



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE
SENSORIZACIÓN AVANZADA APLICADO A UN ENTRENADOR
LAPAROSCÓPICO QUE FACILITE EL DESARROLLO DE LAS
HABILIDADES MOTRICES DE ESTUDIANTES DE CIRUGÍA**

AUTORES: CANGUI LAICA, RICAR SANTIAGO

RAMÍREZ GAVILÁNEZ, ANDRÉ SEBASTIÁN

DIRECTOR: ING. REA MINANGO, SYLVIA NATHALY

LATACUNGA

2020



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SENSORIZACIÓN AVANZADA APLICADO A UN ENTRENADOR LAPAROSCÓPICO QUE FACILITE EL DESARROLLO DE LAS HABILIDADES MOTRICES DE ESTUDIANTES DE CIRUGÍA”***, fue realizado por los señores ***Cangui Laica, Richar Santiago y Ramírez Gavilánez, André Sebastián***, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 23 de enero del 2020

Ing. Rea Minango, Sylvia Nathaly

C.C.: 1721261921



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Cangui Laica, Richar Santiago y Ramírez Gavilánez, André Sebastián* declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SENSORIZACIÓN AVANZADA APLICADO A UN ENTRENADOR LAPAROSCÓPICO QUE FACILITE EL DESARROLLO DE LAS HABILIDADES MOTRICES DE ESTUDIANTES DE CIRUGÍA”***, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 23 de enero del 2020

Cangui Laica, Richar Santiago

C.C.: 0504417338

Ramírez Gavilánez, André Sebastián

C.C.: 1804011888



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Cangui Laica, Richar Santiago y Ramírez Gavilánez, André Sebastián autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SENSORIZACIÓN AVANZADA APLICADO A UN ENTRENADOR LAPAROSCÓPICO QUE FACILITE EL DESARROLLO DE LAS HABILIDADES MOTRICES DE ESTUDIANTES DE CIRUGÍA”, en el repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios es de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 23 de enero del 2020

Cangui Laica, Richar Santiago

C.C.: 0504417338

Ramírez Gavilánez, André Sebastián

C.C.: 1804011888

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación lo dedico principalmente a mi mami Patricia que toda su vida ha luchado para brindarme su apoyo y así pudiera cumplir mis objetivos, a Milton que me ha ayudado durante todo este trayecto sin importar las circunstancias, a mi padre Cesar que me ha brindado su apoyo, a mis hermanos Jonathan y Damaris que han estado junto a mí, a mis abuelitos, tías, tíos, primas y primos que siempre han estado pendiente de mí, a Pris por su valiosa compañía durante este tiempo, a Edi, Ronny, Maggy y Mishu, quienes con sus consejos y compañía me han brindado una ayuda para culminar este trabajo. A todos mis amigos y amigas que me han acompañado durante todo este camino y especialmente a Dios por darme las fuerzas para cumplir esta meta en mi vida.

Richar

A mi madre, quien me impulsó a seguir este camino y me apoyó hasta el último día de su vida.

A mi Abu, quien con amor y dedicación me ha guiado en todo momento, y por ser el pilar más importante para conseguir mis metas.

A mi padre, por darme su apoyo incondicional y estar siempre dispuesto a ayudarme.

A mis hermanos Carolina y Nicolás, quienes llenan de alegría mis días y están siempre para apoyarme.

A María José, por estar siempre en las buenas y sobre todo en las malas, brindándome todo su amor.

André

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por nunca abandonarme y darme las fuerzas para cumplir mis objetivos, a mi mami por brindarme su apoyo que necesité durante este tiempo, a mi familia por estar conmigo siempre. Agradezco a mis docentes, especialmente a los que conforman el departamento de Mecatrónica, que me compartieron todos sus conocimientos día a día y un especial agradecimiento al Ingeniero Vicente Hallo y Licenciada Silvia Pilatasig. A mis amigos y amigas que me acompañaron durante toda esta travesía brindándome su valiosa amistad y apoyo.

Richar

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a mi abu y a mis padres, por brindarme todo su apoyo para conquistar mis sueños.

A mis amigos y compañeros de equipo Iron Rippers, por las experiencias, el conocimiento y la amistad brindada a lo largo de este camino de igual manera a mi compañero de tesis y amigo Richar.

Agradezco a todos los ingenieros que fueron parte crucial en mi formación y me ayudaron a desarrollar mis ideas.

André

Queremos expresar un sincero agradecimiento a nuestra querida ingeniera y amiga Nathaly Rea por toda su paciencia y por haber compartido con nosotros sus conocimientos, guiándonos a lo largo de este tiempo, también queremos agradecer a nuestro colaborador científico Dr. Fernando Torres que siempre estuvo dispuesto a brindarnos apoyo y soporte a lo largo de todo este proyecto.

Richar y André

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Planteamiento del problema.....	3
1.4. Descripción resumida del proyecto.....	5
1.5. Justificación e importancia.....	7
1.6. Objetivos	8
1.6.1. Objetivo general	8
1.6.2. Objetivos específicos	8

1.7.	Hipótesis.....	9
------	----------------	---

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

2.1.	Cirugía laparoscópica.....	10
2.1.2.	Laparoscopia.....	11
2.1.2.	Pinzas laparoscópicas.....	11
2.2.	Entrenamiento basado en simulación.....	12
2.3.	Equipos de entrenamiento laparoscópico.....	13
2.3.1.	Entrenador laparoscópico físico.....	13
2.4.	Sensor.....	15
2.5.	Cámara de video.....	16
2.5.1.	Sensor de captura de imágenes.....	16
2.5.2.	Enfoque.....	17
2.5.3.	Profundidad de campo (DOF).....	19
2.5.4.	Consideraciones para la captura de una buena imagen de video.....	20
2.6.	Resolución de pantalla.....	21
2.6.1.	Relación de aspecto.....	21
2.7.	Transmisión de video.....	22
2.7.1.	Transmisión de video mediante HDMI.....	22
2.7.2.	Interfaz de procesamiento de video.....	23
2.8.	Sistemas de coordenadas.....	23
2.8.1.	Coordenadas esféricas.....	23

2.9.	Grados de libertad	24
2.10.	Joystick.....	24
2.11.	Página web	25
2.11.1.	Desarrollo web	25
2.11.2.	Gestores de contenido	26
2.11.3.	Protocolo de transferencia de archivos	27
2.12.	Base de datos.....	27
2.12.1.	Sistema de Gestión de Base de Datos (SGBD).....	28
2.12.2.	SQL	28
2.13.	Interfaz gráfica	28
2.13.1.	Consideraciones para el diseño de una interfaz de usuario amigable	29
2.13.2.	Python como lenguaje de programación de la interfaz gráfica.....	29

CAPÍTULO III

DISEÑO MECATRÓNICO DEL ENTRENADOR LAPAROSCÓPICO

3.1.	Necesidades del cliente	30
3.2.	Requerimientos técnicos	31
3.3.	Discusión.....	31
3.4.	Propuesta.....	33
3.4.1.	Propuesta del desarrollo web	33
3.4.2.	Propuesta del subsistema electrónico.....	34
3.4.3.	Propuesta del subsistema mecánico	34
3.5.	Selección de componentes del sistema	35

3.5.1.	Selección de componentes del subsistema electrónico	35
3.5.2.	Selección de materiales del subsistema mecánico	43
3.6.	Selección del gestor de contenido para el desarrollo web	46
3.7.	Diseño del sistema mecánico	48
3.7.1.	Diseño de la estructura	49
3.7.2.	Mecanismo de sensorización	52
3.7.3.	Sistema de movilidad de la cámara.....	56
3.7.4.	Diseño del área de entrenamiento	57
3.8.	Análisis CAE de la estructura	58
3.8.1.	Análisis estático de la estructura.....	58
3.8.2.	Análisis estático del módulo de sensorización.....	61
3.8.3.	Análisis estático del mecanismo de la cámara	63
3.9.	Diseño electrónico.....	65
3.9.1.	Subsistema de control	66
3.9.2.	Subsistema de sensorización.....	68
3.9.3.	Subsistema de alimentación e iluminación	69

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN Y PROGRAMACIÓN

4.1.	Construcción del entrenador laparoscópico con sensorización avanzada.....	71
4.1.1.	Impresión 3D.....	71
4.1.2.	Corte láser	73
4.2.	Ensamblaje del prototipo	74

4.2.1.	Ensamblaje del mecanismo de sensorización	78
4.2.2.	Sistema de movilidad de la cámara y el adaptador de la pantalla táctil.....	79
4.2.3.	Ensamble de la estructura	80
4.3.	Conexión del prototipo.....	81
4.2.	Desarrollo de la página web.....	82
4.2.1.	Instalación y configuración de Wordpress.....	84
4.2.2.	Base de datos.....	85
4.2.3.	Menús y submenús que componen la página web	89
4.2.4.	Plugins propios implementados	92
4.3.	Desarrollo interfaz gráfica	96
4.3.1.	Ventanas de navegación.....	98
4.3.2.	Configuración del software de desarrollo	103
4.3.3.	Desarrollo del código de la Rapberry Maestro	104
4.3.4.	Desarrollo del código de la Rasperry Esclavo	112
4.4.	Desarrollo del código de la tarjeta de control	116

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1.	Pruebas de precisión y exactitud a nivel de sistema	119
5.2.	Metodología de toma de datos	119
5.2.1.	Fases de las pruebas	121
5.3.	Resultados obtenidos y análisis.....	122
5.3.1.	Precisión y exactitud a nivel de sistema.....	122

5.3.2.	Validación mediante el método T-Student.....	126
5.3.3.	Ejercicios ejecutados.....	129
5.3.4.	Análisis de la curva de aprendizaje.....	130
5.3.5.	Resultados y análisis de la destreza bimanual	133
5.3.6.	Análisis del desempeño según la escala GOALS	139
5.4.	Satisfacción del sistema	141
5.4.1.	Satisfacción del sistema a nivel experto	141
5.4.2.	Satisfacción a nivel usuario.....	141
5.5.	Validación de la hipótesis mediante el método T-Student.....	143
5.6.	Validación de la hipótesis	147
5.6.	Análisis económico del proyecto	147

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.	Conclusiones	150
6.2.	Recomendaciones.....	154

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

155

ANEXOS

162

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Consideraciones para la captura de imágenes</i>	20
Tabla 2	<i>Especificaciones técnicas de miniordenadores</i>	36
Tabla 3	<i>Características técnicas de la cámara</i>	38
Tabla 4	<i>Características técnicas de la pantalla táctil</i>	39
Tabla 5	<i>Características técnicas de la tarjeta de control</i>	40
Tabla 6	<i>Características técnicas del sensor de medición seleccionado</i>	41
Tabla 7	<i>Características técnicas de la iluminación</i>	42
Tabla 8	<i>Consumo de cada elemento</i>	42
Tabla 9	<i>Características técnicas de los elementos del módulo de alimentación</i>	43
Tabla 10	<i>Comparativa de materiales</i>	45
Tabla 11	<i>Materiales para la construcción de las agarraderas y módulo de sensorizado.</i>	45
Tabla 12	<i>Características de la rótula</i>	46
Tabla 13	<i>Características de los CMS</i>	47
Tabla 14	<i>Dimensiones especificadas</i>	50
Tabla 15	<i>Masa de los elementos que no corresponden a la estructura</i>	59
Tabla 16.	<i>Parámetros de impresión</i>	72
Tabla 17	<i>Elementos utilizados para la construcción del prototipo</i>	75
Tabla 18	<i>Resultados obtenidos en un ambiente controlado</i>	123
Tabla 19	<i>Resultados calculados</i>	125
Tabla 20	<i>Condiciones de validación de hipótesis</i>	126
Tabla 21	<i>Detalle de los ejercicios a ejecutar</i>	129
Tabla 22	<i>Desempeño con respecto a la percepción de profundidad</i>	140
Tabla 23	<i>Desempeño con respecto a la destreza bimanual</i>	140
Tabla 24	<i>Desempeño con respecto a la eficiencia</i>	140
Tabla 25	<i>Análisis económico de los materiales utilizados</i>	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pinza laparoscópica	12
Figura 2. Entrenador laparoscópico físico	14
Figura 3. Dr. ET	15
Figura 4. Sensor de fotografía.....	16
Figura 5. Ejemplo de enfoque de una cámara digital.....	18
Figura 6. Representación gráfica de la distancia focal.....	19
Figura 7. Profundidad de campo	20
Figura 8. Sistema de coordenadas esféricas.....	24
Figura 9. Propuesta de la página web.....	33
Figura 10. Subsistema electrónico	34
Figura 11. Subsistema Mecánico	35
Figura 12. Esquema del diseño mecánico	49
Figura 13. Dimensiones de la estructura	50
Figura 14. Vista superior de la estructura	51
Figura 15. Ubicación de los puertos del sistema de sensorización	52
Figura 16. Mecanismo de sensorización	53
Figura 17. Sistema de medición eje Z.....	54
Figura 18. A) Base del sistema de sensorización con ángulo de corte 6° B) Resultante del corte en la implementación.....	54
Figura 19. Requerimientos de ensamble del sensor	55
Figura 20. Rodamiento 606.....	55
Figura 21. Sistema de movilidad de la cámara	56
Figura 22. Ubicación del sistema de movilidad de la cámara.....	57
Figura 23. Área de entrenamiento.....	58
Figura 24. Condiciones de frontera en la estructura	59
Figura 25. CAE de la estructura (vista isométrica superior).....	60

Figura 26. CAE de la estructura (vista isométrica inferior)	60
Figura 27. Análisis CAE del esfuerzo en la estructura	61
Figura 28. Condiciones de frontera (módulo de sensorización)	62
Figura 29. Análisis de la deformación del módulo de sensorización.....	62
Figura 30. Análisis del esfuerzo del módulo de sensorización	63
Figura 31. Condiciones de frontera (módulo de sensorización)	64
Figura 32. Análisis de la deformación del mecanismo de la cámara	64
Figura 33. Análisis del esfuerzo del mecanismo de la cámara	65
Figura 34. Subsistema electrónico del entrenador	66
Figura 35. Subsistema de control	67
Figura 36. Subsistema de sensorización.....	68
Figura 37. Subsistema de alimentación e iluminación.....	69
Figura 38. Ubicación de la iluminación en el entrenador	70
Figura 39. Entrenador de laparoscopia.....	72
Figura 40. Diseño 2D	73
Figura 41. Elementos realizados en corte láser	74
Figura 42. Molde de caucho silicona	78
Figura 43. Ensamble módulo de sensorización.....	79
Figura 44. Ensamble del sistema de movilidad de la cámara y el adaptador de la pantalla	80
Figura 45. Estructura ensamblada del entrenador	80
Figura 46. Ubicación de los elementos electrónicos	81
Figura 47. Conexión del prototipo	82
Figura 48. Diagrama de flujo del funcionamiento de la página web	83
Figura 49. Diagrama Entidad - Relación de la base de datos de WordPress	86
Figura 50. Diagrama entidad-relación de la base de datos multimedia	88
Figura 51. Base de datos en la herramienta phpMyAdmin	89
Figura 52. Página principal de la web.....	90

Figura 53. Menús y submenús correspondientes al usuario Instructor	91
Figura 54. Menús y submenús correspondientes al usuario Estudiante.....	91
Figura 55. Encabezado del plugin de consulta de la base de datos	92
Figura 56. Programación de la función de consulta.....	93
Figura 57. Programación del botón de retroalimentación	93
Figura 58. Página que se muestra a un usuario Estudiante	94
Figura 59. Página que se muestra a un usuario Instructor.....	95
Figura 60. Código para insertar datos en una base de datos	95
Figura 61. Página para el registro de prácticas	96
Figura 62. Funcionamiento requerido en la interfaz gráfica	97
Figura 63. Ventana de Inicio	98
Figura 64. Ventana de instrucciones	99
Figura 65. Ventana de ingreso de usuario.....	100
Figura 66. A) Entrenamiento cronometrado B) Entrenamiento a contrarreloj	100
Figura 67. Ventana de trabajo sin iniciar la práctica.....	101
Figura 68. Ventana de trabajo ejecutando la práctica	102
Figura 69. Ventana de información.....	103
Figura 70. Software QtDesigner	105
Figura 71. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica (Parte1)	106
Figura 72. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica (Parte2)	107
Figura 73. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica (Parte 3)	108
Figura 74. Inclusión de librerías en el algoritmo del Maestro	109
Figura 75. Código de conexión entre Maestro-Esclavo y la tarjeta de control.....	109
Figura 76. Inicialización de la ventana principal de la interfaz gráfica	110
Figura 77. Función para la comunicación entre Maestro-Esclavo	110
Figura 78. Código para recibir datos mediante comunicación serial	111
Figura 79. Código para la conexión con la base de datos	111

Figura 80. Diagrama de flujo del funcionamiento del Esclavo.....	112
Figura 81. Inclusión de librerías en el algoritmo del Esclavo.....	113
Figura 82. Función del control de la cámara.....	114
Figura 83. Código para subida de ficheros mediante FTP	115
Figura 84. Código para guardar un archivo en un dispositivo USB	115
Figura 85. A) Coordenada esféricas B) Coordenadas esféricas en el mecanismo	116
Figura 86. Fórmula para determinar la longitud de arco.....	117
Figura 87. Diagrama de flujo de la programación de la tarjeta de control.....	118
Figura 88. Escala GOALS.....	120
Figura 89. Formato de la ejecución de las fases de prueba.....	122
Figura 90. Representación gráfica de los valores reales	122
Figura 91. Juegos utilizados para ejecutar los ejercicios	130
Figura 92. Curva de aprendizaje (Tradicional - Avanzado) Ejercicio 1	131
Figura 93. Curva de aprendizaje (Tradicional - Avanzado) Ejercicio 2	132
Figura 94. Curva de aprendizaje (Tradicional - Avanzado) Ejercicio 3	133
Figura 95. Comparativa mano dominante del ejercicio 1 (Primera vez)	134
Figura 96. Comparativa mano dominante del ejercicio 2 (Tercer evento)	134
Figura 97. Comparativa mano dominante del ejercicio 1 (Primera vez)	135
Figura 98. Comparativa mano dominante del ejercicio 2 (Tercer evento)	136
Figura 99. Comparativa mano dominante del ejercicio 3 (Primera vez)	136
Figura 100. Comparativa mano dominante del ejercicio tres (Tercera vez)	137
Figura 101. Distancia promedio recorrida por cada estudiante en el ejercicio 1	138
Figura 102. Distancia promedio recorrida por cada estudiante en el ejercicio 2	138
Figura 103. Distancia promedio recorrida por cada estudiante en el ejercicio 3	139

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se muestra el estudio, diseño y construcción de un sistema de sensorización avanzada aplicado a un entrenador laparoscópico que permite el mejoramiento de las habilidades motrices en los estudiantes de cirugía, se parte desde la recopilación de información actualizada sobre simuladores laparoscópicos físicos de nueva generación y los componentes que utilizan, se toma en cuenta los requerimientos de un experto en cirugía laparoscópica para enlazar dos grandes ramas de la ciencia como son la medicina y la ingeniería. A partir de las necesidades planteadas por el experto se desarrolla una página web que almacena el avance de las prácticas y se implementa un modelo de entrenador laparoscópico en el que pueden ser acoplados los módulos de sensorización avanzada, cuyo componente principal son encoders magnéticos de tipo incremental adaptados a un mecanismo de joystick, estos módulos miden los ángulos y calculan la trayectoria recorrida por la punta de la pinza mediante software. El estudiante puede interactuar con el entrenador a través de la interfaz gráfica y al culminar la práctica puede almacenar los datos en la página web. El entrenador ayuda a mejorar las habilidades motrices de los estudiantes de cirugía ya que este le ayuda a mejorar su percepción de la profundidad, destreza bimanual y eficiencia; además se consideró que el entrenador posee una precisión de 2mm.

PALABRAS CLAVE:

- **CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA**
- **LAPAROSCOPIA - SIMULADORES**
- **INTERFAZ WEB**

ABSTRACT

This degree works shows the study, design and construction of an advanced sensing system applied to a laparoscopic trainer that allows the improvement of motor skills in surgery students, starting from the collection of updated information on laparoscopic simulators new generation physicists and the components they use, the requirements of an expert in laparoscopic surgery are taken into account to link two major branches of science such as medicine and engineering. Based on the needs posed by the expert, a web page is developed that stores the progress of the practices and a laparoscopic trainer model is implemented in which the advanced sensor modules can be coupled, whose main component is magnetic encoders type incremental adapted to a joystick mechanism, these modules measure the angles and calculate the path traveled by the tip of the clamp using software. The student can interact with the coach through the graphic interface and at the end of the practice can store the data on the website. The coach helps improve the motor skills of surgery students as this helps him improve his perception of depth, bimanual skills and efficiency; also considered that the coach has an accuracy of 2mm.

KEY WORDS:

- **LAPAROSCOPIC SURGERY**
- **LAPAROSCOPY-SIMULATORS**
- **WEB INTERFACE**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

La integración de la mecatrónica en la medicina ha avanzado a pasos agigantados en los últimos años, no solo en la construcción de equipo médico tradicional, si no, en la automatización de los procesos para realizar diferentes prácticas médicas, como por ejemplo en la cirugía laparoscópica.

El presente proyecto pretende optimizar el tiempo empleado en la curva de aprendizaje de los cirujanos laparoscópicos para el mejoramiento de sus habilidades motrices mediante el uso de un equipo tecnológico en el que puedan realizar sus prácticas y almacenar sus avances para que posteriormente el instructor pueda brindarles una retroalimentación apropiada y rápida acorde a su desempeño.

1.2. Antecedentes

La cirugía de mínimo acceso, mejor conocida como cirugía laparoscópica, alcanzó su auge en la década de los 90, iniciando el 12 de septiembre de 1985, con la primera colecistectomía (cirugía para extirpación de la vesícula biliar) realizada por Erich Mühe. A partir de ese entonces los avances tecnológicos han permitido que el cirujano realice procedimientos quirúrgicos más complejos y mínimamente invasivos. (Miranda, 2008)

La alta frecuencia de la colecistectomía y el gran número de expertos en este procedimiento fueron los detonantes para el desarrollo del primer simulador tecnológico de laparoscopia, para el análisis de este se utilizó un estándar militar, software de análisis de la NASA y los juicios de expertos en el tema. Se diseñaron módulos para medir las deficiencias en el entrenamiento y para

reforzarlos durante un procedimiento quirúrgico en sus tres momentos principales: el preoperatorio, la intervención y el postoperatorio. (SECLA, 2004)

Conforme se presentaban avances tecnológicos en los equipos usados para realizar cirugía laparoscópica, también se necesitaron de entrenadores con mayores funcionalidades para que los cirujanos adquieran las destrezas y habilidades necesarias. A nivel regional, en el año 2011, la Escuela de Ingeniería de Antioquía desarrolló un simulador laparoscópico llamado GIBEC, el mismo que poseía las especificaciones básicas que son: una estructura construida a base de un maniquí con un espacio hueco, una cámara CCD con transmisión de datos mediante USB y un sistema de luz amarilla regulable; este equipo se utilizó para ayudar a los estudiantes de postgrado de la misma institución a adquirir una habilidad adecuada para realizar dicho procedimiento. (García, Arias, & Valencia, Diseño de prototipo de simulador para entrenamiento en cirugía laparoscópica, 2011)

Adicionalmente, diversas empresas se han dedicado a ofrecer productos de entrenamiento laparoscópico que actualmente se encuentran disponibles en el mercado, uno de ellos es el LS-1100 Simulador Laparoscópico, producto insignia de Training&Competence, el cual posee un hardware externo que recrea con precisión un abdomen insuflado, cuenta con 4 orificios para los trócares (instrumento quirúrgico que abre el paso para el ingreso de la pinza laparoscópica) y una cámara interna de alta definición (1080p, 120 fps) (Training&Competence, 2019). También existen los modelos artesanales que han sido muy útiles por su bajo costo y facilidad de construcción y a pesar de su simplicidad son útiles al momento de adquirir habilidades y destrezas básicas para una cirugía de mínimo acceso.

En cuanto a los sistemas de sensorización, se han desarrollado proyectos enfocados a controlar variables ambientales para el control y gestión de mantenimiento en pavimentos, también existen antecedentes enfocados al área minera, infraestructuras ferroviarias, entre otros, (Proyecto Repara, 2017) pero a pesar de que los sistemas de sensorización se han enfocado en aplicaciones industriales durante los últimos años se han desarrollado equipos quirúrgicos y simuladores adaptados con esta capacidad. En la actualidad esta tecnología está en desarrollo y se estima que en algunos años se pueda englobar todo un sistema de entrenamiento y práctico en un sistema tipo cyberfísico para mejorar el tiempo empleado para el entrenamiento y entrenar sistemas robóticos operatorios para cirugías mínimamente invasivas.

1.3. Planteamiento del problema

La cirugía laparoscópica es un procedimiento que se realiza en un espacio de trabajo reducido y es sumamente delicada, por ende, es necesario que los médicos adquieran destrezas y habilidades en este tipo de procedimientos. Debido al alto riesgo que implica exponer a una persona viva este tipo de procedimientos se emplean simuladores, otra opción es utilizar cadáveres humanos, pero el uso de estos sería poco ético e insalubre, es por eso que en el país existen centros dedicados a ofrecer cursos de entrenamiento laparoscópico, los mismos poseen su propia sala de entrenamiento con equipos que van desde artesanales a sofisticados, pero para reducir el tiempo empleado para el aprendizaje, es necesario que el cirujano adquiera su propio equipo para mejorar su habilidad.

La investigación en el campo de simuladores laparoscópicos se ha enfocado en ambientes virtuales, los mismos que tienen limitaciones relacionadas a su precio y a la calidad de aprendizaje. El enfoque en ese tipo de simuladores ha limitado el avance de los entrenadores físicos a simples adaptaciones requeridas por el cliente; estas adaptaciones realizadas y sumado al valor de

importación hace que este tipo de simuladores con las funcionalidades mínimas sean de un alto costo, lo que implica cursos de entrenamiento laparoscópico a precios elevados y por ende de difícil acceso para los estudiantes de cirugía.

Recordando que la curva de aprendizaje sigue siendo realmente larga y las formas de entrenamiento escasas, se han creado modelos artesanales económicos de simulación laparoscópica, que a pesar de su simplicidad ayudan al momento de adquirir habilidades, pero no cumplen al 100% su objetivo, ya que este tipo de simuladores tienen como objetivo lograr un entrenamiento en habilidades básicas. (Lopes, Ramírez, & Ruiz, 2006)

En acuerdo a una entrevista preliminar con un instructor calificado de cirugía laparoscópica, Dr. Fernando Torres (2018), señala que los kits de entrenamiento artesanales presentan limitaciones como:

- Baja visibilidad, debido a la utilización de una cámara fija, opuesto a la situación real del procedimiento en que la cámara es móvil dentro del espacio de trabajo. En el caso en que el simulador utiliza una cámara móvil, este no permite el entrenamiento individual por la imposibilidad de estabilizar la cámara en una posición mientras la misma persona realiza el procedimiento.
- Retroalimentación de baja calidad, debido a la baja resolución de las cámaras usadas, no permite la visualización óptima del entorno.
- No existe una retroalimentación adecuada al no poseer sensores de ningún tipo.
- Generalmente están limitados al entrenamiento con una sola pinza laparoscópica.

1.4. Descripción resumida del proyecto

El fin del proyecto fue diseñar y construir un sistema de sensorización avanzada, a partir de un conjunto de instrumentos; aplicado a un entrenador laparoscópico que permite el mejoramiento de las habilidades motrices, para ello se partió desde la recopilación de información actualizada sobre simuladores laparoscópicos físicos de nueva generación y los componentes que estos utilizan, también de la entrevista a un experto en cirugía laparoscópica para enlazar dos grandes ramas de la ciencia como son la medicina y la ingeniería, con el objetivo de que el sistema mecatrónico planteado provea los datos que el médico necesita para obtener una retroalimentación efectiva y así reforzar el aprendizaje de destrezas y habilidades de los estudiantes de cirugía.

El prototipo está compuesto de: una estructura mecánica que simule el torso humano, diseñada para la correcta colocación de los diversos componentes que conforman el simulador; una cámara de alta definición, que permite al estudiante e instructor observar todas las maniobras en tiempo real; un conjunto de sensores, que permiten evidenciar los movimientos realizados por el practicante; y, una interfaz que permite seleccionar el tipo de entrenamiento y subir automáticamente el video de la práctica a una plataforma web para ser visualizado desde cualquier lugar con acceso a internet.

Para el diseño de la estructura, una de las características consideradas fue que simule un torso humano, con las dimensiones adecuadas tanto para la manipulación de equipos como para el espacio de trabajo, debido a que se requería simular condiciones quirúrgicas reales tanto en el rango de movimiento como en instrumental utilizado. Se realizó un conjunto de orificios (puertos) para el ingreso del instrumental laparoscópico sobre el torso para permitir el entrenamiento mediante ejercicios de coordinación ojo-mano, mano-mano y de corte y sutura, en diferentes posiciones tanto

de las dos pinzas laparoscópicas como del médico, lo cual aporta al desarrollo de las habilidades que podrán ser aprovechadas en diferentes procedimientos quirúrgicos. También, en esta estructura se añadió un mecanismo que permite la estabilización de la cámara, de tal forma que permite tanto el entrenamiento individual, como la manipulación libre de la misma al entrenar en equipo. El diseño mecánico fue analizado mediante software, con el fin de verificar el adecuado diseño y su espacio de trabajo; dentro del mismo programa se realizó pruebas para determinar la vida útil del equipo en condiciones extremas.

Una vez realizado el diseño mecánico se procedió a realizar el diseño electrónico. Su componente principal es un dispositivo desmontable que podrá acoplarse a la estructura y es compatible con las pinzas de laparoscopia más comunes en el mercado, el cual permite la adquisición de datos directamente de la pinza que ejecuta el procedimiento. Adicionalmente, el simulador tiene una cámara que hará las veces de laparoscopia, la misma es móvil y de alta definición con una calidad de 1080 pixeles y transmisión de video vía HDMI. Estos datos son enviados a un miniordenador, que es el encargado de recibir las señales de los diferentes sensores de acuerdo a las variables a medir, procesa la información para mostrarla de manera óptima al estudiante o instructor, muestra el tiempo total de entrenamiento; captura la información de la cámara, procesa y envía un empaquetado de información directo a un repositorio digital en internet que puede ser accedido desde cualquier parte del mundo, este que alberga las grabaciones y los datos de los entrenamientos realizados.

En la parte externa del simulador se incluyó una pantalla táctil, en la que el usuario puede elegir el tipo de entrenamiento a realizar de entre tres escenarios posibles: cronometrar el tiempo de entrenamiento, prueba contra el tiempo, o entrenamiento libre. Adicionalmente, puede modificar

la intensidad lumínica y el medio por el cual desea recibir los datos del entrenamiento, es decir si desea guardar el video de la práctica y/o los datos obtenidos en un disco externo o subirlo al repositorio.

El repositorio fue programado en base a código HTML, PHP y MySQL, en un host y dominio privado, en este se almacenan las grabaciones y mediante un usuario y contraseña el estudiante o instructor pueden acceder a ella para verificar todo su contenido, permitiendo que el estudiante pueda analizar su desempeño y que el instructor o especialista pueda evaluar el mismo y emitir una retroalimentación basada en su experiencia.

Los ejercicios que se pueden realizar en este simulador fueron definidos y limitados por el usuario, ya que posee una base de entrenamiento que puede ser extraída con la finalidad de facilitar el intercambio de los objetos utilizados para los distintos entrenamientos.

Finalmente, se realizaron las respectivas pruebas de funcionamiento del sistema con estudiantes de cirugía y médicos especializados en el área para obtener una realimentación del funcionamiento del sistema y mejoras para proyectos futuros, de acuerdo con los comentarios del experto.

1.5. Justificación e importancia

Los estudiantes de cirugía laparoscópica son beneficiados con la práctica mediante el uso de simuladores laparoscópicos físicos, ya que refuerzan las destrezas y habilidades para realizar actividades dentro de un espacio reducido, y el mismo hecho de ser un entorno físico provee al practicante una experiencia realista.

En el mercado nacional no existen fabricantes de simuladores quirúrgicos con altas funcionalidades, obligando a la importación de estos equipos, por lo que sus costos son elevados y

al poseer un prototipo funcional las empresas encargadas de ofrecer el servicio de entrenamiento laparoscópico pueden realizar la producción en serie y distribuirlas a un precio económico, generando un ahorro para el estudiante de cirugía laparoscópica.

La importancia del presente proyecto radica en mejorar los simuladores comerciales dotando el prototipo de nuevas tecnologías y funcionalidades, para que el estudiante de cirugía laparoscópica logre un mejor resultado de aprendizaje tanto en destrezas como habilidades con respecto a los simuladores tradicionales. Un punto muy importante es que el precio del simulador será mucho menor a los que se encuentran en el mercado, tanto físicos como virtuales, como por ejemplo el LS-1100 Simulador Laparoscópico, distribuido por la empresa Training&Competence que tiene un costo de 7000 dólares americanos.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

- Diseñar y construir un sistema de sensorización avanzada aplicado en un entrenador laparoscópico que permita el mejoramiento de las habilidades motrices de estudiantes de cirugía.

1.6.2. Objetivos específicos

- Investigar el procedimiento y los parámetros involucrados en cirugía laparoscópica, así como las variables a medir para determinar la efectividad del entrenamiento en estas maniobras.
- Diseñar un dispositivo sensorizado acoplable a pinzas de laparoscopia comerciales que permita adquirir información directa durante el entrenamiento de cirugía laparoscópica.

- Implementar un mecanismo que facilite la fijación del laparoscopio en la estructura del entrenador y permita su manipulación
- Representar los datos obtenidos mediante el dispositivo sensorizado en el video adquirido con el laparoscopio.
- Construir del sistema de sensorización avanzada mediante la integración de todos los componentes.
- Recrear los escenarios y ejecutar ejercicios en el entrenador para levantamiento de información y verificación de hipótesis.

1.7. Hipótesis

¿El sistema de sensorización avanzado facilitará el desarrollo de habilidades motrices de los estudiantes de cirugía laparoscópica?

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se muestran los fundamentos teóricos investigados entorno a la cirugía laparoscópica, también contiene conceptos importantes que serán utilizados a lo largo de la elaboración de este documento.

