



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE  
UN PROTOTIPO DE SIMULADOR  
CON REALIDAD VIRTUAL PARA  
CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA**

**TESIS**

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

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

Moreno Hilarios Tania Deyanira

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Fernando Pérez Escamirosa



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO  
DE SIMULADOR CON REALIDAD VIRTUAL PARA  
CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA**

*A mi familia,  
por su apoyo incondicional día a día a lo largo de toda mi vida.*

## Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a la Facultad de Ingeniería de la UNAM por brindarme los conocimientos adquiridos durante mi formación académica de licenciatura. Agradezco al Departamento de Cirugía de la Facultad de Medicina de la UNAM por permitirme realizar mi tesis, desarrollar y aprender nuevas habilidades durante las pruebas de campo.

En segundo lugar quiero agradecer al Dr. Fernando Pérez Escamiroso, mi asesor de tesis, por darme la oportunidad y la confianza para trabajar en este proyecto de inicio a fin, por su tiempo, inspiración, motivación, por todos sus consejos, apoyo y paciencia. A los sinodales, por su tiempo y dedicación al revisar esta tesis.

En tercer lugar, quiero agradecer a mis papás Edith Aida Hilarios Padilla y Armando Moreno Corchado y a mi hermana Ximena Ivette Moreno Hilarios, por todo su apoyo incondicional en cada momento, por tener fé en mi y darme aliento, por sus grandes consejos y motivación cuando creía estar perdida, por ayudarme en mis proyectos y en ocasiones desvelarse conmigo para terminarlos. A mis abuelitos Esperanza Padilla Sevilla "*Mi Golas*" y a Joel Hilarios Chávez por ser mis segundos padres y estar al pendiente de mí en cada momento y lugar en las buenas y en las malas a lo largo de toda mi vida, por que sin ellos no sería la persona que soy ahora. ¡Gracias por todo a todos!.

También quiero agradecer a todos mis amigos en general, por tantas experiencias increíbles, por su apoyo y por darme momentos felices durante la carrera. ¡Gracias por hacerme pasar muy buenos ratos!

## Contenido

<b>Resumen</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	2
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	3
1.1 Cirugía laparoscópica.....	3
1.2 Planteamiento del problema.....	4
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	6
1.5 Estructura de la tesis.....	6
<b>Capítulo 2. Estado del arte</b> .....	8
2.1 Simuladores para cirugía laparoscópica.....	8
2.1.1 Tipos de entrenadores.....	8
2.1.1.1 Entrenadores de caja (Box trainers).....	9
2.2 Interacción Hombre-Máquina.....	10
2.3 Realidad virtual enfocada a la cirugía.....	12
2.4 Simuladores laparoscópicos de realidad virtual.....	14
2.4.1 LapMentor™.....	14
2.4.1.1 Xitact™ IHP.....	15
2.4.2 LapSim®.....	16
2.4.2.1 Virtual Laparoscopic Interface.....	17
2.4.2.2 Plataforma Simball 4D.....	18
2.4.3 Simulador LapVR™.....	18
2.4.4 MIST-VR™.....	19
2.5 Sistemas para captura y registro de la actividad de los instrumentos quirúrgicos.....	20
2.5.1 Sistemas de rastreo de realidad virtual.....	21
2.6 Requerimientos técnicos para el prototipo de simulador laparoscópico.....	22
<b>Capítulo 3. Metodología</b> .....	23
3.1 Diseño Mecánico.....	23
3.2 Instrumentación electrónica.....	26
3.2.1 Sensores: Codificadores ópticos.....	26
3.2.2 Arduino DUE.....	27
3.3 Diseño de los objetos y Realidad Virtual.....	28
3.3.1 Diseño de las tareas para el simulador laparoscópico.....	29

<b>Capítulo 4. Pruebas y Resultados</b> .....	31
4.1 Diseño mecánico final.....	31
4.2 Pruebas del simulador laparoscópico.....	32
4.2.1 Pruebas de los sensores.....	32
4.2.2 Resolución de los sensores.....	34
4.3 Programación del simulador laparoscópico.....	35
4.3.1 Programación de sensores en la tarjeta Arduino.....	35
4.3.2 Programación de las tareas del simulador con Unity.....	37
4.4 Pruebas y resultados del simulador laparoscópico con cirujanos.....	40
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b> .....	44
5.1 Conclusiones del trabajo.....	44
5.2 Trabajo a futuro.....	45
<b>Referencias</b> .....	47
<b>Apéndice I</b> .....	49
<b>Apéndice II</b> .....	59
<b>Apéndice III</b> .....	61

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b>	Entrenador de caja laparoscópico FLS.....	9
<b>Figura 2</b>	Simulador del robot Da Vinci Mimic®.....	12
<b>Figura 3</b>	Modelo genérico de realidad virtual.....	12
<b>Figura 4</b>	Tareas virtuales para el manejo de habilidades del médico cirujano.....	13
<b>Figura 5</b>	Simulador LapMentor™.....	15
<b>Figura 6</b>	Instrumento háptico Xitact™IHP.....	16
<b>Figura 7</b>	Simulador LapSim®.....	17
<b>Figura 8</b>	Virtual Laparoscopic Interface.....	17
<b>Figura 9</b>	Plataforma Simball 4D.....	18
<b>Figura 10</b>	Simulador LapVR™.....	19
<b>Figura 11</b>	Simulador MIST-VR™.....	19
<b>Figura 12</b>	Explosión del mecanismo para el simulador laparoscópico.....	23
<b>Figura 13</b>	1er grado de libertad “ derecha / izquierda ” o alabeo.....	24
<b>Figura 14</b>	Impresión en 3D y 2do grado de libertad, “adentro / afuera” o cabeceo.....	25
<b>Figura 15</b>	3er grado de libertad “arriba / abajo” o guiñada.....	25
<b>Figura 16</b>	Codificador óptico digital E4T de la compañía US Digital.....	26
<b>Figura 17</b>	Ángulo de giro del codificador óptico E4T.....	26
<b>Figura 18</b>	Tarjeta de desarrollo Arduino DUE.....	27
<b>Figura 19</b>	Módulo MicroSD para Arduino.....	28
<b>Figura 20</b>	Diseño de pinza laparoscópica en 3Dmax.....	28
<b>Figura 21</b>	Toroide diseñado en 3Dmax.....	29
<b>Figura 22</b>	Tarea 1 del simulador laparoscópico: Ubicación espacial.....	29
<b>Figura 23</b>	Tarea 2 del simulador laparoscópico: Transferencia de objetos.....	30
<b>Figura 24</b>	Mecanismo final con la pinza laparoscópica <i>Maryland</i> para el simulador.....	31
<b>Figura 25</b>	Grados de libertad de la articulación mecánica: <b>A)</b> derecha / izquierda, <b>B)</b> adentro / afuera y <b>C)</b> arriba / abajo.....	33
<b>Figura 26</b>	Resultado de calibración y resolución de los tres principales grados de libertad: <b>A)</b> GDL derecha / izquierda, <b>B)</b> GDL adentro / afuera y <b>C)</b> GDL arriba / abajo.....	35
<b>Figura 27</b>	Diagrama de flujo de los codificadores ópticos realizado en la IDE de Arduino.....	36

<b>Figura 28</b>	Diagrama de Flujo de la comunicación Arduino – Unity y movimientos básicos de la pinza.....	37
<b>Figura 29</b>	Diagrama de flujo para desaparecer objetos en Unity.....	38
<b>Figura 30</b>	Tarea 1 Ubicación espacial en la versión final.....	38
<b>Figura 31</b>	Diagrama de flujo de la tarea de transferencia de objetos en Unity.....	39
<b>Figura 32</b>	Tarea 2 Transferencia de objetos en la versión final.....	40
<b>Figura 33</b>	Simulador laparoscópico con realidad virtual durante las pruebas de funcionalidad en el Departamento de Cirugía, Facultad de Medicina UNAM. <b>A)</b> Tarea 1. Ubicación espacial, <b>B)</b> Tarea 2. Transferencia de objetos.....	40
<b>Figura 34</b>	Posición del instrumental laparoscópico para iniciar con las tareas virtuales.....	41
<b>Figura 35</b>	Resultados de movimiento con el tiempo total de un estudiante de medicina en la tarea de ubicación espacial.....	42
<b>Figura 36</b>	Comparación de movimientos en Tarea 2 Transferencia de objetos. <b>A)</b> Estudiante de medicina, <b>B)</b> Cirujano experto.....	43

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	Resolución de los codificadores ópticos montados en el simulador laparoscópico.....	34
----------------	---	----

## Resumen

La cirugía de mínima invasión o mejor conocida como *Minimally Invasive Surgery* (MIS, por sus siglas en inglés), es una técnica que ha comenzado a revolucionar las subespecialidades en la medicina debido a que ofrece varios beneficios para los pacientes. Sin embargo, la cirugía de mínima invasión necesita la adquisición de nuevas habilidades y destrezas quirúrgicas diferentes a los de una cirugía abierta. El aprendizaje de las habilidades psicomotrices y destrezas en cirugía de mínima invasión, fuera de la sala de operaciones, es probablemente el método más eficiente y seguro para los cirujanos y residentes en las especialidades quirúrgicas. Por lo tanto, es importante la creación de nuevas tecnologías en el campo de realidad virtual (VR) que permitan el entrenamiento de las habilidades básicas y destrezas psicomotoras reduciendo la práctica con pacientes reales así como el decremento de los errores médicos.

El objetivo de esta tesis de licenciatura es el diseño y construcción de un simulador con realidad virtual para el entrenamiento en cirugía laparoscópica, desde su diseño mecánico hasta el entorno gráfico en el cual se van a desarrollar diversas tareas de entrenamiento para el cirujano experto o residente.

El mecanismo se realizó mediante una articulación diseñada en forma de “L” que permite el movimiento de 3 grados de libertad de una pinza laparoscópica convencional, además el giro del instrumento sobre su propio eje y la apertura y cierre de la punta. Para registrar los movimientos se utilizaron 5 codificadores ópticos controlados en una tarjeta Arduino DUE. El diseño de las tareas se realizó con el entorno gráfico de Unity donde cada una de las tareas fue programada de manera específica mediante scripts en C#.

La resolución de los sensores en cada grado de libertad fue de 1.77 mm / pulso para el sensor 1, 1.17 mm / pulso para el sensor 2, 1.77 mm / pulso para el sensor 3, 1.5 mm / pulso para la apertura y cierre de la punta y 0.25 grados / pulso para el giro sobre su propio eje.

El dispositivo es una herramienta innovadora para el entrenamiento de la curva de aprendizaje de cirujanos, residentes y estudiantes de medicina, ofreciendo un sistema confiable y eficiente para la obtención de habilidades y destrezas quirúrgicas básicas en un ambiente libre de estrés y seguro para la práctica.

## Abstract

Minimally invasive surgery (Minimally Invasive Surgery (MIS) is a technique that has begun to revolutionize the surgical subspecialties in medicine due to its several benefits for patients. However, minimally invasive surgery requires the acquisition of new skills and dexterities different from those of conventional open surgery.

Learning the psychomotor skills in minimally invasive surgery, outside the operating room, is probably the most efficient and safe method for surgeons and residents in the surgical specialties. Therefore, it is important to create new technologies in the field of virtual reality (VR) that allow the training of basic psychomotor skills by reducing practice with real patients as well as decreasing medical errors.

The objective of this thesis is the design and construction of a simulator with virtual reality for training in laparoscopic surgery, from its mechanical design to the graphic environment in which various training tasks will be developed for the experienced or resident surgeon.

The mechanical design was made in form of "L" that allowed the movement of the 3 degrees of freedom of a conventional laparoscopic instrument, and also allowed other two degrees of freedom as open/close of the tip and rotated around its axis. To record the movements were used 5 optical encoders, controlled by Arduino DUE development platform. The design of the tasks was used Unity graphical environment where each one was programmed in a specific way using different C# scripts.

The resolution of the sensors in each degree of freedom was 1.77mm / pulse for sensor 1, 1.17mm / pulse for sensor 2, 1.77mm / pulse for sensor 3, 1.5 mm/ pulse for open and close the tip, and 0.25 degrees / pulse for the rotation around its axis.

The device is an innovative tool for training the learning curve of surgeons, residents and medical students, offering a reliable and efficient system for obtaining basic laparoscopic skills with a stress-free and safe practice environment.

## Capítulo 1. Introducción

### 1.1 Cirugía laparoscópica

El término laparoscopia se deriva de la raíz griega lapara “abdomen” y skopein “examinar”. Esta técnica quirúrgica permite visualizar el interior del abdomen sin tener la necesidad de realizar grandes incisiones. Dicha técnica consiste en hacer pequeñas incisiones que permiten introducir los instrumentos largos y delgados en el paciente, el llenado de la cavidad peritoneal se hace por medio de gas CO<sub>2</sub> para crear un espacio entre la pared abdominal, los órganos y tejidos y así se introduzca el instrumento llamado laparoscopio. La visualización del área a operar se realiza a partir de una cámara laparoscópica siendo su fuente de iluminación la luz fría (fibra óptica), mientras la imagen se reproduce en un monitor en 2D [1].

En los inicios la cirugía laparoscópica era para fines de diagnóstico y toma de biopsias; en la actualidad, se efectúan múltiples y complejas operaciones en la cavidad abdominal por esta vía [1]. A diferencia de la cirugía abierta convencional, la cirugía laparoscópica posee beneficios importantes para la salud del paciente [1], algunas de ellas se mencionan a continuación:

1. Reduce el stress quirúrgico
2. Se presentan buenos resultados estéticos
3. Disminuye el uso de la anestesia y manipulación intestinal
4. Reduce la estadía en el hospital
5. Reduce el periodo de convalecencia
6. Disminuye los costos hospitalarios

Sin embargo, esta técnica quirúrgica de mínima invasión demanda la adquisición de un conjunto de habilidades psicomotrices y un alto grado de destreza en ambas manos del cirujano así como:

- a) Visión limitada por pérdida de la visualización en el espacio 3-D
- b) Pérdida de la coordinación manos-ojos
- c) Habilidades motrices limitadas de manos, muñeca y dedos
- d) Pérdida del sentido de profundidad
- e) Colocación de suturas y ligaduras difíciles a consecuencia de la rigidez de los instrumentos y reducción de los grados de libertad.
- f) Falta de ergonomía la cual produce incomodidad, cansancio y estrés. [2]

- g) Adaptar el pulso de las manos, la disminución de la sensación táctil de los elementos a manipular, y la disminución de los grados de libertad para maniobrar durante el entrenamiento o procedimiento quirúrgico. [3]

Tradicionalmente, las habilidades y destrezas laparoscópicas se aprenden en la práctica directa en los pacientes, generando muchas veces errores médicos que ponen en peligro la salud de los mismos, razón por la cual el cirujano requiere del entrenamiento específico para realizar una cirugía laparoscópica de forma segura.

En la actualidad, se tienen métodos diferentes para el aprendizaje de estas habilidades y destrezas. Un método de entrenamiento es el cadáver. La ventaja de este método es que existe un entrenamiento casi real y directo de las estructuras anatómicas. Las desventajas derivan en que el cadáver no sangra, se necesita de instalaciones especiales y el costo de mantenimiento para dichas instalaciones es elevado. Por otro lado, se cuenta con otro método de entrenamiento directo que es el modelo animal en rata, conejo o cerdo. Las ventajas de este método es el sangrado, permitiendo la manipulación de órganos y tejidos. Las desventajas que presentan es un modelo anatómico diferente al ser humano, se requieren de instalaciones especiales y el costo de mantenimiento es elevado.

Otro método de entrenamiento para cirujanos que realizan cirugía laparoscópica es el uso de simuladores. La ventaja de estos equipos es que se tiene un entrenamiento en cualquier momento en un ambiente libre de stress, son tareas inanimadas y simuladas, y algunos de ellos brindan resultados al finalizar la tarea.

El presente trabajo de tesis de licenciatura se enfoca en el diseño y construcción de un simulador de realidad virtual de bajo costo para cirugía laparoscópica.

## **1.2 Planteamiento del problema**

En México, un cirujano aprende las habilidades y destrezas laparoscópicas directamente en los pacientes de los hospitales y centros de salud. Con la simulación quirúrgica, se pretende que el cirujano adquiera un cierto nivel de habilidad y destreza manual para que realice menos errores en una cirugía laparoscópica con un paciente real. Por ello, es importante el desarrollo de un programa e instrumentos quirúrgicos previamente diseñados e instrumentados adecuadamente que permitan la práctica y perfección de las habilidades y destrezas quirúrgicas, bajo un ambiente controlado y seguro. El auge que han tenido los entrenadores ya sean físicos, de realidad virtual o de realidad aumentada ha ido en aumento en hospitales de todo el mundo

debido al interés que tiene el cirujano por el paciente, en que tenga una mejoría pronta y con menos complicaciones. Dichos simuladores han sido bien aceptados por residentes y cirujanos expertos en los hospitales y centros de salud de todo el mundo con el fin de adquirir y reforzar las habilidades y destrezas laparoscópicas y que puedan ser aplicables en una cirugía laparoscópica real.

En este trabajo de tesis, se pretende construir un simulador de realidad virtual para el entrenamiento de la cirugía laparoscópica de bajo costo y que pueda ser adquirido de manera fácil por diversos hospitales cuyos recursos son limitados, centrándonos en el diseño, la instrumentación, y en el desarrollo de interfaces gráficas con tareas específicas e implementación de las mismas como entrenamiento de las habilidades y destrezas psicomotoras laparoscópicas.

### **1.3 Justificación**

Actualmente en México, no se cuenta con desarrollos en Realidad Virtual para que los cirujanos entrenen sus habilidades y destrezas laparoscópicas de una forma segura y sin estrés; por lo tanto, se basó en un nuevo diseño de simulador de realidad virtual con la instrumentación de una pinza laparoscópica tipo disector o “Maryland” para hacer la conexión con dispositivo Arduino DUE e interactuar con el entorno gráfico de Unity con el fin de usar y manipular el instrumento en un ambiente controlado y permitir que el cirujano adquiera habilidades psicomotrices que necesita para la técnica laparoscópica.

### **1.4 Objetivos**

En este apartado, se muestra el objetivo general y los objetivos específicos que se pretenden alcanzar dentro de esta tesis.

#### **1.4.1 Objetivo general**

El principal objetivo de esta tesis de licenciatura es el diseño y construcción de un prototipo de simulador con realidad virtual para cirugía laparoscópica, que permita el entrenamiento de estudiantes de medicina, residentes y cirujanos en un ambiente libre de estrés y fuera de la sala de operaciones, tomando como herramienta la interfaz gráfica de Unity con la programación de tareas específicas para la práctica de la técnica de mínima invasión.

### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Diseño y construcción mecánica de un simulador laparoscópico para uso de entrenamiento en tareas específicas dentro del ambiente gráfico Unity.
2. Instrumentación de pinza laparoscópica tipo Maryland mediante sensores específicos que permitan la comunicación con Arduino DUE y Unity.
3. Diseño y programación de tareas en Unity que servirán en el entrenamiento cirujanos y residentes.
4. El diseño de un simulador con realidad virtual de bajo costo, fácil de usar y fácil de entender.
5. Análisis de resultados de los entrenamientos del cirujano utilizando nuestro simulador.

### 1.5 Estructura de la tesis

**Capítulo 1.** En este capítulo se define el concepto de cirugía laparoscópica, además se establece el planteamiento del problema que se requieren de ciertas técnicas para que el cirujano adquiera y refuerce sus conocimientos acerca de dicho entrenamiento laparoscópico. También se definen los objetivos generales y específicos de la tesis.

**Capítulo 2.** En este capítulo se presenta el estado del arte sobre los simuladores de cirugía laparoscópica, las interfaces hombre-máquina así como los diversos sistemas de entrenamiento con realidad virtual.

