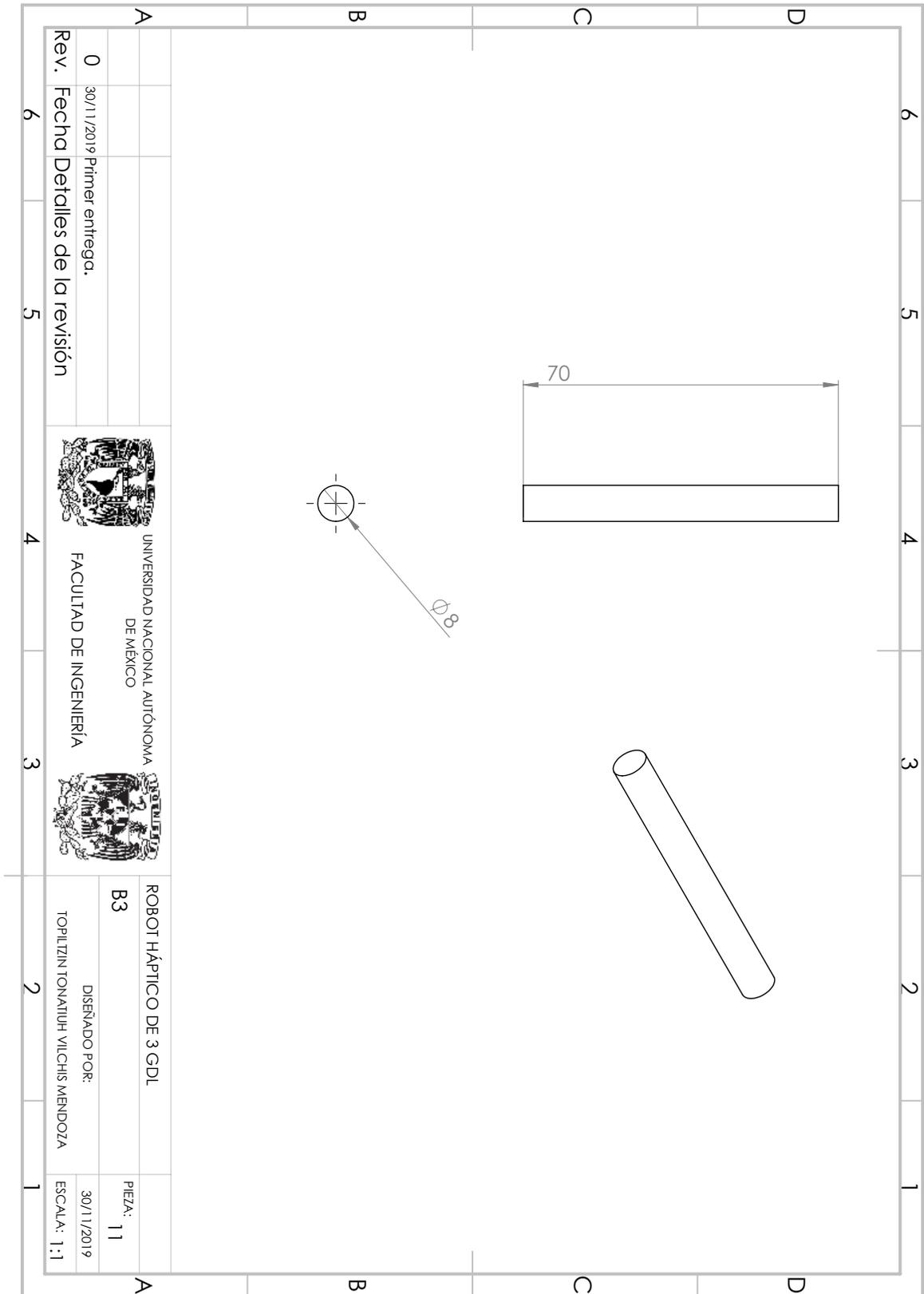


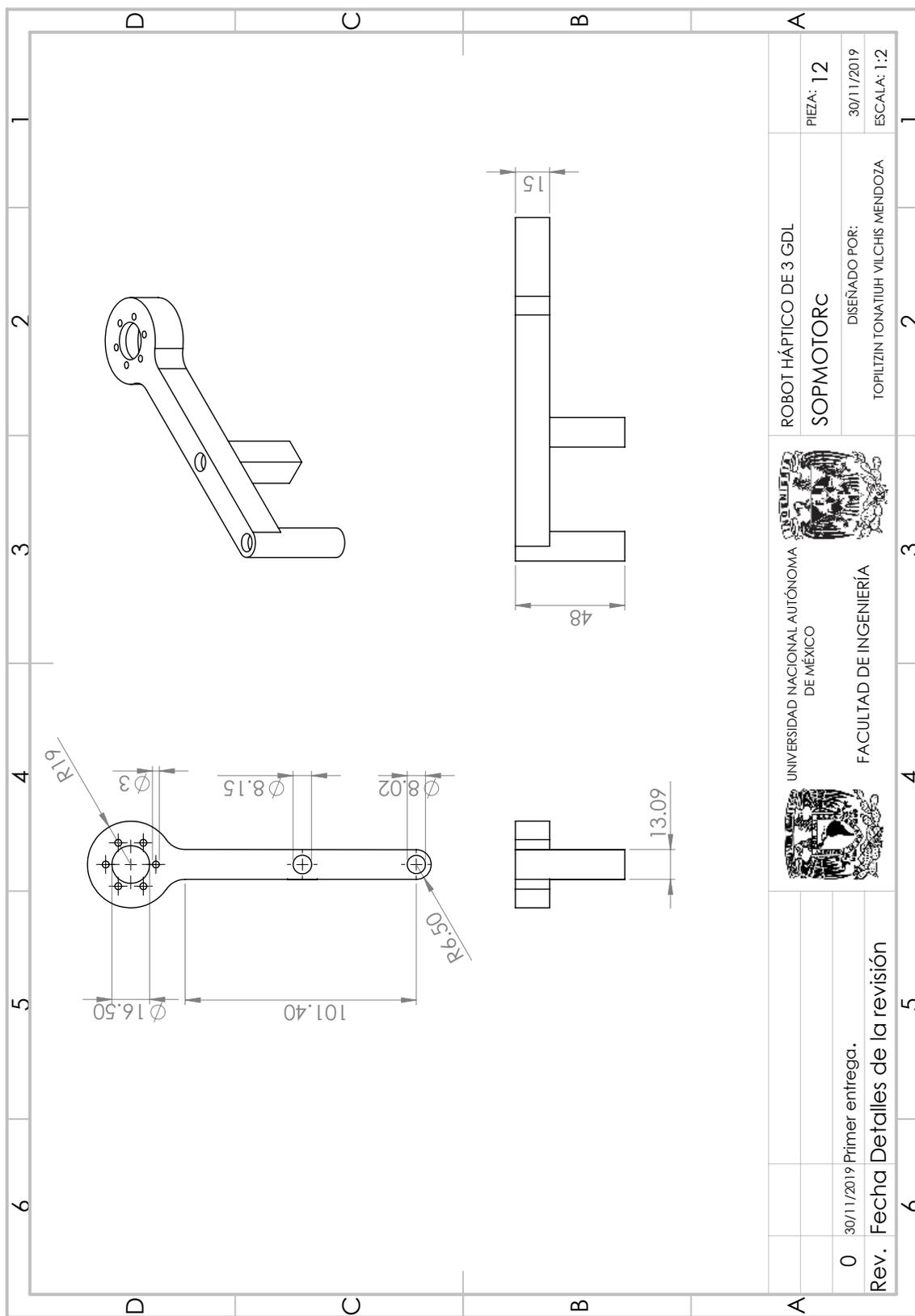
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	FACULTAD DE INGENIERÍA
0	30/11/2019 Primer entrega.
Rev. Fecha	Detalles de la revisión