2.1. Cirugía laparoscópica

Es una técnica de abordaje de la cavidad del abdomen que permite el ahorro de grandes incisiones en el tratamiento quirúrgico de la mayoría de órganos del mismo. Su implementación ha sido la causante de grandes cambios en los aspectos técnicos de cirugía y sobre todo en la formación quirúrgica. (Quirúrgica, 2019)

En la antigüedad, esta técnica se usaba por lo general para cirugía ginecológica y de vesícula biliar, durante los últimos 10 años, el uso de esta técnica se ha ampliado e incluye la cirugía intestinal. En la cirugía tradicional “abierta”, el cirujano usa una sola incisión para entrar al abdomen. La cirugía laparoscópica usa varias incisiones de 0.5 a 1 cm, cada incisión se denomina “puerto”; en cada puerto se inserta un instrumento tubular conocido como trocar. Durante el procedimiento, a través de los trocares se pasan instrumentos especializados y una cámara especial llamada laparoscopio. Al iniciar el procedimiento, el abdomen se infla con dióxido de carbono para proporcionar al cirujano un espacio de trabajo y visibilidad. El laparoscopio transmite imágenes de la cavidad abdominal a los monitores de video de alta resolución del quirófano. Durante la operación, el cirujano observa las imágenes detalladas del abdomen en el monitor. El sistema

permite que el cirujano realice las mismas operaciones que la cirugía tradicional, pero con incisiones más pequeñas. (ASCRS, 2019)

2.1.2. Laparoscopia

El laparoscopia es un instrumento quirúrgico que se emplea para observar el interior de la cavidad abdominal y pélvica durante la cirugía. Se compone de una fuente de luz transmitida hasta el laparoscopia por fibra óptica, un equipo de vídeo con sus correspondientes monitores para poder visualizar y grabar la operación; y, de la pieza que se introduce en sí en la cavidad abdominal. (Operarme.es, 2015)

Aunque este instrumento está pensado especialmente para ser introducido en la cavidad pélvica-abdominal, existen modelos similares para las cirugías relacionadas con el tórax (toracoscopia) y para las cirugías en articulaciones (artroscopia). Estos instrumentos se emplean del mismo modo que el laparoscopia, presentando variaciones principalmente en el tamaño del artefacto. (Operarme.es, 2015)

2.1.2. Pinzas laparoscópicas

Una pinza laparoscópica es un dispositivo que permite al cirujano acceder al interior del cuerpo del paciente a través de una abertura de muy pequeño tamaño. Fundamentalmente, una pinza laparoscópica actual tiene una empuñadura similar a la de unas tijeras, un tubo alargado a través del cual se transmite el movimiento generado por el cirujano al abrir y cerrar los ojales de la empuñadura, y una punta donde se encuentra la pinza propiamente dicha, que es la que actúa directamente sobre los tejidos del paciente. (Ver Figura 1) (IMIBIC, 2012)

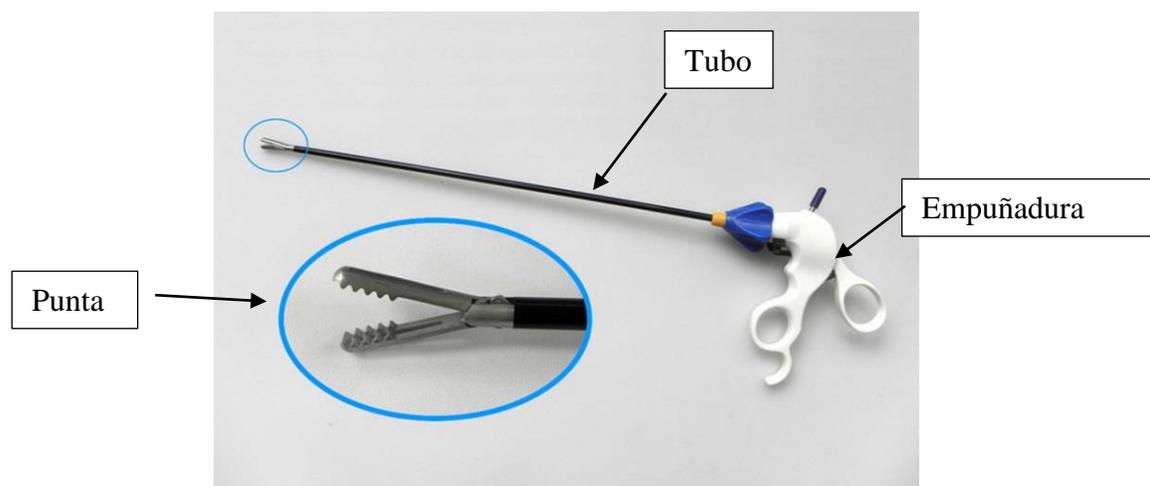


Figura 1. Pinza laparoscópica
Fuente: (IMIBIC, 2012)

Existen distintos tipos de tijeras laparoscópicas: tijeras de gancho, tijeras Metzenbaum rectas y curvas, micro tijeras curvas y rectas. Pueden ser de disección y agarre (que son traumáticas), o pinzas de disección atraumáticas; entre las de disección y agarre están las pinzas de Reddick-Olsen o pinzas click-line). Finalmente están las ópticas, que son de diferentes grados (las hay de 0, 30 y 45 grados). (Soto, 2005)

2.2. Entrenamiento basado en simulación

Generalmente, para el entrenamiento de cirugía se ha utilizado el método maestro-aprendiz de manera que los residentes acompañan a los especialistas a intervenciones quirúrgicas reales, pero su intervención es limitada ya que su falta de experiencia pone en riesgo la vida de un paciente, debido a que este se convertiría en un instrumento de aprendizaje y debido a la falta de experiencia del aprendiz, es posible cometer errores en la mesa de operaciones que podrían provocar a un fatídico desenlace. (García, Arias, & Valencia, 2011)

Se denomina educación médica basada en simulación a cualquier actividad educacional que utilice ayudas de simulación para recrear un determinado escenario clínico, sirven como una alternativa al paciente real y permite a los educadores tener un control total de avances sobre un escenario clínico preseleccionado. (García, Arias, & Valencia, 2011) Entre las ventajas que existen al utilizar el entrenamiento basado en simulación están:

- Reducción del tiempo de aprendizaje;
- Escenarios que son poco frecuentes en una cirugía real pero que se pueden dar;
- Ambiente de trabajo libre de estrés y facilitando una mejor concentración.
- Oportunidad de recibir una retroalimentación del instructor.

2.3. Equipos de entrenamiento laparoscópico

Un equipo de entrenamiento laparoscópico es un dispositivo que permite reproducir diferentes escenarios de una cirugía laparoscópica real, este equipo puede ser físico o virtual, siendo su objetivo principal la adquisición de destrezas y habilidades con los diferentes instrumentos y equipos quirúrgicos antes de ingresar a una cirugía real. El entrenador laparoscópico permite ejecutar procedimientos como suturas, corte, movimiento de pinzas entre otros. (Galindo & Visbal, 2007)

2.3.1. Entrenador laparoscópico físico

Un entrenador laparoscópico físico es uno de los equipos esenciales en proceso de entrenamiento de un médico cirujano. Es básicamente una caja que asemeja el abdomen a través de la cual se introducen los instrumentos laparoscópicos. Los instrumentos del entrenamiento son similares a los utilizados durante una intervención laparoscópica en la sala quirúrgica. Pueden

realizarse numerosos ejercicios que van desde la manipulación de pequeños objetos hasta practicar complejas suturas o anastomosis intra-corpóreas. (Ramos, Quintero, & Hernández, 2010)

Los entrenadores laparoscópicos físicos se pueden realizar de manera artesanal con una caja, iluminación y una cámara; o ser adquiridos de una empresa que se encargue de la distribución de estos productos. Entre los principales elementos que se encuentran en el mercado son:

Caja de entrenamiento para cirugía laparoscópica VIEUR

VIEUR es la empresa encargada de la distribución de este equipo (Figura 2). Se compone de un kit que posee: caja de entrenamiento, 5 módulos de entrenamiento (módulo de sutura 3D, módulo de sujeción, módulo de tracción del anillo de tiro, módulo de sujeción de bola y módulo de perforación), instrumentos quirúrgicos, agujas e hilos, video de instalación de la caja de entrenamiento. El costo del equipo es de 600 Euros, No posee una cámara de video por lo que se requiere una *Tablet* o *iPad*. (VIEUR, 2020)

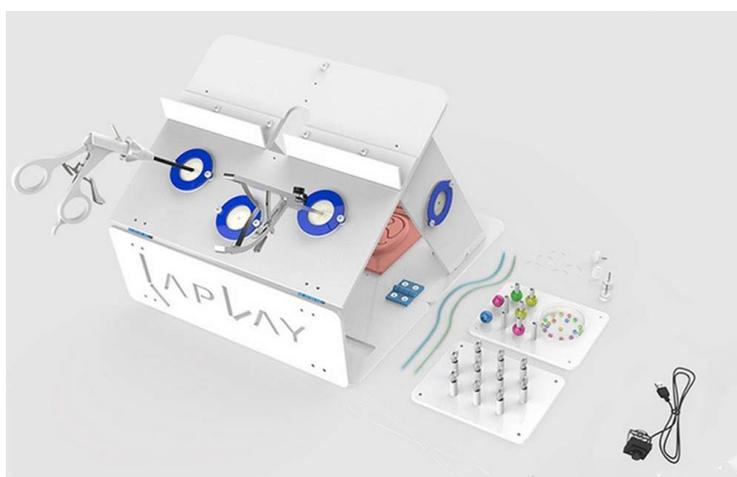


Figura 2. Entrenador laparoscópico físico
Fuente: (VIEUR, 2020)

Dr. ET EndoTrainer

El entrenador laparoscópico Dr. ET (Figura 3) fue diseñado por el Dr. Eduardo Troconis, el equipo consta de un cuerpo femenino, posee 8 aberturas que permiten el ingreso de las pinzas laparoscópicas, además posee una cámara de video HD que reproduce el video en tiempo real en un monitor mediante conexión VGA; el equipo contiene un set de 9 módulos de ejercicios. Su costo es de 800 dólares. (Troconis, 2012)



Figura 3. Dr. ET
Fuente: (Troconis, 2012)

2.4. Sensor

El término sensor se refiere a un elemento de medición que detecta la magnitud de un parámetro físico y lo cambia por una señal eléctrica que puede procesar un sistema. El sensor posee un elemento activo denominado transductor; el diseño de algún tipo de sensor siempre implica la aplicación de una ley o principio físico o químico para que se relacione con el cambio. (Ferrer, 2009)

2.5. Cámara de video

Una cámara de video es un transductor óptico capaz de captar imágenes en movimiento y convertirlas en señales eléctricas, estos dispositivos pretenden emular el funcionamiento del ojo humano. Su funcionamiento es simple, consiste en captar la intensidad luminosa de cada color mediante un sensor fotosensible.

2.5.1. Sensor de captura de imágenes

El sensor es el componente más importante de una cámara, posee forma rectangular y está compuesto por una gran cantidad de celdas fotosensibles, cuya función es recoger la luz. Cada una de las celdas posee un fotodiodo que convierte la luz en electricidad, que a su vez se convierte en información y es receptada por el procesador. (Olmedo, 2019)

La Figura 4 muestra una representación gráfica de un sensor en una cámara y sus celdas fotosensibles, cada una de estas celdas corresponde a un pixel y mientras más celdas posea, más información del entorno captará la cámara.

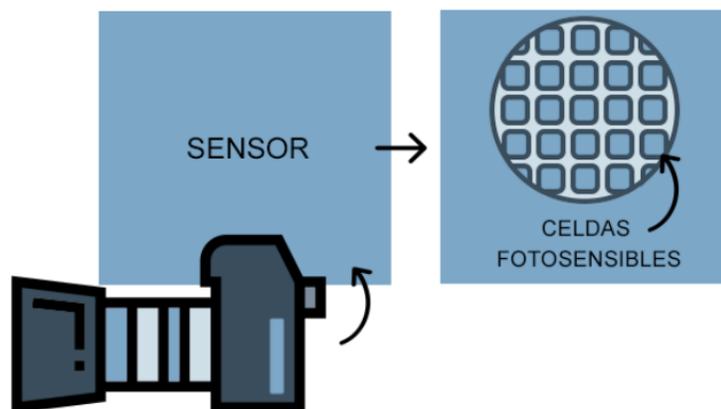


Figura 4. Sensor de fotografía

Fuente: (Olmedo, 2019)

Tecnología de los sensores

Según Sony, los sensores acordes a su tecnología se clasifican en:

- CCD y súper CCD
- CCD RGBE
- CMOS
- Foveon x3

Los sensores más populares en el mercado son los CCD y CMOS. Los sensores CCD tienen una velocidad de muestreo muy lenta y tienen un alto costo de fabricación, pero esto lo compensan con su calidad de fotografía, mientras que los CMOS poseen una velocidad de muestreo alta y su costo de fabricación es bajo, pero poseen una calidad fotográfica menor con relación a los CCD, a pesar de esto este tipo de sensores son muy usados en la actualidad. (Blog del Fotógrafo, 2019)

Una característica muy importante en los sensores es el tamaño ya que de este depende la calidad de imagen y la cantidad de celdas fotosensibles pueda poseer; generalmente el tamaño del sensor es expresado en pulgadas.

2.5.2. Enfoque

En términos de óptica, enfocar es hacer coincidir los rayos de luz que inciden en la cámara en un punto llamado foco. Se dice que un objeto está enfocado si la luz procedente de varios puntos del objeto converge con la imagen. En términos prácticos enfocar es dejar nítido aquello que está a una distancia concreta (Ver Figura 5). (THEWEBFOTO, 2015)

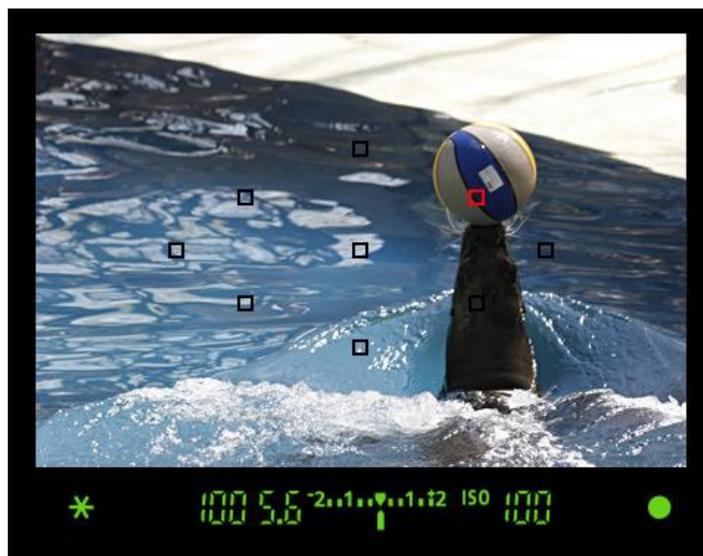


Figura 5. Ejemplo de enfoque de una cámara digital
Fuente: (THEWEBFOTO, 2015)

Métodos de enfoque

Los objetos en un video están constantemente en movimiento, para ello las cámaras actuales poseen varios métodos de enfoque que se pueden configurar, estos son:

- Autofocus simple: La cámara se enfoca una vez, es un método utilizado para fotografías estáticas.
- Autofocus Al Foco: Este método consiste en que si el objeto que está frente a la cámara se mueve levente esta lo reenfoca
- Autofocus al Servo: Este método consiste en que si el objeto se mueve constantemente la cámara automáticamente lo enfoca.

Distancia focal

La distancia focal es la distancia que existe entre el plano focal (sensor) y el centro óptico del lente, esta distancia se mide desde el punto donde los rayos de luz se cruzan y son dirigidos hacia el sensor. La distancia focal es expresada en milímetros. (Ver Figura 6) (Blog del Fotógrafo, 2018)

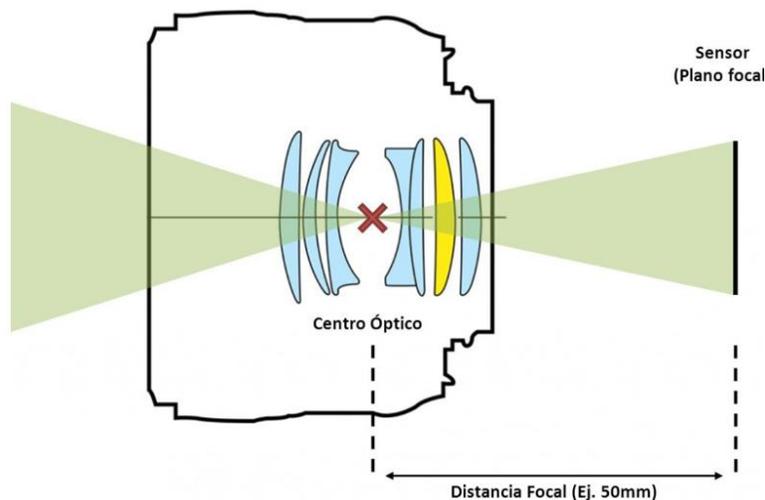


Figura 6. Representación gráfica de la distancia focal
Fuente: (Blog del Fotógrafo, 2018)

2.5.3. Profundidad de campo (DOF)

La profundidad de campo es la distancia por delante y por detrás del punto enfocado que aparece con nitidez en una foto, una imagen en donde casi todo está en el foco tiene una profundidad de campo grande si pasa lo contrario tiene una profundidad de campo pequeña. (Pérez, 2011)

La profundidad de campo depende de la apertura del obturador, y de esta última dependerá la cantidad de luz que pase al sensor, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Profundidad de campo
Fuente: (Pérez, 2011)

2.5.4. Consideraciones para la captura de una buena imagen de video

En la Tabla 1 se muestran los conceptos y características a considerar para capturar una buena imagen.

Tabla 1
Consideraciones para la captura de imágenes

	Descripción	Característica
Luminosidad	La luminosidad hace referencia a la cantidad de luz que llega al lente y este deja pasar	Se define por la apertura focal. En cámaras convencionales esta apertura es fija.
Ambiente controlado	Un ambiente controlado es todo aquel en el que se posee control sobre las variables que influyen al captar una buena imagen.	Control sobre la luz Control sobre el movimiento
Enfoque	Es la acción de dejar nítida la imagen.	Un buen enfoque proporciona una buena imagen sin ruido.
ISO	Marca la cantidad de luz que necesita una cámara para tomar una imagen.	Digitalmente el ISO amplifica la iluminación que ingresa al sensor, pero a costa de reducir la calidad de la imagen.

Fuente: (León, s.f.) (Pérez, 2011)

2.6. Resolución de pantalla

La resolución es la relación entre el número de píxeles en los que se divide la pantalla, horizontal y vertical. Un píxel es la unidad más pequeña en la que se divide una pantalla y es un elemento que se compone de los tres colores principales RGB. Cuanto mayor sea el número de píxeles, mejor definición tendrá una pantalla. (CalibracionesHD, s.f.)

La resolución de pantalla viene expresada por 2 números, siendo el primero el que representa la cantidad de píxeles horizontales y el segundo la cantidad de píxeles verticales.

2.6.1. Relación de aspecto

La relación de aspecto en pantallas indica la relación existente entre la cantidad de píxeles verticales y horizontales. Por ejemplo, si la relación de aspecto es de 4:3 indica que por cada 4 partes de píxeles verticales existen 3 horizontales. (CalibracionesHD, s.f.)

La relación de aspecto 4:3 es la más utilizada y con ella vienen dadas las siguientes relaciones estándar:

- QVGA: 320x240
- VGA: 640x480
- SVGA: 800X600
- XGA: 1024X768
- HD 720: 1280X720
- FULL HD: 1920X1080
- 2K: 2048X1080

2.7. Transmisión de video

La configuración correcta de un sistema de video sea por cable o inalámbrico, debe permitir la transmisión de video en tiempo real sin ningún tipo de latencia. El principal problema de esto es que se necesita líneas de alta capacidad, pues los videos utilizan volúmenes de información elevados. (Ferrer, 2009)

Si la transmisión de video es mediante cables es un medio de transmisión guiado, tradicionalmente se utilizan pares trenzados, para la transmisión de video de forma analógica o digital, por este medio se necesita codificar previamente el video; para evitar estos problemas se requiere de un tipo de cable específico en distancias cortas que es el HDMI. (Romero, 2018)

2.7.1. Transmisión de video mediante HDMI

HDMI es el acrónimo de *High Definition Multimedia Interface* (Interfaz multimedia de alta definición). Es uno de los más utilizados actualmente para la transmisión de video en alta definición y audio en pantallas tipo LCD, plasma y monitores de última generación. Existen dos tipos de enlace, simple y doble, el segundo soporta resoluciones superiores a 1080p. (Ortega, 2011)

Según Ortega (2011), la conexión HDMI no soporta una conexión analógica y sus versiones son:

- HDMI v1.0: Transmisión de video hasta 1080p y audio de 8 canales a 192KHz y 24 bits.
- HDMI v1.1. Similar a la versión 1.0 pero soporta DVD Audio.
- HDMI V1.2: Similar a la versión 1.1. pero soporta transmisión de DSD para Super Audio CD.

- HDMI v1.2: Soporta resoluciones superiores a los 1080p, mayor calidad en bits de color y audio de alta definición.

2.7.2. Interfaz de procesamiento de video

Una interfaz de procesamiento de video es un algoritmo diseñado para manejar los paquetes de información provenientes de una cámara, el más común es el V4L2.

V4L2 significa video para Linux 2 y constituye una segunda versión de la interfaz de programación aplicada V4L, V4L2 forma parte del núcleo de Linux y permite manipular una gran cantidad de dispositivos de video, de entrada y salida. Generalmente se implementa con un conjunto de funciones de llamada al dispositivo. (Delgado, 2017)

2.8. Sistemas de coordenadas

Un sistema de coordenadas es un conjunto de puntos que permiten definir la posición de cualquier punto en un espacio euclídeo. Un espacio euclídeo se define como una dimensión finita en donde se puede construir sistemas de referencia. (Martínez F. , 2015)

Para el posicionamiento de un punto en 3 dimensiones existen sistemas de coordenadas cartesianas, polares, esféricas y cilíndricas.

2.8.1. Coordenadas esféricas

Las coordenadas esféricas se utilizan en espacios euclídeos tridimensionales, se forman por 3 perpendiculares que cortan en el origen.

En la Figura 8 se muestra el sistema de coordenadas esféricas gráficamente con cada una de sus ecuaciones, donde la coordenada r , es la distancia del origen al punto. (Distancia del origen de coordenadas) (Martínez F. , 2015)

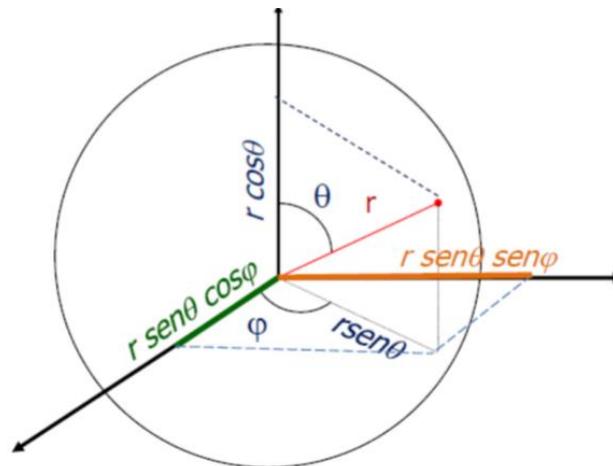


Figura 8. Sistema de coordenadas esféricas

Fuente: (Martínez F. , 2015)

2.9. Grados de libertad

El término grados de libertad viene dado por el número de entradas independientes para determinar el movimiento de un cuerpo, además grados de libertad se refiere al número de movimientos independientes que puede realizar un elemento (Grupo SIRP, 2010)

2.10. Joystick

Un joystick es un dispositivo de entrada a manera de palanca que puede moverse en todas las direcciones posibles a lo largo de dos ejes X e Y, conectada a dos potenciómetros que se encargan de registrar la posición en los ejes mencionados. Su modo de operación es analógico. (GlosarioIT.com, 2019)

2.11. Página web

Una página web es un documento digital de carácter multimediático, adaptado a los estándares *World Wide Web* (www), al cual se puede acceder a través de un navegador web. Su codificación es realizada mediante estándares y el lenguaje específico HTML. Una página web generalmente posee archivos multimedia, texto, enlaces a otros sitios, animaciones, audio, entre otros. (Begoña, 2019) Existen dos tipos de páginas web, que se detallan a continuación:

- Páginas web estáticas: páginas web antiguas que poseen contenido fijo y no apta para actualizaciones contantes.
- Páginas web dinámicas: poseen la característica de interacción en tiempo real, son diseñadas en base a HTML al cliente y algún otro lenguaje de programación en el lado de servidor como PHP.

2.11.1. Desarrollo web

El desarrollo web es un proceso de creación y mantenimiento web, el desarrollador web es quien se encarga de trabajar en segundo plano para que una página web posea un funcionamiento rápido y un buen desempeño lo que conlleva a una mejor experiencia del usuario. (Leandro, 2018) El desarrollo web se ha dividido en dos partes: Backend (cliente) y Frontend (servidor).

Frontend

Frontend es el que está del lado del cliente, es decir interactúa directamente con el usuario. Esta es la parte a la que todos los usuarios tienen acceso y se ejecuta en el navegador. (Chapaval, 2018) Los lenguajes principales del Frontend son: HTML, CSS Y JavaScript.

- **HTML (HyperText Markup Language):** Es un lenguaje de marcado que se utiliza para el desarrollo de páginas web del lado del cliente, indica cómo va ordenado el contenido de la página más no su estructura para esto se usa el archivo CSS que se encarga de la parte gráfica de la misma. (Flores, 2015)
- **CSS (Cascading Style Sheets):** Es un código que funciona como complemento del HTML, dota de color, forma, posición y otras características visuales a una página web. (Hernández, 2017)
- **JavaScript:** Basado en el estándar ECMAScript, funciona del lado del cliente y se utiliza para mejorar la interfaz de usuario de una página web, automatizar acciones o construir aplicaciones o sitios web más complejos y personalizados. (Hernández, 2019)

Backend

Backend es la parte que se encuentra del lado del servidor, no es directamente accesible a los usuarios ya que aquí se encuentra la lógica y los datos de la página web. Los lenguajes de programación de Backend son: Python, PHP, Ruby, C# y JAVA. (Chapaval, 2018)

- **PHP (Hypertext Pre-processor):** Es un lenguaje desarrollado para el diseño de páginas web dinámicas, trabaja del lado del servidor o backend mediante un script y va incrustado dentro del código HTML. (Red gráfica Latinoamérica, 2010)

2.11.2. Gestores de contenido

Según Fernández (2018), un gestor de contenidos o CMS (Content Management System), es una herramienta que permite crear, administrar y gestionar un sitio web sin la necesidad de recursos técnicos avanzados y a un costo reducido. Los gestores de contenido más conocidos son:

- WordPress: Es el gestor de contenidos más popular actualmente debido a su fácil uso, posee una gran comunidad y un gran contenido de plugins. Ideal para sitios corporativos o blogs.
- Drupal: Es un gestor muy complejo, con una gran curva de aprendizaje, pero con mayor capacidad para construir un sitio web complejo.
- Joomla: Posee elementos muy versátiles, aunque su uso es más complejo esto se compensa con la capacidad de crear sitios web avanzados.

2.11.3. Protocolo de transferencia de archivos

Protocolo de transferencia de archivos o FTP (File Transfer Protocol), es de los protocolos más antiguos que se usa hasta el día de hoy, su función es mover ficheros entre un cliente y servidor conectados a una red TCP. (Matus, 2020)

El servicio FTP funciona en una red con el protocolo TCP/IP, generalmente se usa el puerto de red 20 y 21. Ofrece una velocidad de conexión alta, pero a costa de la seguridad de los archivos. Al contratar un hosting el proveedor le entrega un usuario y contraseña para la transferencia de archivos. (Network net Services, s.f.)

2.12. Base de datos

Una base de datos es un conjunto de información relacionada que se encuentra agrupada o estructurada, se componen de una o más tablas en forma de filas y columnas que guardan un conjunto de datos. Las columnas guardan la información sobre el elemento mientras que las filas guardan los registros. (Pérez D. , 2007)

Según Pérez (2007), los tipos de base de datos más conocidos son:

- MySQL: base de datos con licencia GPL basada en un servidor. Es rápida pero no es recomendable su uso para un elevado volumen de datos.
- PostgreSQL y Oracle: sistemas de base de datos poderosos, ideales para un gran volumen de datos.
- Access: desarrollada por Microsoft, debe ser creada bajo el programa Access, el cual crea un archivo con la estructura de la base de datos.
- Microsoft SQL Server: herramienta potente, desarrollada por Microsoft, se utiliza para el manejo de grandes cantidades de información.

2.12.1. Sistema de Gestión de Base de Datos (SGBD)

Un sistema de gestión de base de datos, SGBD, por sus siglas en inglés (*DataBase Management System*), es un tipo de software específico dedicado a ser la interfaz entre la base de datos y el usuario. Se compone de un lenguaje de definición de datos, de un lenguaje de manipulación de datos y de un lenguaje de consulta. (Pérez D. , 2007)

2.12.2. SQL

Lenguaje de consulta estructurado o SQL (*Structured Query Language*), es un lenguaje de acceso a base de datos relacionales. Permite realizar cambios y ejecutar consultas de manera que se recupera la información de interés de una base de datos de una forma sencilla. (Ortiz, 2011)

2.13. Interfaz gráfica

La interfaz de usuario o interfaz gráfica es un modo de interacción entre un usuario y una máquina o sistema informático, se emplean dispositivos de entrada/salida con un software de aporte que controla la lógica de funcionamiento de las ventanas que compone la interfaz. La interfaz tiene

que ser amigable, es decir de fácil uso, esto está muy relacionado con la interactividad. (Fernández, Angós, & Salvador, 2001)

2.13.1. Consideraciones para el diseño de una interfaz de usuario amigable

La norma UNE-EN ISO 9241 indica que las consideraciones a tomar en cuenta para un correcto diseño de una interfaz gráfica amigable son:

- Poseer una excelente comunicación, visual y auditiva.
- Estructura de la interfaz en niveles jerárquicos.
- Emplear símbolos visuales de la vida cotidiana de los usuarios.
- Realizar un estudio previo del usuario al que va a ser enfocada la interfaz gráfica.
- Procurar ayudas textuales y gráficas, tanto generales como locales.
- Procurar ayudas procedimentales, simular el asesoramiento de un experto.
- Tomar en cuenta los colores de la interfaz gráfica.
- Realizar una guía sobre la utilizabilidad.
- Realizar una guía general para el usuario.

2.13.2. Python como lenguaje de programación de la interfaz gráfica

Python es un lenguaje multiparadigma y orientado a objetos, al ser un lenguaje interpretado no requiere compilación previa como otros lenguajes, sino es interpretado durante su ejecución. Es un lenguaje multiplataforma y en los últimos años se ha convertido en una gran herramienta para el desarrollo web y análisis de datos como: Big Data, Data Science. (Zaforas, 2018)

Actualmente Python es el lenguaje más usado a nivel mundial, su uso se enfoca en desarrollo de aplicaciones móviles, web y control de base de datos. (Zaforas, 2018)

CAPÍTULO III

DISEÑO MECATRÓNICO DEL ENTRENADOR LAPAROSCÓPICO

En el presente capítulo se detalla el proceso de diseño y construcción del entrenador laparoscópico con sensorización avanzada, la metodología a utilizar es la de Ulrich & Eppinger (2013), la misma que abarca todos los campos que interviene el desarrollo del proyecto. Se inicia identificando las necesidades del cliente para diseñar los conceptos que cubran los requerimientos proporcionados; una vez diseñado se procede a la selección de componentes electrónicos y mecánicos, se realiza una simulación CAD y CAE, en lo que respecta a estructura mecánica para identificar posibles fallas en la estructura y corregirlas antes de proceder a la construcción del equipo.

3.1. Necesidades del cliente

El criterio de un experto es primordial al momento de iniciar con el desarrollo de un producto, el doctor Fernando Torres es un cirujano general, especializado en el campo de la cirugía laparoscópica básica y avanzada, además es docente en la Universidad San Francisco de Quito en donde dirige cursos de capacitación en simulación quirúrgica hospitalaria a estudiantes y especialistas en el campo de posgrado laparoscópico. Debido a su gran experiencia en el campo es quien tiene el papel de experto y además quien plantea las necesidades del cliente.

Las necesidades planteadas por el cliente para el entrenador laparoscópico son:

- Buena calidad de video.
- El equipo debe permitir el trabajo autónomo o colaborativo.

- Disponer el video de la práctica en una plataforma web, para el control de avance del entrenamiento.
- Un medio que permita interactuar con el equipo.
- Los objetos manipulables del equipo deben ser ergonómicos.
- El equipo debe ser de bajo costo.

3.2. Requerimientos técnicos

Con base a las peticiones realizadas por el cliente se consideran los siguientes requerimientos técnicos:

- Aspectos técnicos de la cámara de video, como: buena resolución de imagen, colores reales de la imagen, visualización de video sin cortes y a tiempo real.
- Estructura, dimensiones y materiales para la construcción del equipo.
- Plataforma virtual que permita el almacenamiento de videos en la nube y su visualización.
- Velocidad de subida de video.
- Sensores de distancia
- Sensores de posición
- Interfaz gráfica de interacción humano-dispositivo.

3.3. Discusión

Sensorización tradicional, se define como la implantación de dispositivos que recogen información acerca de un gran abanico de variables cuantificables, para ser analizados posteriormente en los centros especializados. (Alba Smart, 2018)

En base a los requerimientos establecidos por el cliente se presentan un conjunto de especificaciones técnicas, las mismas que se desenfocan del concepto de sensorización tradicional detallada anteriormente.

Tomando en cuenta la adquisición de datos e imágenes en tiempo real, sumado a la necesidad de una plataforma web de almacenamiento de datos y videos se requiere recurrir a un nuevo término “Sensorización Avanzada”, el mismo no ha sido definido en el campo del entrenamiento laparoscópico físico, pero existen antecedentes sobre este término en otras grandes áreas, por ejemplo:

Según Minería Chilena (2018), un sistema de sensorización avanzada es el primer paso hacia la automatización de operaciones, actualmente las empresas ya no necesitan recopilar un conjunto de datos, ellos requieren la recolección de datos correctos y que estos sean digitalizados y tengan una conectividad. La captación y conducción de datos ayuda a la identificación de las variables críticas y la adecuada selección de componentes tecnológicos.

Según iAgua (2018), un sistema de sensorización avanzada ayuda a reducir los problemas en las redes de distribución de agua, debido a que el sistema provee una detección de fugas en tiempo real.