**Capítulo 3.** En este capítulo se define la metodología que se llevó a cabo para el diseño mecánico del prototipo de simulador, los grados de libertad que tiene el mismo, el montaje de los codificadores para la captura de cada movimiento y la conexión con Arduino para el registro de los movimientos de cada grado de libertad, se muestra el diseño de la pinza virtual y uno de los objetos que se usó para una de las tareas en Unity.

**Capítulo 4.** En este capítulo se presentan las pruebas y los resultados sobre el diseño mecánico del simulador, la metodología que se llevó a cabo para obtener la resolución y linealidad de los sensores montados en la articulación mecánica y en el instrumental laparoscópico así como algunas pruebas de funcionamiento, además de la programación que se llevó a cabo para la comunicación de Arduino con Unity así como la programación de cada una de las tareas, al final se muestran los resultados de las pruebas obtenidas con los estudiantes de medicina y los cirujanos.

**Capítulo 5.** En este capítulo se definen las conclusiones generales de la tesis, así como las conclusiones sobre el diseño mecánico y la resolución de cada sensor, las observaciones y comentarios que realizaron los estudiantes y cirujanos del Departamento de Cirugía de la Facultad de Medicina de la UNAM en cuanto al diseño del simulador laparoscópico, el realismo del simulador en la interfaz gráfica de cada tarea básica, el realismo del instrumental laparoscópico virtual y los objetos. Se presenta el trabajo a futuro para mejorar el simulador laparoscópico.

## Capítulo 2. Estado del arte

En este capítulo se describen los diversos sistemas de entrenamiento en cirugía laparoscópica en cuestión de simuladores de realidad virtual, basado en encontrar la información a partir de fuentes confiables y actualizadas respecto a este tema. Asimismo, se aborda el tema de la interfaz hombre-máquina puesto que es importante conocer el medio en el que se desenvuelve este tipo de herramientas de aprendizaje con el usuario así como diversos simuladores de realidad virtual y el significado de esta tecnología.

### 2.1 Simuladores para cirugía laparoscópica

La preparación de un cirujano laparoscopista ya sea novato o experto presenta obstáculos en su proceso de formación así como el entrenamiento por ejemplo, la superación del inicio del aprendizaje, presiones económicas, tiempo, presión en cuanto a la menor cantidad de errores para evitar poner en riesgo a los pacientes en una cirugía real, etc. Por lo tanto, es necesario el desarrollo de simuladores con reproducción artificial que tomen en cuenta la visualización, manipulación del instrumento, orientación espacial y en algunos casos simulación de procedimientos quirúrgicos completos y métodos de evaluación.

Los simuladores quirúrgicos se pueden clasificar dependiendo de los procedimientos que se vayan a realizar en el entrenador, por ejemplo simuladores con tareas básicas que implican el traslado de objetos de diferente geometría y tamaño, hasta simuladores más especializados donde se pueden realizar procedimientos quirúrgicos completos para el entrenamiento de las habilidades y destrezas del cirujano.

En la actualidad, se ha demostrado que existen casos en los que se tienen los simuladores en el hospital y los cirujanos no se sienten motivados a hacer uso de ellos. Por ello, las interacciones relacionadas con el realismo y la realidad virtual son estímulos para ganar aceptación por el cirujano, haciendo que las habilidades presenten mejoría con el constante uso del simulador.

#### 2.1.1 Tipos de entrenadores

Existen diferentes tipos de simuladores y entrenadores laparoscópicos. Cada uno de ellos tienen características particulares, que generalmente se pueden clasificar en:

- A. Entrenadores de caja
- B. Simuladores de realidad virtual

En esta tesis, en particular, nos enfocaremos más en la segunda clasificación debido a que este simulador se realizará con base en gráficos computacionales de realidad virtual. Sin embargo, para conocer todas las tecnologías se mencionarán alguno de los entrenadores de caja que se han desarrollado.

### 2.1.1.1 Entrenadores de caja (Box trainers)

Los entrenadores de caja (box-trainers) proveen un contenedor que simula la cavidad abdominal de un paciente sometido a una intervención laparoscópica. En dicho entrenador, se recrea el ambiente quirúrgico con las condiciones operativas utilizando componentes básicos como una videocámara, una fuente de luz y un monitor. La cámara de los entrenadores de caja se puede conectar a una computadora o un monitor. Las ventajas de este tipo de entrenadores es que se puede ocupar cualquier tipo de instrumental laparoscópico con una mejor háptica natural de los mismos. Además, ofrecen una solución económica y portátil que permite a los cirujanos practicar sus habilidades en un ambiente seguro, sin presiones, sin complicaciones y sin límite de tiempo. En contraste, la manera de evaluación a los cirujanos en estos entrenadores se basa en la observación y supervisión de un cirujano experto, donde la calificación es entre el profesor y el alumno. Algunos ejemplos de simuladores de caja son: *FLS training system* (Fundamental of Laparoscopic Surgery, por sus siglas en inglés) (Figura 1) [4], el *Portable Laparoscopic Box Trainers* [5] y el *LapTrainer* [6]



**Figura 1.** Entrenador de caja laparoscópico FLS.

## 2.2 Interacción “hombre – máquina”

Desde hace muchos años el hombre ha tratado de adaptarse lo mejor posible a las máquinas; los estudios que se han hecho se centran en la máquina, procurando formar y seleccionar a los operadores dependiendo de las exigencias de la misma.

Conforme va avanzando el tiempo y la tecnología, la complejidad de las máquinas y su precio aumentan llegando a tener una exigencia imperativa, como la del error humano, por ejemplo, si este se materializa a manera de accidente se puede tener una trascendencia económica de gran importancia, por lo que ahora los estudios se han ido concentrando en el hombre. Sin embargo, lo anterior aún sigue sin ser suficiente por ello las investigaciones se reducen a sistemas determinados por el hombre y la máquina buscando una adaptación mútua [2].

El avanzado y progresivo desarrollo de diversas disciplinas y tecnologías, en el campo de la Medicina e Ingeniería se han preocupado por el estudio y solución de problemas entre la relación “hombre-máquina” con el propósito de optimizarlos y perseguir los siguientes puntos: [2]

- Ajustar las exigencias del trabajo a las posibilidades del hombre.
- Máquinas, equipos e instalaciones se crean pensando en la mayor eficacia, precisión y seguridad.
- Estudio meticuloso del área de trabajo.
- Adaptar el entorno a las necesidades del hombre.

La interacción se refiere a una relación entre el ser humano y la máquina por medio de una interface, llevando al hombre a la extensión de sus capacidades, esto es, las ventajas que tiene el mismo para realizar otras tareas de manera simultánea.

En la relación hombre-máquina se entiende que las interacciones entre sí se relacionan de los procesos internos del ser humano. Cuando se habla de procesos internos se refiere a los procesamientos de información, logrando que las máquinas lleven algoritmos que procuren mejorar el desempeño de la persona.

Actualmente, no existe una definición exacta o concreta en cuanto a la interacción hombre-máquina, aunque se puede decir que esta se encarga del diseño, evaluación e implementación de aparatos tecnológicos interactivos, teniendo como objetivo la disminución de errores, aumentar la satisfacción y disminuir la frustración. [7]

Aunque la investigación en este campo es muy compleja, la recompensa una vez cumplido el objetivo es bastante gratificante; la importancia de diseñar sistemas efectivos, eficientes y

sencillos brindan la facilidad al usuario de disfrutarlo de mejor manera. La recompensa sería en el ámbito de la medicina y la ingeniería por ejemplo, la creación de utensilios que permitan a un equipo de cirujanos conceptualizar, alojar y monitorizar una cirugía laparoscópica integrando el mundo virtual con el físico. [7]

Existen estudios científicos de la interacción “hombre–máquina”. Uno de ellos realizado en Inglaterra desde 1949, es la ergonomía, el cual estudia la relación entre el hombre y su ambiente laboral. La interfaz “hombre – máquina” busca obtener el estado del proceso de una sola vez, teniendo como objetivo: [8]

- Que el observador capte la situación de forma rápida
- Toma de decisiones correctas
- Que los equipos se ocupen de manera óptima y segura
- Garantizar confiabilidad
- Cambiar los niveles de las tareas a realizar de manera fácil

Para que exista una interacción entre el hombre y la máquina es necesario que se tengan ejecuciones de mando, las cuales se pueden realizar por medios como sensores, pulsadores, potenciómetros, interruptores, teclados, pantallas táctiles, lápiz ópticos etc. Todos ellos con la finalidad de buscar la comodidad para el usuario, tomando en cuenta también las horas de operación del sistema y la cantidad de operadores, haciendo que las tareas sean fáciles y seguras.

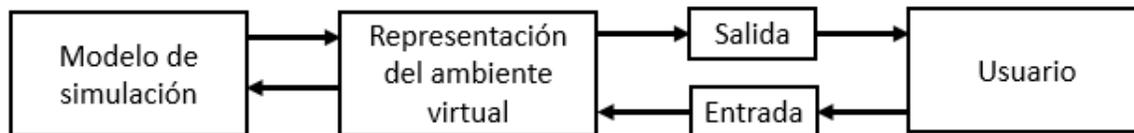
Un ejemplo de la interacción “hombre – máquina” se ve reflejado en un sistema de realidad virtual de entrenamiento para el robot Da Vinci, Mimic® (Figura 2). Este simulador de realidad virtual es ocupado para la formación de los cirujanos y la investigación en la plataforma del robot Da Vinci para mínima invasión. Dicho simulador de entrenamiento dV-Trainer entrena habilidades y destrezas básicas, por ejemplo, manipulación de instrumentos, control de cámara, sutura etc. Dicho simulador también ofrece retroalimentación objetiva al usuario en tiempo real; además, reduce costos de entrenamiento, costo de salas de operaciones reales y asistencia de personal calificado [9].



**Figura 2.** Simulador del robot Da Vinci Mimic®

### 2.3 Realidad virtual enfocada a la cirugía

Primero que nada debemos definir que es la realidad virtual (VR). La realidad virtual es una simulación tridimensional en la que se puede interactuar por medio de la computadora y con un dispositivo de entrada, mientras el usuario se siente introducido dentro del ambiente artificial y que a su vez es percibido de manera real por medio de los sentidos. En el siguiente esquema (Figura 3) se muestra un modelo de sistema de realidad virtual.



**Figura 3.** Modelo genérico de realidad virtual.

La tecnología hardware que llega a usar realidad virtual es:

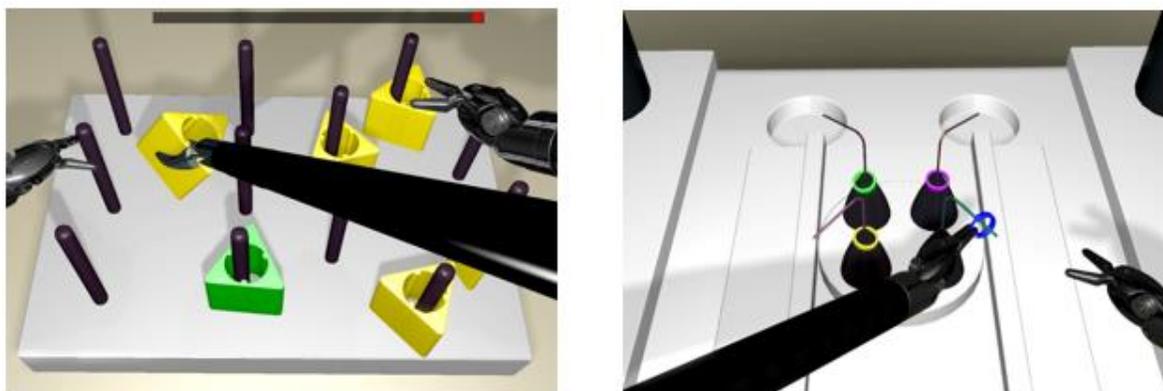
- Máquina de realidad: Máquina ya sea una computadora o estaciones de trabajo que generan modelos virtuales. [10]
- Dispositivos de entrada: Se puede clasificar en elementos de control como Joysticks 3D, mouse 3D, guantes y trajes de datos. En la otra clasificación se encuentran los rastreadores de posición y movimiento como acelerómetros y giroscopios.[10]
- Dispositivos de salida: Se clasifican en tres categorías, la primera es la de dispositivos virtuales como cascos visores, binoculares, lentes estereoscópicos y cuevas; la segunda son los dispositivos de sonido como cascos auditivos; la tercera son los dispositivos

hápticos, los cuales sirven para una manipulación táctil y sensaciones de fuerza de realimentación. [10]

Ahora, con los avances de la tecnología y la implementación de los gráficos computacionales en el campo de la medicina, la realidad virtual es una herramienta sumamente importante y con bastantes cosas que ofrecer, puesto que de una forma práctica y segura que se puede aprender, arriesgarse sin tener ningún problema por equivocarse empezando nuevamente la tarea realizada. La NASA y los ejércitos fueron los primeros en darse cuenta de la importancia y el potencial que tiene una tecnología como lo es la realidad virtual para formar a los astronautas y militares. Actualmente, hospitales y universidades aprovechan la RV para formar a excelentes profesionistas en diversas áreas, en este caso de la cirugía. Con el paso del tiempo, se han ido creando diversas aplicaciones de RV en la medicina, algunas de ellas, si no las más importantes se mencionan a continuación [11]:

- Docencia de estudiantes
- Entrenamiento de cirujanos
- Planificación quirúrgica
- Diagnóstico
- Rehabilitación física y psiquiátrica
- Estudio de emergencias y catástrofes

En esta tesis, nos enfocaremos de manera detallada en el entrenamiento de cirujanos, poniendo como habilidades y destrezas la manipulación de instrumentos laparoscópicos en diferentes tareas con el fin de que el cirujano se familiarice con la profundidad y la sensación de un entorno como lo es la realidad virtual (Figura 4).



**Figura 4.** Tareas virtuales para el manejo de habilidades laparoscópicas de los cirujanos.

## **2.4 Simuladores laparoscópicos de realidad virtual**

Los simuladores de realidad virtual poseen un manipulador con sensores el cual siempre se encuentra activo. Para este caso, los sensores son colocados en el instrumento laparoscópico. Los simuladores de realidad virtual reproducen desde tareas básicas hasta procedimientos quirúrgicos que son recreados a partir de gráficos por computadora. En estos dispositivos se modelan digitalmente la cámara endoscópica, las herramientas quirúrgicas, los órganos y los tejidos con los cuales entrena el cirujano. Algunos de estos sistemas proveen de retroalimentación sobre el desempeño del cirujano mediante calificaciones después de que realiza una tarea o prueba, otorgando alguna calificación numérica previamente clasificada y analizada por el sistema.

Cabe mencionar que el realismo del simulador se disminuye ya que estos dispositivos no poseen de una sensación táctil real; además de que carecen de una deficiencia en el momento de representar los órganos puesto que a veces no sangran o el material como hilo de sutura, o gasas se queda suspendido en el espacio. Existen diversos tipos de entrenadores ya usados en muchos hospitales del mundo, algunos de ellos se mencionarán a continuación.

### **2.4.1 LapMentor™**

Simulador laparoscópico LapMentor™ fue desarrollado por Symbionix Corp, EU. El sistema tiene como base la realidad virtual y sus principales tareas van desde muy básicas como el agarre, corte y transferencia de objetos hasta tareas complejas como el uso del electrocauterio; todo con el fin de adquirir práctica en la manipulación de las manos [12]. Además, la interfaz recrea el abdomen del paciente, los trocares y los pedales de coagulación y corte. Como algunos de los simuladores, este posee la característica de capacitar al cirujano en cuanto a la coordinación de manos-ojos, evalúa el tiempo total, longitud de la trayectoria, eficiencia o economía de los movimientos, velocidad promedio, precisión, riesgo de lesiones en tejidos, hemorragias entre otros (Figura 5).



**Figura 5.** Simulador LapMentor™

### **2.4.1.1 Xitact™ IHP**

La simulación de los trocares de los instrumentos en realidad virtual se realizan mediante la interfaz llamada Xitact™ IHP (Instrument Haptic Port) modelo LS500 VR (Figura 6), como su nombre lo dice, se tiene una sensación háptica de los instrumentos además de una retroalimentación de la fuerza en órganos y tejidos virtuales basado en una estructura mecánica-esférica. El sistema Xitact™ IHP cuenta con 4 GDL generados por un sistema PantoScope (movimiento híbrido, paralelo y serial) y el LinRot (movimientos lineales y rotativos), estos movimientos son capturados mediante sensores ópticos cuya resolución es 0.057 mm para movimiento lineal, 0.58 para rotación y 0.03° para pitch y yaw. [13]



**Figura 6.** Instrumento háptico Xitact™ IHP

### **2.4.2 LapSim®**

El simulador LapSim® permite al alumno aprender y practicar tareas básicas como la navegación, y otras tareas intermedias como la coordinación ojo-mano y navegación de diversas piezas geométricas, corte, engrapado, sutura, coordinación, sujetar, elevación y sujeción, precisión y velocidad, manipulación de intestino y disección [14]. Además, cuenta con módulos para practicar procedimientos quirúrgicos completos como colecistectomías, histerectomías entre otros (Figura 7).



**Figura 7.** Simulador LapSim®

#### **2.4.2.1 Virtual Laparoscopic Interface**

El sistema de captura que utiliza el simulador LapSim® es el Virtual Laparoscopic Interface. Este sistema no posee retroalimentación de la fuerza aplicada, cuenta con 4 grados de libertad (GDL) que son medidos a partir de transductores electromecánicos montados en cada mecanismo. La resolución de los sensores es 2mm para los movimientos lineales, 0.26° para rotación y 0.064° para pitch y yaw [13] (Figura 8).



**Figura 8.** Virtual Laparoscopic Interface.

### 2.4.2.2 Plataforma Simball 4D

Otro sistema que utiliza el simulador LapSim® es la plataforma Simball 4D. Este sistema está equipado con análisis de movimiento en 4D (ejes X, Y, Z, y rotación) usando el instrumento quirúrgico estándar. Posee retroalimentación en la velocidad, aceleración angular, distancia y suavidad de los instrumentos laparoscópicos.

Su mecanismo consiste en una esfera que permite 3 grados de libertad (GDL). La captura de la posición angular se realiza por medio de la esfera, mientras que la posición lineal se mide por medio de un potenciómetro lineal. En su interior lleva un láser en la superficie de la articulación que registra el movimiento del instrumento, formando de esta manera un patrón de puntos. Estas imágenes con patrones de puntos se van actualizando 100 veces por segundo (100Hz) analizando cada imagen hasta obtener la posición exacta de la esfera (Figura 9) [15]



**Figura 9.** Plataforma Simball 4D

### 2.4.3 Simulador LapVR™

El simulador LapVR™ (CAE Healthcare, Saint-Laurent, Quebec, Canadá) cuenta con dos instrumentos laparoscópicos, dos trocares, un pedal de electrocirugía y una cámara, todos ellos simulados, interactuando en su interfaz gráfica. Las tareas con las que cuenta dicho simulador son habilidades básicas y de procedimientos quirúrgicos por ejemplo, el módulo de cirugía general. Para su evaluación final, se requiere haber concluido todas las tareas solicitadas y algunos de los parámetros considerados para la evaluación del cirujano son el tiempo, trayectorias, errores al colocar clips, etc. (Figura 10) [3]



**Figura 10.** Simulador LapVR™

#### 2.4.4 MIST-VR™

Este simulador laparoscópico experimental fue diseñado por The Royal College of Surgeons of England con la finalidad de evaluar las destrezas manuales del cirujano. Tiene la ventaja de poder adaptar los instrumentos para diferentes procedimientos quirúrgicos como suturas con nudo intracorpóreo, corte y disección, etc. Una de las principales tareas de este simulador es la colecistectomía laparoscópica (Figura 11). [12]



**Figura 11.** Simulador MIST-VR™

## 2.5 Sistemas para captura y registro de la actividad de los instrumentos quirúrgicos

Actualmente, existen tecnologías que proporcionan la manera de capturar y registrar métricas cuando se usan los simuladores de realidad virtual. Estas se realizan mediante el seguimiento de los instrumentos laparoscópicos. La medición de parámetros cuantitativos se realiza mediante sistema de captura por sensores que son adaptados en las articulaciones del mecanismo o bien en el instrumental laparoscópico real. Los sensores miden los movimientos generados por las herramientas durante la ejecución de la tarea en el simulador de realidad virtual. En la mayoría de los sistemas de captura se registra la posición x, y, z y la orientación (pitch, roll, yaw) de los instrumentos laparoscópicos. Según Fried et al., las métricas se pueden clasificar en dos categorías: métricas de eficiencia y métricas de calidad [16]. Las **métricas de eficiencia** están relacionadas con los parámetros físicos que pueden ser medibles y requieren de dispositivos de seguimiento lo que genera un error pequeño o casi nulo en su interpretación. Las **métricas de calidad** hacen referencia a la definición y ejecución de una tarea, aun que va relacionada con el rendimiento, el comportamiento y las habilidades que cada usuario desempeña ninguna de estas se puede medir adecuadamente ya que varía dependiendo de la persona, por lo que este tipo de métricas son esenciales para ser tomadas en cuenta a la hora de la medición [16].