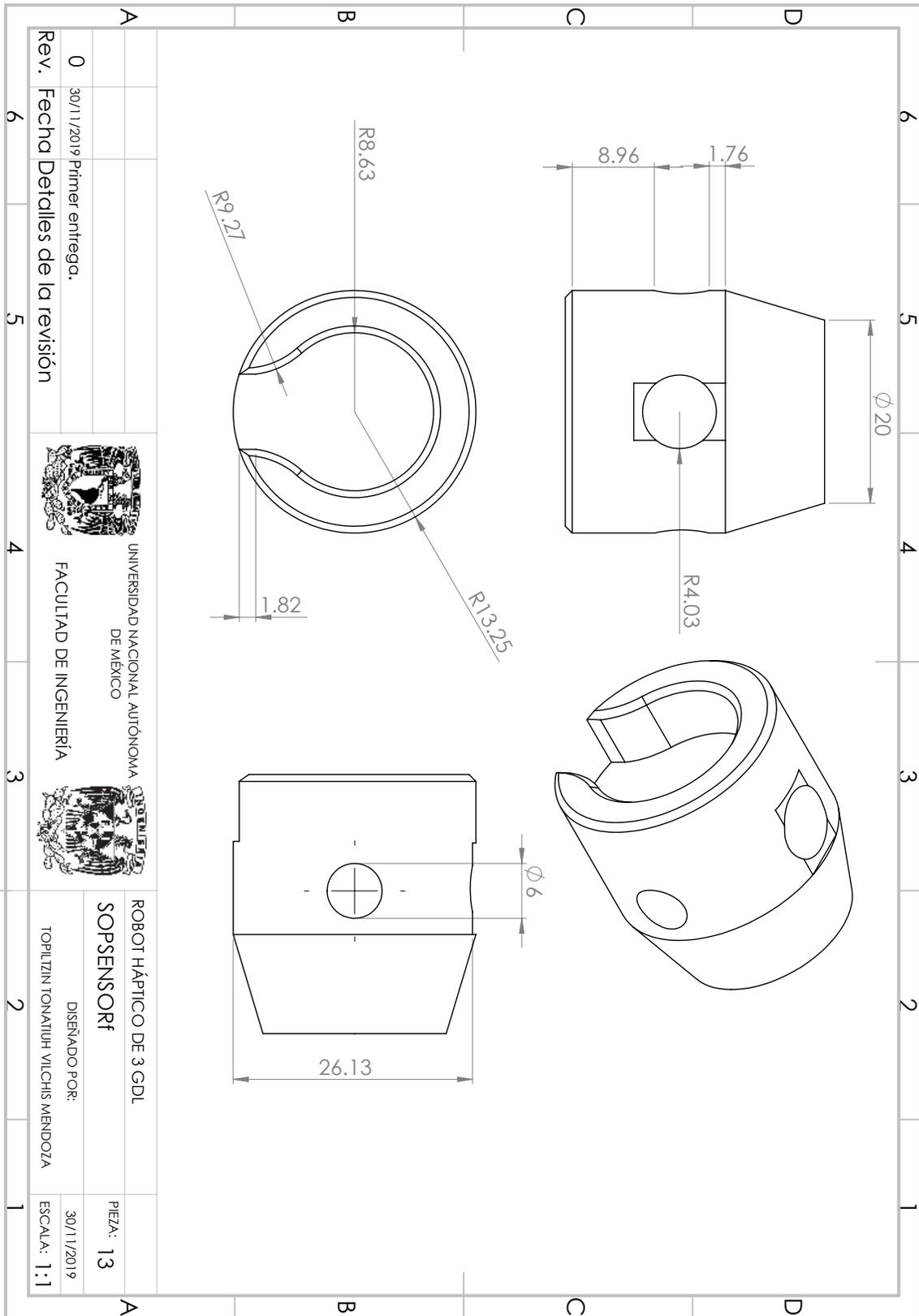


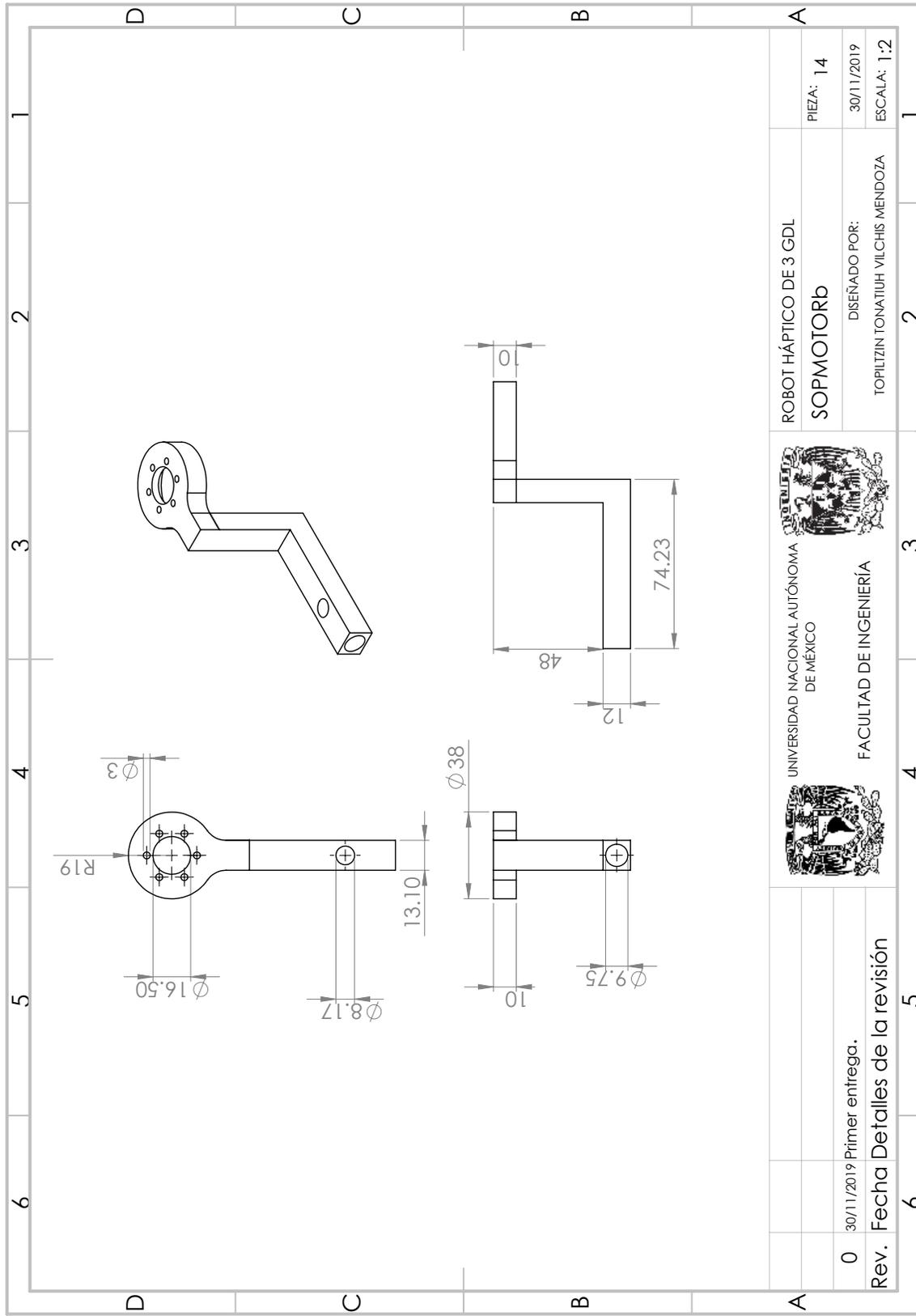
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL	
FACULTAD DE INGENIERÍA		FACULTAD DE INGENIERÍA		A1-9mm	
30/11/2019 Primer entrega.		DISEÑADO POR:		PIEZA: 10	
Rev. Fecha Detalles de la revisión		TOPILIZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA		ESCALA: 1:1	





ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL SOPMOTORC		PIEZA: 12
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA		DISEÑADO POR: TOPILTZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA		30/11/2019 ESCALA: 1:2
0	30/11/2019 Primer entrega.	
Rev. Fecha Detalles de la revisión		