Conociendo los antecedentes se procede a definir el término sensorización avanzada en el campo de los entrenadores laparoscópicos físicos como: Un método de obtención de información de parámetros sobre un determinado entrenamiento, con recolección de datos precisos y disponibilizados a tiempo real, además están sujetos a interacción con una base de datos que le

permite al usuario verificar los valores obtenidos por determinado sistema en cualquier lugar con la ayuda de un dispositivo fijo o móvil con acceso a la red.

3.4. Propuesta

En este apartado se muestra la propuesta para la elaboración del sistema denominado entrenador laparoscópico con sensorización avanzada, se consideraron un apartado de desarrollo web y dos subsistemas, electrónico y mecánico. La razón para considerar los subsistemas fue el grado de dificultad al realizar la propuesta, debido a que las necesidades del cliente se enfocan tanto en la calidad de los componentes electrónicos a seleccionar como la ergonomía de los equipos manuales para el entrenamiento.

3.4.1. Propuesta del desarrollo web

La propuesta desarrollada para la página web es la que se muestra en la Figura 9, en ella se presenta un encabezado en donde se ubica el logo de la empresa y/o producto, un conjunto de menús que le permiten al usuario desplazarse por las diferentes ventanas de la página web una sección de contenido y en la derecha de la ventana un widget que contendrá la información de importancia sobre el usuario.



Figura 9. Propuesta de la página web

3.4.2. Propuesta del subsistema electrónico.

La propuesta del subsistema electrónico se muestra en la Figura 10, el mismo está conformado por: un miniordenador que es el componente principal del subsistema, una cámara de alta definición, entradas de periférico USB, una entrada de pantalla táctil, encargada de enviar la orden a ejecutar. Además, el miniordenador está conectado al sistema de sensorización, el cual se compone de un controlador y sus respectivos sensores de medición. Cada componente interactuará con el miniordenador como indica cada una de las flechas.

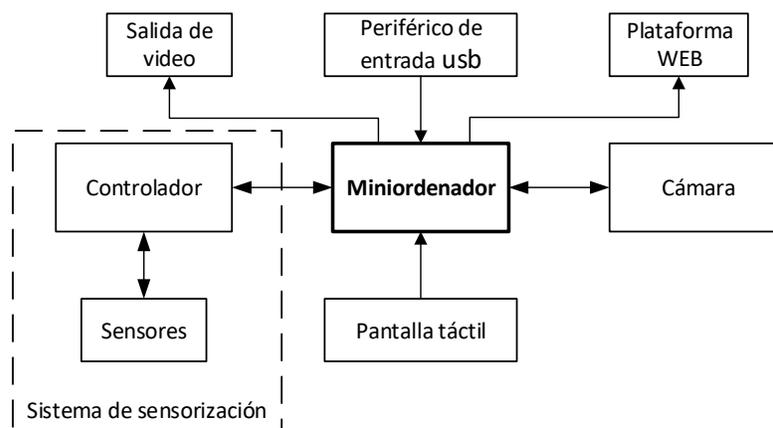


Figura 10. Subsistema electrónico

3.4.3. Propuesta del subsistema mecánico

La propuesta del subsistema mecánico se muestra en la Figura 11, la misma posee varios componentes solicitados por el cliente.

1. Estructura que simule un torso humano (no necesariamente anatómica) con sus cavidades para el acople del sistema de sensorización y el ingreso de las pinzas laparoscópicas comerciales (Globo 1).
2. Entrada para los diferentes juegos de entrenamiento como: sutura, corte, etc. (Globo 2)

3. Posible lugar en donde estaría ubicada la pantalla táctil. (Globo 3)
4. Iluminación interna del equipo. (Globo 4)
5. Espacio para colocar el subsistema electrónico. (Globo 5)
6. Entrada para la cámara laparoscópica. (Globo 6)

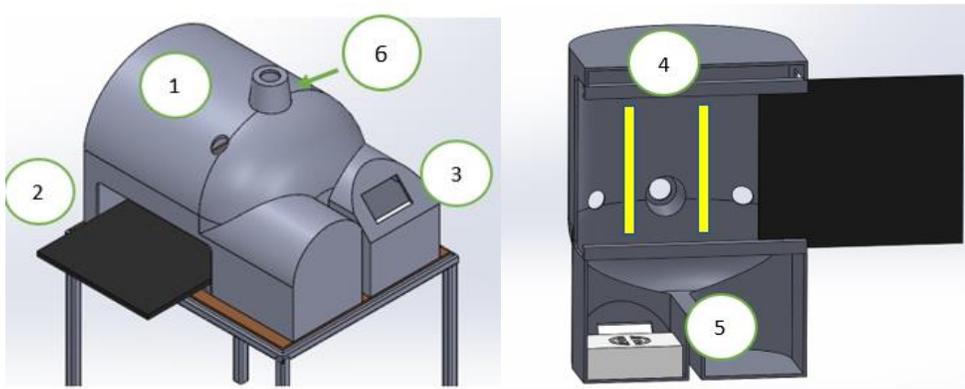


Figura 11. Subsistema Mecánico

3.5. Selección de componentes del sistema

En este apartado se presenta la selección de cada componente que integra el sistema. En el mercado existe un sinnúmero de opciones que se acoplan a las necesidades y cubren cada uno de los requerimientos planteados por el cliente, pero es primordial seleccionar aquel que cumpla los requerimientos sin que sea un elemento subutilizado.

3.5.1. Selección de componentes del subsistema electrónico

Para la selección de los componentes electrónicos que comprende este subsistema se analizaron sus principales características técnicas, acorde con las necesidades del usuario, además se analizan sus dimensiones y su costo.

Selección del miniordenador

Este elemento es el componente principal del prototipo, es quien ejecuta las órdenes enviadas por el usuario. Acorde a las necesidades planteadas por el experto, se plantearon las siguientes opciones de miniordenadores: Raspberry pi 3B+, Orange Pi Plus y Ordroid C2; la Tabla 2, muestra las características técnicas, físicas y precio, de los dispositivos para su posterior elección.

Tabla 2
Especificaciones técnicas de miniordenadores

Característica	Raspberry Pi3 B+	Ordroid C2	Orange Pi Plus
Técnicas			
Procesador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv9) 64-bit SoC	Amlogic S905 64-bit quad-core ARM Cortex-A53 ARMv8	Allwinner H3 ARM Cortex-A7 (32-bit) quad core
Velocidad	1,4 GHz	1,5GHz	1,536GHz
RAM	1GB	2GB	1GB
GPU	N/A	Mali-450 MP a 700MHz	MP400MP2
USB	4 x USB2.1 compartidos con Ethernet	4 x USB2.0 + 1 microUSB para OTG	4 x USB2.0 + 1 microUSB para OTG
Almacenamiento	Micro SD	Micro SD	Micro SD + 8GB internos
Ethernet	100Mbit compartido USB	Gigabit a 1000Mbit independiente de los USB	Gigabit a 1000Mbit
Wi-Fi	2.4GHz / 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac	N/A	802.11n
Video	HDMI 1.4 FullHD 1080p 60fps	HDMI 2.0 4K a 60fps	HDMI 1.4 FullHD 1080p 60fps
GPIO	40 pin incluyendo GPIO / UART / I2C / I2S	40 pin incluyendo GPIO / UART / I2C / I2S / ADC	40 pin incluyendo GPIO / UART / I2C / I2S
Sistema Operativo	GNU/Linux – Raspbian - Windows 10	GNU/Linux Android	GNU/Linux Android
Entrada de energía	5V – 2,5A	5V – 2A	5V – 800mA
Físicas			
Dimensiones (mm)	82x56x19,5	85x56x20	60x108x20

CONTINÚA 

Peso (g)	50	40	50
Temperatura de trabajo (°C)	20-80	N/A	-10 – 75
Precio	\$40,00	\$40	\$49,00
Comunidad	Más de 8 millones	Baja	Baja

Fuente: (Luz, 2016); (Raspberry, 2019); (Orange Pi, 2019))

Acorde a las características presentadas se pudo evidenciar que el procesador de la Raspberry Pi3B+ es superior con respecto a sus competidores, a pesar de que su velocidad sea un 0.1GHz mayor trabaja a 64 bits. Con respecto a la memoria RAM tiene una clara ventaja el miniordenador Ordroid C2, pero su selección queda descartada debido a que no dispone de conectividad inalámbrica (Wi-Fi), es indispensable contar con esta característica para la aplicación.

Las características técnicas de los dos miniordenadores restantes son muy similares, para ello se toma en cuenta las características físicas, siendo la Raspberry Pi 3B+ con respecto a su competidora, la más económica y con una comunidad de desarrollo más amplia, es por este motivo que se seleccionó dicho miniordenador.

Selección de la cámara

La cámara es el componente encargado de recopilar imágenes de la práctica para que el miniordenador pueda empaquetar las mismas y transmitirlo en forma de video hasta el monitor (pantalla); se plantearon 3 opciones de cámaras, tomando en cuenta las necesidades planteadas por el experto y el miniordenador seleccionado en el apartado anterior.

Las opciones son: Arducam Módulo de Cámara 13MP, Módulo de cámara Raspberry PI V8 (RPI – V8) y Arducam Módulo de Cámara 16MP, sus características técnicas y físicas se muestran en la Tabla 3

Tabla 3
Características técnicas de la cámara

Características	Arducam 13MP	RPI V8	Arducam 16MP
Técnicas			
Sensor	Sony Exmor-R con retroiluminación de 1/3 de pulgada IMX135 de 13 megapíxeles	Sony IMX219 de 1/4 pulgada de alta resolución nativa de 8 megapíxeles	SONY CMOS de 1/2.8 pulgadas que adopta Exmor-R IMX298 de 16 megapíxeles
Velocidad de Frames en captura de video	4192x3120/12fps, 1080p/30fps and 720p/60fps	1080/30fps, 720/60fps y 640x480/90fps	4672x3496/7fps, 1080p/55fps y 720p/120fps.
Filtros de color	Filtro de color de codificación RGBW (R, G, B y "Blanco" (acromático) y reproducción de mosaico de color primario RGB en chip	RGBW	Conjunto de filtros de color: patrón de Bayer RGBW
Comunicación	I2C dos hilos compatibles con Raspberry	CSI	I2C dos hilos compatibles con Raspberry
FOV	60 grados, programable	N/A	60grados
Enfoque	Automático/Manual por Software	Manual	Automático
Físicas			
Dimensiones(mm)	40x40x9	25x 23x 9	40x40x9
Peso(g)	3	3	3
Costo	\$47,00	\$25,00	\$60,00

Fuente: ((Arducam, 2019), (Raspberry, 2019))

La Tabla 3 muestra el conjunto de características de las cámaras, siendo estas similares; se seleccionó la Arducam 13MP debido a que el tamaño del archivo de grabación será pequeño a comparación con la Arducam 16MP. Es importante recalcar esta característica ya que el video

obtenido de la práctica será subido a la web, además las características que posee esta cámara se ajustan a las necesidades del usuario y su costo es inferior con respecto a su competidora.

Pantalla táctil

Un medio de interacción entre el usuario y el dispositivo es una pantalla táctil, se decidió utilizar la pantalla mostrada en la Tabla 4 debido a que cumplía las características necesarias, cabe recalcar que no se tomó en cuenta otras alternativas debido a que este tipo de pantalla es la más pequeña y cumple el requisito de calidad precio.

Tabla 4

Características técnicas de la pantalla táctil

Característica	Pantalla táctil
Tipo	LCD táctil 3.5 [pulg]
Controlador	XPT2046
Resolución	320X480
Compatibilidad	Raspberry Pi, Orange Pi
Táctil	Resistivo
Gama de colores	655356
Precio	\$20,00

Fuente: (altronics.cl, 2017)

La pantalla no necesita un driver debido al tipo de controlador que dispone (ver Tabla 4), lo que hace su uso más fácil, además el margen de colores es amplio lo que facilita el aspecto estético de la interfaz gráfica, estas características son las que favorecen la elección de esta pantalla, sumado a su bajo costo es un elemento que cumple todos los requisitos.

Tarjeta de Control

Este elemento es el que se encarga de recibir las señales de los sensores, mediante la ejecución de un algoritmo enviará los datos calculados a la minicomputadora, se han considerado 3 tarjetas

electrónicas: Arduino MEGA, Teensy 3.2 y Arduino DUE, cuyas características se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.

Características técnicas de la tarjeta de control

Característica	Arduino Mega	Teensy 3.2	Arduino DUE
Voltaje de operación	5VDC	3.3 VDC	3.3VDC
Voltaje de alimentación	7-12VDC	3.6-6VDC	7-12VDC
Controlador	ATmega 2560 8Bits	Microcontrolador ARM Cortex-M4 32 bit	Cortex AM3 AT91SAM3X8E.a 32 bits
Frecuencia del reloj	16 MHz	72 MHz	84MHz
Pines digitales	54 (15PWM)	34 (12PWM)	54 (12PWM)
Pines interrupción	6	34	54
Entradas analógicas	16	21 (13bit)	12
Salidas analógicas	0	1 (12bit)	2
Tipo de conector	Puerto serie	Micro USB	Micro USB
Costo	\$ 20,00	\$45,00	\$40,00

Fuente: (arduino.cl, 2019) (naylamp, 2019)

En la Tabla 5 se muestran varias características técnicas de las tarjetas de control de posible uso, en primera instancia se decidió descartar el uso del Arduino MEGA, debido a que el proyecto requiere un alto nivel de velocidad de procesamiento, además no cuenta con los pines de interrupción necesarios. El Arduino DUE y la Teensy 3.2 son aptos para la aplicación a un costo semejante poseen características técnicas similares, pero se optó por el uso de la Teensy, pues provee una capacidad de procesamiento de casi el doble con relación al Arduino DUE. (naylamp, 2019)

Sensores

Al momento de la selección de sensores de medición, se tuvo en consideración el uso de un IMU (Unidad de Medida Inercial o *Inertial Meassure Unit*), la MPU-6050, es una combinación de

un acelerómetro y un giroscopio, cada uno de 3 ejes. Su voltaje de funcionamiento es de 2.4 a 3.6VDC. Su posicionamiento es de gran precisión, pero para la correcta obtención de los parámetros de posición se debían ubicar 2 sensores en cada brazo del practicante, además estos sensores debían ser calibrados y cada uno sería diferente, dependiendo de la característica física de cada practicante, lo cual no era adecuado ya que se perdería la usabilidad del equipo.

Se decidió utilizar 3 encoder acoplados a un mecanismo de joystick para determinar la posición de la pinza, debido a que este proporciona datos más precisos porque funciona a 360 pulsos sus características técnicas se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6

Características técnicas del sensor de medición seleccionado

Característica	Encoder
Modelo	AS22 Series
Dimensiones	Ø22 x 10.9mm
Voltaje de operación	5VDC
Pulsos por revolución	360 a 2048
Tipo de encoder	Incremental
Aplicación	Industrial

Fuente: (BROADCOM, 2017)

Debido a que el encoder seleccionado es incremental se necesita una zona de inicialización de los sensores, para ello se seleccionaron dos leds infrarrojos para que la posición de la pinza laparoscópica sea detectada.

Iluminación

El sistema de iluminación es importante en el dispositivo ya que de la iluminación adecuada depende la calidad de imagen que brindará la cámara, considerando este aspecto como un requisito

del cliente, se decidió incorporar un sistema de iluminación led, cuyas características técnicas se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7

Características técnicas de la iluminación

Tipo	LED
Voltaje de consumo	12 [V]
Intensidad	100[mA] x led
Vida útil	45000 [horas]
Potencia lumínica	300 [lúmenes]

Fuente: (Aguilar, 2019)

Módulo de alimentación

La selección de los componentes que conforman el módulo de alimentación es primordial ya que de esto dependerá el correcto funcionamiento del equipo, la Tabla 8 detalla el consumo de cada componente utilizado para la construcción del entrenador laparoscópico con sensorización avanzada.

Tabla 8

Consumo de cada elemento

Elemento	Voltaje de alimentación [V]	Consumo [A]
Miniordenador x2	5	5
Tarjeta de control	5	0,093
Iluminación	12	1
Sensores x6	5	0,12
Total	-	6,213

En la Tabla 8 se puede observar que elementos como el miniordenador son utilizados en 2 unidades, las razones se detallarán en el transcurso del capítulo, de la misma manera ocurre con los sensores. Al realizar la suma del consumo de todos los elementos se puede constatar que se necesita

un mínimo de 6,3 A en total, pero dos tensiones, de 12 y 5 V. Para cubrir las necesidades de cada elemento se seleccionó una fuente y un regulador. Las características técnicas de los componentes seleccionados se encuentran detalladas en la Tabla 9.

Tabla 9

Características técnicas de los elementos del módulo de alimentación

Característica	Fuente de Voltaje	Regulador
Voltaje de entrada	110/220 [V ac]	12/24 [V dc]
Voltaje de salida	12 [V dc]	5 [V dc]
Intensidad de salida	20 [A]	10 [A]
Potencia de salida	240 [W]	50 [A]

Fuente: (Superdroid, 2019)

3.5.2. Selección de materiales del subsistema mecánico

El subsistema mecánico comprende de la estructura física del sistema y el módulo adaptable para cada pinza.

Características de los materiales

1. Fibra de vidrio: está compuesta de numerosos filamentos poliméricos extremadamente finos basados en dióxido de silicio, es un material aislante, posee una resistencia a la tracción mayor a la del acero, resistente a la corrosión por ciertos agentes químicos, no es combustible y su ligereza es en un 30% menor con respecto al acero. (termister.com, 2017)
2. Acrílico: es un polímero de metil metacrilato, transparente en su estado puro. Sus parámetros de transmisión y difusión de luz lo hacen óptimo para diferentes usos. La resistencia al impacto es 15 veces mayor al vidrio no templado, su peso es 43% más ligero al del aluminio, es resistente a la intemperie y de fácil limpieza. La lámina de acrílico resiste la mayoría de

las sustancias químicas, no es conductora eléctrica y es de fácil moldeo. (acrilico-y-policarbonato.com, 2017)

3. MDF: tablero de fibras de densidad media, fabricado a partir de fibras de madera y resinas sintéticas comprimidas, excelente para trabajos en carpintería. (Maderas Santana, 2015)
4. PLA común: elaborado a base de maíz, no emite gases nocivos su punto de fusión es a partir de los 180 grados centígrados, pero se empieza a descomponer a los 60 grados. Excelente para ser usado en el mercado doméstico por su bajo costo. (Impresoras3D, 2017)
5. PLA Fibra de carbono: compuesto principalmente de PLA común y recortes de fibra de carbono en un 15%, es mucho más rígido y por ende menos flexible, se utiliza para piezas que necesitan alta rigidez. (FilamentoPrinting, 2019)
6. ABS: utilizado en procesos de fabricación, con un punto de fusión alto de 230-260 grados centígrados, alta resistencia al impacto, desprende gases nocivos al calentarse. (Impresoras3D, 2017)

Selección de los materiales de la estructura

La estructura del prototipo es el elemento más expuesto a golpes, por lo que se requiere un material que brinde resistencia a las mismas. Las partes que componen la estructura son: recubrimiento y agarraderas. El recubrimiento comprende la totalidad de la estructura, mientras que las agarraderas son los elementos que brindan robustez al elemento.

Para la selección del material de manufactura adecuado del recubrimiento, se consideraron los elementos mostrados en la Tabla 10

Tabla 10
Comparativa de materiales

Característica	Fibra de vidrio	Acrílico	MDF
Dificultad de manejo	Alta	Baja	Media
Costo	\$18,00	\$60,00 por plancha	\$20,00
Propiedades físicas	30% más ligero que el acero Alta resistencia a la tracción Baja resistencia al impacto	45% más ligero que el aluminio Alta resistencia al impacto Alta resistencia al impacto	Material homogéneo. Alta resistencia al impacto y a la tracción

Fuente: (Martínez, Calil, & Fiorelli, 2002)

Como se puede observar en la Tabla 10, la fibra de vidrio tiene un costo menor con respecto a sus competidoras pero se necesita de un molde para que esta adquiera la forma deseada, el acrílico a pesar de que su elevado costo es ligero y posee excelentes propiedades físicas, además de su baja dificultad de manejo lo hacen el material idóneo para la construcción del recubrimiento.

Para la selección del material de manufactura adecuado de las agarraderas, se consideraron los elementos mostrados en la Tabla 11

Tabla 11
Materiales para la construcción de las agarraderas y módulo de sensorizado.

Característica	PLA común	PLA Fibra de carbono	ABS
Dificultad de manejo	Impresión 3D	Impresión 3D	Impresión 3D
Costo	\$20,00	\$30,00	\$40,00
Propiedades físicas	Punto de fusión 180°C Elaborado en base a maíz 80MPa (Flexión) 50 MPa (Tracción)	Punto de fusión 190°C Elaborado en base a maíz con un 15% de fibra de carbono 82.5MPa (Flexión) 52.5 MPa (Tracción)	Punto de fusión 220°C Elaborado con resina del copolímero acrilonitrilo 86.5MPa (Flexión) 76 MPa (Tracción)

Fuente: ((Makeitfrom, 2015); (Universidad de Barcelona, 2018))

El material por excelencia para cualquier tipo de manufactura cuando no se requieren altos valores de resistencia es el PLA común, pero al necesitar un material más resistente y que no sea tóxico se decidió usar el PLA de fibra de carbono.

Selección del material para el módulo de sensorizado

La estructura del módulo de sensorizado contiene los sensores y los cables, además es manipulada todo el tiempo. Por ello se eligió el PLA común (Tabla 11) ya que las propiedades físicas son suficientes para la aplicación que se va a realizar y el costo es bajo con respecto a sus competidores.

Selección del componente principal del mecanismo de la cámara

El mecanismo de la cámara debe permitir el trabajo autónomo o colaborativo en el equipo, para ello se seleccionó una rótula esférica radial, cuyas características son mostradas en la Tabla 12

Tabla 12. Características de la rótula

Nombre	GE 20 ES-2RS
Dimensiones	35x16 [mm]
Lubricante	Relubricación regular – grasa
Diseño	Acero/acero
Solución de sellado	Sellos de doble labio
Masa	0.065[Kg]
Capacidad de carga estática	146[KN]
Capacidad de carga dinámica	30[KN]

Fuente: (SKF, 2019)

3.6. Selección del gestor de contenido para el desarrollo web

Para la selección del gestor de contenidos se plantearon las opciones mostradas en la Tabla 13

Tabla 13
Características de los CMS

	Ventajas	Desventajas
WordPress	Fácil implementación y uso.	Se requiere un <i>hosting</i> potente para su implementación, ya que hace un uso extensivo de PHP.
	Fácil de adaptar a los proyectos web más repetitivos como blogs o portafolios.	Filtros de seguridad en los <i>plugins</i> ya que son desarrollados por distintos programadores.
	Multitud de <i>Themes</i> (plantillas), tanto gratuitas como de pago.	Para cambiar la estructura y forma en que se muestra tu sitio web es necesario algún conocimiento de HTML y PHP.
	Administrador muy amigable para el usuario y gran comunidad de soporte.	Si se desean implementar filtros para <i>spam</i> , como no lo hace de forma automática, es responsabilidad del desarrollador.
	Infinidad de <i>plugins</i> por lo que se puede expandir el sitio a desarrollar sin tener grandes conocimientos de programación.	El nivel de programación es mucho más bajo que el de otros CMS como Drupal.
	Curva de aprendizaje fácil en comparación con otros CMS.	Debido a su popularidad, el sitio puede ser objetivo de ataques, bien de “ <i>bots</i> ” o de <i>hackers</i> .
Joomla	El aprendizaje es un poco más rápido que Drupal, pero más lento que WordPress.	Si se desea implementar un blog, es mucho menos eficiente que Drupal y esa diferencia es aún más notoria si se le compara con WordPress.
	Diversidad de <i>plugins</i> (módulos) para instalar, pero menos que WordPress.	El código es complicado de editar y además poco ordenado.
	Gran comunidad de desarrolladores y mucho tiempo en el mercado.	La curva de aprendizaje es más alta que WordPress.
	Gran diversidad de opciones en cuanto a posiciones de menús y <i>widgets</i> .	Se conocen bastantes casos de sitios atacados, aunque este punto depende también del administrador

CONTINÚA 

Drupal	Mejor optimización del uso de PHP es capaz de soportar una mayor cantidad de visitas que WordPress.	Curva de aprendizaje elevada tanto para el usuario como para el administrador.
	Alta personalización de los módulos para cada plantilla.	Interfaz menos amigable que en otros CMS, ya que posee muchos niveles interiores (submenús o subcategorías) en el panel de control.
	Gran comunidad de desarrolladores.	Se necesita un <i>hosting</i> específico para que soporte todas sus características.
	Posee <i>plugins</i> para ampliar la funcionalidad, pero no en tanta cantidad como WordPress. Alta seguridad contra el ataque de hackers. Permite usar diversos gestores de base de datos.	A nivel empresarial, cabría matizar que los desarrolladores son más caros, ya que hay menos que para otros CMS.

Fuente: (Rodríguez, 2014)

Como se puede apreciar en la Tabla 13 cada CMS tiene distintas ventajas y desventajas, pero se decidió utilizar WordPress debido a su curva de aprendizaje corta y nivel de programación bajo, posee una gran comunidad de desarrolladores y un sinnúmero de temas para personalizar la capa del usuario y administrador.

3.7. Diseño del sistema mecánico

En la Figura 12 se muestra un esquema general del sistema mecánico en el que están involucrados tres subsistemas, partiendo de la estructura del prototipo, a continuación, se muestra el mecanismo de sensorización utilizado para la adquisición de datos, el sistema de movilidad de la cámara con la que el usuario podrá enfocar la práctica y el diseño del área de entrenamiento.

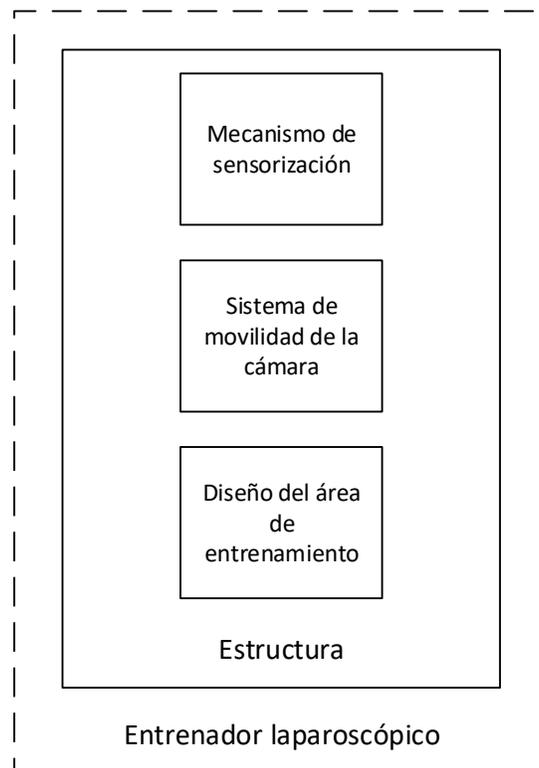


Figura 12. Esquema del diseño mecánico

3.7.1. Diseño de la estructura

Para el diseño de la estructura inicialmente se propuso un modelo anatómico curvo sin embargo, al momento de integrar los módulos de sensorización se determinó que esta no era la morfología que el sistema requería debido a que limitaba el espacio de trabajo y la movilidad del mecanismo utilizado para adquirir los datos, otro punto en contra de este modelo fue que requería un proceso de fabricación más complejo en el que involucraba realizar una matriz para obtener la estructura, por añadidura el costo de producción se elevaba, lo cual no es conveniente para un prototipo en desarrollo, tomando en cuenta que una de las necesidades del cliente es que el equipo sea de bajo costo.

Por lo que se realizó el diseño CAD partiendo de la funcionalidad del sistema considerando el material escogido en la sección 3.4.2, la facilidad de construcción y las medidas especificadas por el usuario (Tabla 14 y Figura 13).

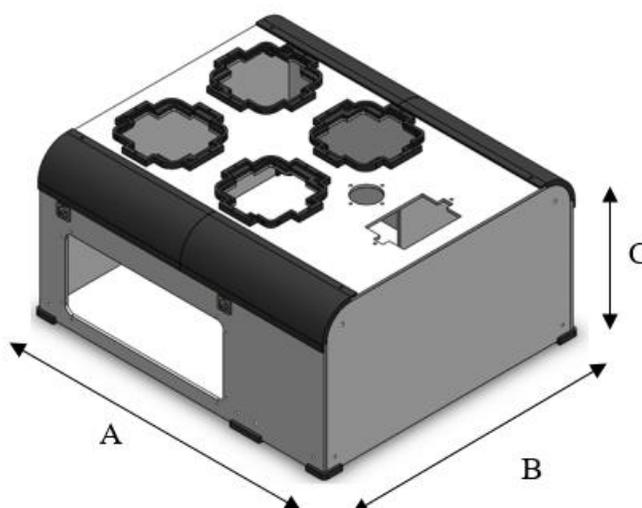


Figura 13. Dimensiones de la estructura

Tabla 14

Dimensiones especificadas

	Dimensión [cm]	Representación
Largo	45	A
Ancho	40	B
Altura	20	C

Como se expresó anteriormente, el acrílico es un material que se encuentra en planchas y para su manipulación se puede utilizar corte laser o doblado por calor, al doblar con calor se puede obtener figuras en 3 dimensiones a partir de una plancha, sin embargo, no es un método óptimo de fabricación cuando se requiere exactitud en las medidas para realizar un ensamble. Por lo que se

optó por un diseño modular en el cual se combinó el acrílico con impresión 3D para obtener un prototipo estético y resistente.

Los bordes y esquinas del prototipo fueron diseñados de tal manera que brinden rigidez y soporte al resto de la estructura, además para que tenga facilidad de ser ensamblado con las planchas de acrílico diseñadas.

En la cara superior de la estructura se encuentra ubicado el mecanismo de sensorización, la pantalla táctil y el mecanismo de movilidad de la cámara, distribuido como se muestra en la Figura 14.

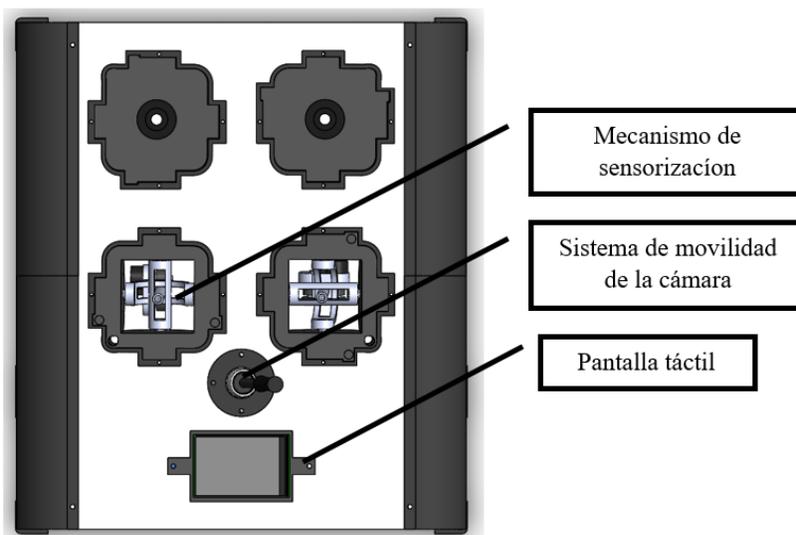


Figura 14. Vista superior de la estructura

Puertos para el mecanismo de sensorización

Uno de los requerimientos del sistema es que el entrenador cuente con varios puertos de ingreso para las pinzas con la finalidad de que el usuario pueda realizar el entrenamiento desde la parte

frontal, lateral o posterior. Para cumplir esta necesidad se diseñó un mecanismo de sensorización modular capaz de ser intercambiado en cualquier puerto.

Con las dimensiones especificadas fue posible colocar 4 puertos de ingreso ubicados con una separación de 16 cm, distancia indicada por el médico en base a simuladores existentes. Los cuales están diseñados para que tengan una única posición de acoplamiento (Figura 15), para facilitar el intercambio del módulo entre los puertos y debido a que internamente el mecanismo posee un ángulo de corte con la finalidad de alcanzar una mayor superficie de trabajo, lo que se detallará en el diseño del mecanismo.

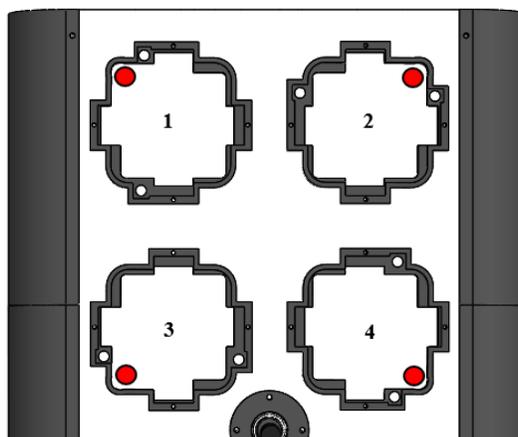


Figura 15. Ubicación de los puertos del sistema de sensorización

3.7.2. Mecanismo de sensorización

La finalidad del sistema de sensorización es captar los movimientos realizados por el usuario durante el entrenamiento para obtener un valor de trayectoria recorrida en el espacio tridimensional, para lo que se implementó un mecanismo basado en un joystick, el cual transforma mediante software la señal de dos sensores ubicados en perpendicular a coordenadas en dos dimensiones, y la adición de un tercer sensor para determinar la longitud recorrida de la pinza.

El mecanismo consta de 3 ejes distribuidos como se muestra en la Figura 16, cada uno cuenta con una abertura para adaptar el sensor de tipo encoder seleccionado, el mismo que se encarga de captar la señal respectiva, para su posterior procesamiento. El eje X posee una forma cilíndrica con un orificio central, el eje Y se encuentra perpendicular a este con una morfología de arco y de igual manera posee una abertura, el eje Z se encuentra atravesando los dos anteriores y es fijado a manera de bisagra en el eje X.