Para el caso de las métricas de eficiencia, las tareas consideradas como las más prominentes son el tiempo y la longitud de trayectoria del instrumento. Un razonamiento estipulado detrás de las pruebas es que un cirujano experto realiza la tarea con mayor rapidez y con movimientos cortos; además de que tiene más clara la percepción del espacio de trabajo y en enfoque estético requerido a comparación de un novato.

Algunos investigadores han demostrado que la velocidad de los movimientos también puede ser un factor importante aunque no ha sido debidamente explotado aún. Por otro lado, la economía de los movimientos la cual tiene una relación con la desviación de la trayectoria óptima es también otra métrica importante, aunque muy cuestionada por el aspecto de no tener una trayectoria óptima para cada tarea, puesto que eso sería sumamente imposible. La suavidad de movimiento también se reporta como otro factor determinante por ejemplo agarre de los objetos, transferencia de los mismos entre otros. Otras métricas también consideradas van relacionadas con el cirujano novato y es la orientación del instrumento ya que no todos los cirujanos toman el instrumento de la misma manera, lo que lleva a tener una lectura diferente debido a que el punto de partida respecto a las coordenadas va a cambiar.

Las tareas de sutura son pruebas para medir la fuerza aplicando magnitudes de fuerza/par, más recientemente se detectan fuerzas de tejido/instrumento mediante la presión. Ahora los simuladores de realidad virtual cuantifican los daños en los tejidos mediante la detección de colisiones [16]. Una vez que se ha definido el entorno de entrenamiento y las métricas a registrar ahora la tarea es tomar la decisión de cómo registrar dichas métricas. La aplicación de tecnologías o programas que evalúen la capacidad del médico pueden ser del tipo óptico, electromagnético, mecánico, ultrasónico entre otras, siendo estos configurados en simuladores reales o de realidad virtual mediante una conexión con algún microcontrolador o microprocesador.

### 2.5.1 Sistemas de rastreo con realidad virtual

Hay algunos simuladores que se concentran en la enseñanza de habilidades psicomotoras en lugar de tareas anatómicas complejas. Es por ello que algunos de los simuladores de realidad virtual se diferencian dependiendo de los recursos que empleen para el entrenamiento del cirujano. Cuando se habla de simuladores que evalúan las habilidades psicomotoras se tienen beneficios como:

- La **adquisición de eficiencia**, esto es movimiento y métricas de calidad incluyendo el control de los instrumentos y los elementos del escenario. Todo ello se logra gracias a la integración de diversas tecnologías de seguimiento y entornos creados en la computadora. [16]
- Proporcionar **información inmediata** al usuario, lo que conlleva a mejorar el proceso de aprendizaje. [16]

En general, los simuladores de realidad virtual son herramientas para la formación de habilidades en sus primeras etapas del cirujano; además son elementos complementarios válidos para la formación y acreditación del médico cirujano a pesar de que el realismo y el costo de estas herramientas aún sean variables.

## **2.6 Requerimientos técnicos para el prototipo de simulador laparoscópico**

El prototipo de simulador de la presente tesis, en comparación de los mencionados anteriormente, debe poseer una pinza laparoscópica original y la simulación de la misma en el entorno virtual, permitir 4 grados de libertad así como la apertura y cierre del instrumento. En cuanto a las dimensiones, el simulador debe ser portátil lo cual es muy importante ya que los simuladores anteriores no tienen esa ventaja y el cirujano debe ir a la estación donde se encuentra instalado el equipo, ocasionando que estos no sean usados con frecuencia.

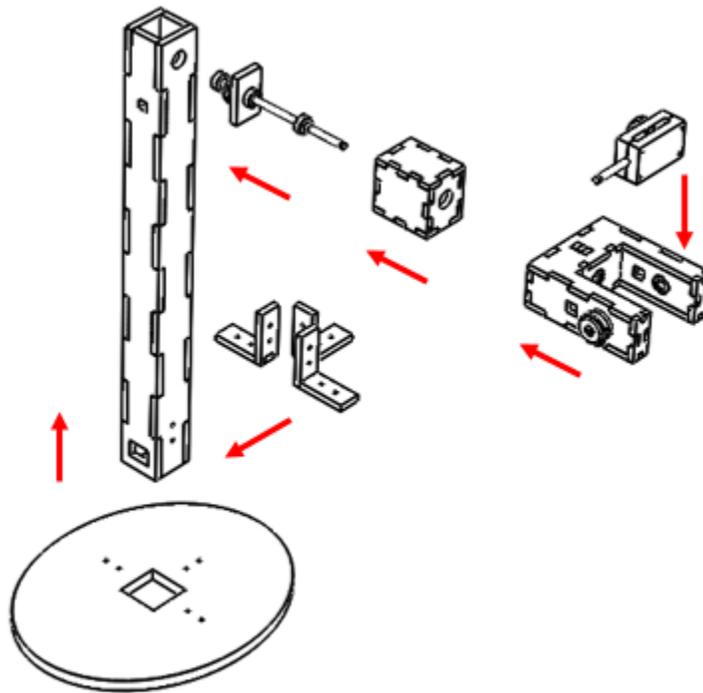
Además, el simulador debe permitir una fácil conexión a computadoras personales para la interacción con la interfaz gráfica para su uso, y fácil calibración con una posición inicial antes de empezar las tareas, con una precisión adecuada para tener una interacción con la realidad virtual.

## Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se describe el proceso de diseño mecánico de cada una de las partes que conforman al simulador laparoscópico, el montaje de los sensores en el mecanismo y la conexión de los codificadores con Arduino para la lectura posterior de los datos. Se muestra el diseño de los objetos para el ambiente en la realidad virtual del simulador laparoscópico que fueron usados para las tareas realizadas en Unity.

### 3.1 Diseño mecánico

El diseño mecánico se muestra en la figura 12 con una explosión y cada grupo de piezas que forman el mecanismo para el simulador laparoscópico y el sentido en el que son montadas cada una de las partes. Los planos de diseño de cada sección se encuentran en el **Apéndice I**.

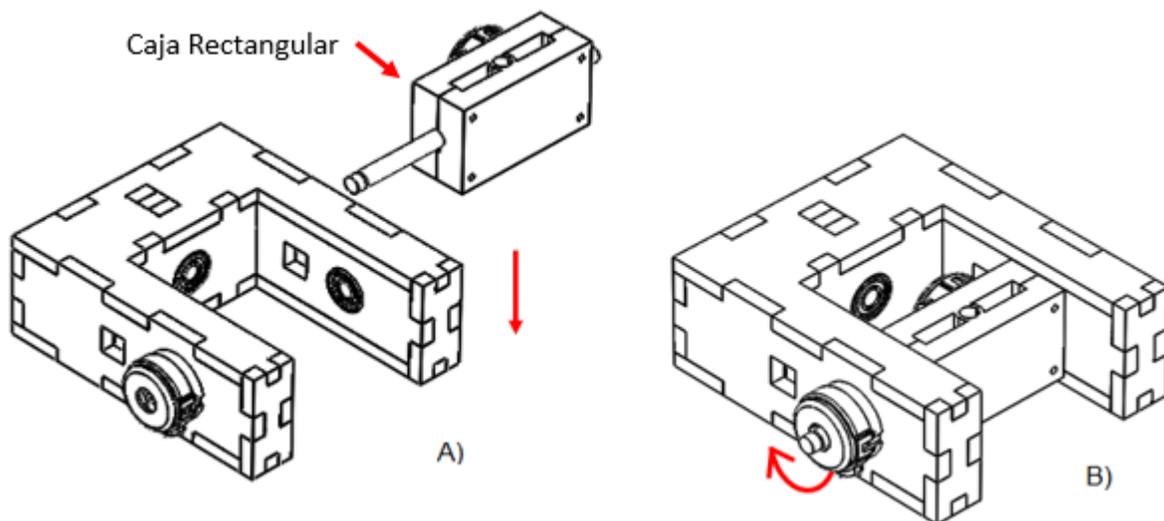


**Figura 12.** Explosión del mecanismo para el simulador laparoscópico.

En el prototipo de simulador laparoscópico se consideró una altura de la torre de 40 cm para que el cirujano pueda manipular el instrumento quirúrgico fácilmente, colocándose enfrente de la

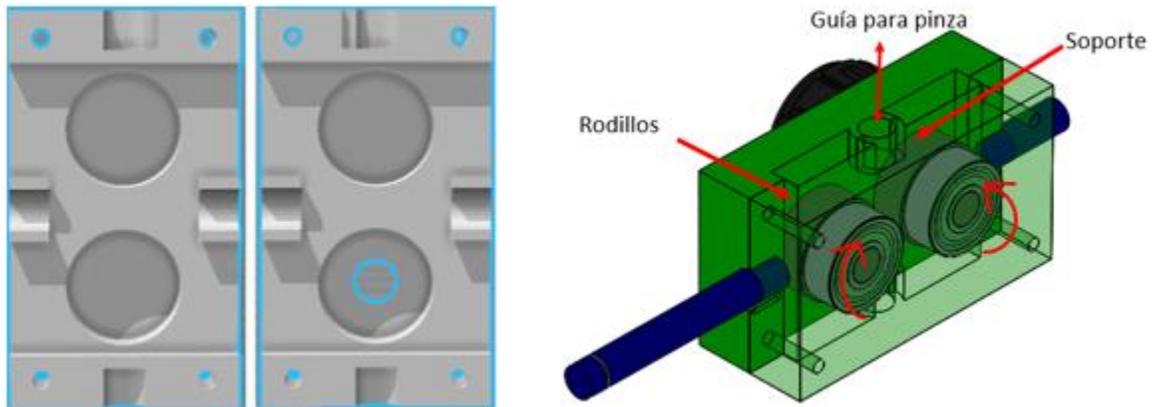
estructura. El material para construir la misma fue de acrílico cortado en láser. El mecanismo está conformado por 3 grados de libertad (GDL), que son: derecha / izquierda, arriba / abajo, y adelante / atrás.

El primer grado de libertad del mecanismo es el derecha / izquierda o también llamado alabeo. El movimiento es generado mediante una caja rectangular montado en otro objeto en forma de “C” que tiene internamente dos rodamientos con diámetro interno de 5mm de lado izquierdo y derecho, además cuenta con dos flechas que están montadas en cada uno de los rodamientos, con longitudes de 37 mm y 15.50 mm, respectivamente, que permitirán montar el segundo grado de libertad. En la figura 13A, se muestra el montaje la caja que implica el segundo grado de libertad y en la figura 13B se muestra el giro del primer grado de libertad.



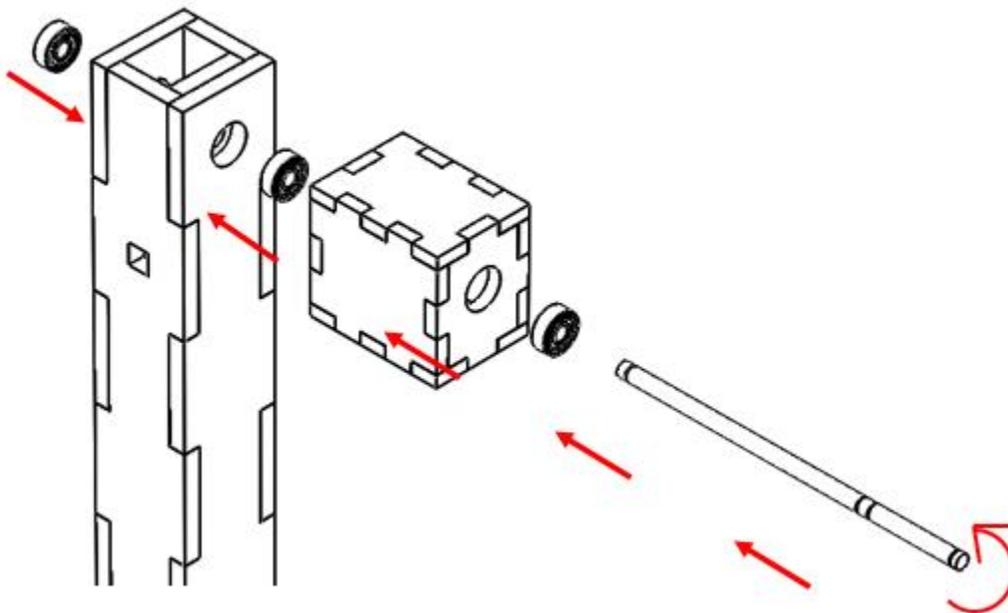
**Figura 13.** 1er grado de libertad “derecha / izquierda” o alabeo.

El segundo grado de libertad se encuentra en la caja rectangular del mecanismo. Esta pieza a excepción de las otras se fabricó con impresión 3D usando PLA como material de deposición. Esta pieza se conforma de dos partes unidas por tornillos y tuercas. Sobre ambas piezas, se colocó un sistema de rodillos y la pinza laparoscópica entre una guía cuyo diámetro es de 5 mm con el fin de impedir un movimiento lateral y que los rodillos aprieten el eje tomando de esta manera la lectura respectiva del movimiento (Figura 14).



**Figura 14.** Impresión en 3D del 2do grado de libertad, “adentro / afuera” o cabeceo

El tercer grado de libertad contemplado en el mecanismo es el movimiento arriba / abajo o guiñada. Este grado de libertad se encuentra en la parte inicial de la torre y cuenta con tres rodamientos de 5mm de diámetro interno, dos de ellos están colocados en la parte principal de la torre y el otro en el cubo posterior a la torre los cuales permitirán el giro de la flecha cuya longitud es de 128.30 mm (Figura 15).



**Figura 15.** 3er grado de libertad “arriba / abajo” o guiñada

## 3.2 Instrumentación electrónica

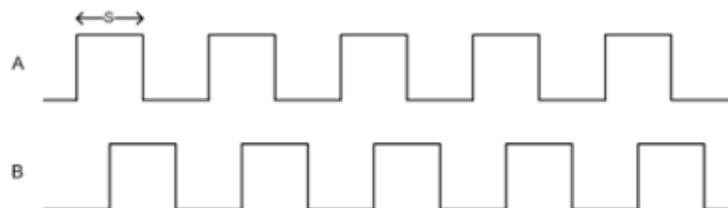
### 3.2.1 Sensores: Codificadores ópticos

El método para la captura de cada movimiento o grado de libertad en el simulador laparoscópico se llevó a cabo a partir de 5 codificadores ópticos digitales E4T US Digital de 400 a 2000 pulsos por revolución (PPR), (Figura 16).



**Figura 16.** Codificador óptico digital E4T de la compañía US Digital.

El codificador óptico es un transductor rotativo que por medio de una señal eléctrica, generalmente un pulso, indica el ángulo. Este codificador óptico se encuentra en la clasificación de codificador incremental ya que transmite un pulso por cada ángulo de giro. El inconveniente es que no se dispone de una referencia absoluta de la posición donde se encuentra el eje. Para determinar el ángulo de giro, se cuenta el número de flancos de subida o bajada generados en un canal en este caso la señal A, mientras que la dirección vendrá determinada en cada pulso por el estado del otro canal, en este caso la señal B [17] (Figura 17). Del canal A al canal B el sentido de giro es en sentido horario, mientras que del canal B a canal A la rotación es en sentido antihorario.



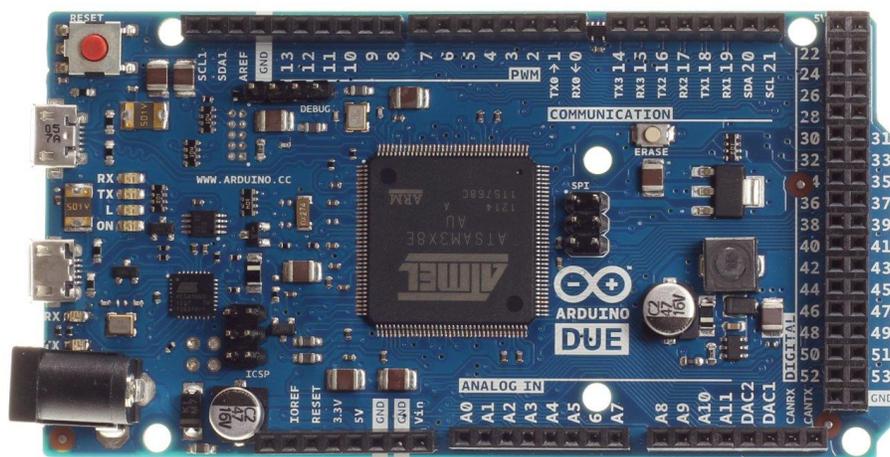
Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
Symmetry, S	105	180	255	electrical degrees
Quadrature Delay, Q	30	90	150	electrical degrees

**Figura 17.** Ángulo de giro del codificador óptico E4T.

Los valores mostrados en la tabla anterior representan el rendimiento del codificador óptico E4T en su montaje típico, mientras que los valores máximos representan toda la gama de tolerancias de montaje recomendadas. Las especificaciones más detalladas del codificador óptico E4T se encuentran en el **Apéndice II**.

### 3.2.2 Arduino DUE

La conexión y lectura de los 5 codificadores ópticos E4T se realizó por medio de la tarjeta Arduino DUE (Figura 18). Para obtener automáticamente las señales derivadas de los codificadores ópticos, se programó las interrupciones del puerto 22 al 31 del dispositivo. De esta manera, se capturan las señales dentro del dispositivo Arduino DUE, permitiendo que realice otra actividad sin perder la entrada o la señal siguiente de los codificadores [18]. Las especificaciones detalladas de la tarjeta DUE se encuentran en el **Apéndice II**. En el proyecto, se empleó la librería *Encoder.h* de Arduino para que cada uno de los sensores pueda ser llamado mediante código y muestren su lectura en el monitor serial.



**Figura 18.** Tarjeta de desarrollo Arduino DUE

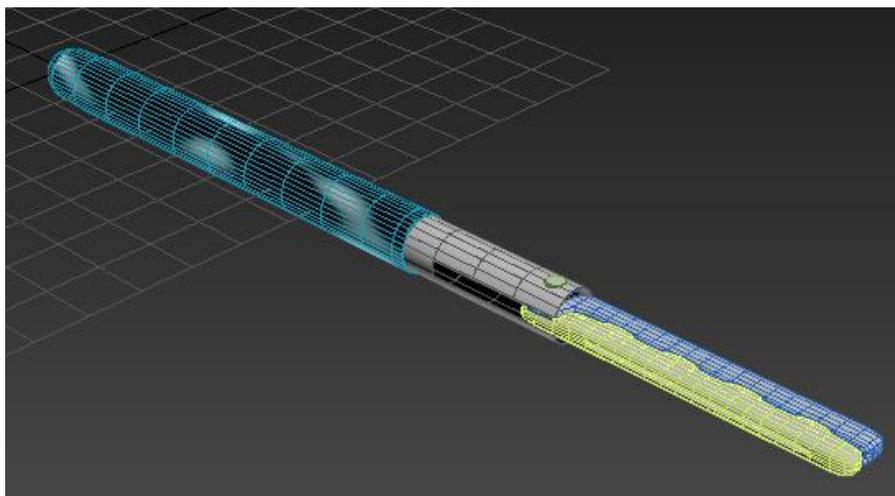
Para el almacenamiento de los datos que se van generando de cada uno de los codificadores durante el movimiento del instrumental laparoscópico, se utilizó un módulo MicroSD (Figura 19) para Arduino, el cual se conectó a la entrada SPI de la tarjeta Arduino DUE. En el programa, se empleó la librería *SD.h* y *SPI.h* para comunicar el módulo MicroSD. Las especificaciones del módulo se encuentran en el **Apéndice II**.