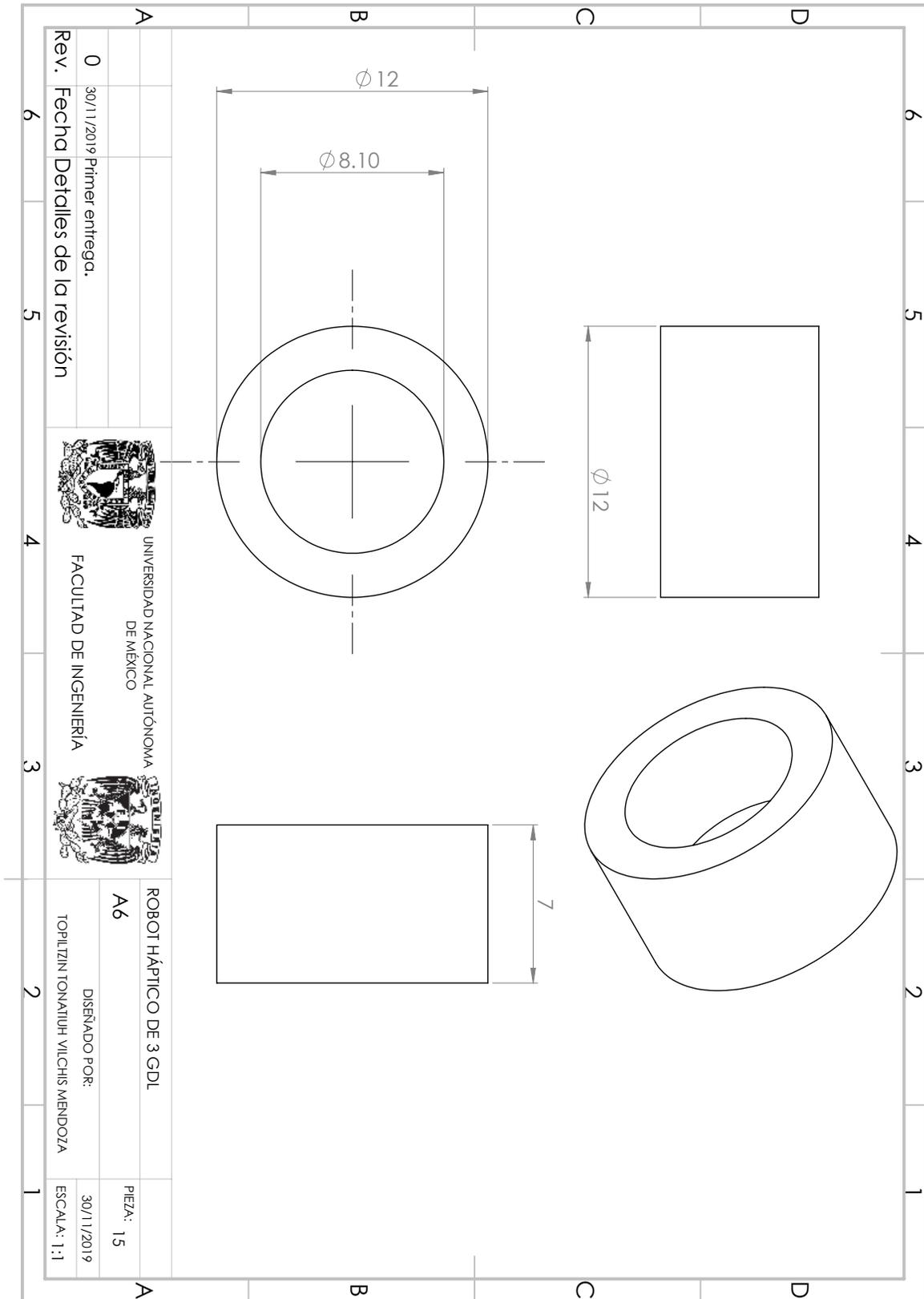




ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL SOPMOTORb	PIEZA: 14
DISEÑADO POR: TOPILTZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA	30/11/2019 ESCALA: 1:2