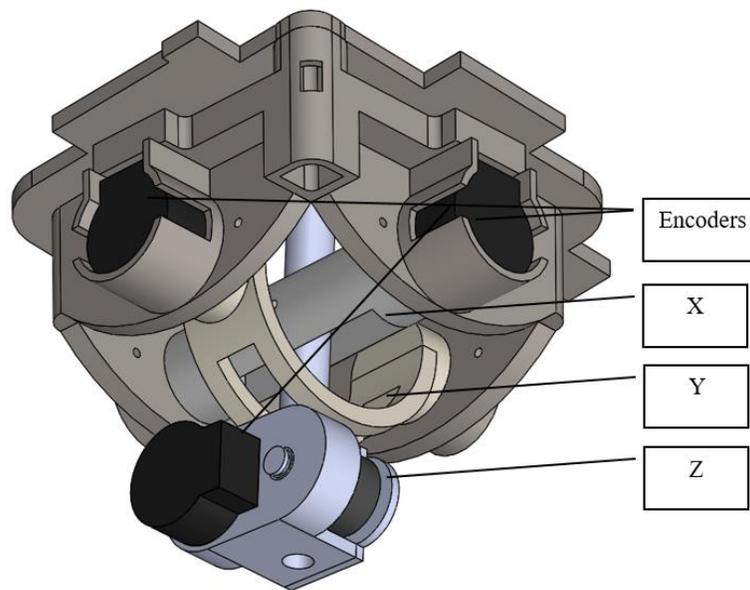


Figura 16. Mecanismo de sensorización

El sistema de medición del eje Z está conformado por una guía en la que ingresa la pinza y al extremo se encuentran dos ruedas de artesil con una separación menor al diámetro de una pinza estándar de 5 mm esto permite tener el ajuste necesario para medir pero que no impida su manipulación, las mismas se encuentran fijadas en un eje que transmite el movimiento hacia el sensor y que se encuentra fijo en el sistema a manera de chumacera con un rodamiento cuyo diámetro interno fue seleccionado considerando la medida requerida para el sensor de 6 mm. En la Figura 17 se puede observar a detalle el sistema mencionado.

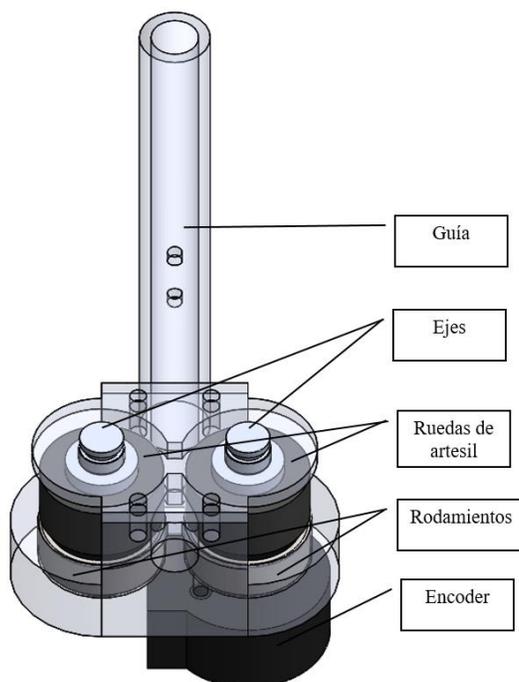


Figura 17. Sistema de medición eje Z

La base del sistema de sensorización posee un corte transversal a 6° de la horizontal (Figura 18A), este ángulo fue medido para que la pinza tenga acceso hasta la parte trasera del área de entrenamiento como se muestra en la Figura 18B.

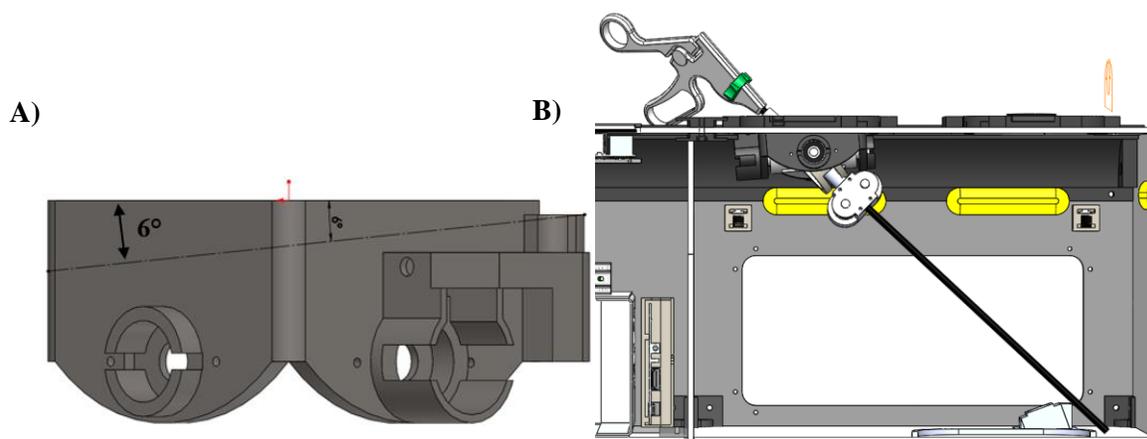


Figura 18. A) Base del sistema de sensorización con ángulo de corte 6° B) Resultante del corte en la implementación

Rodamiento

Para seleccionar los rodamientos utilizados en el mecanismo de sensorización se partió de los requerimientos de ensamble expresados en la hoja de datos del sensor. El cual demanda ser ensamblado en un eje de 6mm de diámetro (Figura 19). En este mecanismo el rodamiento únicamente brinda soporte y libre movilidad por lo que el criterio de selección se reduce a la dimensión del eje del sensor.

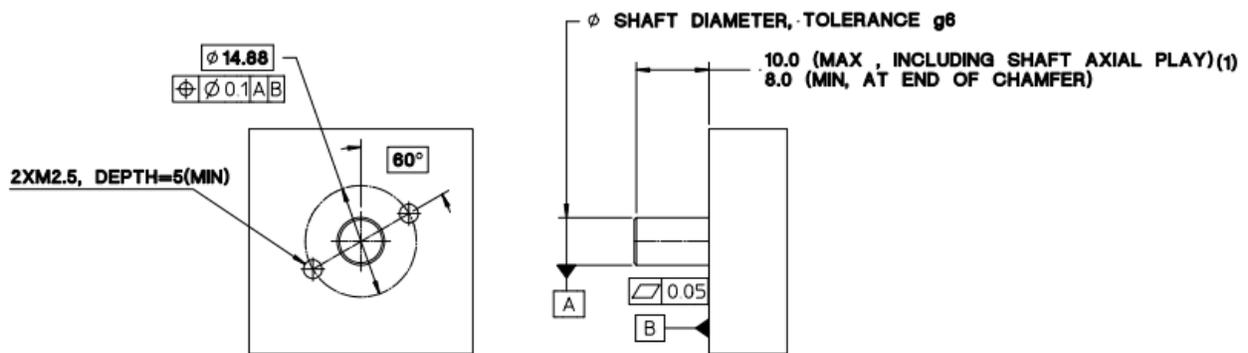


Figura 19. Requerimientos de ensamble del sensor

Fuente: (BROADCOM, 2017)

El rodamiento que cumple con esta especificación fue un 606 y en la Figura 20 se muestran sus dimensiones.

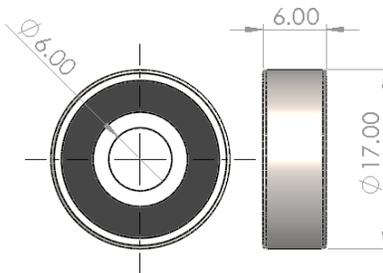


Figura 20. Rodamiento 606

3.7.3. Sistema de movilidad de la cámara

Uno de los requisitos principales para el desarrollo del entrenador fue poseer un sistema que permita el libre movimiento de la cámara y que a su vez pueda ser fijada en una posición deseada, para solventar este requerimiento se partió de una rótula esférica radial de la marca SFK la cual posee un anillo plástico que fija la parte interna de la rótula en la posición ubicada.

Se diseñó un soporte para adaptarlo en el entrenador, y en su interior un adaptador para ubicar un eje de fibra de carbono debido a su bajo peso, al extremo inferior del eje se encuentra ubicada la cámara seleccionada dentro de una carcasa que está adherida al mismo y en su extremo superior se encuentra un mango de sujeción realizado en impresión 3D con material flexible para que su textura sea agradable al contacto, desde ahí el usuario es capaz de mover la cámara para enfocar dependiendo el entrenamiento que va a realizar. En la Figura 21 se puede observar a detalle el sistema implementado.



Figura 21. Sistema de movilidad de la cámara

Ubicación del sistema de movilidad de la cámara

En la propuesta del sistema mecánico inicialmente se ubicó la cámara en el centro del entrenador debido a que desde ahí se lograría captar la imagen centrada del área de trabajo, sin embargo después de realizar las pruebas de funcionamiento de la cámara y consultar con el experto se determinó que la mejor ubicación para este sistema es en la parte inferior por dos razones, la primera es que simula la entrada del laparoscopio por el ombligo como lo es en la cirugía real y la otra es que como el campo de visión de la cámara es de 120° se aprecia de mejor manera la práctica cuando no se encuentra muy cercana a los juegos. En la Figura 22 se observa la ubicación del sistema de movilidad de la cámara en el entrenador.

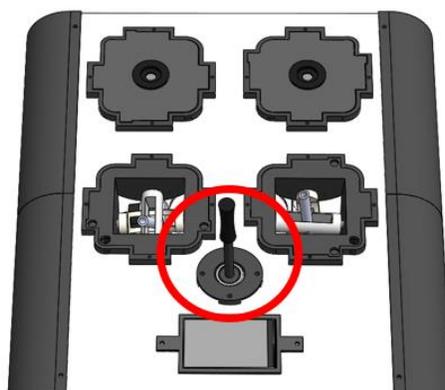


Figura 22. Ubicación del sistema de movilidad de la cámara

3.7.4. Diseño del área de entrenamiento

Al realizar una valoración del entrenamiento es preciso colocar un punto de referencia para cada pinza y que la ubicación de los juegos sea siempre la misma, de esta manera se puede comparar los datos obtenidos en cada intento de manera correcta, por lo que se diseñó una base de inicialización en el que involucran estos dos aspectos como se observa en la Figura 23

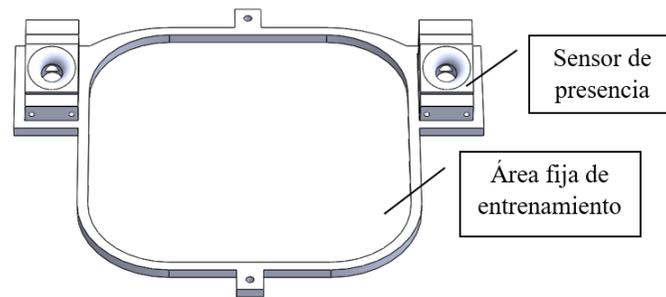


Figura 23. Área de entrenamiento

Se encuentra ubicada en la parte posterior de la base dónde es más accesible intercambiar los juegos, los cuales fueron diseñados en base a tabla de especificaciones de entrenamientos detallada en la sección 5.3.2.

3.8. Análisis CAE de la estructura

3.8.1. Análisis estático de la estructura

Un elemento mecánico está bien diseñado si no falla por tracción, flexión, torsión o deformación excesiva (Mott, 2009). En el caso de la estructura del entrenador laparoscópico con sensorización avanzada es más probable que sufra un fallo por flexión, para ello se ha realizado un análisis CAE para determinar el esfuerzo y la deformación total que poseen los componentes de este cuando es sometido a fuerzas externas.

Las fuerzas externas son aquellas que no forman parte de la estructura, como por ejemplo el peso de los componentes electrónicos, en la Tabla 15 se detalla la masa de estos elementos para determinar las condiciones de frontera de la estructura, las mismas fueron configuradas con la masa del elemento en Kg y la gravedad de $9,8 \frac{m}{s^2}$

Tabla 15

Masa de los elementos que no corresponden a la estructura

Elemento	Masa [Kg]	Peso [N]
Módulo de sensorización	0,350	3,43
Pinza laparoscópica	0,100	1,00
Mecanismo de la cámara	0,200	1,96
Pantalla táctil	0,100	0,98
Electrónica	1,000	9,80
Total	1,750	17,17

Para el análisis CAE de la estructura se aplicaron las fuerzas descritas en la Tabla 15, en la Figura 24 se muestra las condiciones de frontera que indican las fuerzas mencionadas.

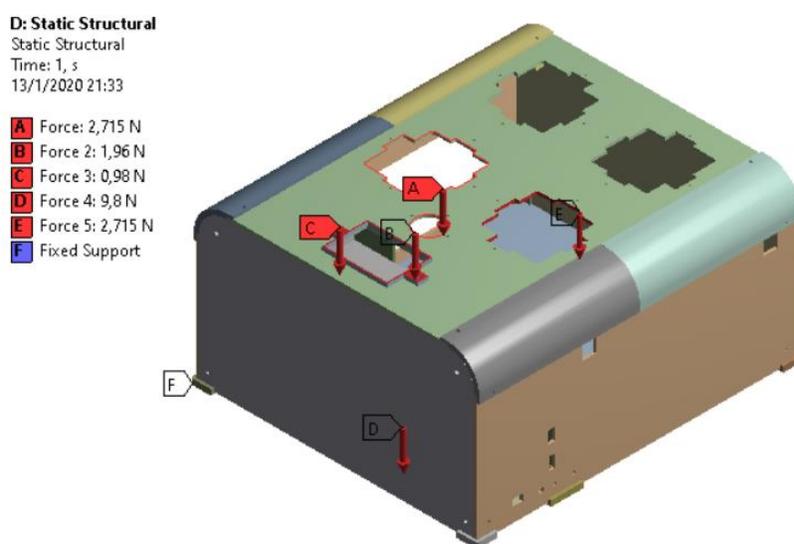


Figura 24. Condiciones de frontera en la estructura

En la Figura 25 se muestra una vista isométrica superior, aquí se puede notar que la mayor deformación se presenta en los cambios de sección de las aberturas para los módulos de sensorización avanzada, la deformación máxima que se presenta en este caso es de 0,05998 mm, dicho valor se puede considerar insignificante y no afecta a la estructura.

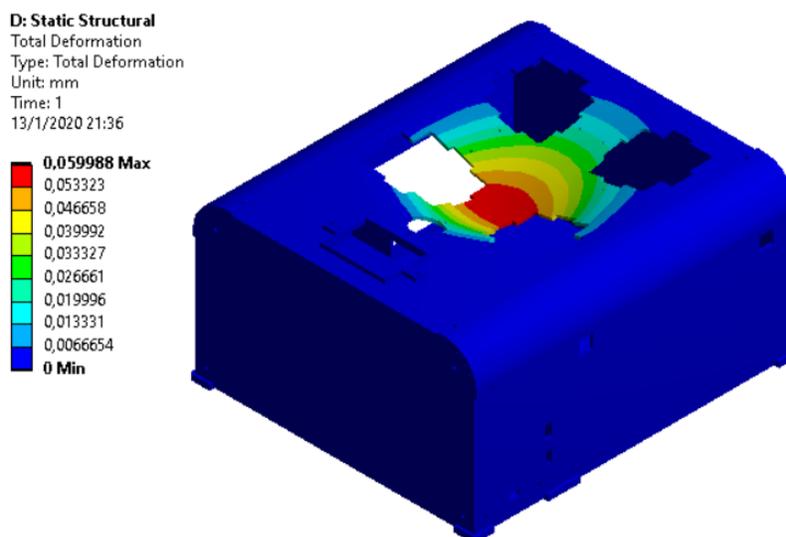


Figura 25. CAE de la estructura (vista isométrica superior)

La estructura alberga la parte electrónica y esta le genera una carga de 9,8 N sobre la placa de acrílico, el análisis de este caso se muestra en la Figura 26, la placa de acrílico no presenta deformación a pesar de la fuerza a la que está sometida.

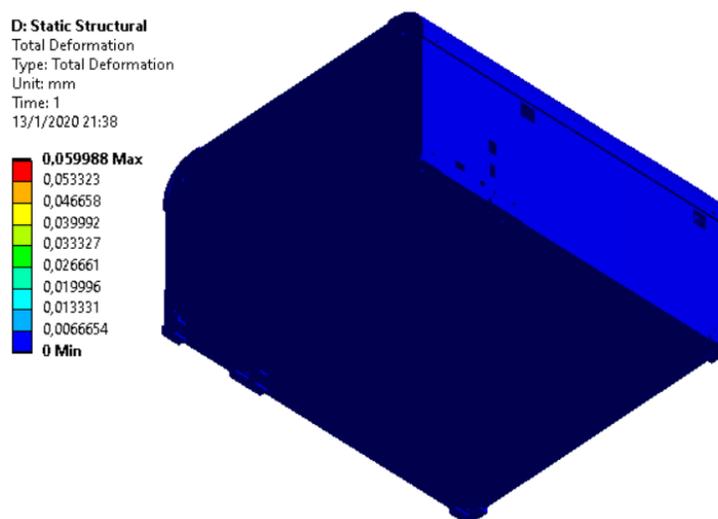


Figura 26. CAE de la estructura (vista isométrica inferior)

En la Figura 27 se muestra el esfuerzo que producen las cargas en la estructura, el mismo que tiene un valor máximo de 0,1288MPa, debido a que el acrílico tiene una resistencia a la flexión de 100MPa, la estructura no fallará por flexión.

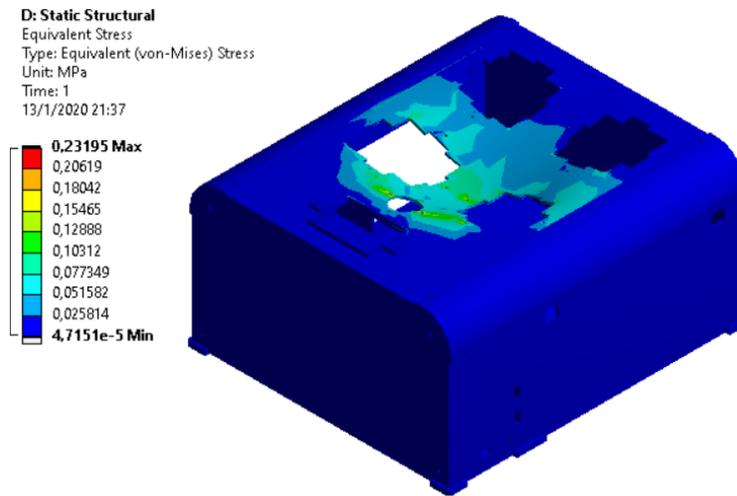


Figura 27. Análisis CAE del esfuerzo en la estructura

3.8.2. Análisis estático del módulo de sensorización

Con los datos de la Tabla 15 se aplica sobre el módulo de sensorización una fuerza de 1,0 N; que corresponde al peso de la pinza laparoscópica. Las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo se muestran en la Figura 28.

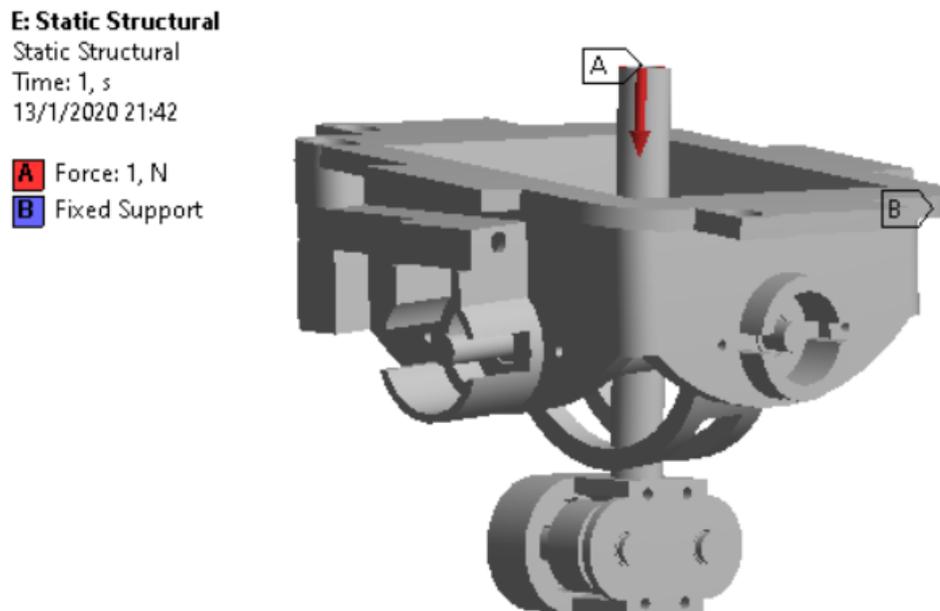


Figura 28. Condiciones de frontera (módulo de sensorización)

En la Figura 29 se muestra el análisis de la deformación del módulo de sensorización, el eje que más deformación presenta en el mecanismo de joystick es el Z con un valor de 0,00091 mm y el eje X con un valor de 0,0005 mm, estos valores al ser tan pequeños se los toma como despreciables y no afectan al sistema de sensorización.

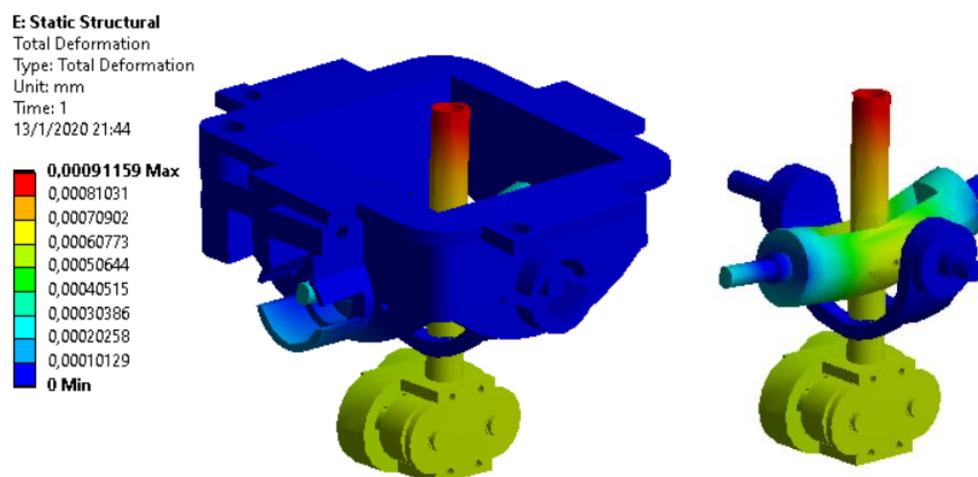


Figura 29. Análisis de la deformación del módulo de sensorización

En la Figura 30 se muestra el análisis del esfuerzo al que está sometido el módulo de sensorización, siendo el valor máximo que presenta de 0,034 MPa, acorde a la Tabla 11, el PLA común soporta un esfuerzo máximo de 80MPa, por lo que el diseño del módulo es seguro.

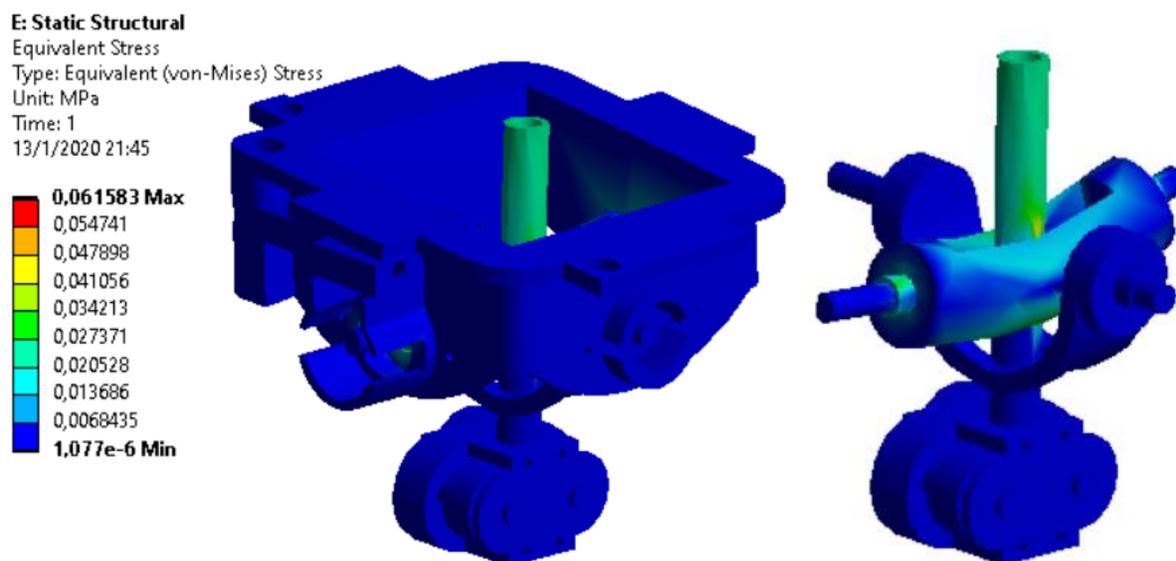


Figura 30. Análisis del esfuerzo del módulo de sensorización

3.8.3. Análisis estático del mecanismo de la cámara

Con los datos de la Tabla 15 se aplica sobre el mecanismo de la cámara una fuerza de 2 N; que corresponde a la fuerza al que está sometido durante el uso, además se considera una masa puntual que representa el sensor de la cámara. Las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo se muestran en la Figura 31

F: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

13/1/2020 0:00

- A** Point Mass
- B** Force: 2, N
- C** Fixed Support

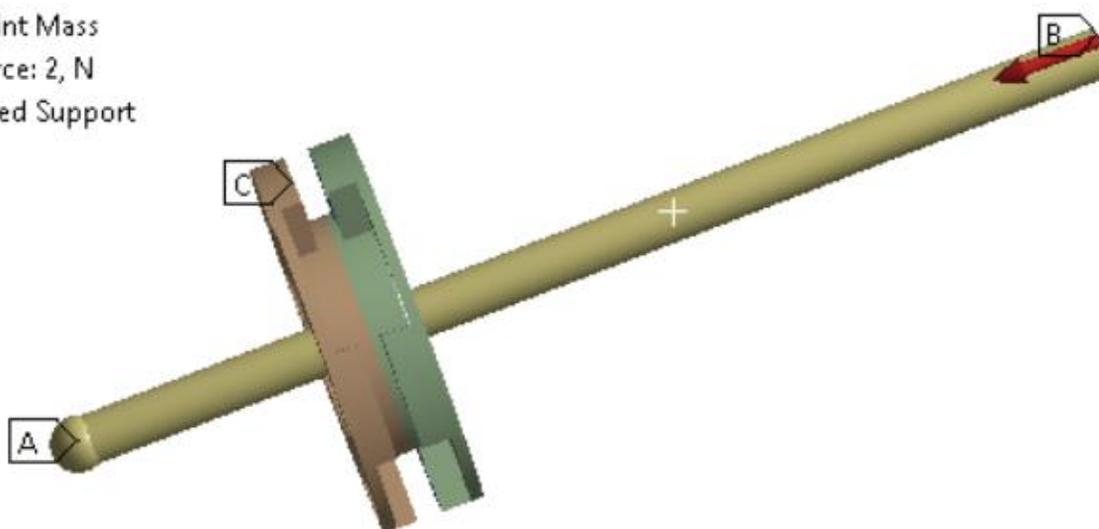


Figura 31. Condiciones de frontera (módulo de sensorización)

En la Figura 32 se muestra el análisis de la deformación del mecanismo de la cámara, el componente que más deformación presenta es el eje de fibra de carbono con un valor de 0,0004mm, este valor al ser tan pequeño se lo puede considerar como despreciable.

F: Static Structural

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit: mm

Time: 1

13/1/2020 0:04

0,00038593 Max

0,00034304

0,00030016

0,00025728

0,0002144

0,00017152

0,00012864

8,5761e-5

4,2881e-5

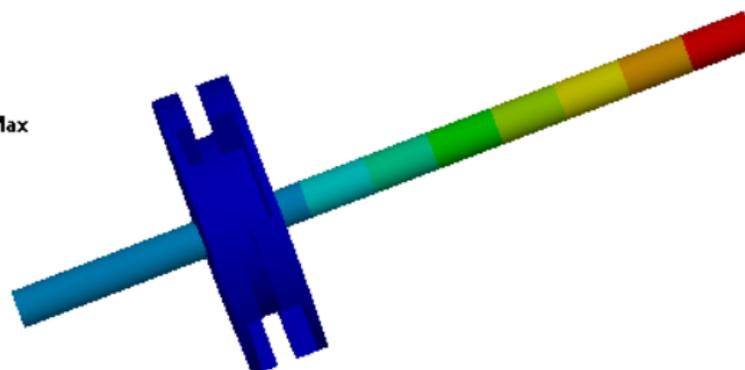
0 Min

Figura 32. Análisis de la deformación del mecanismo de la cámara

En la Figura 33 se muestra el análisis del esfuerzo al que está sometido el módulo de sensorización, siendo el valor máximo que presenta de 0,06MPa, acorde a la Tabla 11, la fibra de carbono soporta un esfuerzo máximo de 82,5MPa, por lo que el diseño de los soportes del mecanismo de la cámara es seguro ya que no se ven comprometidos por flexión o deformación excesiva.

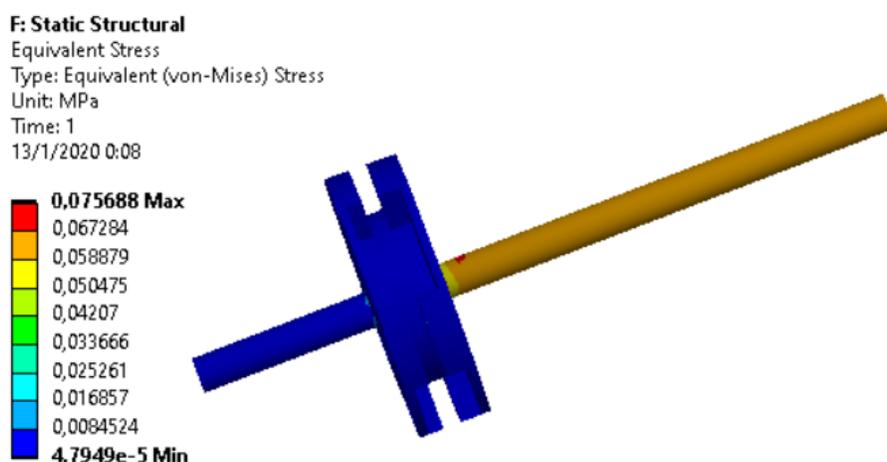


Figura 33. Análisis del esfuerzo del mecanismo de la cámara

3.9. Diseño electrónico

Para interpretar el diseño electrónico se realizó un esquema general con todos los componentes seleccionados en la sección 3.5.1. y la relación que llevan entre sí como se muestra en la Figura 34. Se dividió el subsistema electrónico en 4 subsistemas: iluminación, alimentación, control y sensorización; esto facilita identificar de mejor manera cada etapa del proceso.

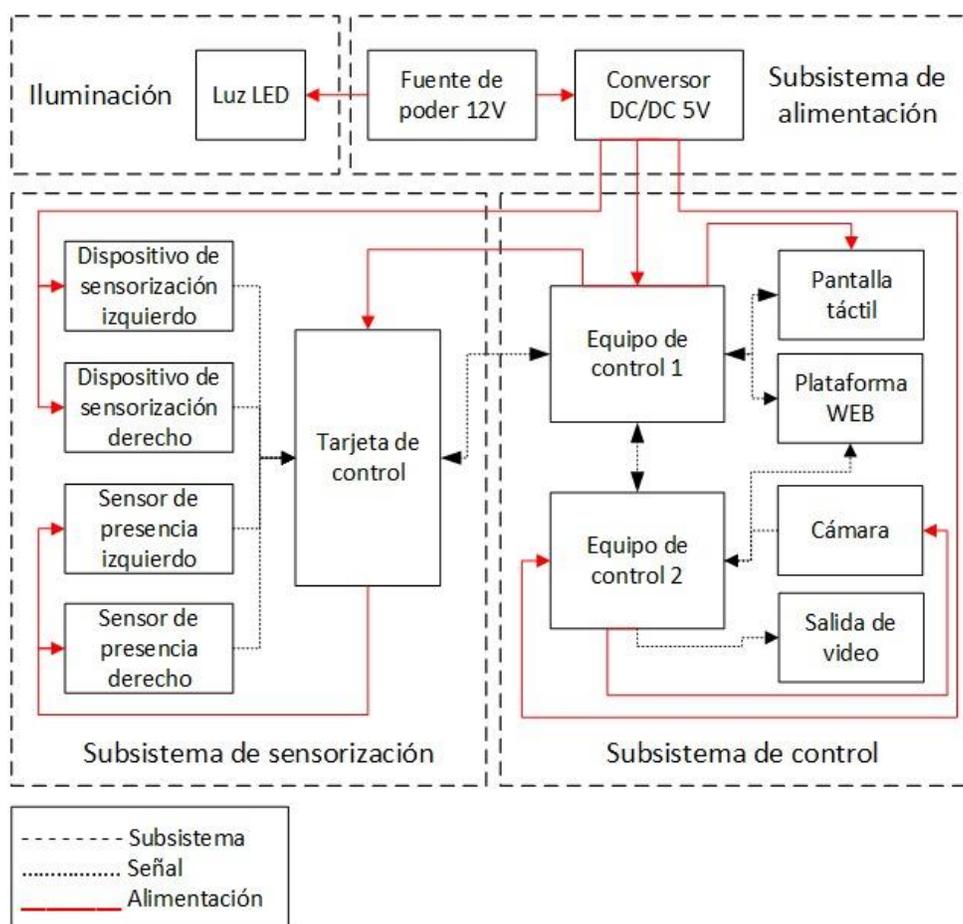


Figura 34. Subsistema electrónico del entrenador

3.9.1. Subsistema de control

En la Figura 35 se muestra a detalle el subsistema de control, este está compuesto de dos Raspberry Pi, una será denominada “Maestro” y la otra será denominada “Esclavo”, ambos dispositivos están conectados mediante comunicación serial.

Se necesitó utilizar un sistema de Maestro – Esclavo debido a que la Raspberry PI 3B+ posee una sola salida de video HDMI y esta ya estaba ocupada en el Maestro para la pantalla táctil, así que se necesitaba utilizar una adicional para la salida de video al monitor, a la que sale al monitor

se le llamó Esclavo, por lo tanto, la mejor opción fue utilizar 2 tarjetas con la estructura antes mencionada.

El Maestro es el que se encarga del control de todo el entrenador laparoscópico, este posee una pantalla táctil en el cual recibe las instrucciones del usuario mediante una interfaz gráfica y este ordena a los demás dispositivos ejecutar una determinada acción, el maestro interactúa directamente con la plataforma web, pantalla táctil y tarjeta de control, como se muestra en la Figura 35.

El esclavo es el que ejecuta las órdenes del Maestro, interactúa directamente con la cámara, la base de datos, la página web y el dispositivo de salida de video.