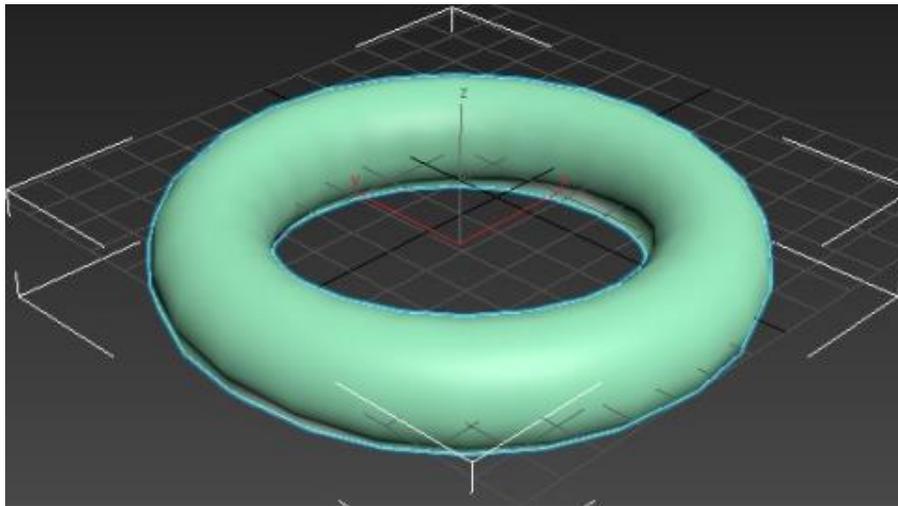
**Figura 19.** Módulo MicroSD para Arduino

### 3.3 Diseño de los objetos y Realidad Virtual

El diseño de la pinza laparoscópica y los toroides o aros que se usaron para la tarea del simulador se dibujaron en el software llamado 3DMax. Una vez terminado el diseño, se exportaron en formato .FBX para que pudieran ser importados en el ambiente de realidad virtual Unity como objetos. Las figuras 20 y 21 muestran el desarrollo de los componentes de la pinza laparoscópica y de un toroide o aro que sirve para la tarea del simulador, respectivamente. El diseño de las tareas de entrenamiento del simulador laparoscópico se realizó a partir de la plataforma de desarrollo en realidad virtual Unity, programando cada objeto creado anteriormente en el entorno para que realice las tareas específicas mediante diversos códigos de programación.



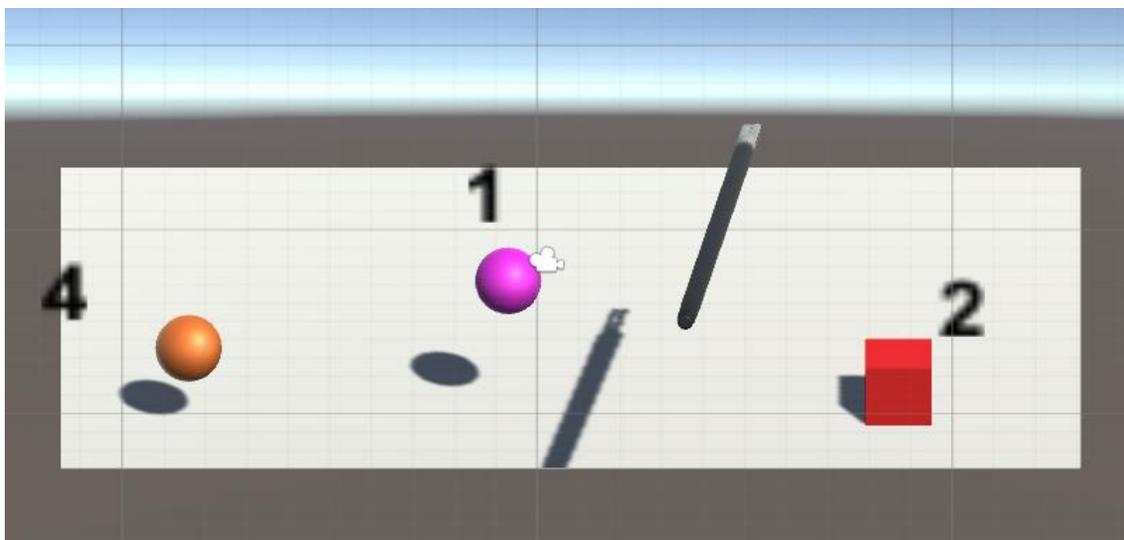
**Figura 20.** Diseño de pinza laparoscópica en 3DMax



**Figura 21.** Toroide diseñado en 3DMax

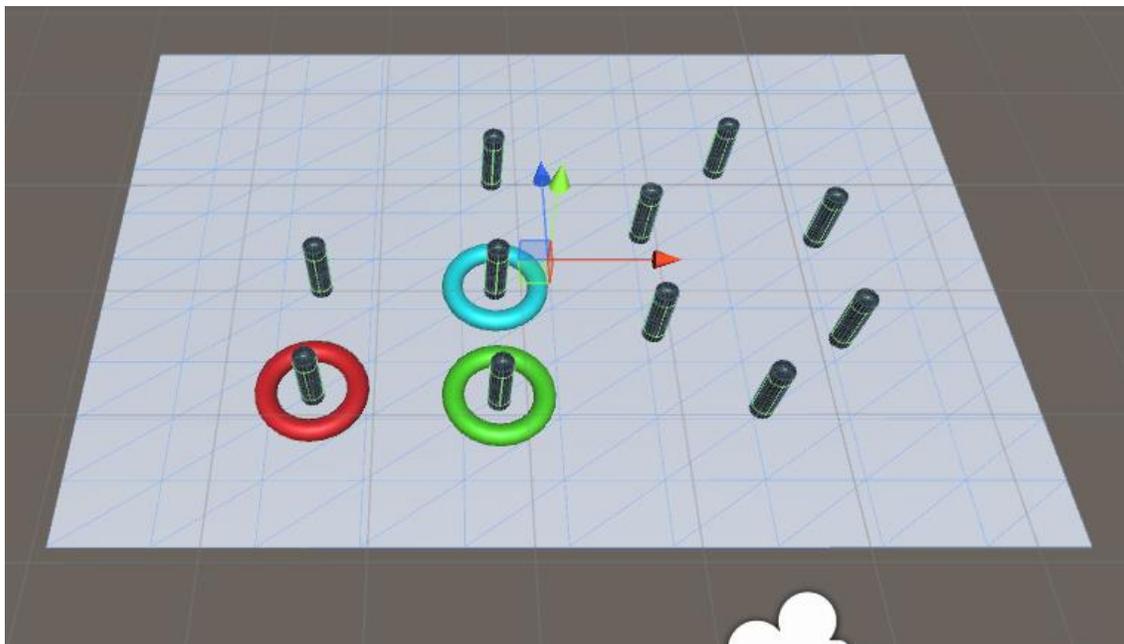
### 3.3.1 Diseño de las tareas para el simulador laparoscópico

La primera tarea que se programó fue el ejercicio de ubicación espacial. Esta consiste en tocar los objetos, colocados en diferentes posiciones y alturas, con el instrumento laparoscópico virtual para que desaparezcan dentro del espacio de trabajo (Figura 22).



**Figura 22.** Tarea 1 del simulador laparoscópico: Ubicación espacial

La segunda tarea que se programó corresponde al ejercicio de transferencia de objetos (aros) de acuerdo con el protocolo de entrenamiento MISTELS [19]. Esta tarea consiste en trasladar los aros de un poste al otro tratando de generar la menor cantidad de movimientos posibles y de no tirar ninguno de los aros fuera del área de trabajo (Figura 23).



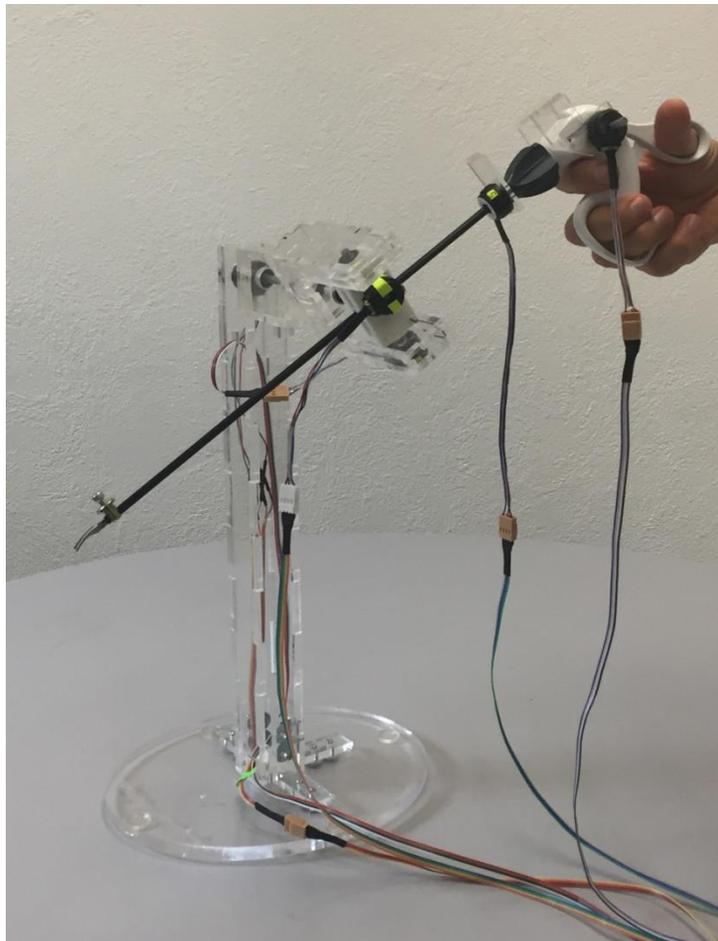
**Figura 23.** Tarea 2 del simulador laparoscópico: Transferencia de objetos.

## Capítulo 4. Pruebas y Resultados

En este capítulo, se explica como se obtuvo la resolución y la linealidad de cada uno de los codificadores ópticos con su respectivo movimiento, así como algunas pruebas de funcionamiento con los estudiantes de medicina y los cirujanos.

### 4.1 Diseño mecánico final

El diseño mecánico final del simulador laparoscópico permite 5 grados de libertad (GDL), los cuales son: 1) derecha / izquierda o alabeo, 2) adentro / afuera o cabeceo, 3) arriba / abajo o guiñada y 2 movimientos en el instrumento que son el giro de la punta sobre su propio eje así como la apertura / cierre de la punta de la pinza. El mecanismo con el instrumento laparoscópico convencional previamente instrumentado con la electrónica se muestra en la Figura 24.



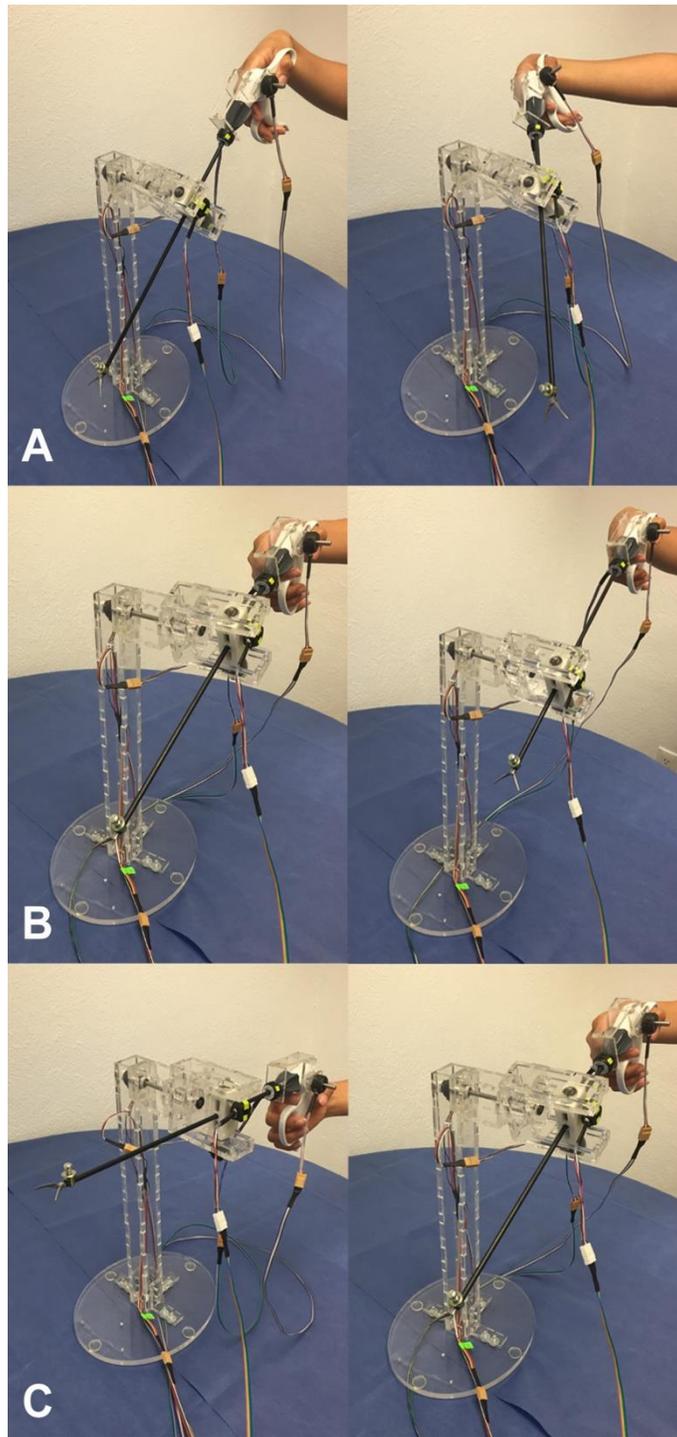
**Figura 24.** Mecanismo final con la pinza laparoscópica *Maryland* para el simulador.

## **4.2 Pruebas del simulador laparoscópico**

### **4.2.1 Pruebas de los sensores**

Para obtener la resolución y linealidad en la captura de cada uno de los codificadores ópticos montados sobre el mecanismo y en el instrumental, se realizaron una serie de pruebas técnicas con el simulador laparoscópico. Se trazó una línea recta de 80 mm, y se realizaron diez movimientos continuos con la pinza laparoscópica de un punto inicial (A) a un punto final (B) sobre la línea dibujada para cada uno de los grados de libertad: derecha / izquierda, arriba / abajo, y adelante / atrás, que corresponden a los sensores 1,2 y 3. Un ejemplo de estos movimientos se muestra en la figura 25.

En el caso de la apertura y cierre de la pinza, se realizó 10 movimientos abriendo y cerrando el efector final sobre su línea recta de 30 mm que corresponde al sensor 4. Finalmente para el sensor 5 se giró el instrumento sobre su propio eje dándole 10 vueltas de un punto inicial (A) a un punto final (B). Después, se realizó el análisis de los valores máximos y mínimos de los pulsos obtenidos de cada trayectoria en cada grado de libertad (GDL) para obtener la resolución correspondiente. Con estas pruebas se visualizaron los errores en la captura de movimiento del instrumento laparoscópico con la articulación mecánica.



**Figura 25.** Grados de libertad de la articulación mecánica: **A)** derecha / izquierda, **B)** adentro / afuera y **C)** arriba / abajo.

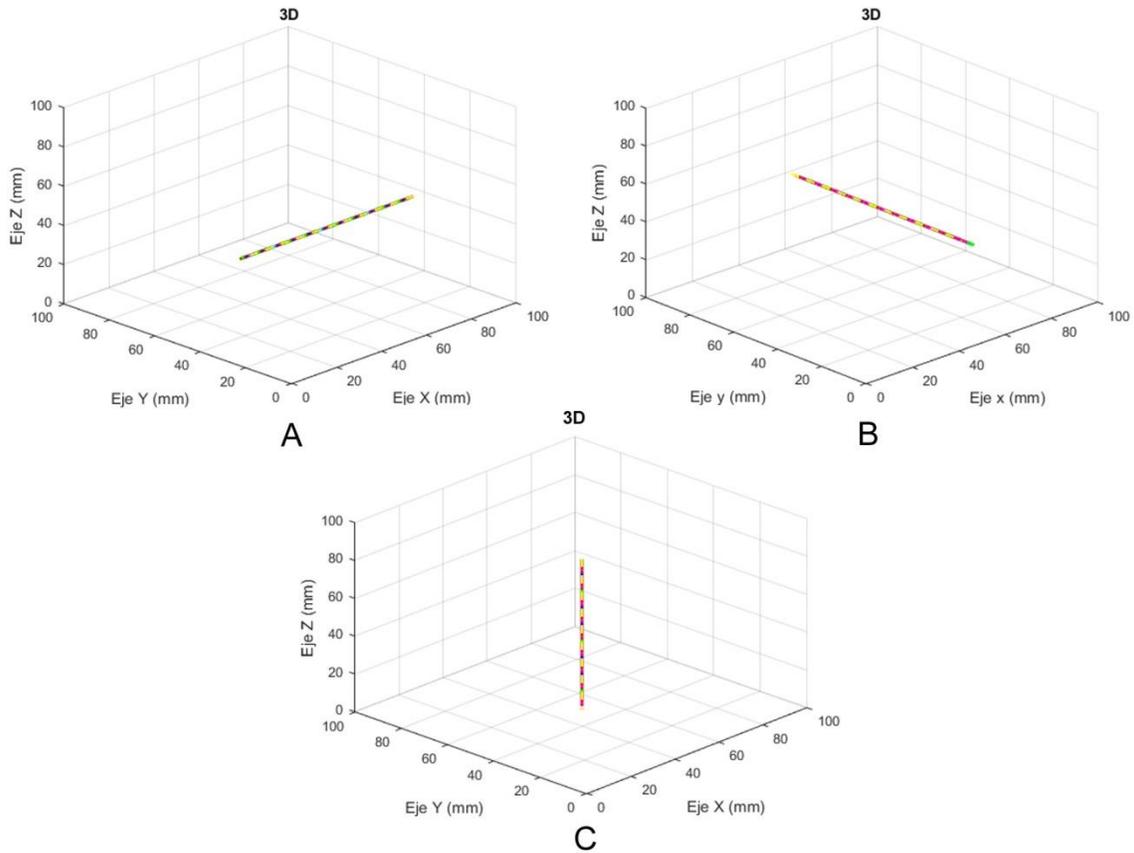
#### 4.2.2 Resolución de los sensores

Para el caso del grado de libertad derecha / izquierda con el sensor 1, se obtuvo un promedio en los registros de 45 pulsos para una distancia de 80 mm. En el grado de libertad adentro / afuera con el sensor 2, se registró un promedio de 45 pulsos con una distancia de 80 mm y para el tercer grado de libertad arriba / abajo con el sensor 3 se registró un promedio de 68 pulsos para una distancia de 80 mm. Para el caso de la apertura y cierre en la punta de la pinza (sensor 4), se registró un promedio de 20 pulsos para una distancia de apertura de 30 mm, mientras que el giro del instrumento laparoscópico sobre su propio eje se obtuvieron un promedio de 1400 pulsos (sensor 5). La tabla 1 muestra los resultados finales de la resolución de los sensores colocados en la articulación mecánica así como en el instrumental laparoscópico del simulador.