0	30/11/2019	Primer entrega.
Rev.	Fecha	Detalles de la revisión



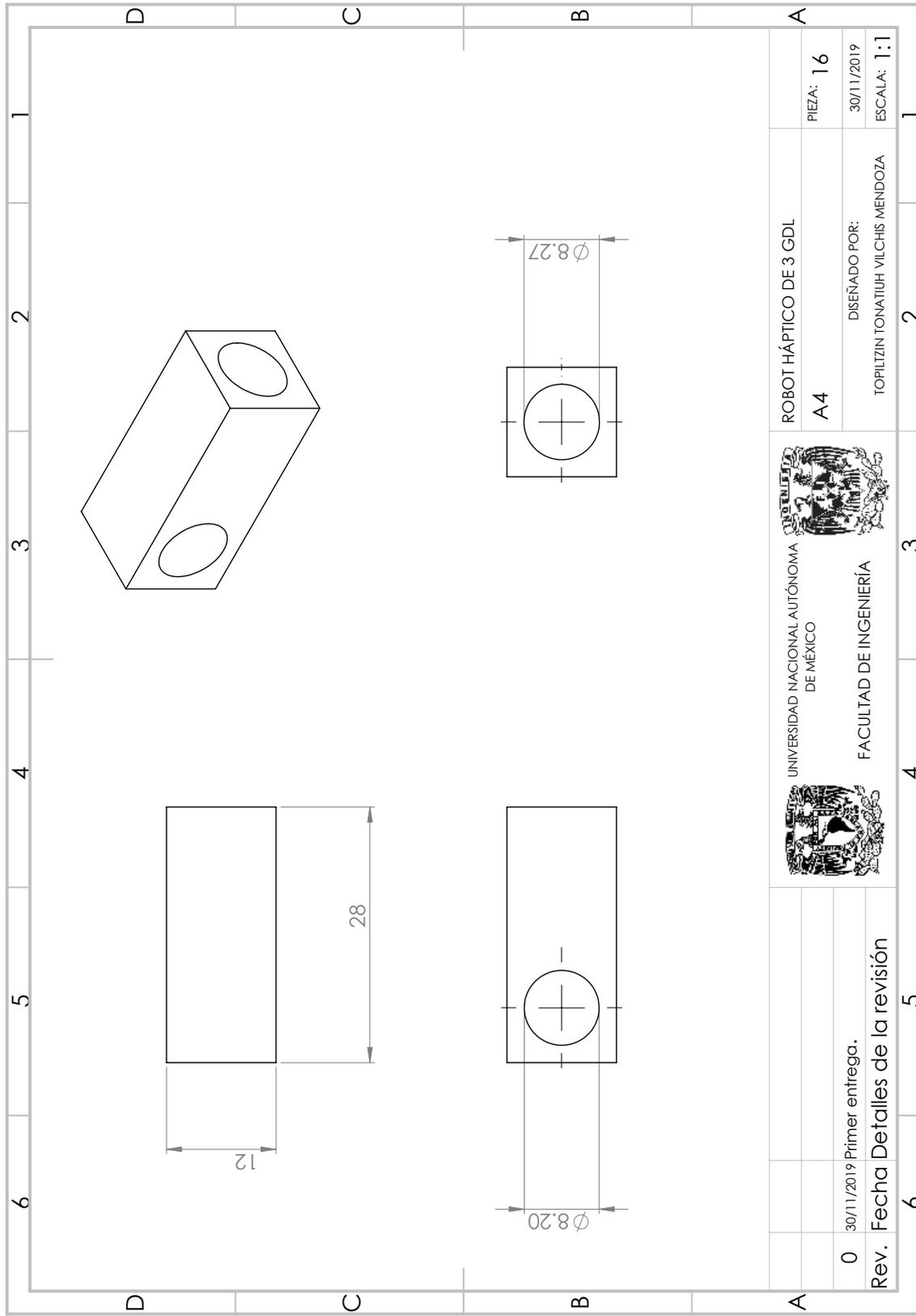
0	30/11/2019	Primer entrega.
Rev.	Fecha	Detalles de la revisión