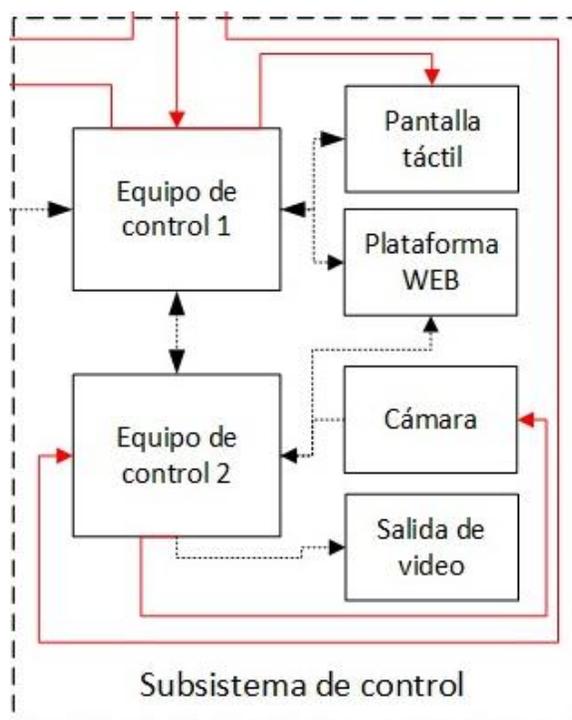


Figura 35. Subsistema de control

3.9.2. Subsistema de sensorización

Este subsistema está conformado por dos módulos de sensorización y dos sensores de presencia uno en cada lado del entrenador, con la finalidad de obtener los datos respectivos de las dos pinzas de laparoscopia con las que se realiza el entrenamiento.

El módulo de sensorización cuenta con tres sensores encoder de 360 ppr (pulsos por revolución), uno en cada eje de medición; esta señal es convertirla a grados para determinar mediante ecuaciones matemáticas la distancia recorrida en el espacio.

En base a los requerimientos del sistema, se utilizó un sensor infrarrojo para la detección de presencia, este se encarga de detectar cuando la pinza se encuentra en el punto de inicialización, está constituido por un receptor encargado de enviar la señal a la tarjeta de control y un emisor alimentado con 3.3 V desde la misma tarjeta. Se ha seleccionado este voltaje para el sensor ya que la lectura de los puertos analógicos del controlador da lectura hasta un máximo de este valor. En la Figura 36 se puede observar un diagrama detallado de las conexiones de estos elementos a la tarjeta de control.

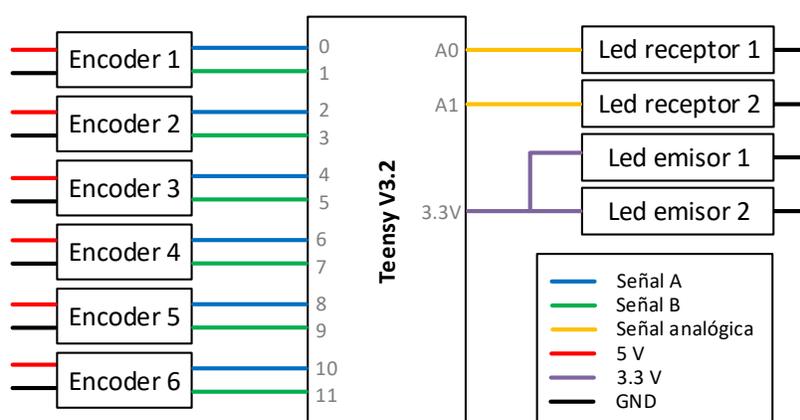


Figura 36. Subsistema de sensorización

3.9.3. Subsistema de alimentación e iluminación

El subsistema de alimentación es el encargado de energizar la iluminación, el sistema de control y el sistema de sensorización de acuerdo los cálculos realizados para la selección de componentes en la sección 3.5.1 está conformado por una fuente de alimentación conmutada de 12 V y un convertor de corriente continua a 5 V, en la Figura 37 se muestra un diagrama de conexión de este subsistema.

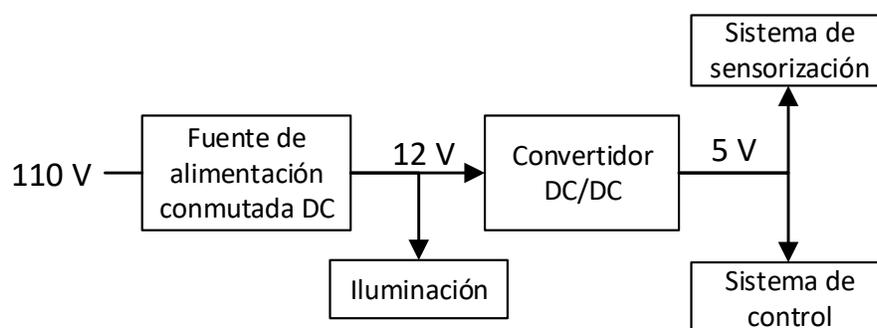


Figura 37. Subsistema de alimentación e iluminación

Ubicación de la iluminación

Las luces LED han sido ubicadas en el simulador teniendo en consideración que no deben estar frente a la cámara ya que impediría la visión de la práctica y ni frente a la base inferior porque el reflejo de esta produce una saturación en la imagen, por lo que se las colocó en la parte superior de los tapas laterales de la estructura como se observa en la Figura 38

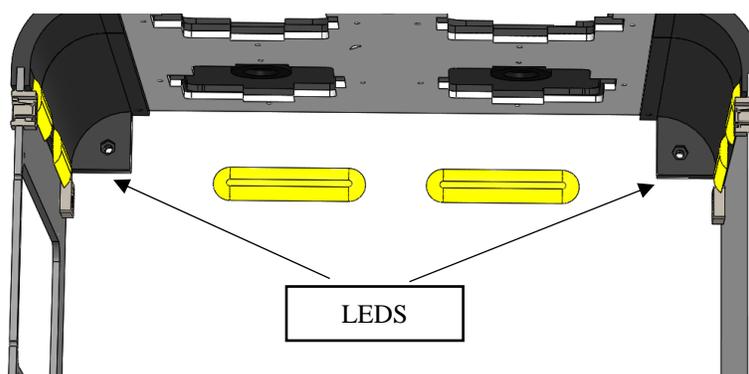


Figura 38. Ubicación de la iluminación en el entrenador

Un Lux es la unidad del sistema internacional que mide el nivel de iluminación y corresponde a los lúmenes sobre el área de iluminación. Según la Tabla 7, cada luz led emite 300 lúmenes, como son 6 luces led, estas emitirán 1800 lúmenes, si el área de trabajo es de $0,18 \text{ m}^2$, la cantidad de luxes al que está sometido el entorno es de 10000 unidades, siendo un valor correcto ya que el nivel de iluminación para un quirófano es de 1000 luxes. (Ledbox, 2016)

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN Y PROGRAMACIÓN

En el presente capítulo se muestran los pasos seguidos para la elaboración del entrenador laparoscópico con sensorización avanzada; se parte desde la construcción de la estructura física, seguida de la incorporación de todos los elementos eléctricos y electrónicos que conforman el sistema para finalmente realizar la programación del equipo y la página web, los mismos son considerados el “alma” del entrenador laparoscópico.

4.1. Construcción del entrenador laparoscópico con sensorización avanzada

Después de haber realizado el diseño y el análisis computacional se procede con la construcción del prototipo, para lo que fue necesario combinar varias técnicas de manufactura como es la impresión 3D para el mecanismo de sensorización, varias partes de la estructura y del sistema de movilidad de la cámara; también se utilizó corte láser para las tapas principales de la estructura.

4.1.1. Impresión 3D

Se utilizó la tecnología de impresión 3D para elaborar varios elementos del entrenador, en la Figura 39 se observa en el ensamble con todos los componentes realizados con este proceso.

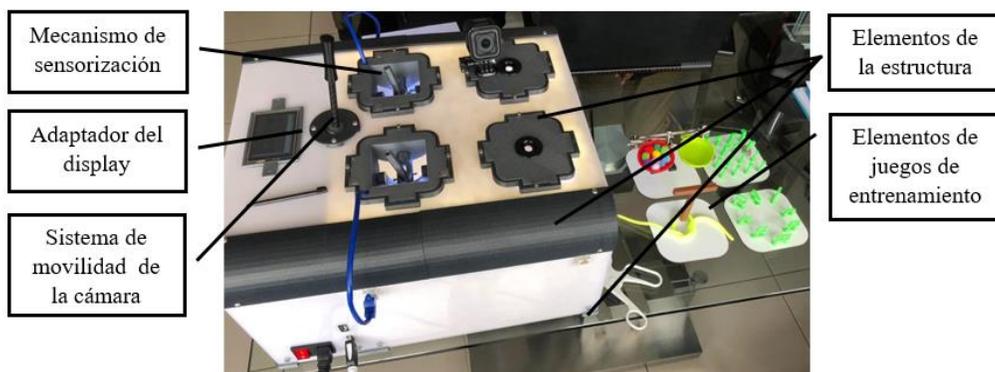


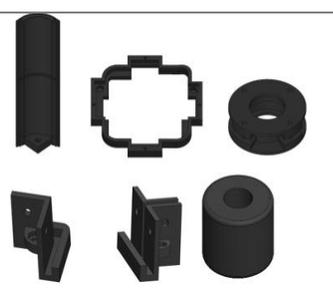
Figura 39. Entrenador de laparoscopia

Para la configuración de los parámetros de impresión se utilizó el software libre Ultimaker Cura; tres materiales distintos fueron necesarios para la fabricación de estas piezas por lo que se tuvo que realizar varios ajustes para cada uno. En la Tabla 16 se muestra a detalle los materiales y configuraciones utilizados.

Tabla 16.
Parámetros de impresión

Material	Elementos	Altura de capa [mm]	Temperatura del extrusor [°C]	Velocidad de impresión[mm/s]
PLA		0,2	200	40

CONTINÚA 

PLA + Fibra de carbono		0,3	220	30
TPU		0,15	200	20

4.1.2. Corte láser

En la construcción de la estructura se utilizó el método de manufactura corte por láser. Partiendo del diseño, con la ayuda de un software, se obtiene la geometría en 2D cómo se muestra en la Figura 40, y un programa específico de la máquina lo traduce para realizar el corte, teniendo en consideración el espesor y el material para configurar la potencia.

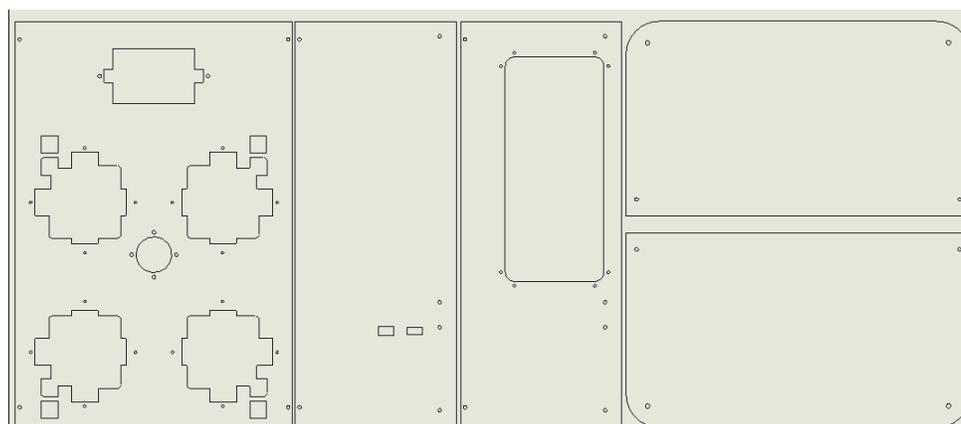


Figura 40. Diseño 2D

Se ingresa la plancha de acrílico en la máquina y se obtienen los elementos diseñados como se puede observar en la Figura 41.

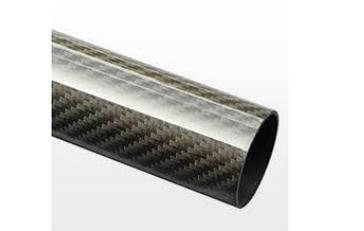


Figura 41. Elementos realizados en corte láser

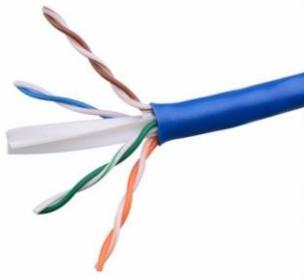
4.2. Ensamblaje del prototipo

Para ensamblar el prototipo fueron necesarios varios elementos mecánicos como rodamientos para brindar soporte y movilidad a los ejes, tornillos para dar fijación a las partes que lo requieran y elementos electrónicos como conectores, cables y puertos necesarios para la conexión del sistema. En la Tabla 17 se detalla los elementos utilizados.

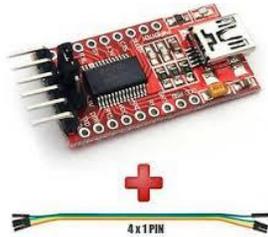
Tabla 17
Elementos utilizados para la construcción del prototipo

Elemento	Descripción	Imagen
Rodamientos	Modelo: 606RS Dimensiones: 17x6x6 [mm]	
Tornillos	Elementos de fijación -M5 x 10 [4] -M4 x 10 [22] -M3 x 8 [26] -M2 x 10 [28]	
Eje de fibra de carbono	Ligero Dimensiones: Diámetro externo 8 [mm] Largo 170[mm]	
Adaptador extensor HDMI	Utilizado para extender el puerto HDMI hasta el costado del entrenador	
Extensor	Utilizado para extender el puerto USB hasta el costado del entrenador	

CONTINÚA →

Interruptor con protección	Es el filtro principal en la alimentación del sistema y posee un fusible como protección.	
Cable de alimentación	Cable utilizado para alimentar el prototipo	
Puerto RJ45 hembra	4 puertos	
Conectores RJ45	2 conectores	
Cable UTP	Extensión 4 [m]	
Cable flexible 12 AWG	Conexión de la fuente al regulador dc	

CONTINÚA 

Cable FFC para Raspberry	Utilizado para la conexión de la cámara	
Módulo de comunicación serial	Utilizado para la conexión entre maestro-esclavo	
Ventilador	Utilizado para refrigerar el sistema de control	
Termo flexible	Utilizado en las uniones de los cables, se encoge con calor.	
Caucho silicona	Es una aleación utilizado para construir las ruedas utilizadas en el sistema de medición del eje Z.	

4.2.1. Ensamblaje del mecanismo de sensorización

Para realizar el ensamble de este mecanismo fue necesario fabricar las ruedas que se encargarían de medir la distancia en el eje Z, para lo cual se fabricó un molde de impresión 3D y se utilizó una aleación de caucho silicona para obtener este elemento (*Figura 42*).

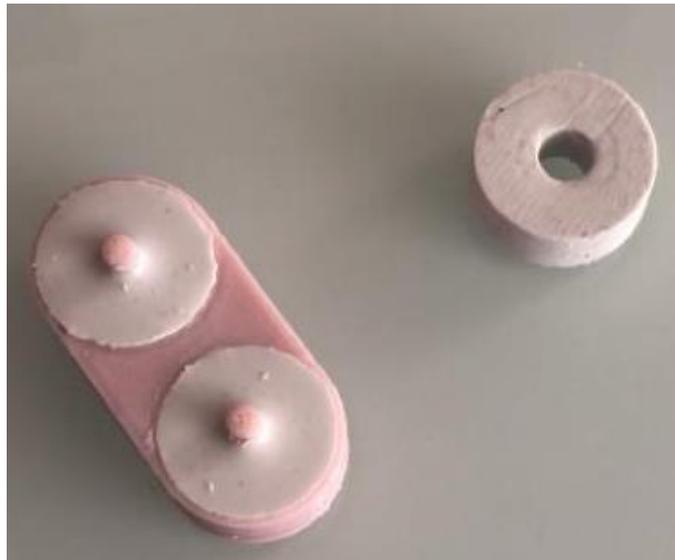


Figura 42. Molde de caucho silicona

Con todos los elementos fabricados, el primer paso es insertar el eje X y fijarlo con los rodamientos, se repite este procedimiento con el eje Y. Por último, el eje Z debe atravesar estos dos y ser fijado a manera de bisagra al eje X para posteriormente ubicar los rodamientos con las ruedas de medición, los sensores y las tapas respectivas para asegurar todas las piezas involucradas. (Ver Figura 43)



Figura 43. Ensamble módulo de sensorización

4.2.2. Sistema de movilidad de la cámara y el adaptador de la pantalla táctil

El sistema de movilidad de la cámara presenta dos partes la primera es donde se encuentra la rótula esférica radial adaptada a la estructura; y, la otra es el eje con sus tres componentes: adaptador para la cámara, adaptador a la rótula y el mango. Para la primera se utilizó tornillos M4 para fijar este sistema a la estructura y para la segunda se utilizó tornillos M2 para asegurar el adaptador de la cámara.

Para el adaptador de la pantalla táctil únicamente se utilizó las piezas fabricadas en impresión 3D y tornillos M3 como se muestra en la Figura 44.



Figura 44. Ensamble del sistema de movilidad de la cámara y el adaptador de la pantalla

4.2.3. Ensamble de la estructura

Una vez ensamblados los subsistemas que componen el entrenador se procede a ensamblar la estructura y montarlos, para lo que se debe asegurar con tornillos M4 la tapa frontal a las esquinas para luego colocar los laterales, tapa frontal y trasera y asegurar las bases impresas a las piezas ensambladas para colocar las tapas inferiores donde se colocará los elementos electrónicos. (Figura 45)

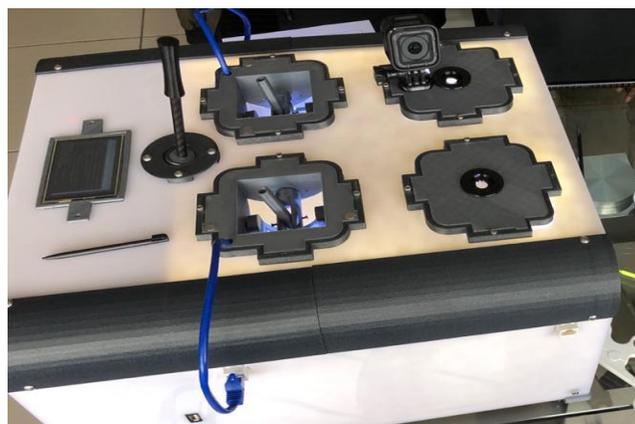


Figura 45. Estructura ensamblada del entrenador

4.3. Conexión del prototipo

Una vez ensamblado el prototipo se realizan las conexiones. Una de las especificaciones del mecanismo de sensorización fue que sea modular y se pueda cambiar de posición, para lo que fue necesario utilizar un conector capaz de transmitir la señal de 3 sensores por cada módulo, es decir, un conector de 8 cables. El conector RJ45 cumple con estos requisitos por lo que se ha ubicado en la parte lateral de cada puerto del mecanismo de sensorización, como se observa en la Figura 46

En el lateral derecho también se conectó los adaptadores para los puertos USB y HDMI, así como el interruptor de encendido y apagado.



Figura 46. Ubicación de los elementos electrónicos

El resto de las conexiones se las realizó de acuerdo con los diagramas detallados en la sección 3.9 y se encuentran en el compartimento electrónico. Adicionalmente, se ha colocado un ventilador para mantener refrigerado el sistema, como se observa en la Figura 47



Figura 47. Conexión del prototipo

4.2. Desarrollo de la página web

En esta sección se detalla el proceso para el desarrollo de la página web, para su elaboración se decidió utilizar el gestor de contenidos WordPress, en la Figura 48 se muestra el diagrama de flujo de funcionamiento de la página web.

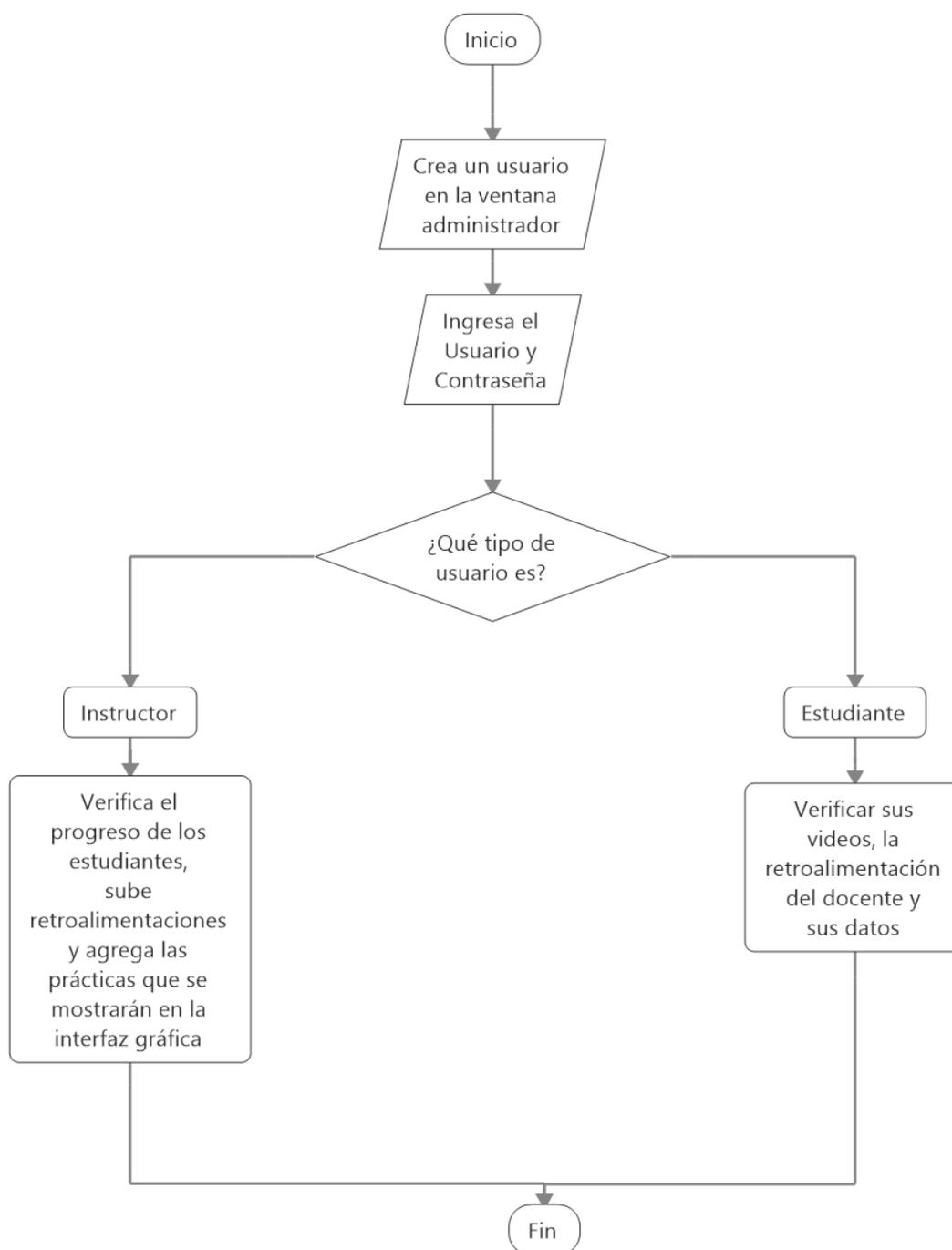


Figura 48. Diagrama de flujo del funcionamiento de la página web

4.2.1. Instalación y configuración de Wordpress

Previo al desarrollo de la página web se adquirió un hosting web con un proveedor de servicios de alojamiento, el mismo posee características primordiales para el funcionamiento de la página, estas son:

- Panel de control.
- Gestor de base de datos
- Acceso al administrador de archivos
- Administrador de FTP
- Ancho de banda ilimitado
- Almacenamiento Ilimitado

Para la instalación de WordPress se accedió al control panel, el mismo que es entregado por el proveedor. Una vez ingresado al panel se procedió a la instalación con la ayuda del asistente, además se registró y asignó un dominio llamado www.meditechec.com.

Una vez culminada la instalación se procedió a la configuración en la ventana de administrador, se aplicó un tema que sea atractivo para el usuario y se aplicaron los siguientes plugins de uso libre para la configuración de la página:

- Members: Un plugin de gestión de usuarios y perfiles que te ofrece el control de los permisos de tu sitio. Este plugin te permite editar tus perfiles y sus capacidades, clonar perfiles existentes, asignar varios perfiles por usuario, bloquear contenido de entradas, o incluso hacer que tu sitio sea completamente privado. (Tadlock, 2019)

- Roles de menú: Permite ocultar elementos de menú personalizados en base a perfiles de usuario. (Darling, 2019)
- Ultimate Member: Un plugin que sirve para la gestión y control de perfiles de usuarios. (Ultimate Member, 2019)

4.2.2. Base de datos

La base de datos es el repositorio del simulador, en ella se almacenan los usuarios, las contraseñas, los videos y toda la información correspondiente al usuario. La base de datos está desarrollada en MySQL con SQL como lenguaje de consulta, además se utilizó la interfaz phpMyAdmin como herramienta para administración.

Estructura de la base de datos WordPress

Al instalar el CMS de WordPress por defecto se crea una estructura, en la que se encuentran 3 tablas principales y 2 secundarias, estas tablas tienen la función de almacenar la información del sistema y se detallan a continuación:

- ceiq_user: almacena los datos personales de los usuarios y sus contraseñas.
- ceiq_usermeta: almacena información adicional generada por el propio CMS.
- ceiq_post: contiene información sobre las actualizaciones de los usuarios.
- ceiq_postmeta: se guarda información adicional generada por los plugins.
- ceiq_links: se utiliza para la gestión de enlaces.

En la Figura 49 se muestra la estructura de la base de datos mediante un diagrama entidad–relación, este tipo de diagrama utiliza el método relacional, que simplemente almacena datos en tablas.

(CampusMVP, 2014) Cada tabla tiene relación una con otra, estas relaciones le permiten realizar las funcionalidades de la página.

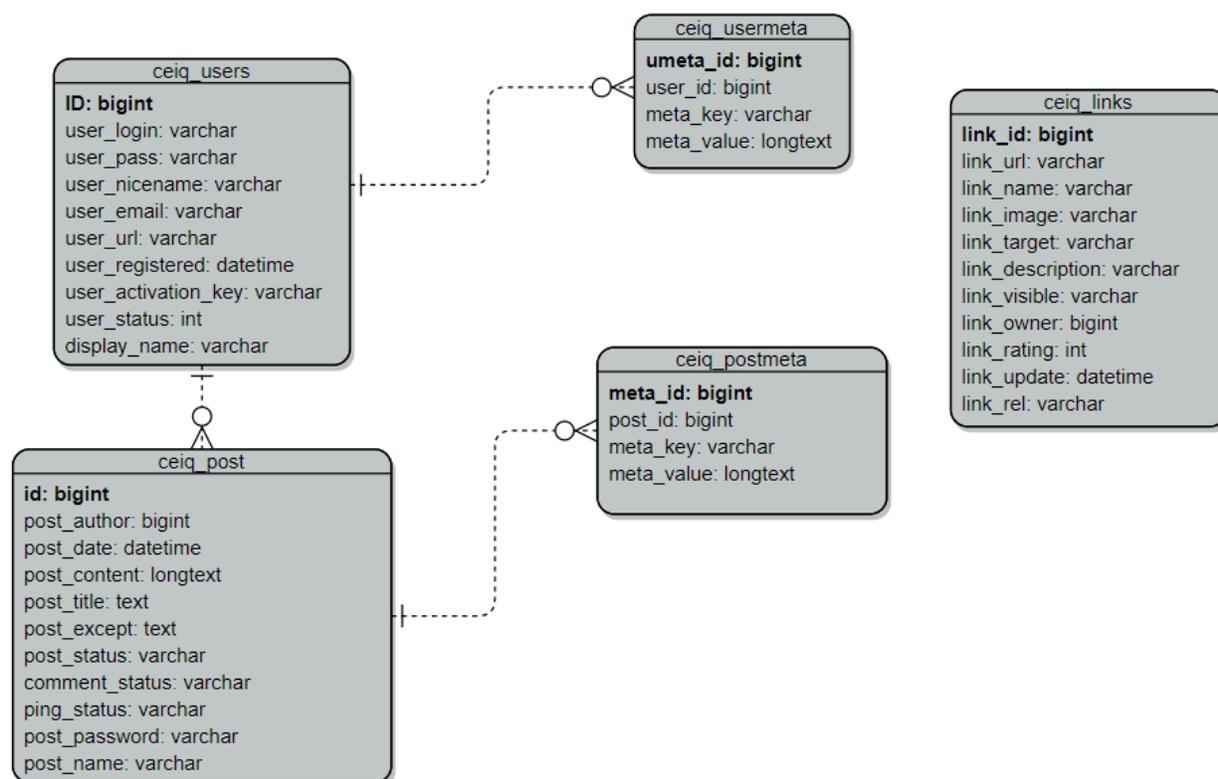


Figura 49. Diagrama Entidad - Relación de la base de datos de WordPress

Fuente: (WordPress, 2019)

Estructura de la base de datos multimedia

La base de datos de multimedia es una estructura independiente que se conecta a la página web, en ella están albergados los enlaces, datos e información de cada usuario enviada directamente desde el entrenador laparoscópico, cuyo funcionamiento es explicado en la sección 4.3.

En la Figura 50 se muestra el diagrama entidad-relación de la base de datos multimedia, en esta base de datos se encuentra una tabla principal llamada videos que contiene la siguiente información:

- **ID:** posición de cada dato en la tabla
- **user:** usuario de ingreso
- **link:** enlace de video
- **teme:** tipo de práctica a realizar
- **date:** fecha de la ejecución de la práctica.
- **student:** nombre completo del estudiante
- **description:** tipo de entrenamiento
- **time:** tiempo de ejecución de práctica
- **hora:** hora de realización de la práctica
- **distance:** distancia recorrida por la pinza derecha.
- **retroalimentacion:** enlace del archivo de retroalimentación (subido por el docente)
- **distance2:** distancia recorrida por la pinza izquierda.
- **angulo1:** ángulo de movimiento de la pinza derecha.
- **angulo2:** ángulo de movimiento de la pinza izquierda.

La entidad “videos” se relaciona con la entidad “nombre_videos”, que es la que se encarga de guardar el nombre del video más no su enlace, por lo contrario, la tabla “prácticas” no tiene relación ya que es independiente y se encarga de almacenar los tipos de prácticas que serán mostradas en la tabla principal y en la interfaz gráfica.

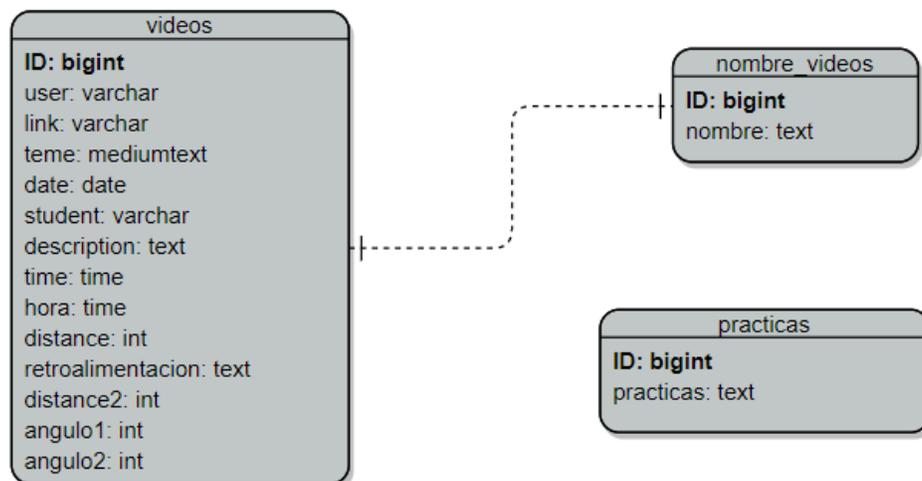


Figura 50. Diagrama entidad-relación de la base de datos multimedia

En la Figura 51 se muestra la base de datos en la herramienta phpMyAdmin, cada uno de sus componentes se detalla a continuación:

1. Base de datos WordPress
2. Base de datos multimedia
3. Tablas que compone la base de datos, aquí se muestran los datos de cada tabla.
4. Herramientas de configuración
5. Consola de comandos SQL

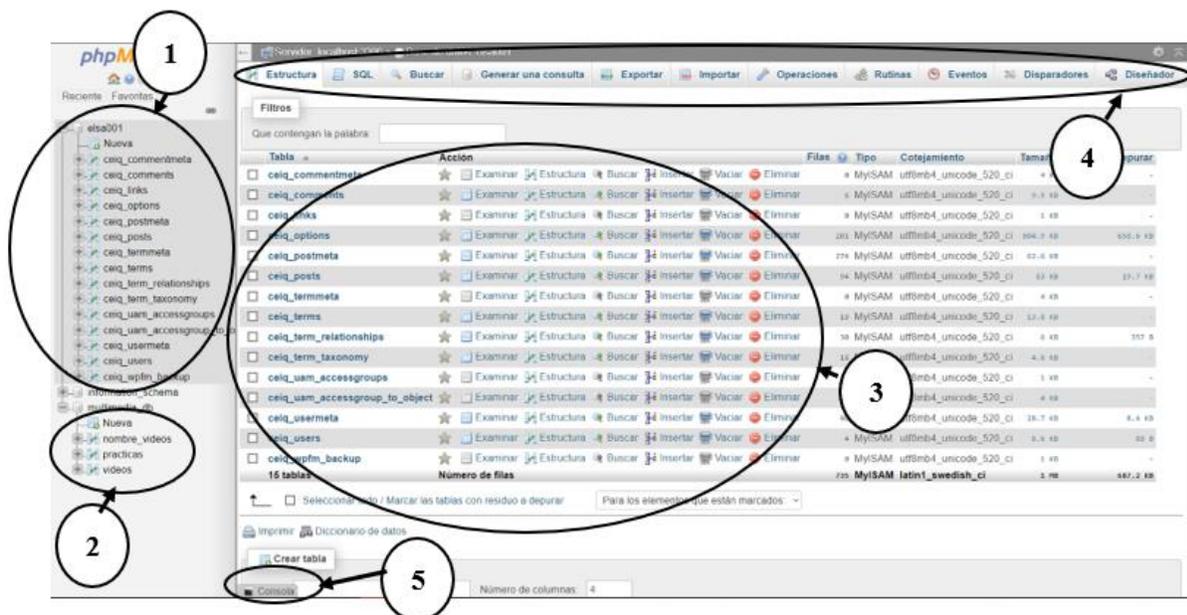


Figura 51. Base de datos en la herramienta phpMyAdmin

4.2.3. Menús y submenús que componen la página web

Al ingresar al enlace www.meditechec.com se muestra la página de la Figura 52, donde se encuentran dos menús, el primero, “ELSA”, contiene información sobre el entrenador laparoscópico y el segundo, “Iniciar sesión”, que permite el inicio de sesión con un usuario correspondiente.