**Tabla 1.** Resolución de los codificadores ópticos montados en el simulador laparoscópico.

<b>GDL</b>	<b>mm / pulso</b>
Derecha / Izquierda	1.77
Arriba / abajo	1.17
Adentro / afuera	1.77
Abrir / cerrar	1.5
<b>GDL</b>	<b>Grados / pulso</b>
Giro sobre su propio eje	0.25

Como resultado de la resolución de los sensores, la figura 26 muestra los movimientos realizados por la pinza laparoscópica en los tres principales grados de libertad que permite la articulación mecánica del simulador laparoscópico. La figura muestra la linealidad así como la repetibilidad en cada uno de los movimientos registrados con el simulador, sin presentar errores sistemáticos durante la trayectoria o errores aleatorios que se encuentren fuera de las líneas presentadas en las gráficas.

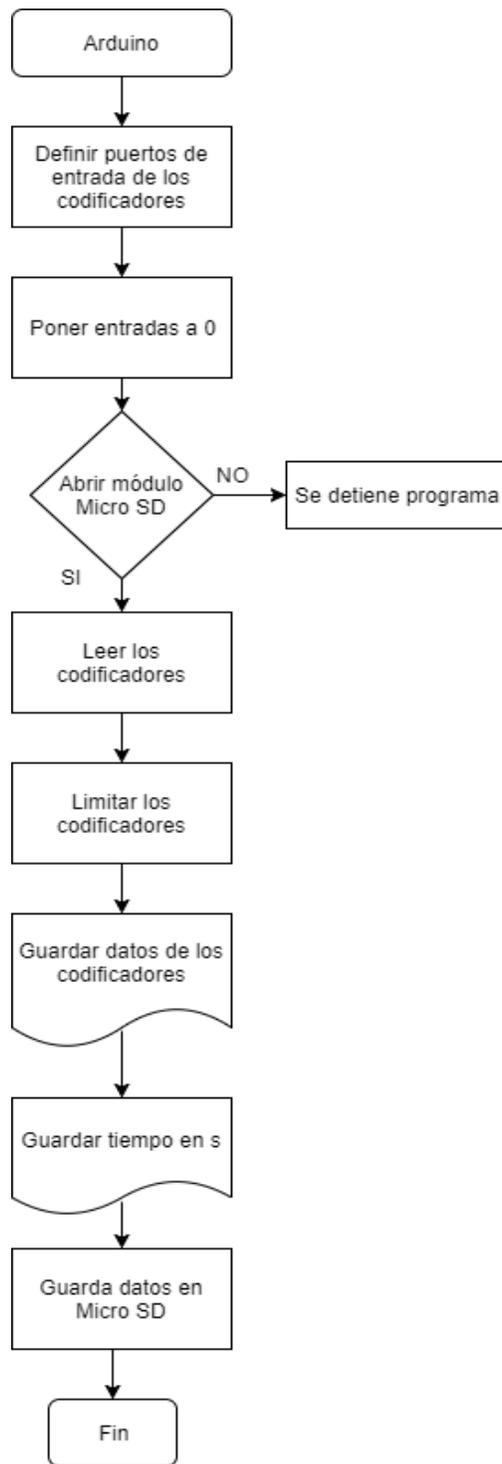


**Figura 26.** Resultado de calibración y resolución de los tres principales grados de libertad: **A)** GDL derecha / izquierda, **B)** GDL adentro / afuera y **C)** GDL arriba / abajo.

## 4.3 Programación del simulador laparoscópico

### 4.3.1 Programación de sensores en la tarjeta Arduino

El control de los codificadores ópticos digitales se realizó mediante la programación de todos ellos en la IDE de Arduino. Cada uno lleva un mapeo determinado que limita los movimientos en el entorno virtual de Unity y de esta manera se pueda registrar cada movimiento de manera específica. En la figura 27 se muestra el diagrama de flujo del control de los codificadores ópticos, en ella se ven declaradas las entradas de cada uno de los sensores, así como la calibración de ellos para realizar los movimientos adecuados en el entorno gráfico virtual, además permite mandar a llamar el archivo en el que van a ser grabados los datos de movimiento de cada uno de los codificadores y el tiempo final en el que realizaron la tarea. El código fuente se muestra en el **Apéndice III**.



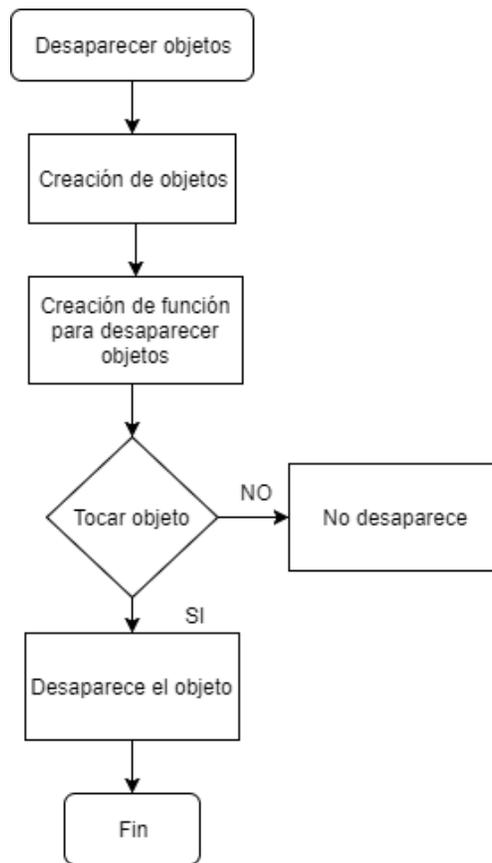
**Figura 27.** Diagrama de flujo de los codificadores ópticos realizado en la IDE de Arduino.

### 4.3.2 Programación de las tareas del simulador con Unity

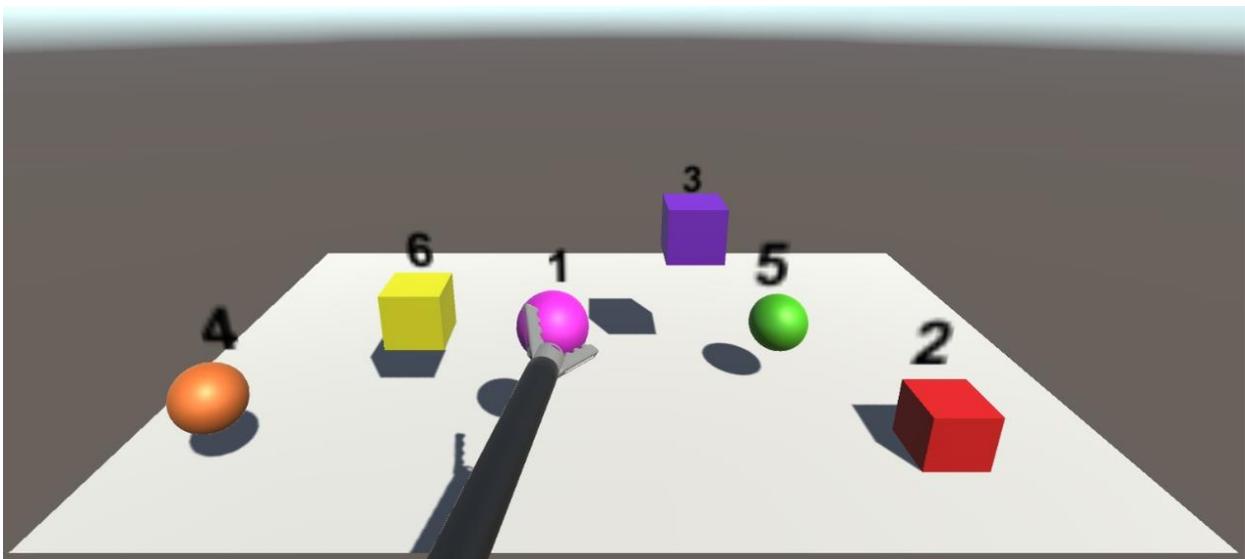
La programación de la tareas en Unity se crearon mediante diferentes *scripts* en C# que interpretan movimientos específicos de los objetos en cada una de las tareas. La figura 28 muestra el diagrama de flujo del código principal con el que se hace la comunicación interfaz Arduino – Unity, así como los movimientos básicos de la pinza. El código fuente se encuentra en el **Apéndice III**. Para el caso de la Tarea 1 Ubicación Espacial se programó un script basado en Colliders, para desaparecer cada una de las figuras una vez que son tocadas con la punta de la pinza laparoscópica virtual. El diagrama de flujo del programa de esta tarea se muestra en la figura 29, el código fuente se encuentra en el **Apéndice III** y en la figura 30 se muestra la tarea ya finalizada con la pinza laparoscópica virtual.



**Figura 28.** Diagrama de Flujo de la comunicación Arduino – Unity y movimientos básicos de la pinza

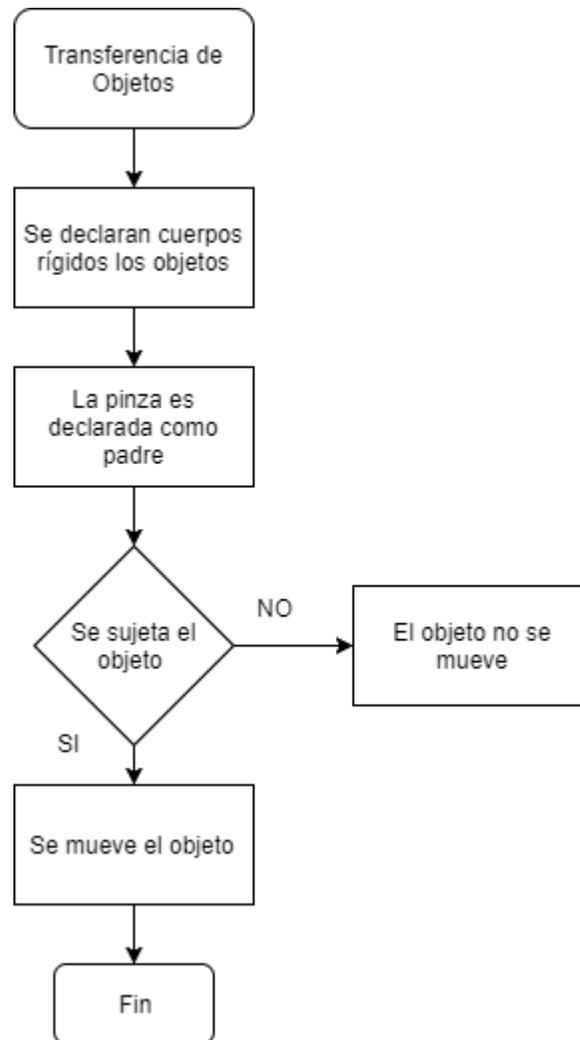


**Figura 29.** Diagrama de flujo para desaparecer objetos en Unity

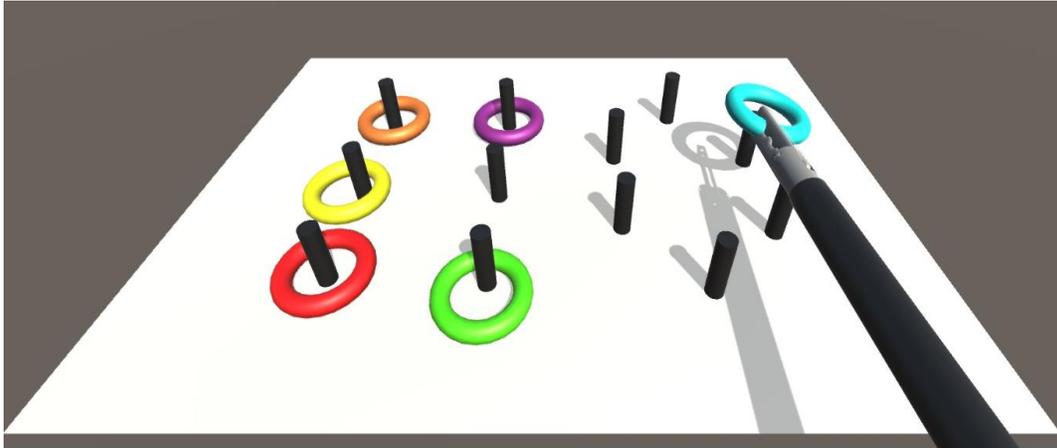


**Figura 30.** Tarea 1 Ubicación espacial en la versión final.

En el caso de la Tarea 2 Transferencia de objetos, se programó un script diferente que permite mover e interactuar con los aros virtuales y la pinza laparoscópica virtual para la transferencia de los mismos de una serie de postes hacia otra. El diagrama de flujo de esta tarea se muestra en la figura 31. El código fuente se encuentra en el **Apéndice III**. Finalmente, la figura 32 muestra las tarea de Transferencia de objetos ya terminadas con la pinza laparoscópica virtual en Unity.



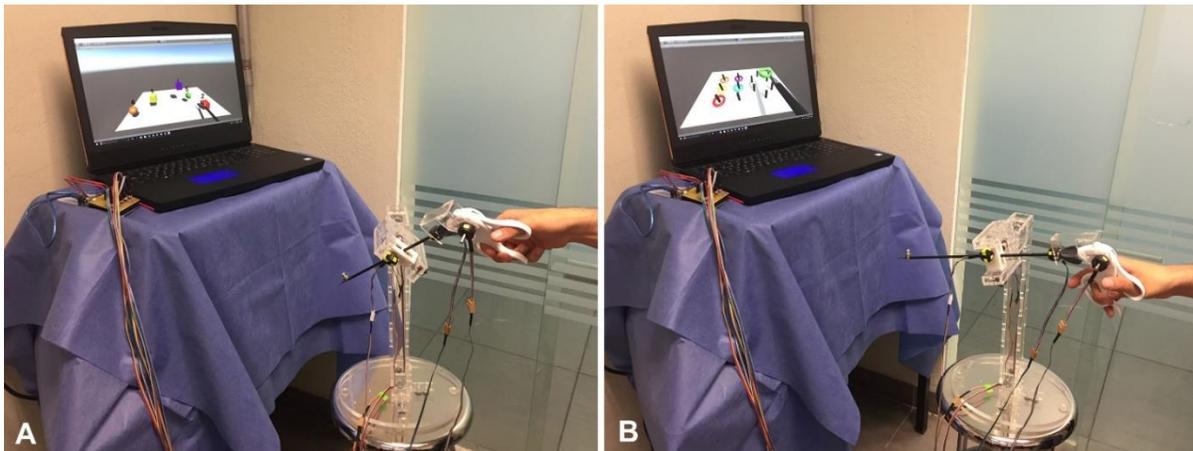
**Figura 31.** Diagrama de flujo de la tarea de transferencia de objetos en Unity



**Figura 32.** Tarea 2 Transferencia de objetos en la versión final

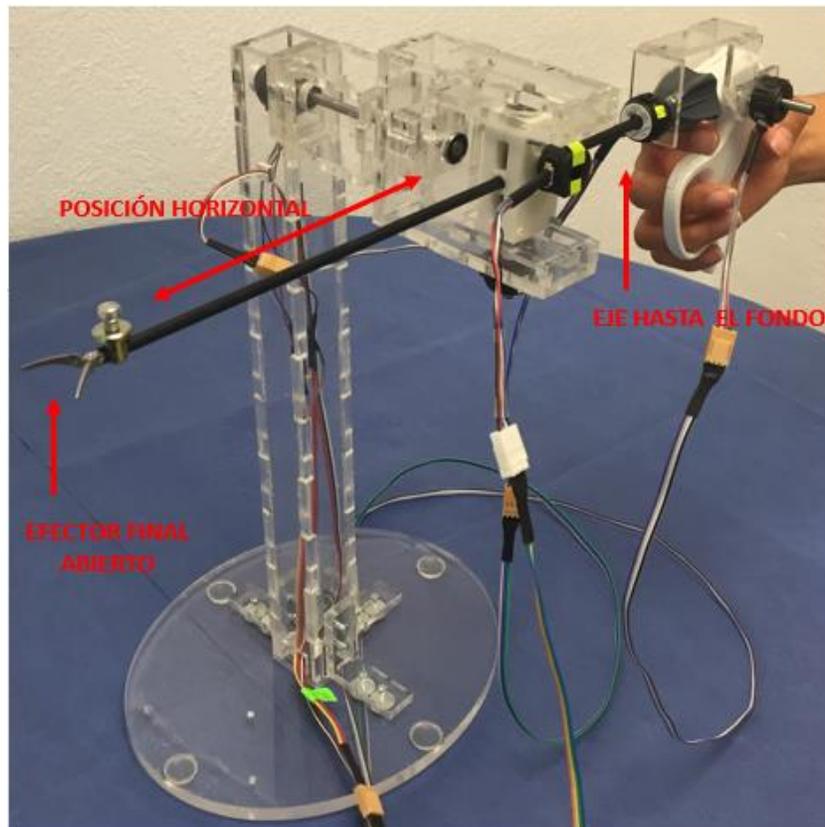
#### 4.4 Pruebas y resultados del simulador laparoscópico con cirujanos

Para las pruebas de funcionalidad, se invitó a participar a 10 estudiantes de medicina y 2 profesores con especialidad en cirugía general del Departamento de Cirugía de la Facultad de Medicina de la UNAM. Los participantes realizaron las dos tareas básicas del simulador laparoscópico: Ubicación espacial y Transferencia de objetos. La tarea de Ubicación espacial consistió en tocar con la punta del instrumento cada uno de los objetos virtuales hasta que desaparezcán de la pantalla siguiendo el orden específico (Figura 33A). La tarea de transferencia de objetos consistió en tomar cada uno de los aros de una serie de postes y transferirlos en orden a una segunda serie de postes en el lado opuesto (Figura 33B).



**Figura 33.** Simulador laparoscópico con realidad virtual durante las pruebas de funcionalidad en el Departamento de Cirugía, Facultad de Medicina, UNAM. **A)** Tarea 1. Ubicación espacial, **B)** Tarea 2. Transferencia de objetos.

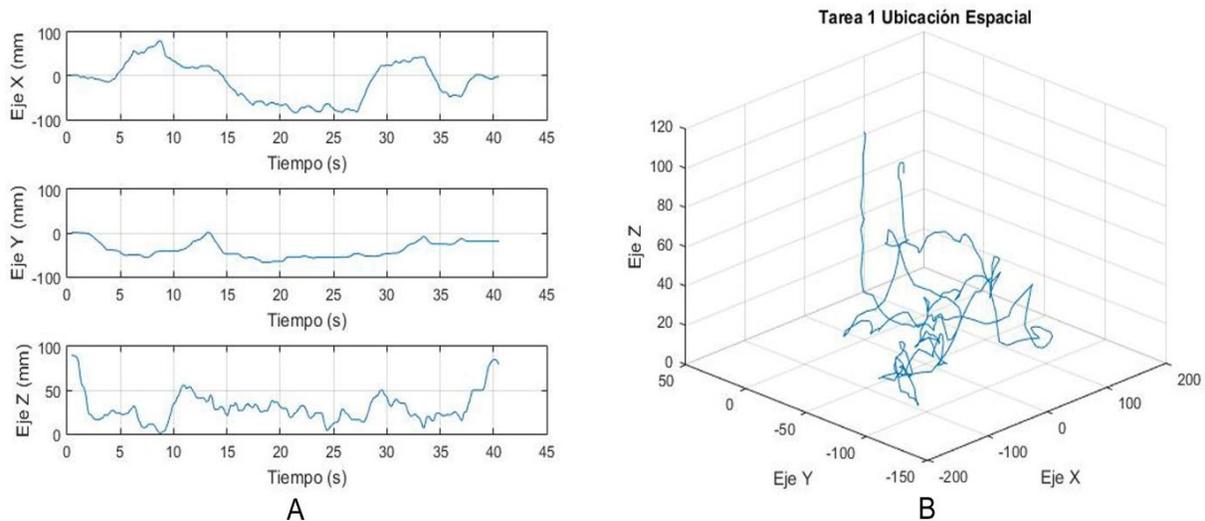
Antes de comenzar con estas tareas, todos los participantes fueron instruidos en como debían realizar cada una de las tareas y se les permitió interactuar con el simulador para que se fueran familiarizando. Para iniciar con las tareas, a todos los participantes se les explicó la posición de inicio colocando el instrumento laparoscópico en una posición horizontal, con el eje totalmente hasta el fondo y con el efector final, es decir la punta de la pinza, totalmente abierta como se muestra en la figura 34.