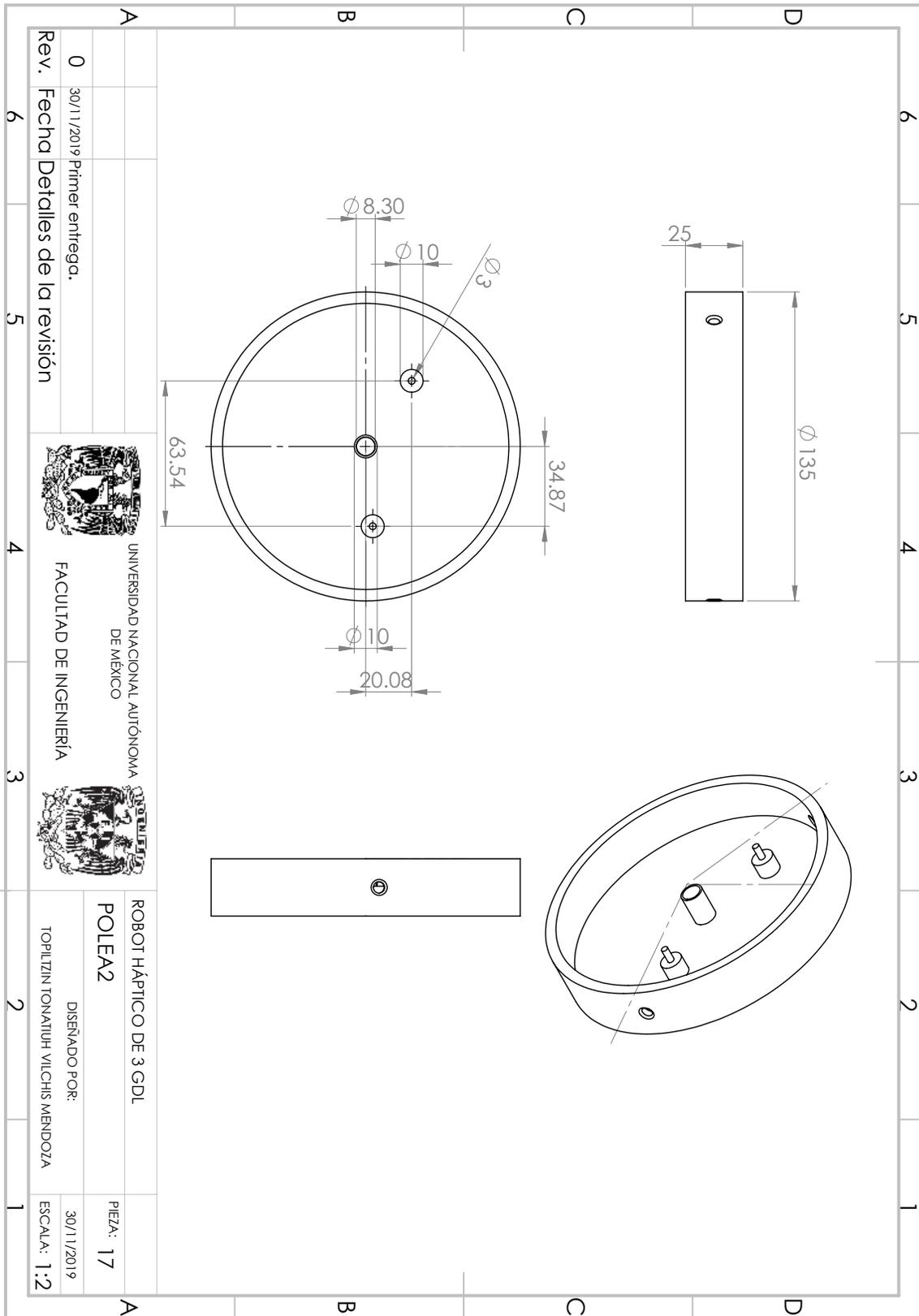
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA



ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL		PIEZA: 15
A6	DISEÑADO POR:	30/11/2019
TOPILTZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA		ESCALA: 1:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO		ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL	
FACULTAD DE INGENIERÍA		FACULTAD DE INGENIERÍA		A4	
0		30/11/2019 Primer entrega.		PIEZA: 16	
Rev. Fecha		Detalles de la revisión		DISEÑADO POR: TOPILIZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA	
6		5		2	
1		3		1	
Escala: 1:1					



Rev.	0	30/11/2019	Primer entrega.
Fecha Detalles de la revisión			



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA



ROBOT HÁPTICO DE 3 GDL	
POLEA2	PIEZA: 17
DISEÑADO POR: TOPILTZIN TONATIUH VILCHIS MENDOZA	
30/11/2019	
ESCALA: 1:2	