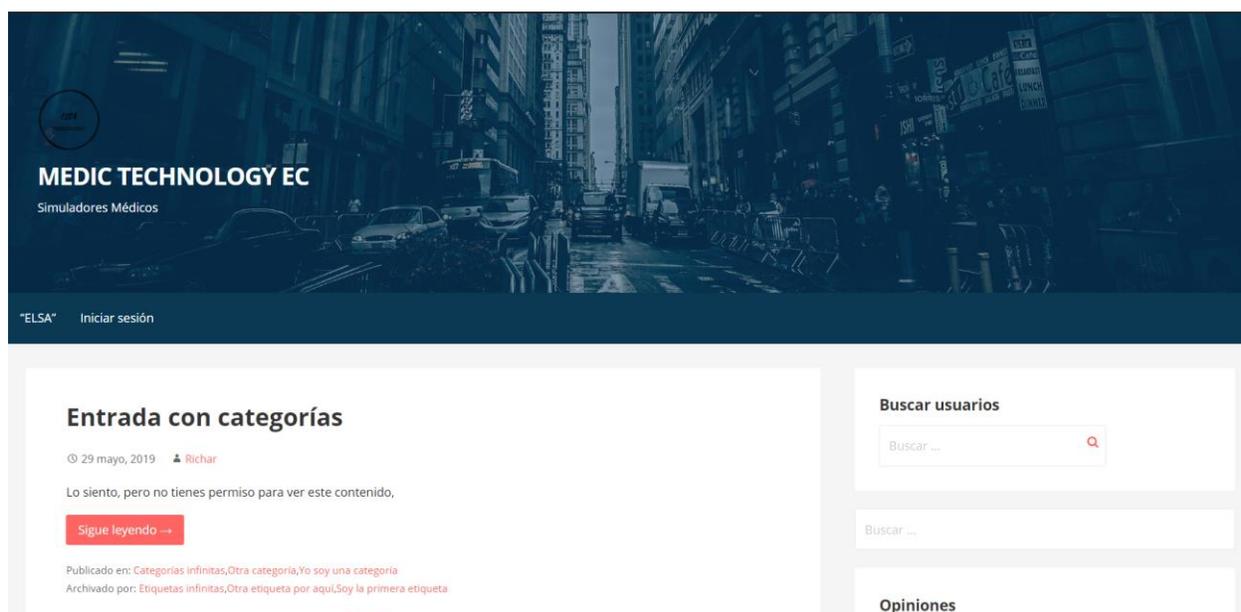


Figura 52. Página principal de la web.

En la Figura 53 se muestran los menús que visualiza el usuario Instructor, la función de los menús se detalla a continuación:

- **“ELSA”:** Muestra información relevante con respecto al entrenador laparoscópico.
- **Cuenta:** Muestra un submenú “Perfil” que contiene la información del usuario, se puede configurar como un perfil social.
- **Área multimedia:** Muestra los videos de todos los estudiantes.
- **Miembros:** Muestra los estudiantes inscritos en el curso.
- **Registro de prácticas:** Permite registrar prácticas que serán mostradas en el entrenador laparoscópico.
- **Cerrar sesión:** Permite cerrar la sesión.

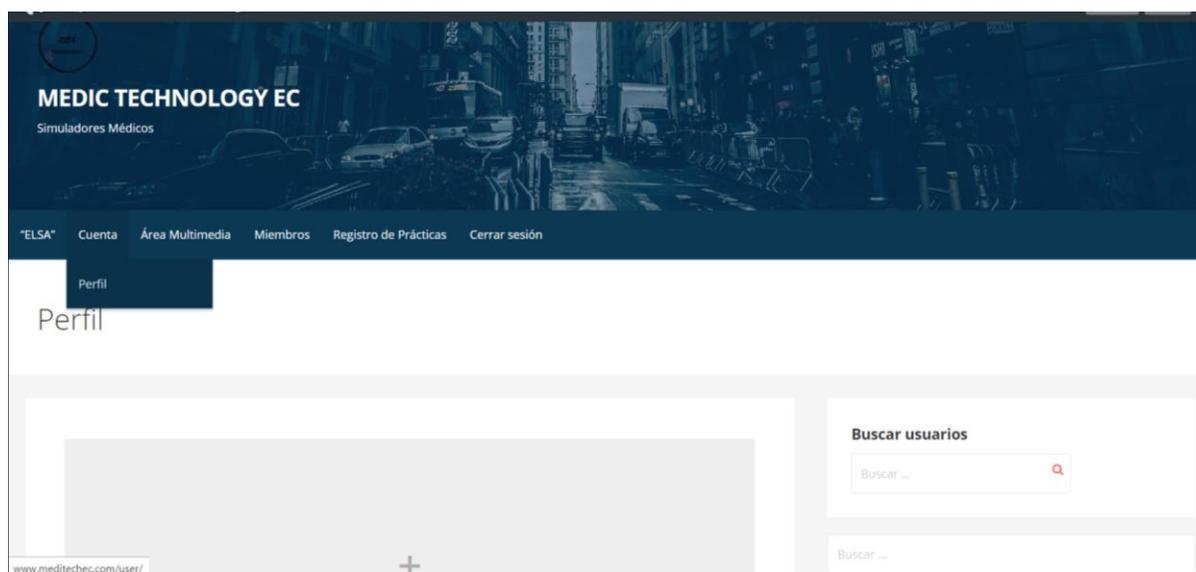


Figura 53. Menús y submenús correspondientes al usuario Instructor

En la Figura 54 , se muestran los menús que visualiza el usuario Estudiante, el funcionamiento de cada uno es similar a los del instructor.

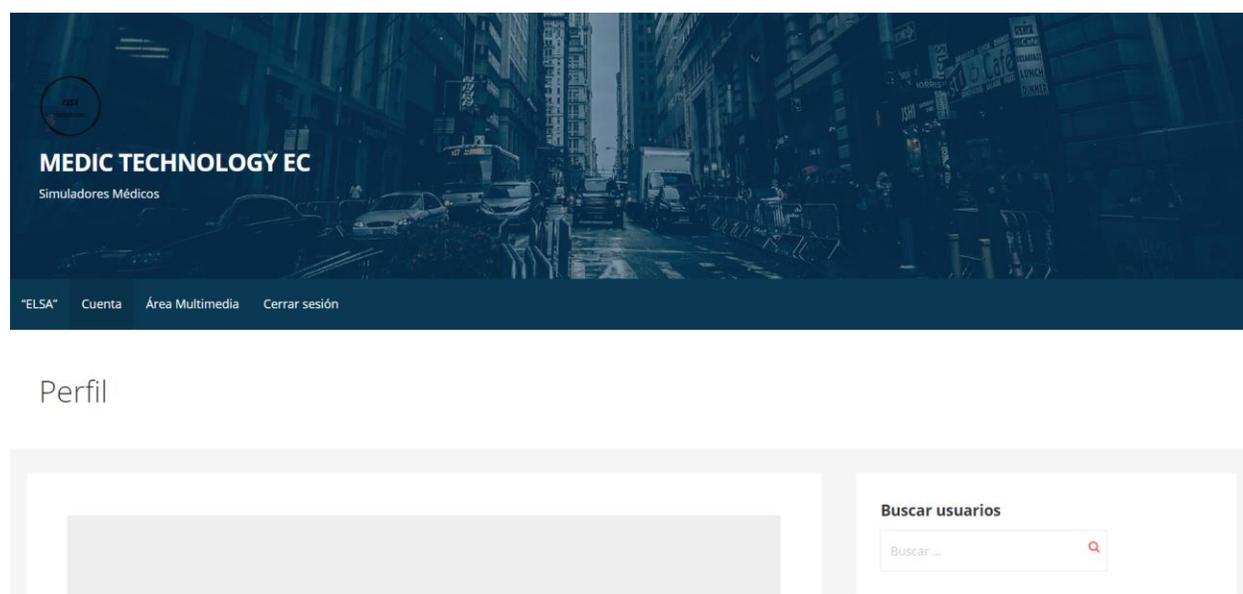


Figura 54. Menús y submenús correspondientes al usuario Estudiante

4.2.4. Plugins propios implementados

Para la implementación de las funcionalidades de visualización de video y registro de prácticas se crearon dos plugins que permiten enlazar la página web con la base de datos creada en MySQL, para el desarrollo de estos se utilizó PHP y HTML.

Plugin para la consulta de la base de datos

La programación del plugin parte desde un encabezado que contiene la información y detalles de este, además posee los datos del desarrollador, su uso es importante ya que este es el enlace con la página web para que pueda ser utilizado, la estructura del encabezado se muestra en la Figura 55.

```
/*
  Plugin Name: Consulta Base de Datos
  Plugin URL: http://www.meditechec.com
  Description: Consulta en base de datos
  Author: Richar Cangui
  Version: 0.1
  Author URL: http://www.meditechec.com
*/
```

Figura 55. Encabezado del plugin de consulta de la base de datos

Continuando con la programación, se realiza una función de consulta para guardar en variables datos como: usuario, rol, ID y nombres completos. Esta función se ejecuta posterior a la conexión del script con la base de datos, la conexión se realiza con el comando “mysqli_connect”. La programación de esta se muestra en la Figura 56.

Al final se obtuvieron dos páginas uno para el estudiante y otro para el instructor, las páginas están en la pestaña “Área Multimedia”, en la Figura 58 se presenta la página que visualiza el usuario estudiante, muestra una tabla con toda la información que reposa en la base de datos como se detallaba en la Figura 50.

Área Multimedia

Richar Cangui
Estudiante

Práctica	Hora	Fecha	Distancia	Duración	Video	Tipo	Retroalimentación
Corte	21:07:45	2019-10-10	0	00:00:09	Corte	Cronometrado	
Sutura	21:16:04	2019-10-10	0	00:00:14	Sutura	Cronometrado	
Corte	19:48:40	2019-11-06	0	00:02:18	Corte	Cronometrado	
Sutura	20:00:14	2019-11-06	0	00:00:37	Sutura	Cronometrado	

Una producción Richar Cangui - Copyright © 2019 MEDIC TECHNOLOGY EC

Figura 58. Página que se muestra a un usuario Estudiante

Si el usuario es un instructor se mostrarán los videos de cada uno de los estudiantes, además se muestra un botón que permite realizar una retroalimentación (Figura 59) La extensión de los archivos permitidos son: .doc, .txt, .zip, rar, .pdf, .docx, .png, .jpg y .jpeg.

“ELSA” Cuenta Área Multimedia Miembros Registro de Prácticas Cerrar sesión

Área Multimedia

Fernando Torres

Instructor

Nomenclatura

La pinza derecha se representa con "PinzaR"
La pinza izquierda se representa con "PinzaL"

Alumno	Práctica	Hora	Fecha	PinzaL[mm]	PinzaR[mm]	ÁnguloPinzaL	ÁnguloPinzaR	Duración	Video	Tipo	Retroalimentación
Fernando Torres	Nudo	20:19:24	2019-12-23	1700	2158	878	1047	00:01:09	Nudo	Cronometrado	
Nicolle Herrera	PracticaDesconocida	11:54:10	2019-12-21	1896	2184	967	1056	00:03:57	PracticaDesconocida	Cronometrado	
Diego Montenegro	PracticaDesconocida	11:48:50	2019-12-21	1680	1824	651	674	00:01:33	PracticaDesconocida	Cronometrado	
Fernando Torres	Aros	20:11:29	2019-12-23	1529	1489	900	972	00:02:20	Aros	Cronometrado	
Nicolle Herrera	PracticaDesconocida	11:41:14	2019-12-21	1720	1032	1034	702	00:03:11	PracticaDesconocida	Cronometrado	
Diego Montenegro	PracticaDesconocida	11:32:47	2019-12-21	1123	988	630	595	00:02:01	PracticaDesconocida	Cronometrado	Descargar

Seleccionar la práctica para retroalimentación:

Subir Retroalimentación

Seleccionar archivo

Figura 59. Página que se muestra a un usuario Instructor

Plugin para la registrar prácticas en la base de datos

El plugin para registro de prácticas es muy similar al plugin de consulta, con la diferencia que este tiene que conectarse a la base de datos y editar el contenido de una tabla, el código utilizado para realizar esta acción es el que se muestra en la Figura 60.

```
<?php
$conexion=mysqli_connect('107.180.25.39','richar','richar1996','multimedia_db');

$InPractica=$_POST['practicas'];
$con consulta="insert into practicas(practica) VALUES ('$InPractica')";

$resultado=mysqli_query($conexion,$con consulta);
echo '<meta http-equiv="Refresh" content="0;URL=http://www.meditechec.com/registro-de-practicas/">';
?>
```

Figura 60. Código para insertar datos en una base de datos

La estructura de la tabla se realizó en HTML y la forma obtenida es la que se muestra en la Figura 61.

Número	Práctica
1	Corte
2	Sutura
3	Prueba
4	Corte Sutura

Figura 61. Página para el registro de prácticas

4.3. Desarrollo interfaz gráfica

En esta sección se muestra el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo de la interfaz gráfica, la misma que es mostrada en una pantalla táctil de 3.5 pulgadas incorporada en el equipo, la pantalla está conectada a la raspberry “maestro”, permite la interacción del entrenador laparoscópico con el usuario, para el desarrollo de la misma previamente se planteó un diagrama de flujo del funcionamiento que esta debe cumplir, se muestra en la Figura 62.

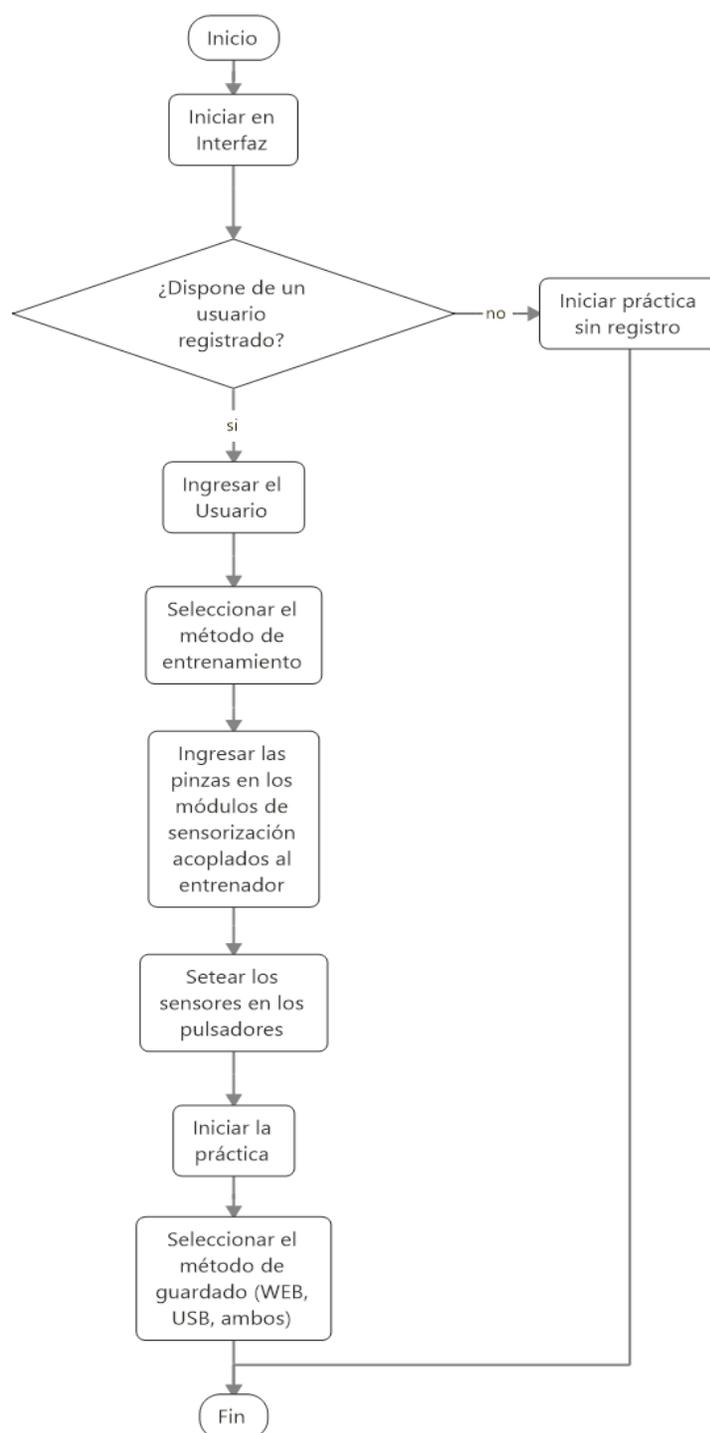


Figura 62. Funcionamiento requerido en la interfaz gráfica

4.3.1. Ventanas de navegación

La interfaz gráfica consta de 6 ventanas para la interacción con el usuario y se muestran según se manipulen cada uno de los botones presentes en ella, permiten un uso intuitivo y fueron diseñadas acorde a las normativas sobre desarrollo de interfaces gráficas descritas en la sección 2.13.1.

La Figura 63 muestra la pantalla de inicio, es la primera pantalla que el usuario visualiza al encender el equipo. En esta ventana como encabezado se muestra el nombre de la empresa auspiciante y del entrenador, denominado E.L.S.A. (Entrenador Laparoscópico con Sensorización Avanzada), como pie de página se muestra un conjunto de logos de diferentes entidades como son: universidad, empresa auspiciante y carrera, en el centro de la ventana se encuentra el botón “INICIAR” que da el paso a la ventana de instrucciones (Figura 64) y activa la previsualización de la cámara incorporada en el entrenador. En la esquina superior derecha se encuentra el botón de apagado.



Figura 63. Ventana de Inicio

La Figura 64 muestra la ventana de instrucciones, la misma que contiene una información breve sobre el uso del entrenador, además contiene un botón en la esquina inferior derecha que sirve para saltar esta ventana y pasar a la ventana de ingreso de usuario (Figura 65).

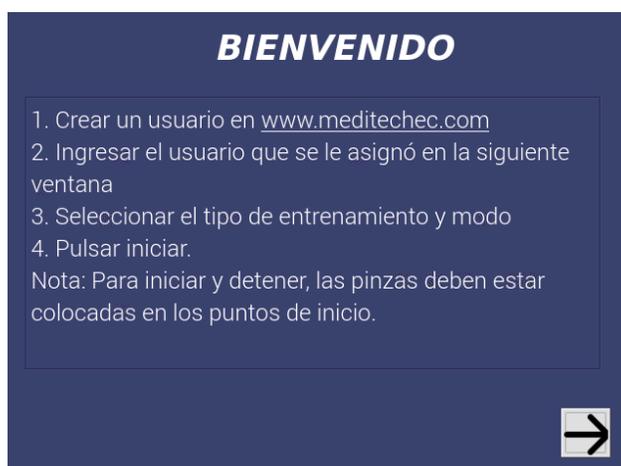


Figura 64. Ventana de instrucciones

En la Figura 65 se muestra la ventana de ingreso de usuario, esta contiene un teclado alfanumérico para el ingreso de datos, además contiene otros botones: regreso a casa “Home” cuya función es regresar a la ventana de inicio, “DEL” que borra todo la información ingresada con el teclado alfanumérico y un botón “OK” que verifica que el usuario ingresado es el correcto en cuyo caso permite el paso a la ventana de configuraciones.



Figura 65. Ventana de ingreso de usuario.

En la Figura 66A se muestra la ventana de configuraciones, la misma que contiene una lista de prácticas precargada en la página web (Figura 61), además posee un cuadro de selección para elegir si desea realizar un entrenamiento a contrarreloj, si se marca el cuadro se muestra un reloj para establecer el tiempo en un formato de HH:MM:SS, (Figura 66B). En la parte inferior de la ventana se muestran etiquetas de ayuda al usuario, además posee flechas de navegación una de retroceso y una de siguiente para avanzar a la ventana de trabajo (Figura 67).



Figura 66. A) Entrenamiento cronometrado B) Entrenamiento a contrarreloj

En la Figura 67 se muestra la ventana de trabajo, cuando la práctica no se está ejecutando, esta posee etiquetas que informan al usuario el tipo de práctica que está realizando y si es cronometrada o a contrarreloj, en la parte central de la ventana se encuentra un reloj que cuenta las horas, minutos y segundos, debajo de este se encuentran los botones de iniciar habilitado y detener deshabilitado, el mismo que se habilita al iniciar la práctica. Posee teclas de navegación para desplazarse entre las distintas ventanas.

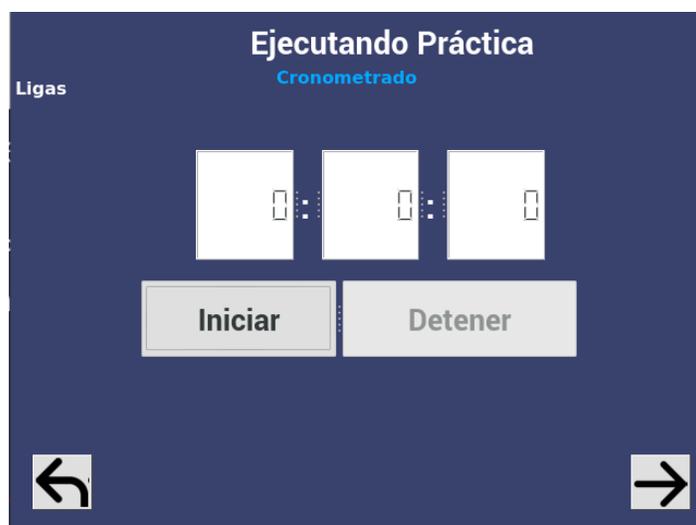


Figura 67. Ventana de trabajo sin iniciar la práctica

En la Figura 68 se muestra la ventana de trabajo, con la práctica en ejecución, sus elementos son similares a los mostrados en la Figura 67 pero se incorporan otros adicionales, se muestra una etiqueta que indica que la práctica está siendo grabada mediante la cámara incorporada en el entrenador, además se deshabilita el botón iniciar y se habilita el botón detener, en la parte inferior además de los botones de navegación se muestra una etiqueta de ayuda al usuario.

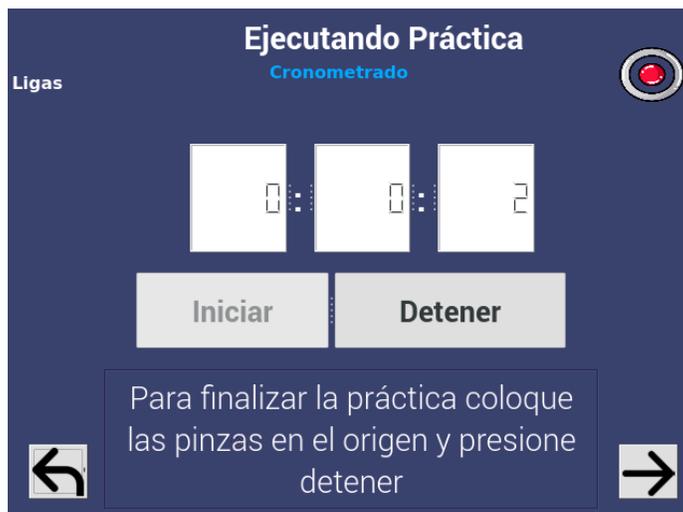


Figura 68. Ventana de trabajo ejecutando la práctica

En la Figura 69 se muestra la ventana de información, en la parte superior muestra el nombre del practicante y en la inferior se indica los datos referentes a la práctica realizada:

- **Nombre:** muestra el nombre con el que se guardará el video en la base de datos o usb.
- **Fecha:** muestra la fecha y hora de inicio de la práctica.
- **Guardar:** posee dos cuadros de selección para elegir la opción de guardado, web, usb o ambos.
- **Tiempo:** muestra el tiempo que le tomó al practicante ejecutar el entrenamiento.
- **Izquierda:** muestra la distancia y los ángulos recorridos por la pinza izquierda.
- **Derecha:** muestra la distancia y los ángulos recorridos por la pinza derecha
- **Botón “Guardar”:** se habilita cuando el usuario seleccione un método de guardado.
- **Botón salir/cerrar sesión:** detiene la previsualización del video y cierra la sesión de usuario.

Figura 69. Ventana de información

4.3.2. Configuración del software de desarrollo

Una vez culminada la construcción del prototipo a nivel estructural y electrónico se procedió a realizar las configuraciones necesarias para la programación de la tarjeta controladora Teensy 2.3 y Raspberry Pi 3B+, para el desarrollo del proyecto se utilizó el entorno de desarrollo Arduino para la programación de la tarjeta controladora, un entorno de desarrollo de Python denominado Tonny para la programación de la Raspberry y QtDesigner para el diseño de cada una de las ventanas de la interfaz.

Para la configuración de entorno de desarrollo de Arduino se deben seguir los pasos mostrados en la página oficial de la tarjeta controladora Teensy3.2. (Projects, 2018)

Para la configuración del entorno de desarrollo Tonny de la Raspberry Pi 3B+ (Maestro) se realiza lo siguiente:

- Instalar QtDesigner: Interfaz para el diseño y compilación de una interfaz gráfica.

- Descargar PyQt5: librería necesaria para trabajar en Python la interfaz gráfica generada en QtDesigner.
- Descargar mysql-connector: librería necesaria para enlazar Python con la base de datos alojada en el servidor.

Para la configuración del entorno de desarrollo Tonny de la Raspberry Pi 3B+ (Esclavo) se realiza lo siguiente:

- Instalar los drivers correspondientes a la cámara MIPI camera module, la documentación se la puede encontrar en la página oficial de Arducam.
- Descargar mysql-connector: librería necesaria para enlazar Python con la base de datos alojada en el servidor.

4.3.3. Desarrollo del código de la Raspberry Maestro

Antes de iniciar con el código se utilizó una herramienta para el diseño de cada una de las ventanas que comprenden la interfaz gráfica, esta herramienta se llama QtDesigner y se maneja mediante *widjets* que ayudan a la creación de las ventanas las mismas que son guardadas en un archivo con la extensión “.UI”. La ventana del software se muestra en la Figura 70, cuyos componentes principales son los siguientes:

1. Caja de widjets: enlista un conjunto de elementos que pueden conformar una ventana.
2. Área de trabajo: espacio para el diseño de las ventanas.
3. Inspector de objetos: muestra todos los objetos colocados en una ventana.
4. Editor de propiedades: muestra las propiedades de cada objeto.

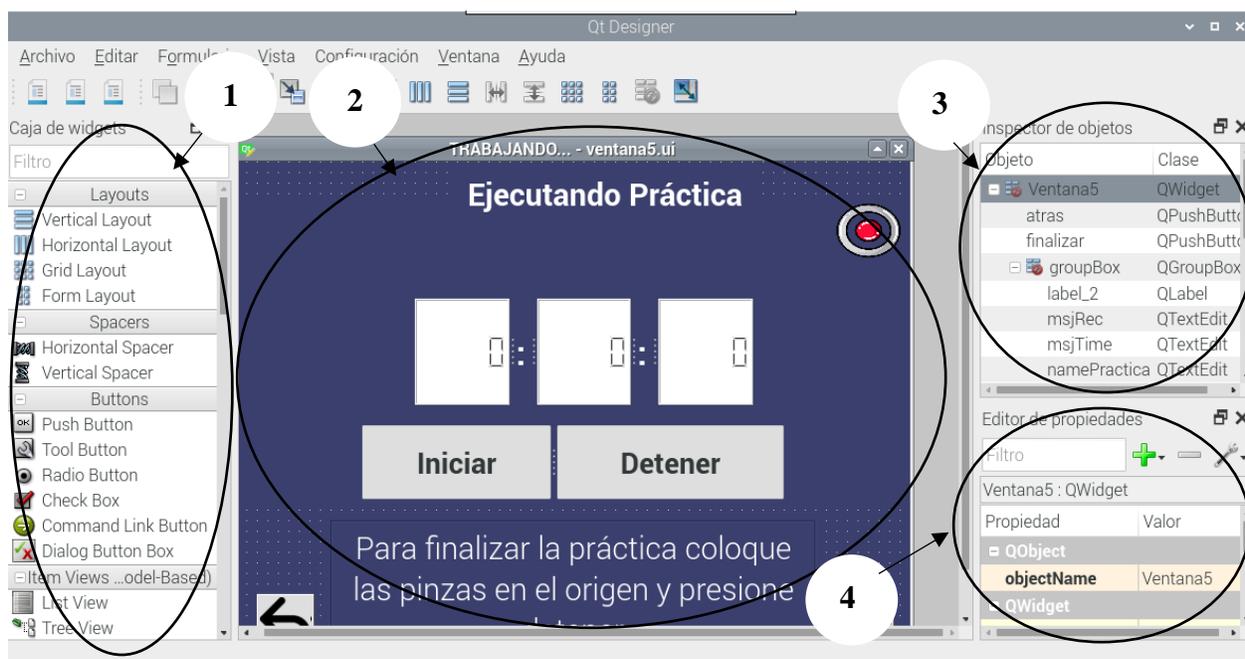


Figura 70. Software QtDesigner

En la Figura 71, Figura 72 y Figura 73 se muestra el diagrama de flujo detallado del algoritmo de programación implementado para el control de las ventanas de la interfaz gráfica.