**Figura 34.** Posición del instrumental laparoscópico para iniciar con las tareas virtuales.

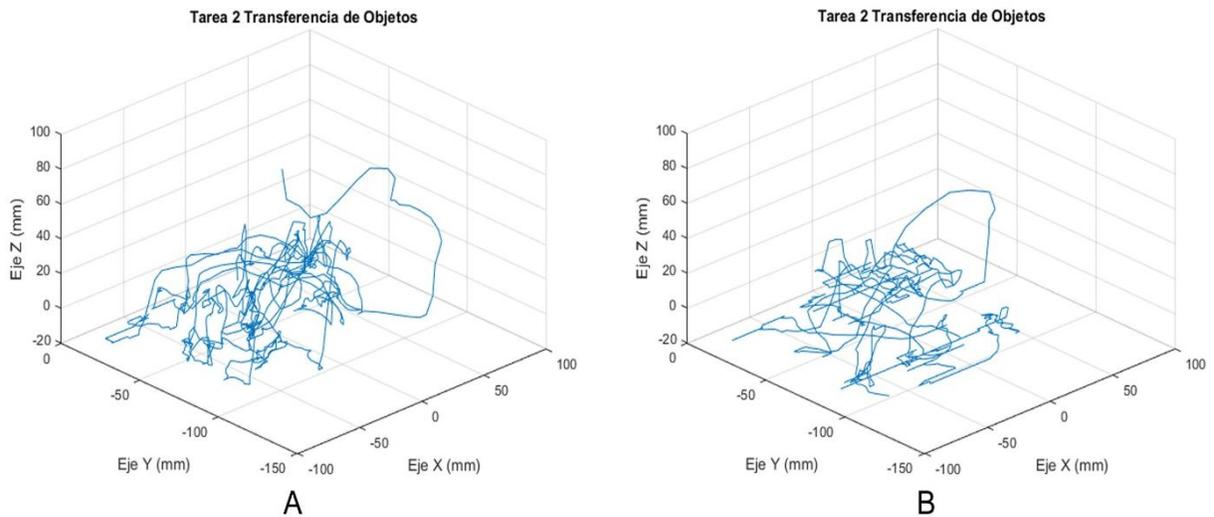
Después de que los estudiantes de medicina y los cirujanos se familiarizaron con el entorno virtual y con el mecanismo, se procedió a la práctica con el simulador laparoscópico y las tareas virtuales. Al mismo tiempo, se capturó el movimiento del instrumento en ambas tareas con el simulador para visualizar el desempeño y la eficiencia de todos los participantes. Una vez realizadas todas las pruebas con los estudiantes y los cirujanos, se realizó un análisis de los datos de movimiento que captura el simulador laparoscópico durante las 2 tareas básicas.

En la figura 35 se muestran los resultados de un estudiante de medicina en la Tarea 1 de ubicación espacial, donde se pueden observar los movimientos en milímetros de los tres principales grados de libertad con respecto al tiempo, derecha / izquierda o alabeo (X), adentro / afuera o cabeceo (Y) y arriba / abajo o guiñada (Z), además de la representación gráfica tridimensional 3D de los movimientos obtenidos durante esta tarea.



**Figura 35.** Resultados de movimiento con el tiempo total de un estudiante de medicina en la tarea de ubicación espacial.

En la figura 36 se muestra las trayectorias obtenidas por un estudiante de medicina y por un profesor de cirugía durante la tarea de Transferencia de objetos. En la figura se puede visualizar y comparar el desempeño en movimiento entre un estudiante de medicina y un cirujano experimentado con el instrumental laparoscópico.



**Figura 36.** Comparación de movimientos en Tarea 2 Transferencia de objetos. **A)** Estudiante de medicina, **B)** Cirujano experto.

Al final de las pruebas, los estudiantes de medicina y cirujanos realizaron observaciones y comentarios con respecto al entorno virtual en general, el realismo de los objetos virtuales en cada una de las tareas y el realismo del instrumento virtual, si el mecanismo causó algún impedimento o restricción en sus movimientos con el instrumental laparoscópico. Se obtuvieron como resultado del estudio buenas observaciones y comentarios sobre el entorno gráfico de la realidad virtual y el mecanismo instrumentado, además de la pinza laparoscópica virtual. Los participantes comentaron que el simulador laparoscópico con realidad virtual es una herramienta adecuada para el entrenamiento en percepción de profundidad y la coordinación mano – ojo que son habilidades generales y necesarias para este tipo de cirugía.

## Capítulo 5. Conclusiones

En este capítulo se explican las conclusiones del trabajo desde el objetivo principal, el diseño mecánico y la realidad virtual. Además, se define el trabajo a futuro con las propuestas de mejora del simulador.

### 5.1 Conclusiones del trabajo

Dentro de pocos años, el éxito de estos simuladores de cirugía laparoscópica aumentará de manera exponencial. Los cirujanos podrán realmente simular una operación con los datos del paciente y hacer ensayos cuantas veces sea necesario, usando técnicas de reconstrucción virtual de piel, músculos, órganos, huesos y cerebro.

El objetivo principal de la tesis fue presentar el diseño y construcción de un simulador con realidad virtual en cirugía laparoscópica para el entrenamiento de tareas básicas como la ubicación espacial y la transferencia de objetos. Este dispositivo es una herramienta de innovación y desarrollo para el entrenamiento de la curva de aprendizaje de los cirujanos, además de ser un sistema confiable y eficiente para la obtención de habilidades y destrezas quirúrgicas básicas bajo un ambiente libre de estrés, seguro y confiable en laparoscopia. De esta manera, se puede evaluar los movimientos y tiempo obtenido con los usuarios de este simulador.

Este simulador laparoscópico es portátil y de fácil manejo, donde el entorno virtual es semejante a los que ofrecen los simuladores comerciales, además de permitir la captura adecuada del movimiento sin presentar retrasos, sumando el adecuado realismo del instrumental laparoscópico en la realidad virtual.

El diseño mecánico del simulador se llevó a cabo en forma de “L” invertida para que fueran adaptados los 3 codificadores ópticos en los tres principales grados de libertad y permitiera una manipulación del instrumento de manera libre, además de conservar la originalidad del instrumento laparoscópico una vez colocados los codificadores para los otros dos grados de libertad. La resolución obtenida fue óptima y adecuada para este simulador evitando lecturas incorrectas y así se permitiera un registro adecuado en cada uno de ellos. Una vez calibrados y con la resolución respectiva en cada uno de los codificadores, se observó que no se requiere una constante calibración en ellos, pero fue necesario poner el mecanismo y el instrumento en la posición inicial indicada para un funcionamiento adecuado. El simulador laparoscópico posee una interfaz de realidad virtual realizada en Unity y controlada por medio de la tarjeta Arduino

DUE, que captura en tiempo real todos los movimientos realizados con la pinza laparoscópica física, de esta manera los datos de tiempo y movimiento son registrados tridimensionalmente 3D durante el entrenamiento.

En general, los resultados de las pruebas sirvieron para observar la manipulación del instrumento en el ambiente virtual. En el caso de la tarea 1 se tuvieron menos movimientos ya que fue una tarea básica y la precisión debía ser mínima a comparación de la tarea 2. Sin embargo, en la tarea 2 se presentó una mayor cantidad de movimientos ya que se requiere mayor tiempo y precisión al tomar los aros y poderlos transportar de una sección de postes a otra. En las imágenes presentadas en el capítulo anterior, se realizó una evaluación visual en el que se diferenciaba los movimientos generados por un estudiante de medicina y un cirujano experimentado, donde este último presenta una mayor precisión en los movimientos generados con el simulador. Los resultados sobre las pruebas de funcionalidad del simulador laparoscópico con realidad virtual presentaron comentarios y calificaciones positivas. Los estudiantes y los cirujanos consideraron que es una herramienta innovadora, de bajo costo y con un buen potencial para el entrenamiento de la percepción de profundidad, dominio espacial y la coordinación mano – ojo, habilidades importantes para este tipo de técnica laparoscópica. Finalmente, este simulador tiene un gran potencial en el campo de la cirugía laparoscópica debido al bajo costo de esta tecnología y fácil manejo del sistema para el aprendizaje y entrenamiento de los estudiantes de medicina, residentes y cirujanos en esta técnica quirúrgica de mínima invasión.

## 5.2 Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro, se espera realizar el diseño y construcción de otra pinza para la mano izquierda con el mismo diseño mecánico y una interfaz gráfica mejorada para que la realidad virtual se apegue más a los simuladores de entrenamiento laparoscópico ya existentes. En ese contexto, se plantea la programación de otro tipo de tareas de entrenamiento más complejas como son la sutura, cauterización o corte no sólo de objetos sino de órganos y tejidos. Además, se pretende que el programa forme una base de datos de los usuarios en el que pueda indicar si es un cirujano novato, residente, o experto, esto con la finalidad de que al finalizar las tareas se entregue una retroalimentación y se vaya teniendo un control sobre su evolución y su avance durante su entrenamiento para que el usuario vea el desempeño en su curva de aprendizaje.

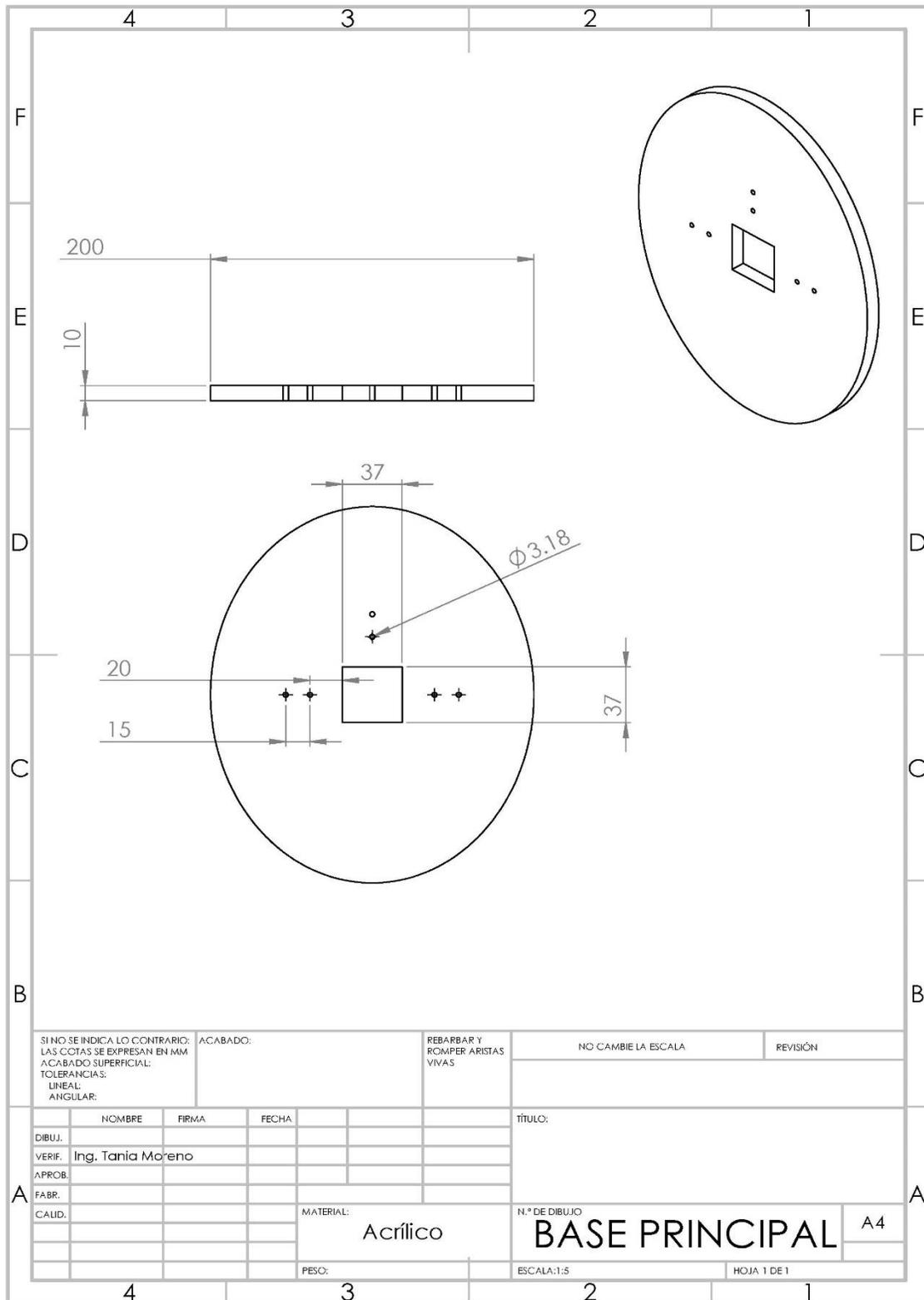
Por otra parte, hacer uso de otro tipo de microcontrolador que permita la conexión de más codificadores y sensores. Finalmente, se proponen el uso de parámetros de evaluación para mejorar el simulador laparoscópico como son la velocidad y aceleración del instrumento, la suavidad de los movimientos así como la economía de los mismos durante los ejercicios.

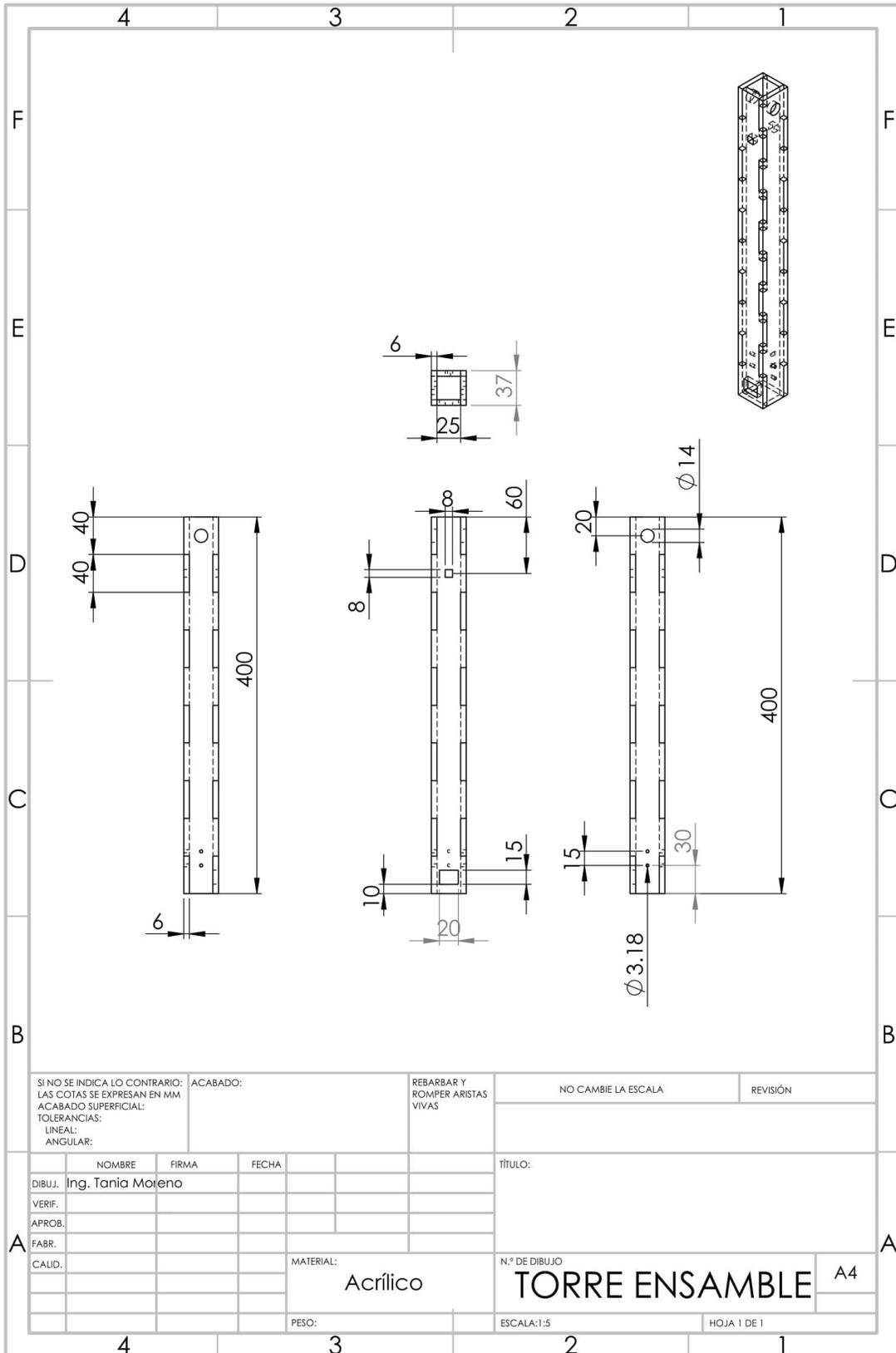
## Referencias

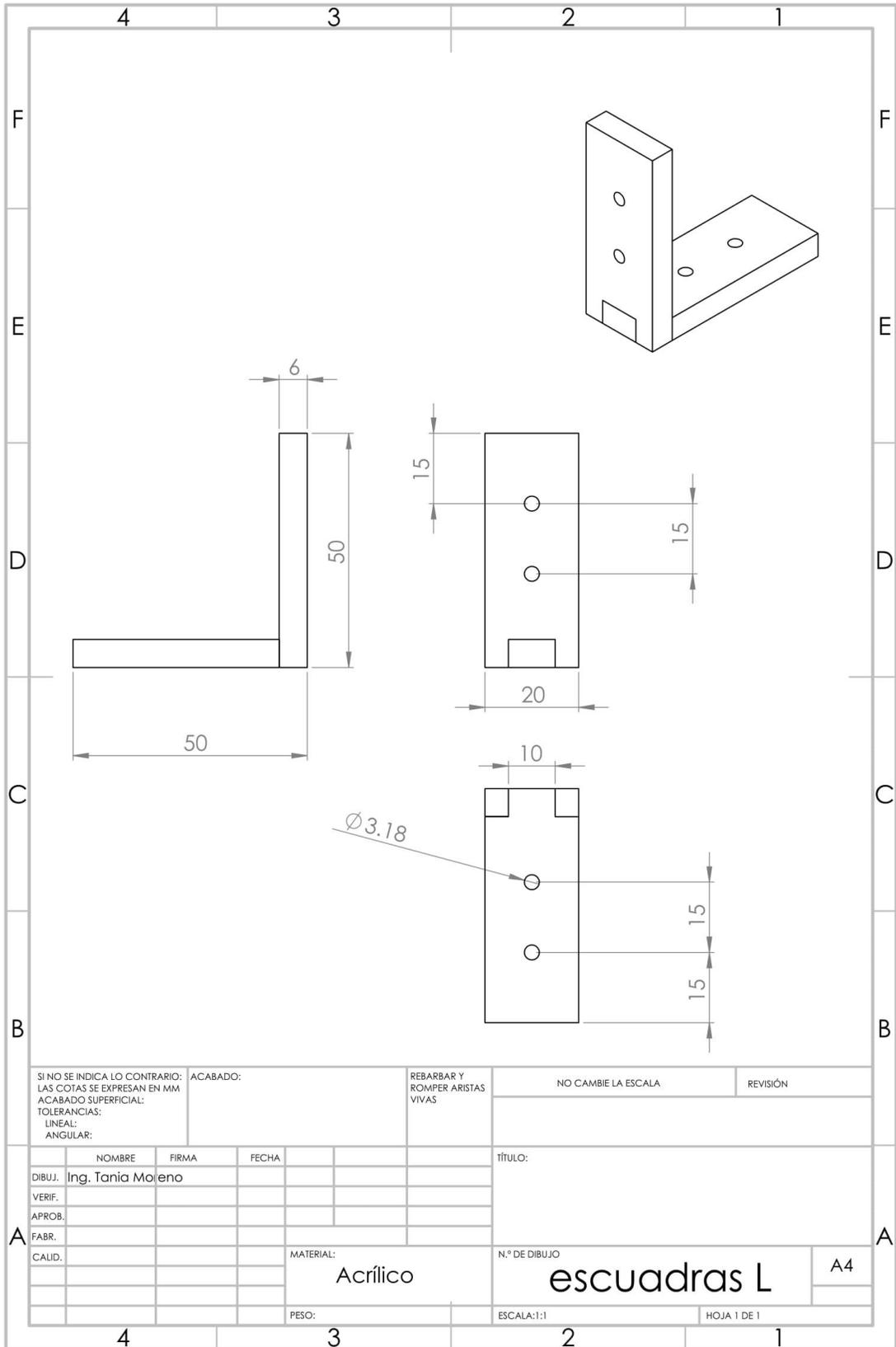
- [1] Galloso Cueto GL., Frías Jiménez RA. (2010) Consideraciones sobre la evolución histórica de la cirugía laparoscópica: colecistectomía. *Rev Med Electrón*, 32(7).
- [2] Jouvencel M. R. (1994) Ergonomía básica aplicada a la medicina del trabajo. Madrid España, página 12, Ediciones Díaz de Santos. España. Disponible en: <http://www.editdiazdesantos.com/libros/rodriguez-jouvencel-miguel-ergonomia-basica-aplicada-a-la-medicina-del-trabajo-L03001310201.html>
- [3] Pérez Escamirosa F. (2015) Simulador quirúrgico laparoscópico EndoViS basado en técnicas de visión por computadora para entrenamiento, evaluación y análisis de las habilidades psicomotoras adquiridas de los cirujanos [tesis doctorado]. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Bioelectrónica, CINVESTAV-IPN, Unidad Zacatenco, México DF.
- [4] Fundamentals of Laparoscopic Surgery (FLS) ...the definitive laparoscopic skills enhancement and assessment module. Disponible en: <https://www.flsprogram.org/>
- [5] Portable Laparoscopic Box Trainers. Medical Education. 2017. Disponible en: <https://www.carolinashealthcare.org/education/Carolinas-Simulation-Center/Simulation-Equipment/Portable-Laparoscopic-Box-Trainers>
- [6] Simulab. LapTrainer™ With SimuVision®. 2017. Disponible en: <https://www.simulab.com/products/laptrainer%E2%84%A2-simuvision%C2%AE>
- [7] Chaig Pamela, Definición de Interacción Hombre-Máquina. En: Seminario I: Actualización Tecnológica. Universidad Nacional de la Rioja, Sede Universitaria Chamental. Disponible en: <https://sites.google.com/site/seminario1les/contenido-de-la-asignatura/Unidad-N2/2-La-relacion-Hombre-Mquina-y-su-esquematzacion/21-Definicin-de-Interaccion-Hombre-Maquina>
- [8] Interfaz Hombre Máquina. Universidad de Cauca, Colombia (2012) Disponible en: <ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIET/DEIC/Materias/SW%20para%20aplicaciones%20Industriales%20I/Teoria/3%20Interfaz%20Hombre-maquina.pdf>
- [9] Sistema de realidad virtual ayuda al entrenamiento de los cirujanos (2008). *Hospita Medica en Español*. 26 (7).
- [10] Barea R. Cirugía Robótica Virtual. Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá, Madrid España.
- [11] R.G (2016) La realidad virtual revoluciona la medicina. Salud Digital. Madrid. *Rev. Salud Digital*. 7

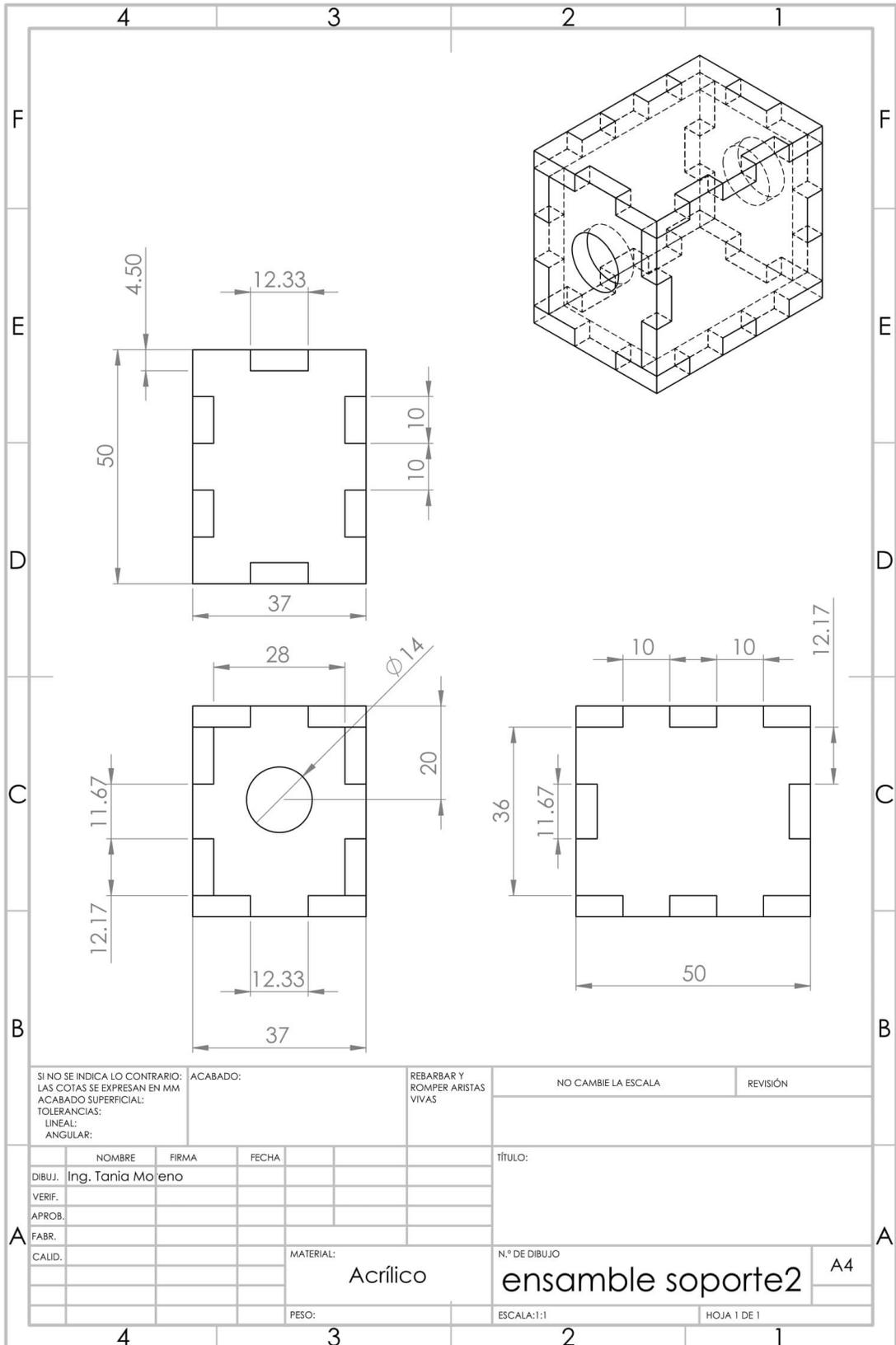
- [12] Mejía Íñigo R. (2014) Software para la estimación y registro de los parámetros de movimiento de cirujanos laparoscopistas [tesis maestría]. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Bioelectrónica. CINVESTAV-IPN, Unidad Zacatenco, México DF
- [13] Chmarra M.K., Grimbergen C.A. & Dankelman J., (2007), Systems for tracking minimally invasive surgical instruments. *Minim Invasive Ther Allied Technol*, 16 (6), 328–340.
- [14] TAQ. Enseñanza Médica, Simulador para cirugía laparoscópica > LapSim habilidades básicas. México: Enseñanzas Médicas. 2012. Disponible en: <http://www.taq.com.mx/Productos/Simuladores/Simulador-para-cirugia-Laparoscopica/LapSim-Habilidades-Basicas>
- [15] Hagelsteen K., Sevonius D., Bergenfelz A., Ekelund M., (2016), Simball Box for Laparoscopic Training With Advanced 4D Motion Analysis of Skills, *SAGE*, 1(8).
- [16] García Oropesa I (2012) Conceptual framework for the design, implementation and validation of psychomotor skills' assessment systems in minimally invasive surgery [tesis doctorado], Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid España.
- [17] El encoder MCBtec. (2008) Disponible en: [http://www.mcbtec.com/pdf/Funcionamiento\\_Encoder.pdf](http://www.mcbtec.com/pdf/Funcionamiento_Encoder.pdf)
- [18] Arduino, Interrupciones. (2017). Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Reference/AttachInterrupt>
- [19] Vassiliou MC., Ghitulescu GA., Feldman LS., Stanbridge D, Leffondré K., Sigman HH., Fried GM (2006) The MISTELS program to measure technical skill in laparoscopic surgery. *Surg Endosc* 20:744–747.

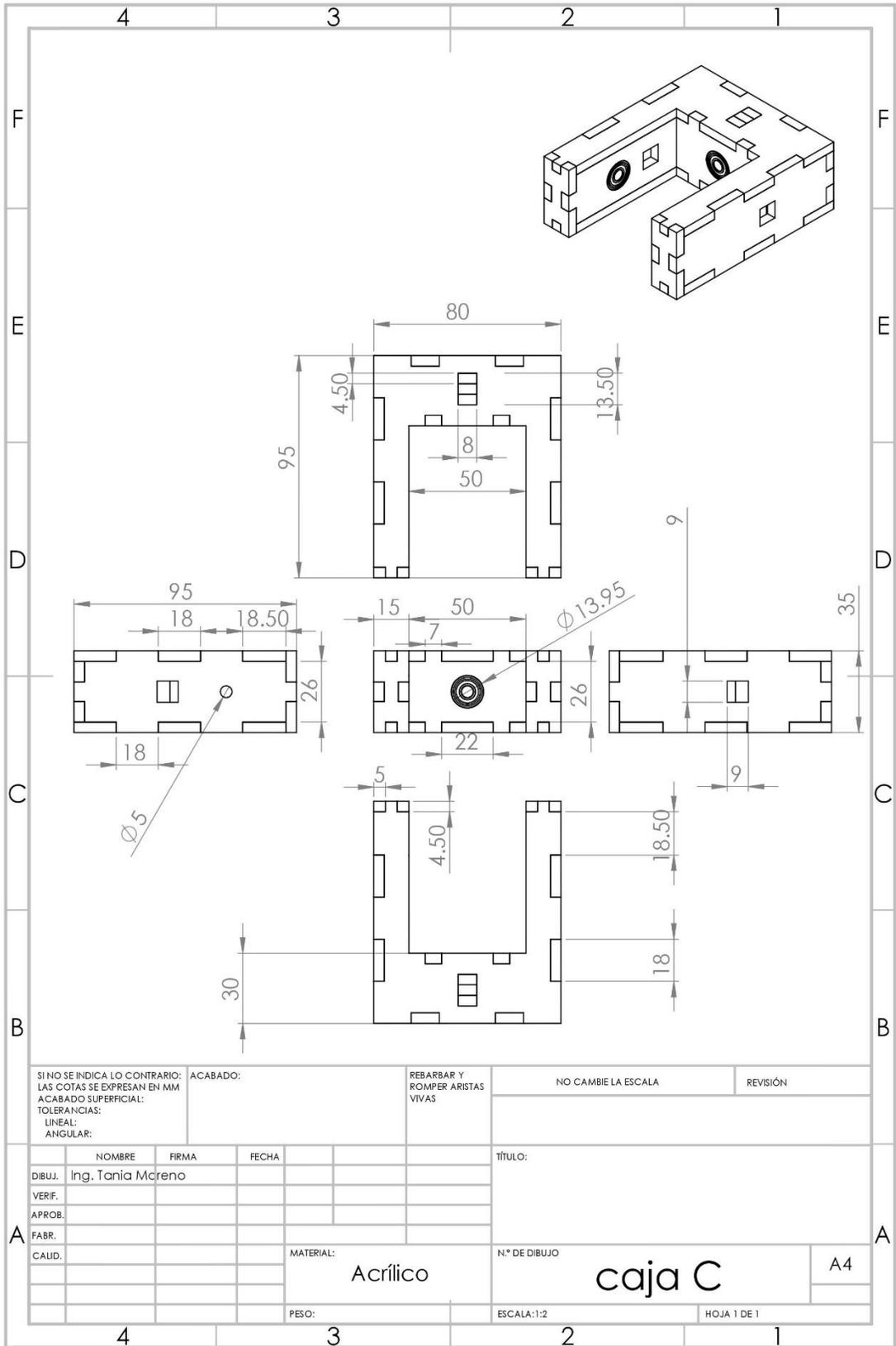
# Apéndice I











SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
ACABADO SUPERFICIAL:  
TOLERANCIAS:  
LINEAL:  
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y  
ROMPER ARISTAS  
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Ing. Tania Moreno		
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CAUID.			

TÍTULO:

MATERIAL:  
**Acrílico**

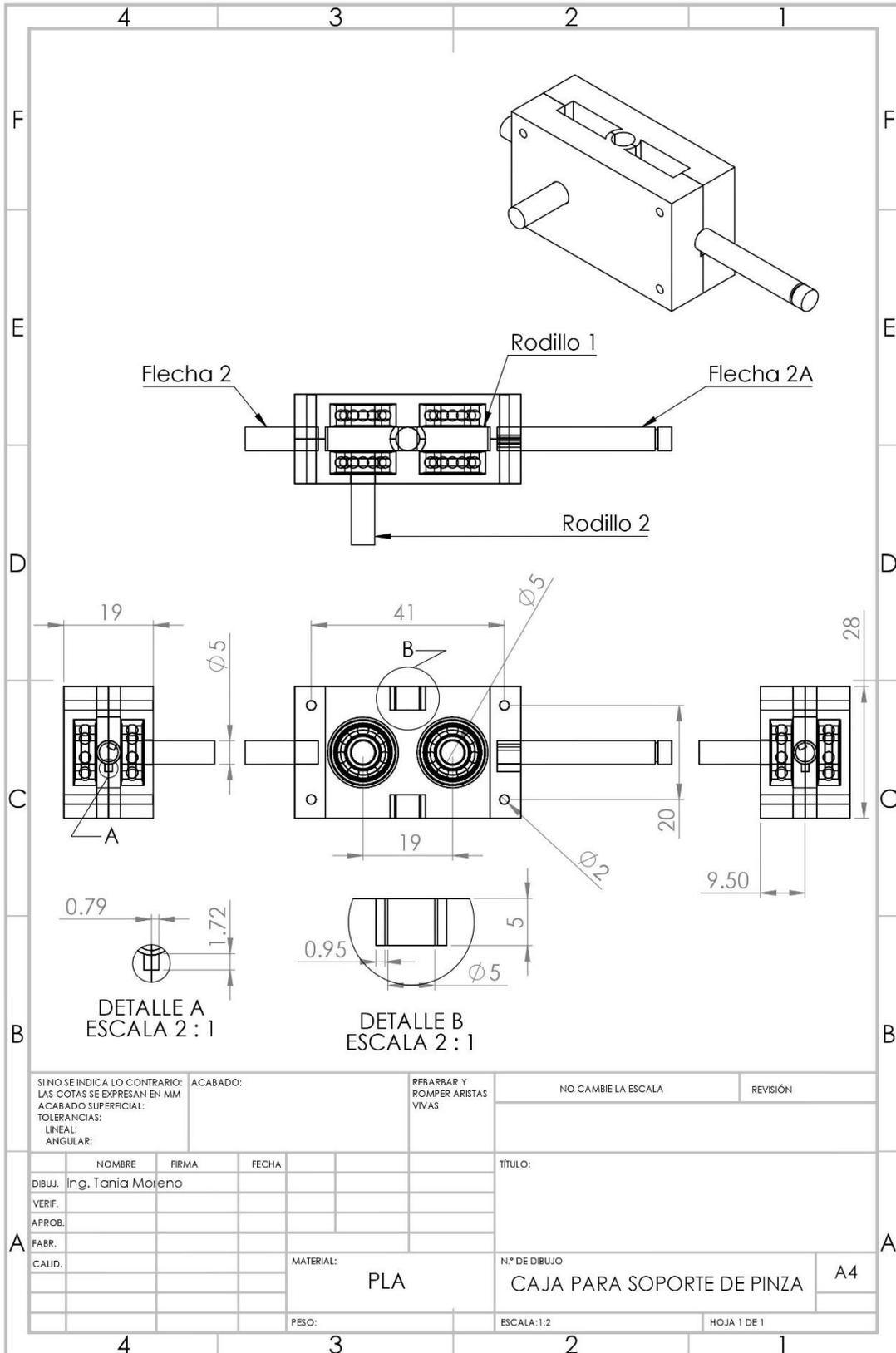
N° DE DIBUJO  
**caja C**

A4

PESO:

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
ACABADO SUPERFICIAL:  
TOLERANCIAS:  
LINEAL:  
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y  
ROMPER ARISTAS  
VIVAS