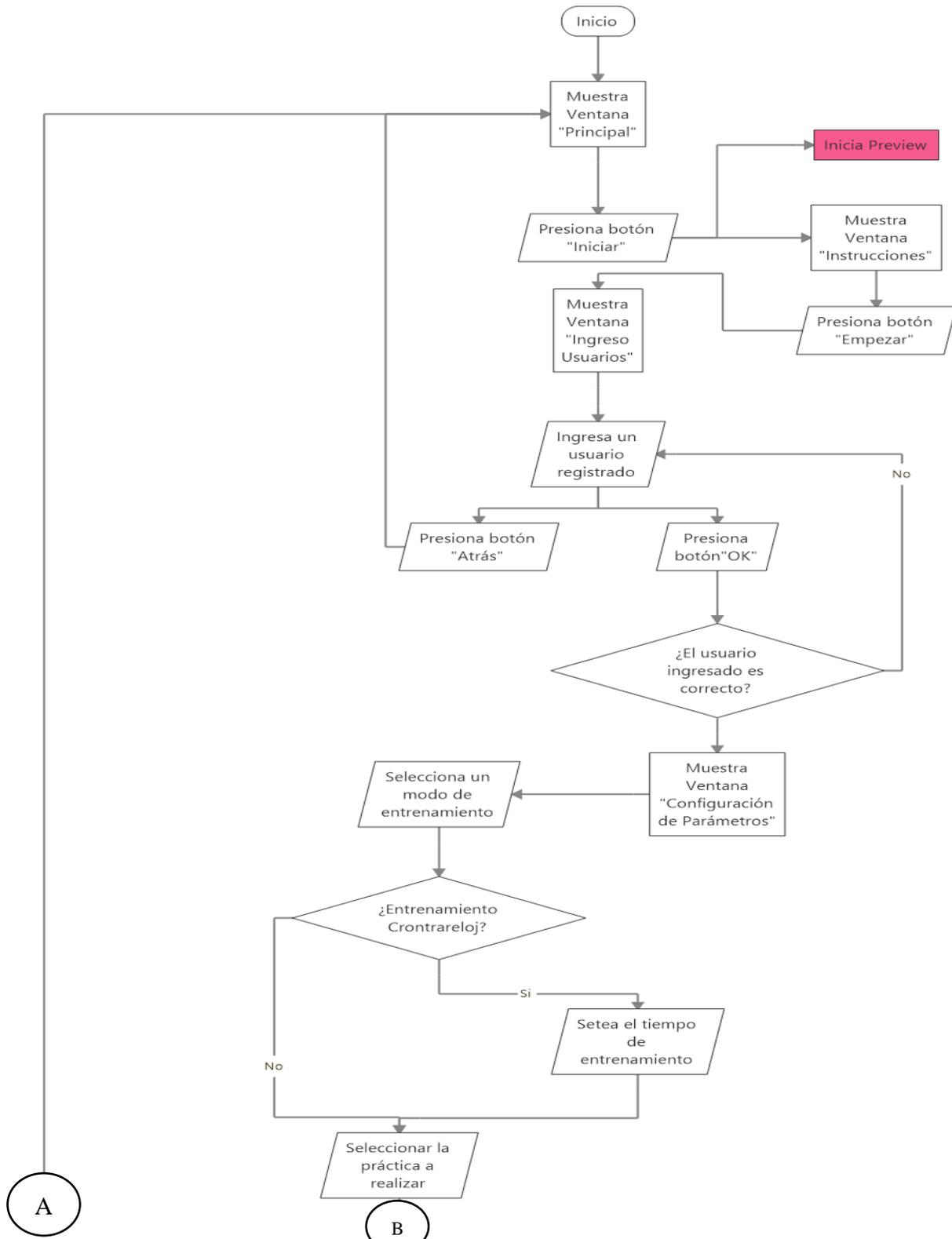


Figura 71. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica (Parte1)

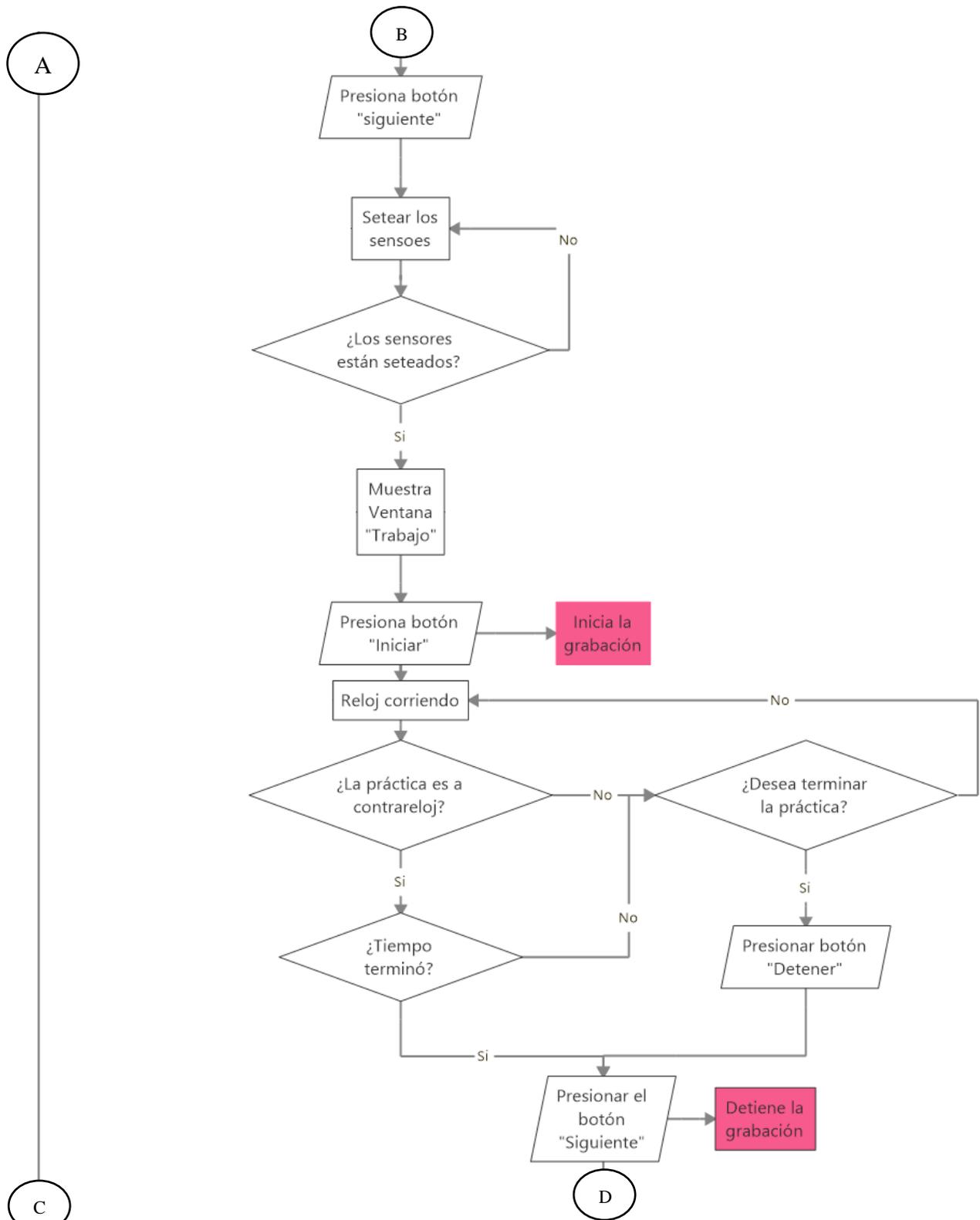


Figura 72. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica (Parte2)

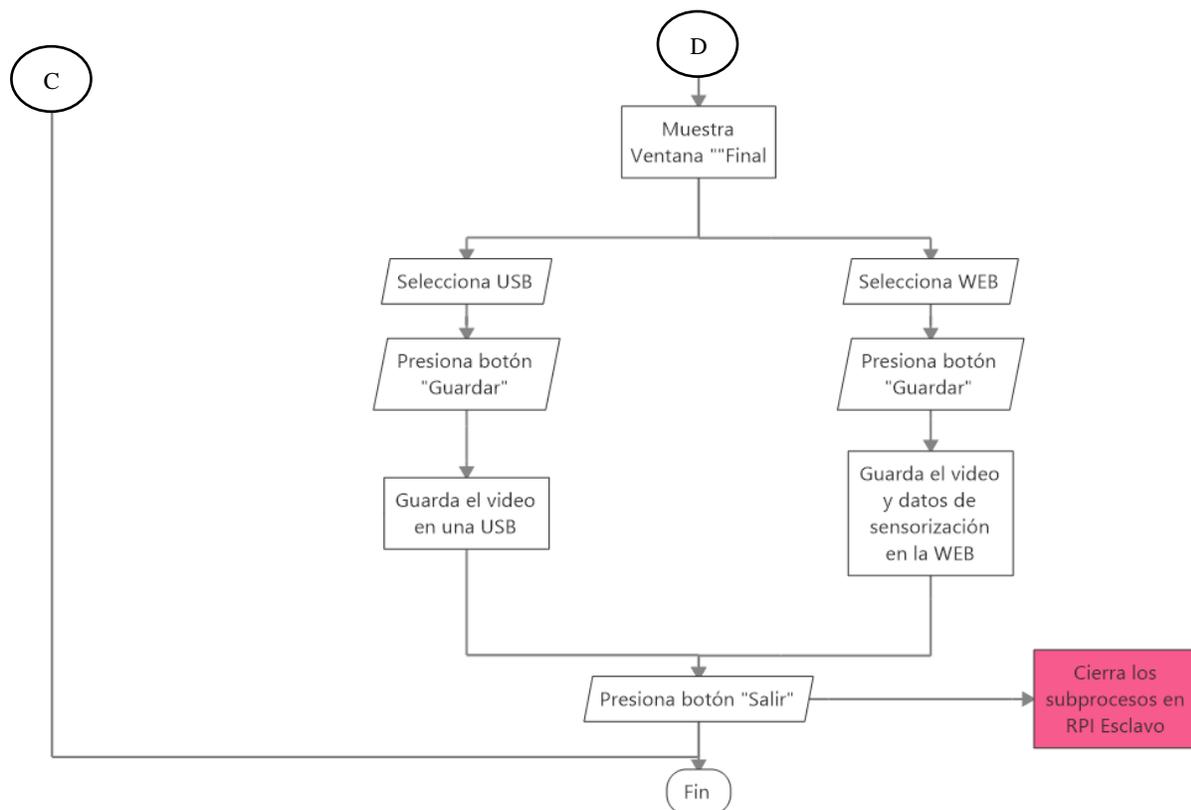


Figura 73. Diagrama de flujo de la interfaz gráfica (Parte 3)

Declaración de las librerías para el Maestro

El código ejecutado en el Maestro se encarga de controlar todo el entrenador laparoscópico con sensorización avanzada, mediante el uso de la interfaz gráfica: recibe los datos del controlador, envía comandos al Esclavo para que ejecute determinadas acciones e interactúa con el servidor de la página web para actualizar la base de datos. En la Figura 74 se muestran las librerías incluidas en el código para conectar los archivos con extensión “.UI” proporcionados por el software QtDesigner, la importación de los recursos como son las imágenes y cada uno de los iconos, la librería de conexión a la base de datos MySQL y la librería de comunicación serial para la interacción entre Maestro-Esclavo.

```

1  #!/usr/bin/python3
2  import sys
3  from PyQt5.QtCore import QApplication
4  from PyQt5.QtWidgets import QApplication, QMainWindow
5  from PyQt5.uic import loadUi
6  from Tesis import recursos_rc
7  from Tesis import iconos_rc
8  from PyQt5 import QtCore
9  import mysql.connector
10 import time
11 import threading
12 import queue
13 import serial
14 import subprocess

```

Figura 74. Inclusión de librerías en el algoritmo del Maestro

Algoritmo para la comunicación serial

En la Figura 75 se muestra el código utilizado para la comunicación entre el Maestro-Eslavo y la tarjeta de control,

```

16 portA='/dev/ttyUSB0'
17 portB='/dev/ttyACM0'
18 try:
19     puerto = serial.Serial(port = portA,
20                           baudrate = 115200,
21                           bytesize = serial.EIGHTBITS,
22                           parity = serial.PARITY_NONE,
23                           stopbits = serial.STOPBITS_ONE)
24     tensity = serial.Serial (portB, 9600)

```

Figura 75. Código de conexión entre Maestro-Eslavo y la tarjeta de control.

Declaración de las clases y objetos para inicializar una ventana

Para la programación de las ventanas de la interfaz gráfica se utilizaron clases y objetos en el que a cada ventana le corresponde una clase distinta y por lo tanto debe tener una inicialización, en la Figura 76 se muestra el código de inicialización de la ventana principal. Para el funcionamiento

de cada botón es necesario crear una función dentro de la clase con los comandos que le corresponden a cada uno de estos.

```

27 class VentanaPrincipal(QMainWindow):
28     #inicializa la funcion de la ventana principal
29     def __init__(self):
30         super(VentanaPrincipal, self).__init__()
31         loadUi('/home/pi/QtDesigner/ventana1.ui', self)
32         self.setWindowFlags(
33             QtCore.Qt.Window |
34             QtCore.Qt.FramelessWindowHint
35         )
36         puerto.write('ok'.encode())
37         #programa el comando al boton
38         self.botonIniciar.clicked.connect(self.abrirVentana2)
39         self.off.clicked.connect(self.apagado)
40         #funcion para abrir la ventana 2
41     def abrirVentana2(self):
42         self.hide()
43         nextVentana=Ventana2(self)
44         nextVentana.show()

```

Figura 76. Inicialización de la ventana principal de la interfaz gráfica

Algoritmo para el envío y recepción de una trama de datos mediante comunicación serial

Para la comunicación entre Maestro-Esclavo es necesario utilizar el código mostrado en la Figura 77, esta línea envía una trama de datos codificadas al esclavo, el cual la interpreta y ejecuta determinada acción, en este caso, ejecutar la previsualización de la cámara. Se sigue el mismo principio para iniciar la grabación, detener la grabación, subir la grabación y detener la previsualización.

```

62     try:
63         puerto.write('preview'.encode())
64     except serial.SerialException:
65         print('exception')
66

```

Figura 77. Función para la comunicación entre Maestro-Esclavo

En la Figura 78 se muestra el código utilizado para la recepción de datos por parte de la tarjeta controladora.

```

583     while True:
584         QApplication.processEvents()
585         arduino.reset_input_buffer()#resetea los valores
586         received_data = arduino.read()#recibe los datos
587         time.sleep(0.1)
588         data_left = arduino.inWaiting()#concatena los datos recibidos
589         received_data += arduino.read(data_left)
590         sensor=received_data.decode('ascii')#decodifica los datos recibidos
591         controlador=sensor[0:1]#se filtra el dato deseado
592

```

Figura 78. Código para recibir datos mediante comunicación serial

Algoritmo para la conexión con la base de datos

Para conectar el Maestro con la base de datos alojada en el servidor se utiliza la librería *mysql-connect*, cuyos comandos básicos para la conexión son los mostrados en la Figura 79, para el uso de esta librería fue necesario implementar comandos del lenguaje SQL.

```

223     dbConnect = {
224         'host':'xxx.xxx.xx.xx',#colocar host
225         'port':3306,
226         'user':'user', #colocar usuario
227         'password':'password',#colocar Password
228         'database':'name_db'#nombre de la base de datos
229     }
230     conexion=mysql.connector.connect(**dbConnect)
231     cursor = conexion.cursor()
232     ## Obtener Datos de la base de datos enlace a los videos
233     sql="select * from practicas "
234     cursor.execute(sql)
235     resultados=cursor.fetchall()
236     for datos in resultados:
237         name=datos[1]
238         ##print(name)
239         self.selectPractica.addItem(name)
240     conexion.close()

```

Figura 79. Código para la conexión con la base de datos

4.3.4. Desarrollo del código de la Raspberry Esclavo

En la Figura 80 se muestra el diagrama de flujo simplificado del funcionamiento del algoritmo de control de la Raspberry Esclavo.

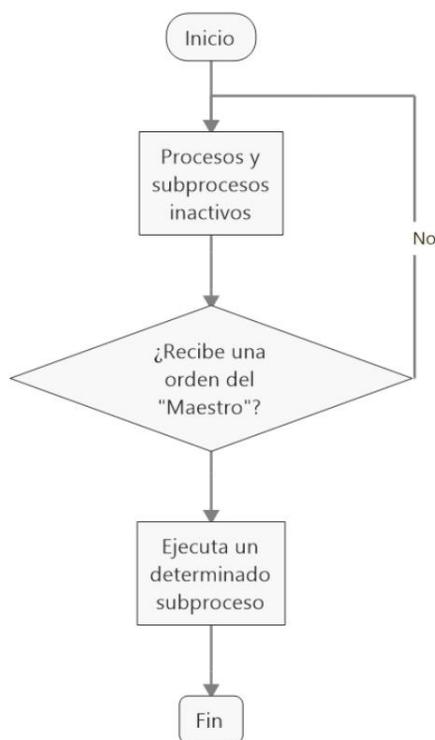


Figura 80. Diagrama de flujo del funcionamiento del Esclavo

Declaración de librerías para el esclavo

El Esclavo se encarga de ejecutar las acciones enviadas por el maestro, mediante comunicación serial interactúa con el Maestro y cumple funciones como: visualización y grabación de video, actualización de la base de datos y subida de video al servidor que aloja la página web. Las principales librerías incluidas en el código son las que se muestran en la Figura 81, siendo las que más destacan las siguientes librerías:

- Arducam: se encarga del control de la cámara.
- Ftplib: proporciona un enlace al servidor para la subida de archivos mediante FTP.
- Mysql Connector: proporciona una conexión segura a la base de datos alojada en el servidor.
- Subprocess: permite ejecutar subprocessos dentro de Python a manera de terminal.

```

1  #! usr/bin/python3
2  import arducam_mipicamera as arducam
3  import v4l2 #sudo pip install v4l2
4  import time
5  import ctypes
6  import numpy as np
7  import time
8  import threading
9  import subprocess
10 import shlex
11 import os.path
12 from subprocess import call
13 import mysql.connector
14 import os
15 import shutil
16 import ftplib
17 import serial
18 from time import sleep

```

Figura 81. Inclusión de librerías en el algoritmo del Esclavo

Algoritmo de control de parámetros de la cámara

El algoritmo del Esclavo fue programado mediante funciones, cada una corresponde a determinada acción que le pide el Maestro ejecutar, en la Figura 82 se muestra la función utilizada para configurar los valores de exposición y balance de blancos de la cámara, estos parámetros son muy importantes para obtener la mejor calidad de video.

```

22 def set_controls(camera):
23     try:
24         print("Reset the focus...")
25         camera.reset_control(v4l2.V4L2_CID_FOCUS_ABSOLUTE)
26         focus_value=camera.get_control(v4l2.V4L2_CID_FOCUS_ABSOLUTE)
27         focus_step=205#valor a modificar para modificar el enfoque
28         camera.set_control(v4l2.V4L2_CID_FOCUS_ABSOLUTE, focus_value + focus_step)
29     except Exception as e:
30         print(e)
31         print("The camera may not support this control.")
32     try:
33         print("Setting the exposure...")
34         exposureValue=310#Valor a modificar para la exposición
35         camera.set_control(v4l2.V4L2_CID_EXPOSURE, exposureValue)
36         camera.set_control(v4l2.V4L2_CID_VFLIP, 1)#Flip vertical
37         camera.set_control(v4l2.V4L2_CID_HFLIP, 1)#Flip Horizontal
38         print("Enable Auto White Balance...")
39         camera.software_auto_white_balance(enable = True)#balance de blancos automático
40     except Exception as e:
41         print(e)
42         print("The camera may not support this control.")
43

```

Figura 82. Función del control de la cámara

Algoritmo para la transferencia de archivos FTP

La transferencia de archivos mediante FTP es un proceso tedioso si no se conocen los requerimientos adecuados, previamente se necesitó crear un usuario FTP en el servidor, para ello fue necesario contactar con el proveedor de servicios. Con el usuario creado se procedió a realizar el código mostrado en la Figura 83, el código toma un archivo del Esclavo (video) y lo sube al servidor mediante el protocolo mencionado.

Una vez subido el video se actualiza la base de datos del servidor para que la dirección del enlace sea mostrada en la página del estudiante o instructor, según sea el caso, para esto se utilizó el código mencionado en la Figura 79.

```

134 # Datos FTP
135 ftp_servidor = 'xxx.xxx.xx.xx'#direccion del servidor FTP
136 ftp_usuario = 'user'#Usuario(proporcionado por el proveedor)
137 ftp_clave = 'password'#Clave de usuario
138 ftp_raiz = '/public_html/multimedia' # destino del fichero en el servidor
139 # Datos del fichero a subir
140 fichero_origen = name
141 fichero_destino = dest
142 # Conectamos con el servidor
143 try:
144     s = ftplib.FTP(ftp_servidor, ftp_usuario, ftp_clave)
145     try:
146         f = open(fichero_origen, 'rb')
147         s.cwd(ftp_raiz)
148         s.storbinary('STOR ' + fichero_destino, f)
149         f.close()
150         s.quit()
151         print('Grabado exitoso')
152         print(name)
153         call(['rm',name])
154     except:
155         print ("No se ha podido encontrar el fichero " + fichero_origen)
156 except:
157     print ("No se ha podido conectar al servidor " + ftp_servidor)

```

Figura 83. Código para subida de ficheros mediante FTP

Algoritmo para guardar el video en una USB

Para guardar el video en un dispositivo USB, se utilizó el código mostrado en la Figura 84, toma un fichero y lo mueve a un destino específico mediante el comando *shutil*.

```

90     ruta='/media/pi/'+usbName
91     print(ruta)
92     destino=ruta
93     fichero=name
94
95     shutil.copy(fichero,destino)
96     print('Fichero copiado')
97

```

Figura 84. Código para guardar un archivo en un dispositivo USB

4.4. Desarrollo del código de la tarjeta de control

La tarjeta de control se encarga de adquirir los datos del subsistema de sensorización, procesarlos y enviarlos mediante comunicación serial al maestro. El sistema de sensorización está constituido por dos partes la primera es el dispositivo de sensorización y la otra es el sensor de presencia. El objetivo del dispositivo de sensorización es calcular la trayectoria de la pinza y del sensor de presencia es detectar cuando la pinza se encuentra en el punto de inicialización.

Para calcular la trayectoria de la pinza partiendo de los 3 encoders seleccionados anteriormente se utilizaron las ecuaciones de coordenadas esféricas, debido a que el movimiento realizado por la pinza en el mecanismo se asemeja al movimiento realizado en este tipo de coordenadas (ver Figura 85)

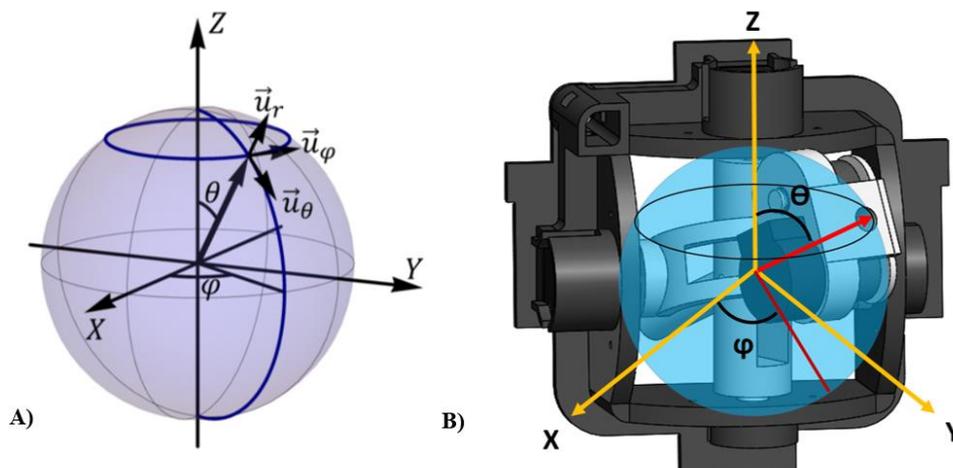


Figura 85. A) Coordenada esféricas B) Coordenadas esféricas en el mecanismo de sensorización

Las fórmulas utilizadas para determinar las ecuaciones cartesianas son:

$$x = r \sin(\theta) \cos(\varphi) \quad \text{Ec. 1}$$

$$y = r \sin(\theta) \sin(\varphi) \quad \text{Ec. 2}$$

$$z = r \cos(\theta) \quad \text{Ec. 3}$$

Dónde:

θ = Coordenada polar y se mide con el encoder del eje Y

φ == Coordenada acimutal y se mide con el encoder del eje X

r = Radio, en el caso del mecanismo es la longitud medida por la pinza, se lo calcula con la medición del encoder del eje Z [α] y el radio de la rueda de caucho silicona [R] con la fórmula de longitud de arco [L] expresada en la Figura 86.

$$L = \alpha * R$$

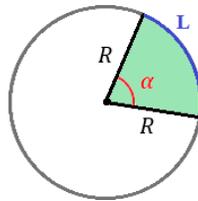


Figura 86. Fórmula para determinar la longitud de arco

Una vez que se ha calculado el valor de X Y Z se procede con el cálculo de la trayectoria de la pinza utilizando la Ec. 4.

$$|\Delta \vec{r}| = \sqrt{(Xf - Xi)^2 + (Yf - Yi)^2 + (Zf - Zi)^2} \quad \text{Ec. 4}$$

Este valor se lo guarda en un acumulador y en otra variable se guarda la suma de todos los movimientos en ángulos para, posteriormente, enviar estos datos hacia el maestro mediante comunicación serial.

Para los sensores de presencia, únicamente se da lectura del puerto analógico proveniente del receptor y se observa los valores cuando no hay ningún objeto obstaculizando el sensor y cuando la pinza se encuentra ubicada, para determinar un valor de umbral en el que la pinza sea detectada y active una bandera, al activarse la misma esta señal es enviada de igual manera al maestro.

En la Figura 87 se observa un diagrama de flujo del código implementado en la tarjeta Teensy por medio del compilador de Arduino.

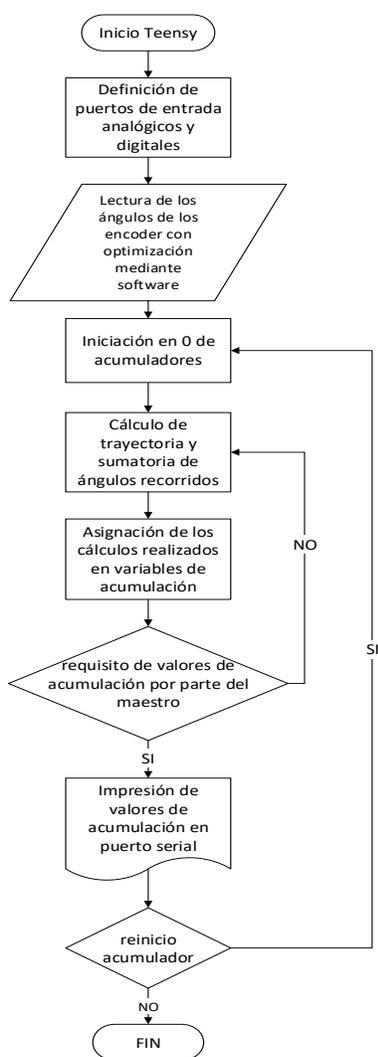


Figura 87. Diagrama de flujo de la programación de la tarjeta de control

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran las pruebas realizadas en el entrenador laparoscópico con sensorización avanzada, además se realiza el análisis de los resultados obtenidos, las pruebas realizadas fueron enfocadas en distintos ámbitos como: precisión y exactitud a nivel del sistema, análisis de la curva de aprendizaje antes y después de la utilización del equipo y por último la valoración del sistema a nivel del experto y estudiante, además estas pruebas ayudaron a validar la hipótesis planteada.

5.1. Pruebas de precisión y exactitud a nivel de sistema

El equipo, al poseer un sistema de medición, necesita tener un nivel de precisión y exactitud aceptable; un sistema es exacto si los valores medidos se acercan al valor real sin importar el margen de dispersión que estos posean, mientras que un sistema es preciso cuando todos sus valores medidos son similares sin importar que no se acerque a su valor real. (Ruiz, García, & Mesa, 2010)

Para determinar el porcentaje de precisión y exactitud del sistema se utilizó un estudio de repetibilidad en un ambiente controlado y con medidas conocidas. Las muestras tomadas fueron de 15 eventos a una medida conocida.

5.2. Metodología de toma de datos

La metodología de toma de datos consta en tomar los resultados de entrenamiento de cinco estudiantes incluyendo al experto para realizar una comparativa.

Para realizar el experimento se tomó en cuenta la escala GOALS (*Global assessment of laparoscopic skills*), que evalúa mediante 5 parámetros el desempeño y habilidad del participante cuando realiza una tarea en específico (Figura 88). (Vegas, Sanchez, Rodríguez, & Sánchez, 2013)

Percepción de Profundidad				
1	2	3	4	5
Constantemente sobrepasa el objetivo, movimientos amplios, corrige lentamente		Algunas fallas en la toma del objetivo, pero corrige rápidamente		Dirige los instrumentos en el plano correcto hacia el objetivo
Destreza Bimanual				
1	2	3	4	5
Usa solo una mano, ignora la mano no dominante, pobre coordinación entre ambas		Usa ambas manos, pero la interacción entre ambas no es óptima		Usa ambas manos de manera complementaria para una óptima exposición
Eficiencia				
1	2	3	4	5
Muchos movimientos tentativos, cambios frecuentes en el paso a realizar, no progresa		Movimientos lentos, pero organizados y razonables		Confiado, eficiente se mantiene enfocado en el objetivo
Manejo de los tejidos				
1	2	3	4	5
Movimientos bruscos, desgarrar el tejido, daño a las estructuras, pobre control		Manejo razonable de los tejidos, ocurre daño menor		Manejo adecuado de los tejidos, tracción apropiada de los mismos
Autonomía				
1	2	3	4	5
Incapaz de terminar el procedimiento		Es capaz de terminar la tarea de manera segura, con algo de guía del tutor		Capaz de complementar la tarea por sí solo, sin guía

Figura 88. Escala GOALS

Fuente: (Vegas, Sanchez, Rodríguez, & Sánchez, 2013)

De la escala GOALS para evaluar el mejoramiento de las habilidades motrices del practicante se utilizaron 3 parámetros que son: percepción de profundidad, destreza bimanual y eficiencia; debido a que el equipo se enfoca especialmente en dichos tres aspectos.

Se tomó en cuenta también los tiempos y las distancias recorridas por cada uno de los practicantes en cada prueba.

5.2.1. Fases de las pruebas

Para la recolección de datos se dividió el estudio en tres fases:

Fase 1

La fase 1 corresponde a la toma de resultados del antes, es decir en un entrenador laparoscópico tradicional, esto se realizó con el fin de obtener datos previos y conocer el nivel de aprendizaje de cada practicante. Las muestras recolectadas corresponden a tiempo y habilidades con respecto a la escala GOALS.

Fase 2

La fase 2 corresponde a una capacitación breve sobre el uso del entrenador laparoscópico con sensorización avanzada. Aquí se detalló el uso de este y el modo de manejo que deben darle. Esta capacitación duró un tiempo estimado de 15 minutos, en esta fase se asignaron los usuarios correspondientes a cada individuo, estos son: instructor y estudiante. Se permitió una práctica de prueba en el simulador.

Fase 3

La fase 3 comprende la toma de datos dentro del sistema diseñado, las muestras recolectadas corresponden a tiempo, distancia recorrida y habilidades con respecto a la escala GOALS.

Cada una de las fases se detalla en la Figura 89.

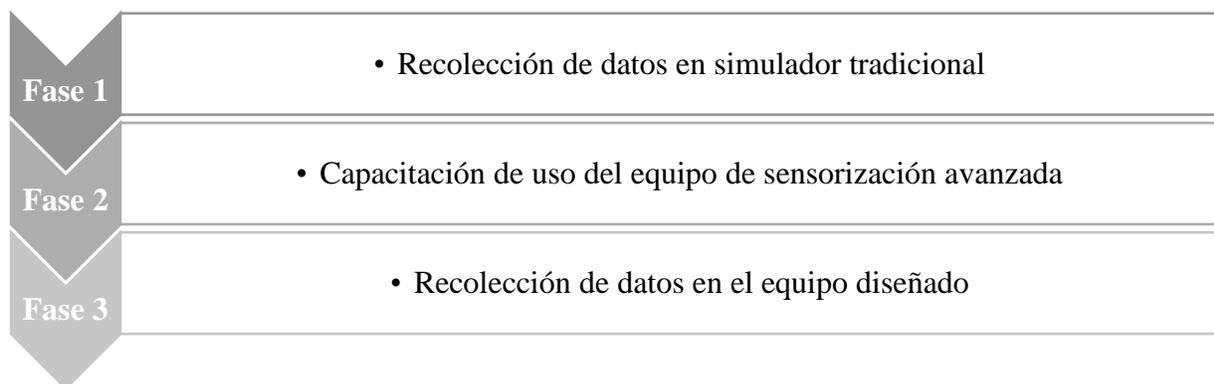


Figura 89. Formato de la ejecución de las fases de prueba

5.3.Resultados obtenidos y análisis.

5.3.1. Precisión y exactitud a nivel de sistema

Las pruebas para determinar el nivel de precisión y exactitud del sistema fueron realizadas con los datos de longitud de arco y ángulo que forma el movimiento de la pinza al ingresar al módulo de sensorización avanzada, los mismos que son de 50mm y 25 grados, respectivamente (*Figura 90*).

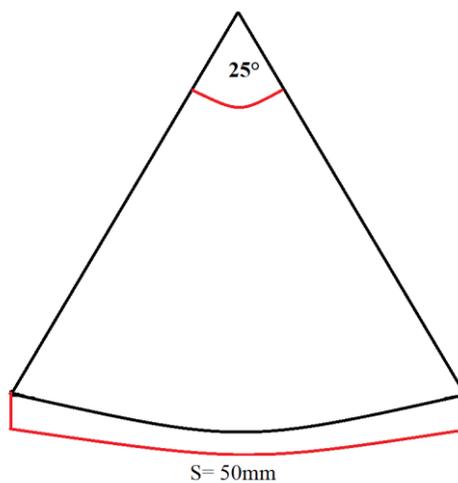


Figura 90. Representación gráfica de los valores reales

Una vez ingresada la pinza se procedió a realizar la medición correspondiente, cabe recalcar que para la medición no se tomó la lectura de la distancia en Z; los resultados obtenidos con respecto a las distancias lineales y angulares se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18
Resultados obtenidos en un ambiente controlado

	Pinza izquierda				Pinza derecha			
	Distancia [mm]	Error [mm]	Ángulo [°]	Error [°]	Distancia[mm]	Error [mm]	Ángulo [°]	Error [°]
Evento 1	52	2	26	1	51	1	27	2
Evento 2	54	4	27	2	52	2	26	1
Evento 3	50	0	24	1	48	2	23	2
Evento 4	52	2	26	1	50	0	28	3
Evento 5	54	4	28	3	48	2	24	1
Evento 6	50	0	24	1	52	2	26	1
Evento 7	52	2	26	1	52	2	28	3
Evento 8	52	2	26	1	52	2	26	1
Evento 9	52	2	27	2	50	0	27	2
Evento 10	52	2	26	1	53	3	25	0
Evento 11	50	0	25	0	52	2	27	2
Evento 12	50	0	25	0	50	0	25	0
Evento 13	50	0	25	0	50	0	24	1
Evento 14	50	0	21	4	50	0	24	1
Evento 15	52	2	26	1	48	2	24	1

Exactitud

Como primer paso se estimó el valor verdadero de la lectura, mediante la media denotada por \bar{x} , cuyo cálculo se lo realiza con la Ec. 5.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

\bar{x} = media aritmética

n = número de lectura de eventos

x_i = valor de la muestra en determinada posición

El porcentaje de exactitud de un sistema viene dado por el error determinado (Universidad de Antioquia, s.f.), es decir la diferencia que existe entre la media de la muestra y el valor aceptado.

Ec. 6.

$$\%E_{det} = \frac{\bar{x} - \mu}{\mu} \times 100 \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

$\%E_{det}$ = Porcentaje de error determinado

\bar{x} = media aritmética

μ = valor aceptado o valor real del sistema

Precisión

Para conocer el nivel de precisión del sistema se ha realizado el cálculo de la desviación estándar y la varianza, de esta manera se conoció que tan dispersos están los datos con respecto a su valor real, para el cálculo de la desviación estándar se parte de la varianza para ello se utilizó la Ec. 7.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

s = desviación estándar

\bar{x} = media aritmética

Aplicando la Ec. 5, Ec. 6 y Ec. 7a los datos de la Tabla 18, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 19, los mismos son representados con 4 decimales.

Tabla 19.
Resultados calculados

	Pinza izquierda		Pinza derecha	
	Distancia [mm]	Ángulo [°]	Distancia [mm]	Ángulo
Valor máximo	54	28	53	28
Valor mínimo	50	21	48	23
Rango	4	7	5	5
Media aritmética	51,4667	25,4667	50,5333	25,6
Desviación estándar	1,4074	1,6417	1,6417	1,5946
Media aritmética del error	1,467	1,267	1,333	1,400
Desviación estándar del error	1,407	1,642	1,642	1,595
Porcentaje de exactitud	2,9334%	1,8667%	1,0666%	2,4%

La media aritmética del error tiene un valor menor a 2, tanto para los ángulos como para las distancias por lo que se establece que el sistema va a ser exacto si el porcentaje de error es menor al 4%. Con los resultados de la Tabla 19, se puede evidenciar que promedio del porcentaje de error determinado para las distancias es de un 2%, mientras que el porcentaje de error determinado de los ángulos es de 2,13%. Los valores se encuentran dentro del rango para afirmar que el sistema de medición para los módulos de sensorización son exactos.

El promedio de la desviación estándar de las distancias es de 1,53, mientras que el promedio de la desviación estándar de los ángulos es de 1,62°. Como los promedios de desviación estándar son

bajos (menores a 2 unidades) se puede afirmar que el sistema de sensorización avanzado es preciso.

El equipo posee un error de medición $< 2mm$ y $< 2^\circ$ debido a que la distancia y ángulos son medidos en unidades enteras, esto corresponde al 4% en la distancia y al 8% en el ángulo.