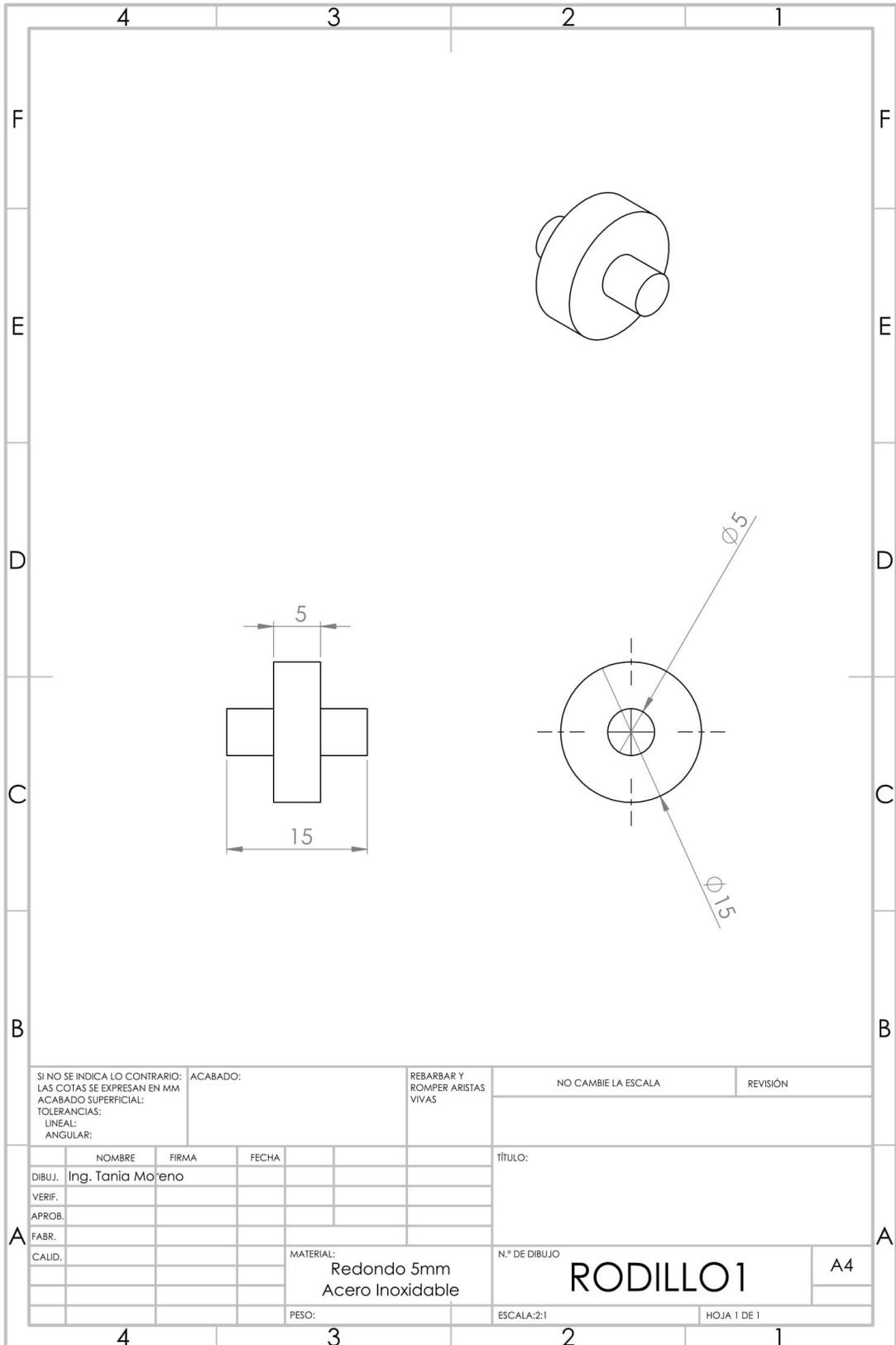
NO CAMBIE LA ESCALA

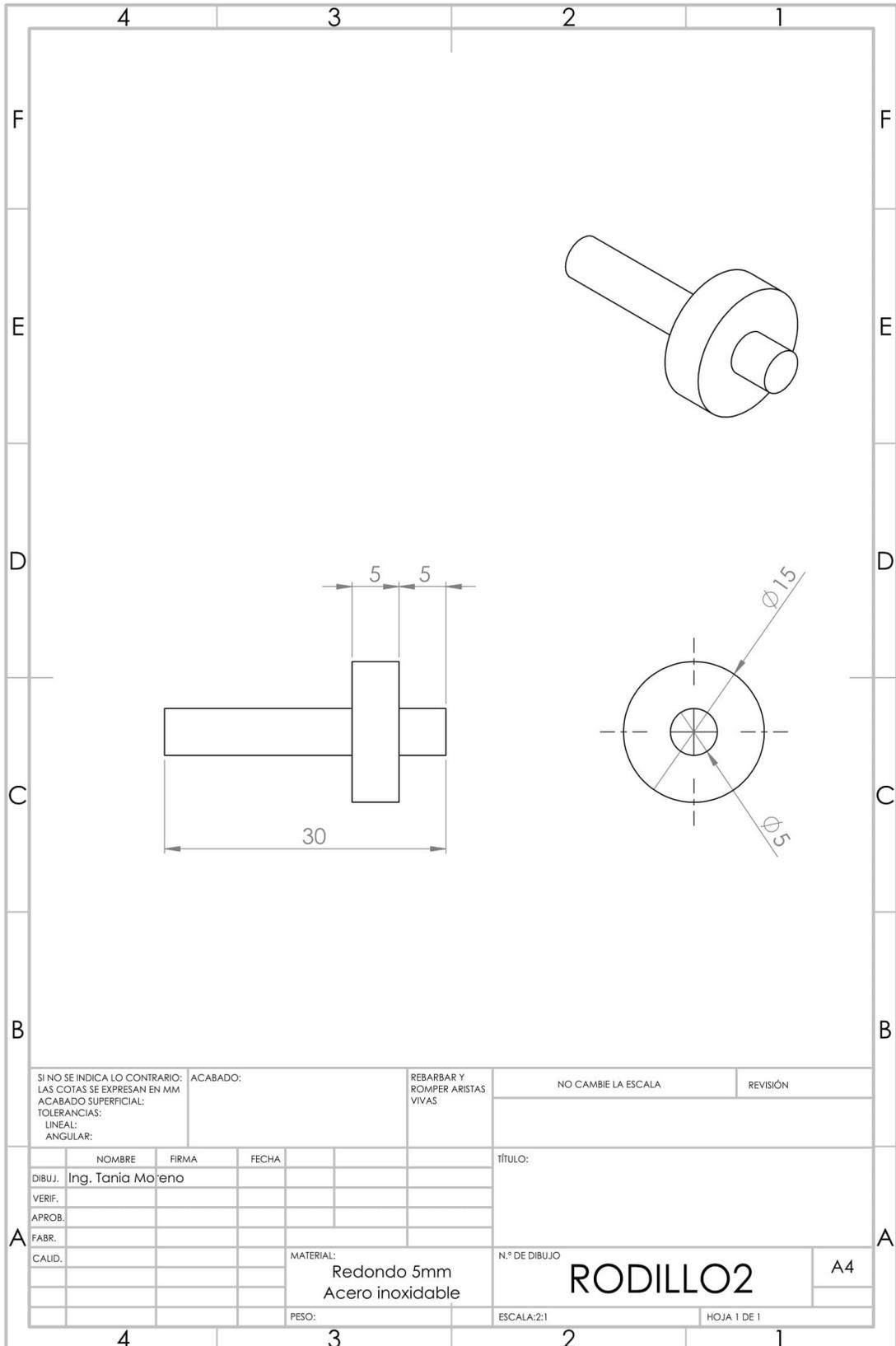
REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	Ing. Tania Moreno		
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CAUID.			

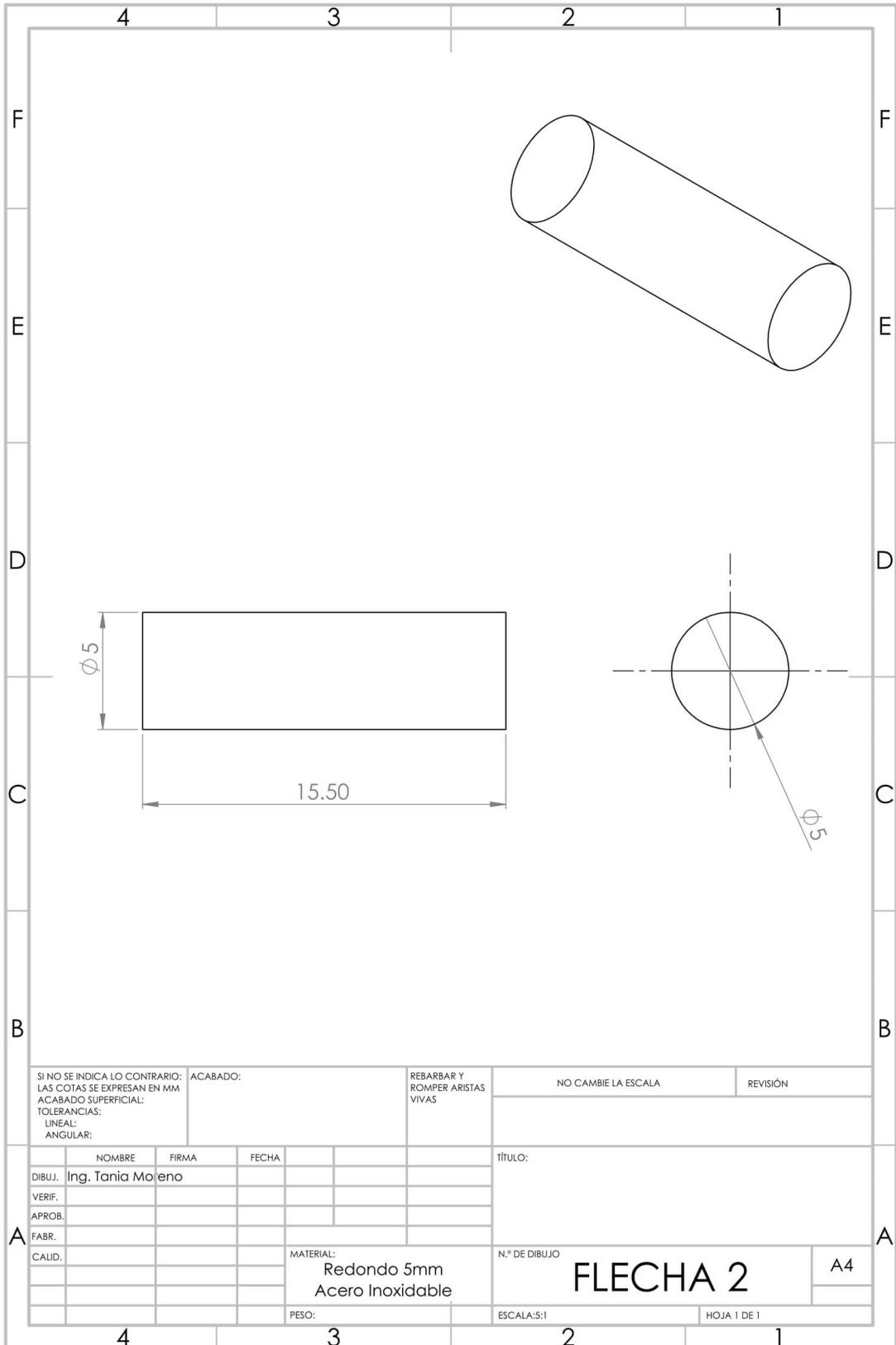
TÍTULO:	
N.º DE DIBUJO	A4
CAJA PARA SOPORTE DE PINZA	

MATERIAL:	PLA
PESO:	
ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1

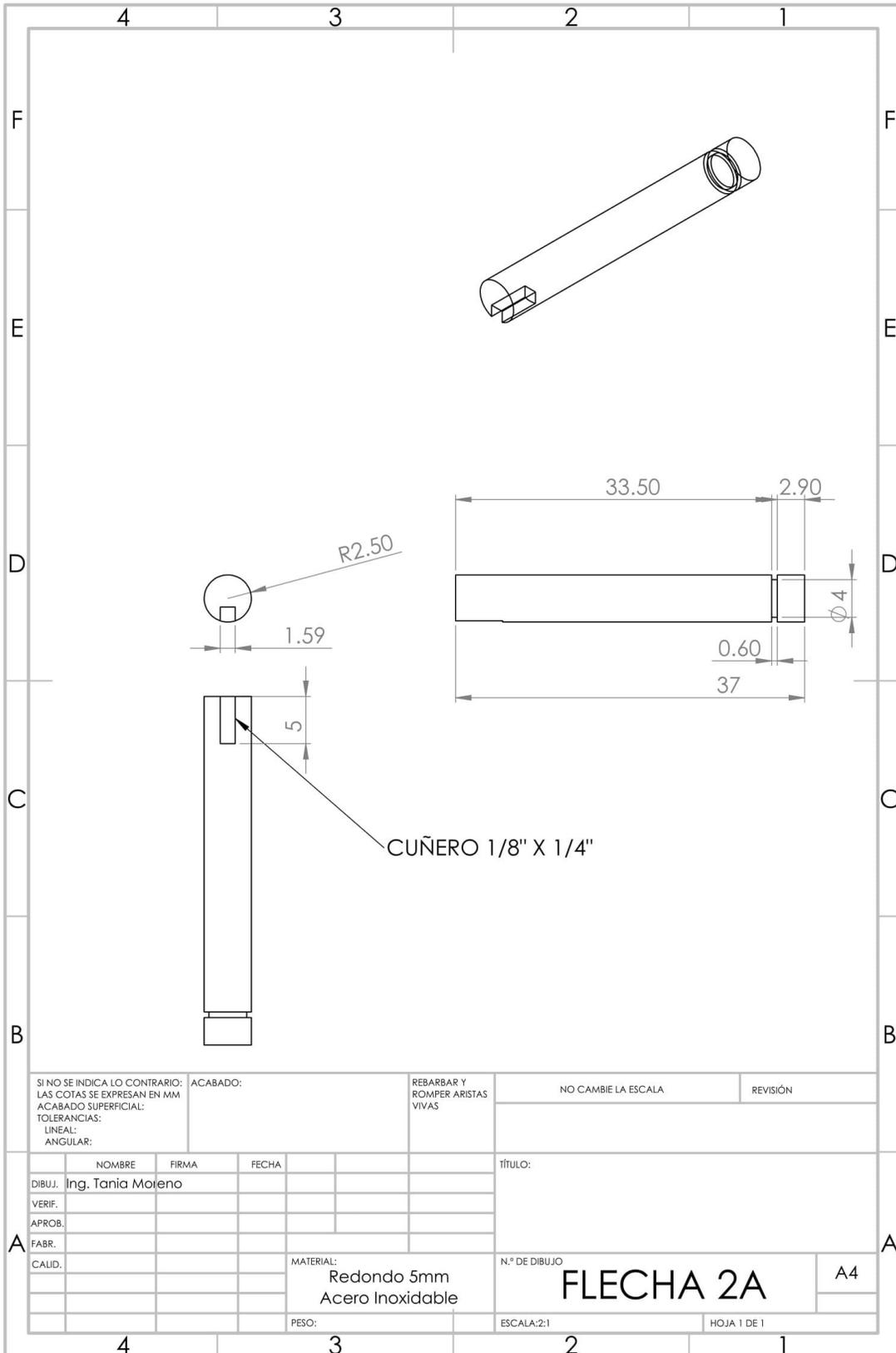




SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.	Ing. Tania Moreno				
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	
			Redondo 5mm Acero inoxidable	<b>RODILLO2</b>	A4
			PESO:	ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE	FIRMA	FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.	Ing. Tania Moreno				
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
MATERIAL: Redondo 5mm Acero Inoxidable			N.º DE DIBUJO	FLECHA 2	
PESO:			ESCALA: 5:1	A4	
				HOJA 1 DE 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Ing. Tania Moreno</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CAUID.</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			NOMBRE	FIRMA	FECHA	Ing. Tania Moreno			VERIF.			APROB.			FABR.			CAUID.			TÍTULO:		
NOMBRE	FIRMA	FECHA																					
Ing. Tania Moreno																							
VERIF.																							
APROB.																							
FABR.																							
CAUID.																							
MATERIAL: Redondo 5mm Acero Inoxidable			N.º DE DIBUJO <b>FLECHA 2A</b>		A4																		
PESO:			ESCALA:2:1		HOJA 1 DE 1																		

## Apéndice II

### Decodificador óptico E4T

El codificador óptico miniatura E4T proporciona retroalimentación digital en cuadratura. Ofrece máxima velocidad, posee un disco que tiene un diámetro de 5mm para que se adapte a él un eje. La base del codificador en miniatura E4T proporciona orificios de montaje para dos tornillos longitud 3/16", longitud 4 mm en un círculo de tornillo de .586". La tapa del codificador se encaja fácilmente en la base y se marca con el pin-out del conector. El codificador se conecta mediante un conector de paso de 4 conductores. Las especificaciones técnicas son las siguientes:

- Se adapta a diámetros de eje de .079 "a .250"
- 100 a 500 ciclos por revolución (CPR)
- 400 a 2 000 pulsos por revolución (PPR)
- Suministro individual de +5V



#### 4-pin Single-ended

Pin	Description
1	+5VDC power
2	A channel
3	Ground
4	B channel

Operating Temperature	-20 to 100	C
Electrostatic Discharge, IEC 61000-4-2 Single-ended (-S version) Differential (-D version)	± 12 ± 7	kV
Shock, 6 millisecond, half-sine	75	G
Vibration (20Hz to 2kHz, sinusoidal)	20	G

### Arduino DUE

La tarjeta de desarrollo Arduino Due cuenta con 54 pines digitales de E/S, 12 de ellos se pueden usar como entradas PWM, 12 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 84 MHz, una conexión USB tipo OTG, un conector de alimentación, una cabezal SPI, y un botón de reinicio. Es un microcontrolador basado en ARM CortexM3 de 32bit. Los datos técnicos se muestran en la siguiente tabla:

Microcontroller	AT91SAM3X8E
Operating Voltage	3.3V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-16V
Digital I/O Pins	54 (of which 12 provide PWM output)
Analog Input Pins	12
Analog Output Pins	2 (DAC)
Total DC Output Current on all I/O lines	130 mA
DC Current for 3.3V Pin	800 mA
DC Current for 5V Pin	800 mA
Flash Memory	512 KB all available for the user applications
SRAM	96 KB (two banks: 64KB and 32KB)
Clock Speed	84 MHz
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	36 g

### Módulo MicroSD Arduino

El módulo para conectar una memoria SD a una tarjeta Arduino es alimentado por 3.3 V o 5V usando los pines respectivos, los cuales se conectan con el cabezal SPI de la tarjeta Arduino DUE que estamos utilizando. El diagrama de conexión respectivo del módulo es el que se muestra en la siguiente figura:



## Apéndice III

### Código de control de los codificadores ópticos realizado en la IDE de Arduino.

```
#include <Encoder.h>      myFile = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE); Serial.print (A) ; //A/Cierra
#include <SPI.h>           Serial.print (" , ");
#include <SD.h>           if (myFile) { Serial.print (B); /* Giro
                          Serial.print (" , ");
Encoder E1 (22,23);      encoder1=E1.read(); Serial.print (C); /* D/I
Encoder E2 (24,25);      encoder2=E2.read(); Serial.print (" , ");
Encoder E3 (26,27);      encoder3=E3.read(); Serial.print (D); /* A/A
Encoder E4 (28,29);      encoder4=E4.read(); Serial.print (" , ");
Encoder E5 (30,31);      encoder5=E5.read(); Serial.print (E); //profundidad
                          Serial.print (" , ");
                          Serial.println(float(millis())/1000);

int A=0;                 if(encoder1>120) encoder1=120;
int B=0;                 if(encoder1<0) encoder1=0;
int C=0;
int D=0;                 if(encoder2>1000) encoder2=1000;           myFile.print(A);
int E=0;                 if(encoder2<-1000) encoder2=-1000;           myFile.print(" , ");

File myFile;            if(encoder3>5000) encoder3=5000;           myFile.print(B);
                          if(encoder3<-5000) encoder3=-5000;       myFile.print(" , ");
```

### Comunicación Arduino – Unity y movimientos básicos de la pinza

```
private SerialPort puerto = new SerialPort ("COM6", 115200);
private string[] datos = new string[6];
private char[] splitters = new char[]{' ',' '};
private float[] entrada = new float[6];
private Vector3 posOffset;

public GameObject pinzaIzquierda;
public GameObject pinzaDerecha;
public GameObject pinzaSoporte;

void Start () {
    puerto.Close ();
    puerto.Open ();
    posOffset = transform.position;
}

puerto.DiscardInBuffer ();
datos = puerto.ReadLine ().Split(splitters);
for (int i = 0; i < datos.Length; i++) { /
    float.TryParse (datos [i], out entrada[i]);
}

Debug.Log (entrada [0] + " , " + entrada [1] + " , " + entrada [2] + " , " + entrada [3] + " , " + entrada [4]);
pinzaDerecha.transform.localEulerAngles = Vector3.down * -entrada[0];
pinzaIzquierda.transform.localEulerAngles = Vector3.up * entrada [0];
pinzaSoporte.transform.localEulerAngles = Vector3.forward * entrada[1];

transform.position = 0.1f * new Vector3 (entrada [2], entrada [3], entrada [4]);
```

## Código para desaparecer objetos en Unity

```
public GameObject Fig1;
public GameObject Fig2;
public GameObject Fig3;

void OnTriggerEnter (Collider other)
{
    if (other.gameObject.tag == "Fig1") {
        Destroy (Fig1);
    }
    if (other.gameObject.tag == "Fig2") {
        Destroy (Fig2);
    }
    if (other.gameObject.tag == "Fig3") {
        Destroy (Fig3);
    }
    if (other.gameObject.tag == "Fig4") {
        Destroy (Fig4);
    }
}
```

## Código de la tarea de transferencia de objetos en Unity

```
void Start () {
    rb = GetComponent<Rigidbody> ();
    padre = GameObject.FindWithTag ("Padre").transform;
}

void Update () {
    if (t1 && t2) {
        if (!rb.isKinematic) {
            Debug.Log ("Sujetado");
            rb.isKinematic = true;
            transform.SetParent (padre);
        }
    }
    else if (rb.isKinematic)
    {
        rb.isKinematic = false;
        transform.SetParent (null);
    }
}
```