5.3.2. Validación mediante el método T-Student

Para validar si los módulos de sensorización avanzada son efectivamente precisos y exactos se realizó un análisis T-Student de los datos obtenidos, se lo realiza con la Ec. 8.

$$T = \frac{\bar{x} - \mu_o}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

T = valor T-Student calculado

μ_o = valor de análisis planteado

S = desviación estándar

Para la validación de la hipótesis se utilizaron los parámetros que se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20

Condiciones de validación de hipótesis

Hipótesis Alternativas	Condición de validación
$\mu > \mu_o$	$T > t_\alpha$
$\mu < \mu_o$	$T < -t_\alpha$
$\mu \neq \mu_o$	$T < -t_{\alpha/2}$ o $T > t_{\alpha/2}$

Donde:

t_α = valor T-Student obtenido mediante tablas ANEXO B

Validación del parámetro de distancias por el método T-Student

Para la validación de la hipótesis de exactitud y precisión se tomaron los datos de las columnas 3 y 7 de la Tabla 18, con una confiabilidad del 90% se plantearon las siguientes hipótesis:

H_0 = los valores medidos por el módulo de sensorización avanzada tienen una variación igual a 2mm

H_1 = los valores medidos por el módulo de sensorización avanzada tienen una variación menor a 2mm

Con los datos obtenidos en la Tabla 19, se determinó que, para el parámetro de distancia, el promedio entre la media del error de medición de la pinza izquierda y derecha es de 1,4 mm y la desviación estándar del error corresponde a 1,525, estos valores se reemplazan en la Ec. 8 y se determina que:

$$T = -1,523$$

Tomando en cuenta que los grados de libertad correspondiente a la muestra son de 14 y la confiabilidad es del 90%, se determina que $t_\alpha = 1,3450$

Por lo tanto:

$$-1,523 < -1,3450$$

Por lo que se acepta la hipótesis alternativa y los valores medidos con los módulos de sensorización se encuentran dentro del el rango de error $< 2mm$ con un 90% de confiabilidad.

Validación del parámetro de los ángulos por el método T-Student

Para la validación de la hipótesis de exactitud y precisión con respecto a los ángulos se tomaron los datos de las columnas 5 y 9 de la Tabla 18, con una confiabilidad del 90% se plantearon las siguientes hipótesis:

H_0 = los valores medidos por el módulo de sensorización avanzada tienen una variación igual a 2° .

H_1 = los valores medidos por el módulo de sensorización avanzada tienen una variación menor a 2° .

Con los datos obtenidos en la Tabla 19, se determinó que, para el parámetro de ángulos, el promedio entre la media del error de medición de la pinza izquierda y derecha es de $1,333^\circ$ y la desviación estándar del error corresponde a $1,619^\circ$, estos valores se reemplazan en la Ec. 8 y se determina que:

$$T = -1,596$$

Tomando en cuenta que los grados de libertad correspondiente a la muestra son de 14 y la confiabilidad es del 90%, se determina que $t_\alpha = 1,3450$

Por lo tanto:

$$-1,596 < -1,3450$$

Por lo que se acepta la hipótesis alternativa y los valores medidos con los módulos de sensorización se encuentran dentro del el rango de error $< 2^\circ$ con un 90% de confiabilidad.

5.3.3. Ejercicios ejecutados

Los ejercicios ejecutados para la toma de datos se muestran en la Tabla 21

Tabla 21

Detalle de los ejercicios a ejecutar

	Descripción	Destreza desarrollada	Instrucciones
Ejercicio 1	Pasar 10 esferas de un recipiente a otro.	Adquiere habilidades en percepción de profundidad, destreza bimanual, eficiencia y autonomía	El usuario toma una esfera del recipiente 1 con una pinza e intercambia la esfera a la otra pinza para finalmente colocarla en el recipiente 2 y repetir el procedimiento 10 veces.
Ejercicio 2	Pasar un filamento a través de obstáculos con agujeros de un área mayor.	Adquiere habilidades en destreza bimanual, eficiencia, manejo de tejidos y autonomía	El usuario toma con una pinza un filamento y lo pasa a través de los obstáculos intercambiando entre pinza cada vez que pasa uno.
Ejercicio 3	Tomar un cordón y realizar un nudo doble.	Adquiere habilidades en destreza bimanual, eficiencia, manejo de tejidos y autonomía	Se ingresa un cordón por un agujero, el usuario lo toma con una pinza y juntamente con el uso de ambas pinzas realiza un nudo en una T.

Los juegos utilizados para realizar los ejercicios mencionados en la Tabla 21 son los que se muestran en la Figura 91.



Figura 91. Juegos utilizados para ejecutar los ejercicios

5.3.4. Análisis de la curva de aprendizaje

El análisis de la curva de aprendizaje se realizó con una comparativa entre el número de repeticiones de cada estudiante vs el tiempo de ejecución del ejercicio. Tomados los datos de los 5 estudiantes se procedió a sacar un promedio de tiempo para los tres ejercicios ejecutados y que estos puedan ser expresados mediante curvas.

Resultados y análisis del ejercicio 1

En la Figura 92 se muestra los resultados del ejercicio 1, la línea en azul representa el entrenador tradicional y en esta se observa el tiempo promedio que le toma a los estudiantes ejecutar determinada práctica; la curva del entrenador avanzado es representada con el color naranja.

En la Figura 92 se puede notar que el uso del entrenador avanzado disminuye el tiempo de ejecución del segundo intento con respecto al primer intento, en un tiempo de 33,4 segundos; el uso del entrenador tradicional tuvo una reducción en el tiempo de 16,2 segundos, algo muy diferente indica la comparativa entre el tercer intento y el segundo intento, en el entrenador

avanzado los estudiantes reducen su tiempo de entrenamiento en 11,2 segundos, mientras que en el entrenador tradicional reducen su tiempo en 17,8 segundos.

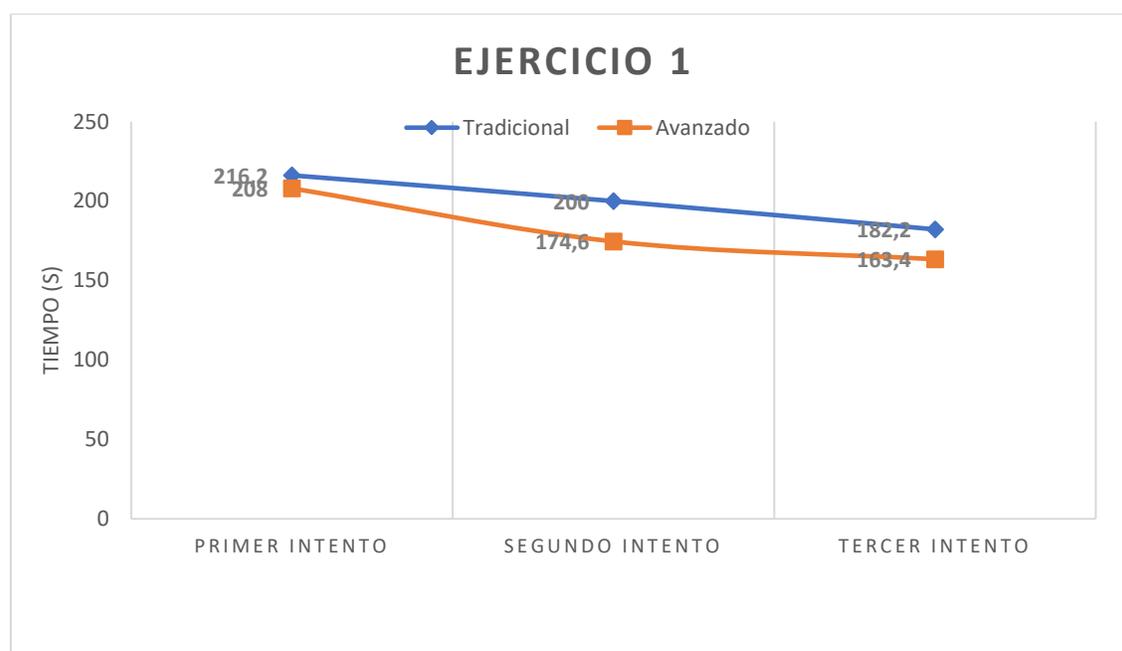


Figura 92. Curva de aprendizaje (Tradicional - Avanzado) Ejercicio 1

En una manera global el uso del entrenador avanzado redujo en 45 segundos la ejecución del entrenamiento, mientras que en el entrenador tradicional se redujeron 34 segundos. Cabe recalcar que la curva que se genera con el entrenador avanzado es exponencial, mientras que la que genera el avanzado es una lineal inclinada con pendiente negativa, debido al gran avance que presenta el estudiante al utilizar un entrenador laparoscópico con sensorización avanzada.

Resultados y análisis del ejercicio 2

La ejecución del ejercicio 2 muestra resultados muy similares al ejercicio 1, estos se representan en la Figura 93, en ella se aprecia claramente que la curva de aprendizaje del entrenador avanzado

es exponencial, mientras que el entrenador tradicional continúa con el comportamiento de línea inclinada con pendiente negativa.

El tiempo que se redujo en el entrenador tradicional al ejecutar el segundo ejercicio fue de 18 segundos, mientras que el tiempo reducido al ejecutar el entrenamiento en el entrenador avanzado fue de 68 segundos.

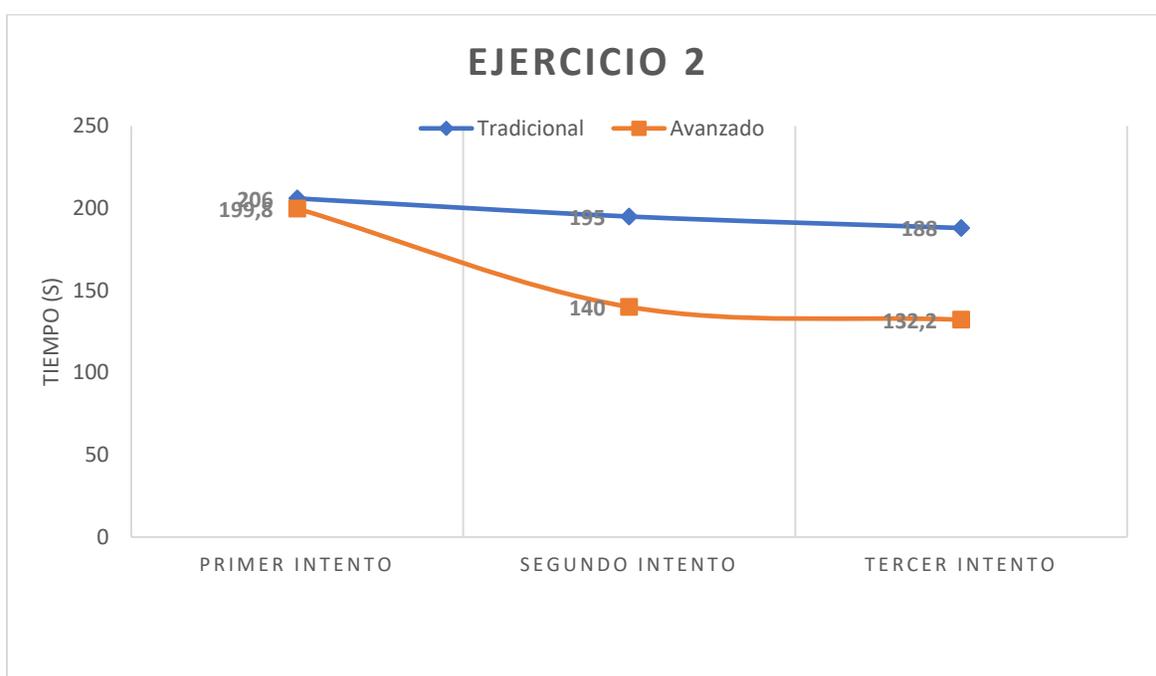


Figura 93. Curva de aprendizaje (Tradicional - Avanzado) Ejercicio 2

Resultados y análisis del ejercicio 3

La ejecución del ejercicio 3 muestra resultados muy similares al ejercicio 1, estos se representan en la Figura 94, en ella se aprecia claramente que la curva de aprendizaje del entrenador avanzado es exponencial, mientras que el entrenador tradicional continúa con el comportamiento de línea inclinada con pendiente negativa.

El tiempo que se redujo en el entrenador tradicional al ejecutar el tercer ejercicio fue de 24 segundos, mientras que el tiempo reducido al ejecutar el entrenamiento en el entrenador avanzado fue de 60 segundos.

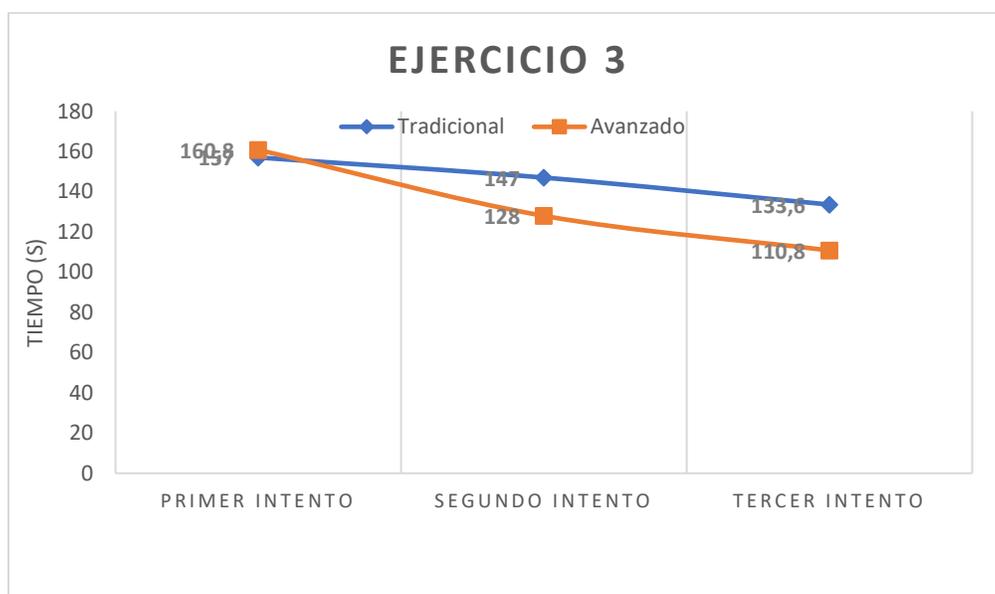


Figura 94. Curva de aprendizaje (Tradicional - Avanzado) Ejercicio 3

5.3.5. Resultados y análisis de la destreza bimanual

La escala GOALS posee un parámetro de calificación con respecto a la destreza bimanual y eficiencia, para determinar esto se comparó las distancias obtenidas con el simulador de la pinza izquierda y la pinza derecha y de esta manera determinar la mano dominante y cómo fue su avance conforme utiliza el estudiante el entrenador.

Resultados y análisis del ejercicio 1

En la Figura 95 se muestra la destreza que posee el estudiante en cada mano al ejecutar el primer intento, se puede apreciar que cada estudiante posee más destreza en su mano dominante.

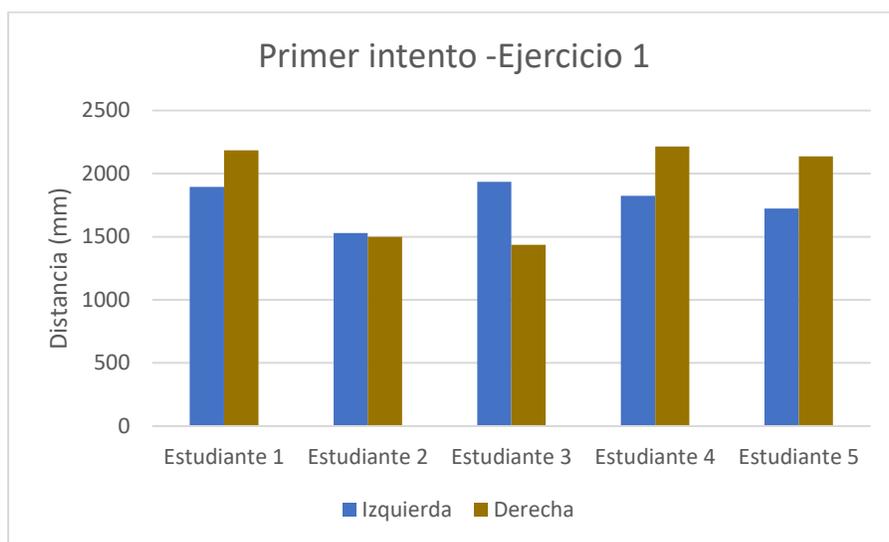


Figura 95. Comparativa mano dominante del ejercicio 1 (Primera vez)

En la tercera repetición los estudiantes lograron una mejor destreza bimanual siendo los resultados los presentados en la Figura 96. Éstos lograron alcanzar un dominio similar en sus dos manos al ejecutar el entrenamiento.

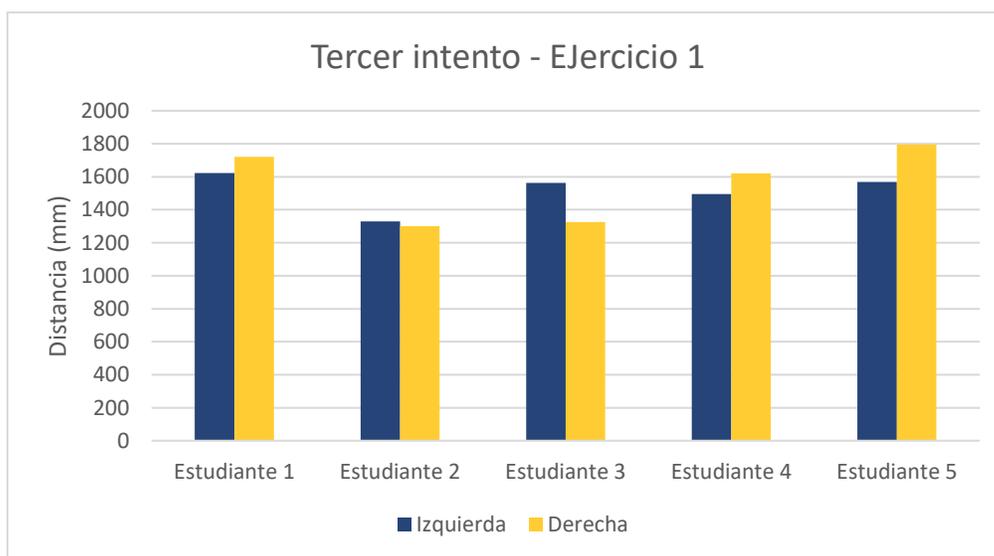


Figura 96. Comparativa mano dominante del ejercicio 2 (Tercer evento)

Resultados y análisis del ejercicio 2

En la Figura 97 se muestra la destreza que posee el estudiante en cada mano al ejecutar el primer intento, se puede apreciar que cada estudiante posee más destreza en su mano dominante.

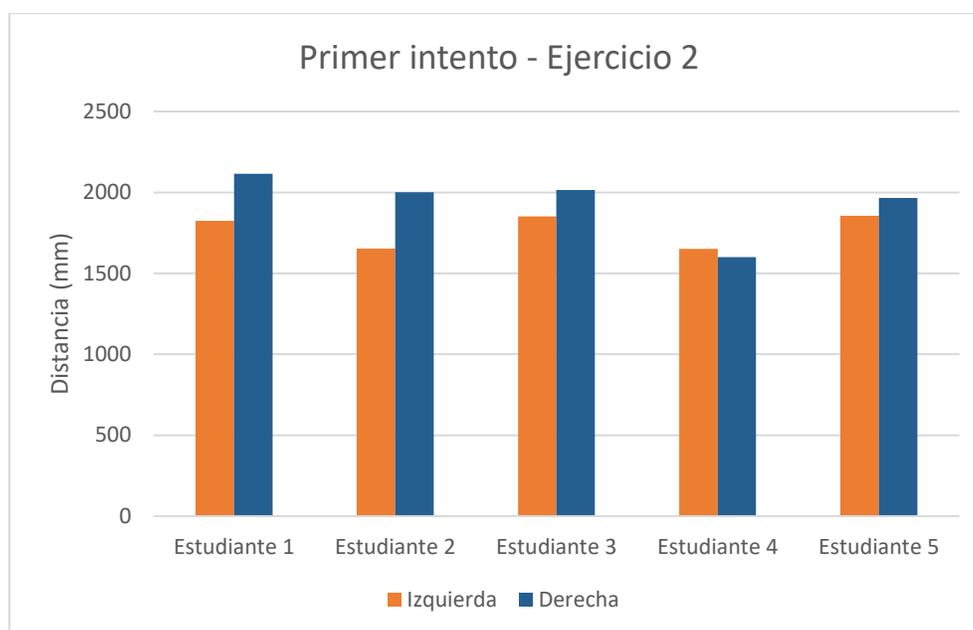


Figura 97. Comparativa mano dominante del ejercicio 1 (Primera vez)

En la tercera repetición los estudiantes lograron una mejor destreza bimanual siendo los resultados los presentados en la Figura 98. Éstos lograron alcanzar un dominio similar en sus dos manos al ejecutar el entrenamiento.

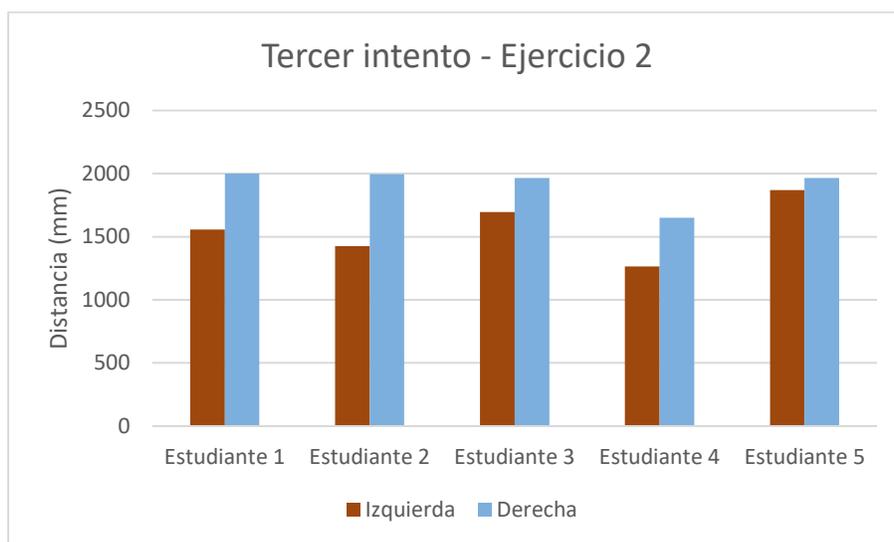


Figura 98. Comparativa mano dominante del ejercicio 2 (Tercer evento)

Resultados y análisis del ejercicio 3

En la Figura 99 se muestra la destreza que posee el estudiante en cada mano al ejecutar el primer intento, se puede apreciar que cada estudiante posee más destreza en su mano dominante.

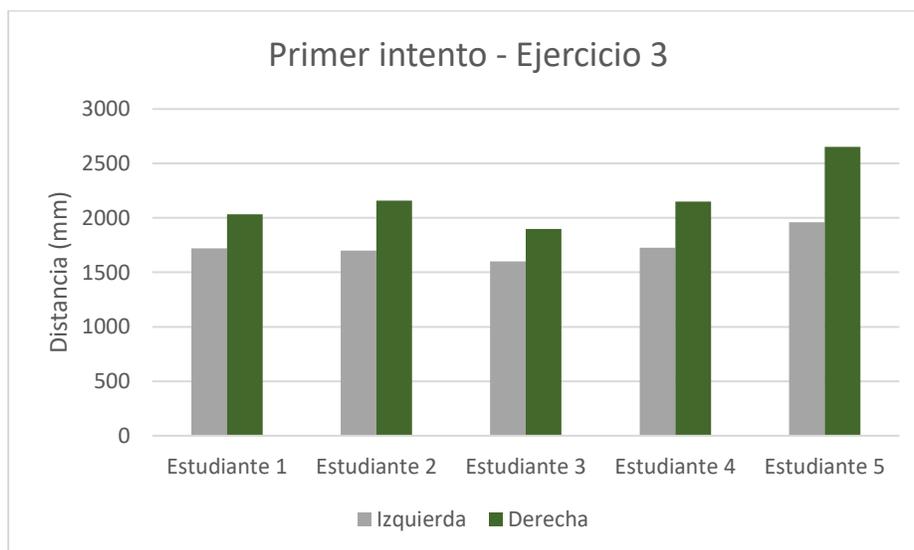


Figura 99. Comparativa mano dominante del ejercicio 3 (Primera vez)

En la tercera repetición los estudiantes lograron una mejor destreza bimanual siendo los resultados los presentados en la Figura 100. Éstos lograron alcanzar un dominio similar en sus dos manos al ejecutar el entrenamiento.

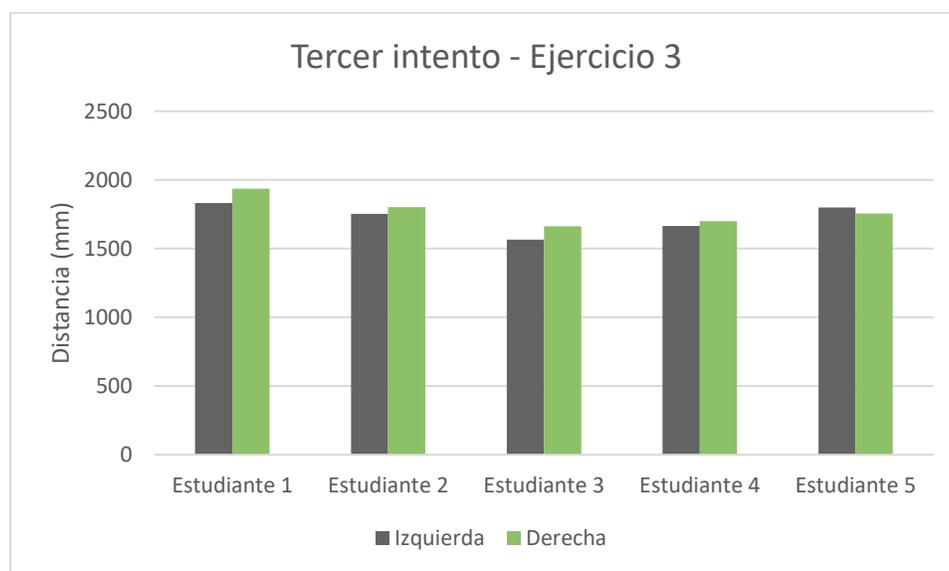


Figura 100. Comparativa mano dominante del ejercicio tres (Tercera vez)

Distancia promedio recorrida

La Figura 101 muestra la distancia promedio recorrida por cada estudiante al ejecutar el ejercicio 1, este parámetro es utilizado para que con la ayuda del experto se pueda calificar la eficiencia de cada uno según lo especificado en la escala GOALS, se puede apreciar que cada estudiante recorre una distancia diferente por encima de la línea entrecortada que representa la distancia recorrida por el instructor al ejecutar la práctica, el objetivo del estudiante es llegar a igualar la distancia de este.

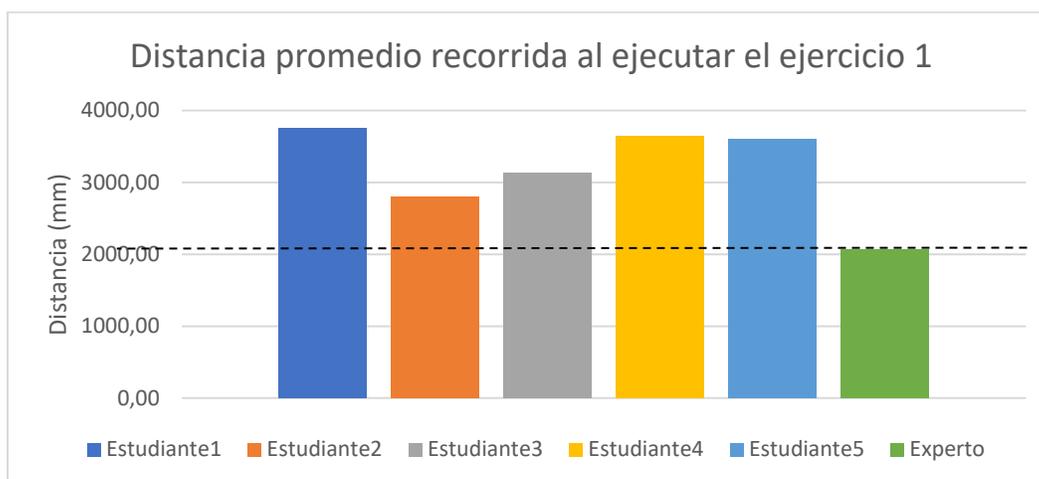


Figura 101. Distancia promedio recorrida por cada estudiante en el ejercicio 1

La Figura 102 muestra la distancia promedio recorrida por cada estudiante al ejecutar el ejercicio 1, este parámetro es utilizado para que con la ayuda del experto se pueda calificar la eficiencia de cada uno según lo especificado en la escala GOALS, se puede apreciar que cada estudiante recorre una distancia diferente por encima de la línea entrecortada que representa la distancia recorrida por el instructor al ejecutar la práctica, el objetivo del estudiante es llegar a igualar la distancia de este.

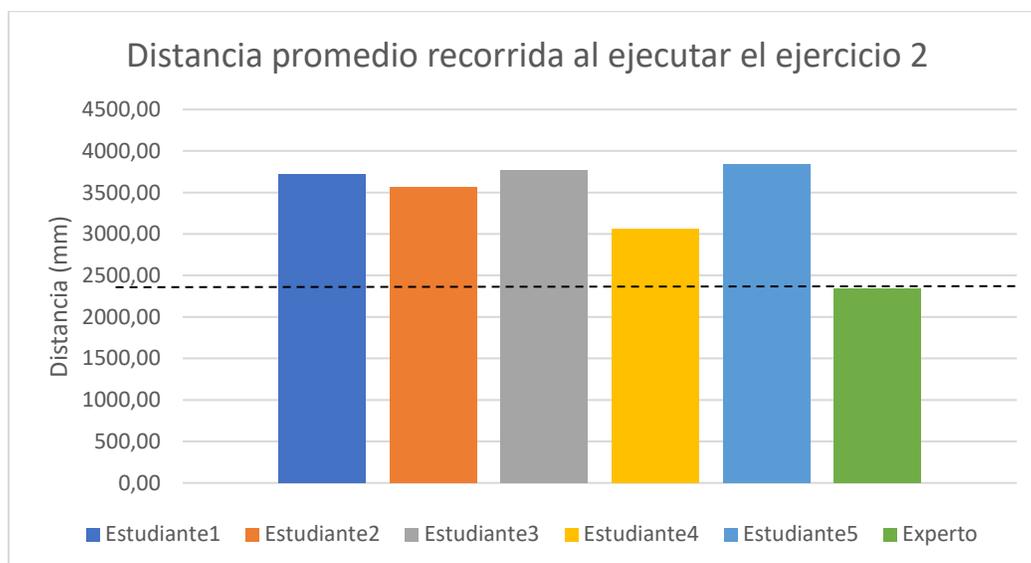


Figura 102. Distancia promedio recorrida por cada estudiante en el ejercicio 2

La Figura 103 muestra la distancia promedio recorrida por cada estudiante al ejecutar el ejercicio 1, este parámetro es utilizado para que con la ayuda del experto se pueda calificar la eficiencia de cada uno según lo especificado en la escala GOALS, se puede apreciar que cada estudiante recorre una distancia diferente por encima de la línea entrecortada que representa la distancia recorrida por el instructor al ejecutar la práctica, el objetivo del estudiante es llegar a igualar la distancia de este.

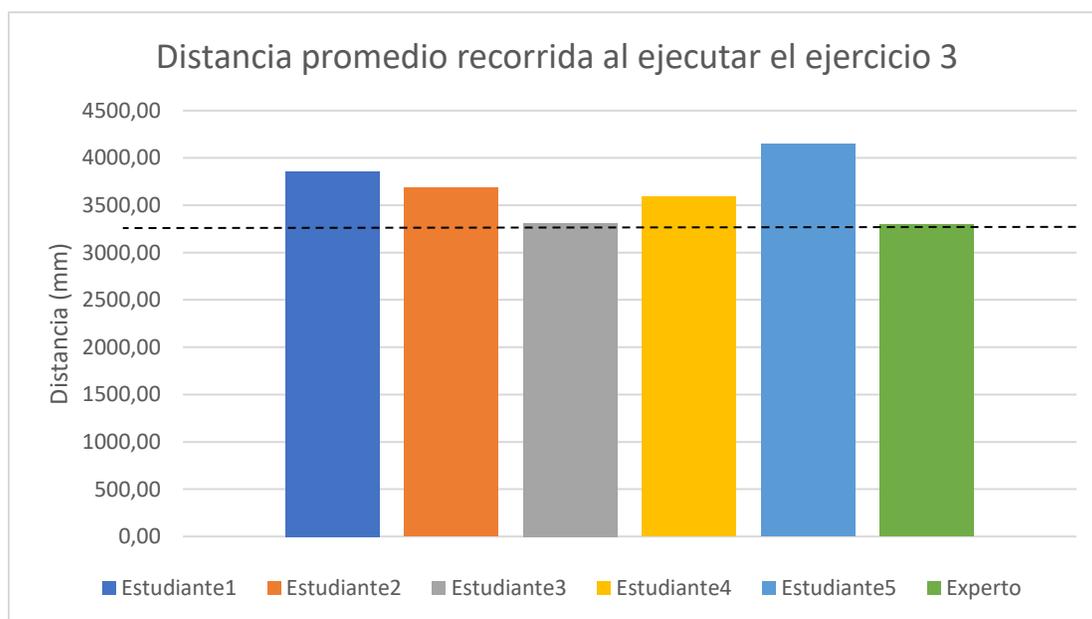


Figura 103. Distancia promedio recorrida por cada estudiante en el ejercicio 3

5.3.6. Análisis del desempeño según la escala GOALS

Como se muestra en la Figura 88, la escala GOALS califica el desempeño del usuario en 3 niveles. Para un buen desempeño se le asigna un valor de 1, desempeño medio 3 y 5 para un buen desempeño.

Con los resultados obtenidos en la sección 5.3.5. se procedió con la ayuda del experto a darle una calificación a cada estudiante conforme su destreza durante los ejercicios. Los resultados obtenidos fueron divididos en 3 tablas que corresponden a cada destreza según detalla la tabla

GOALS. Cada tabla posee la calificación asignada durante la ejecución de las fases 1 y 3, que corresponden al uso del simulador tradicional y el simulador diseñado, respectivamente.

La Tabla 22 muestra los resultados obtenidos con respecto a la habilidad de la percepción de la profundidad.

Tabla 22.

Desempeño con respecto a la percepción de profundidad

	Fase 1			Fase 3		
	1	3	5	1	3	5
Percepción de Profundidad						
Ejercicio 1	4	1	0	2	2	1
Ejercicio 2	0	5	0	0	5	0
Ejercicio 3	2	3	0	1	3	1

La Tabla 23 muestra los resultados obtenidos con respecto a la habilidad de destreza bimanual.

Tabla 23

Desempeño con respecto a la destreza bimanual

	Fase 1			Fase 3		
	1	3	5	1	3	5
Destreza bimanual						
Ejercicio 1	4	1	0	0	2	3
Ejercicio 2	5	0	0	1	2	2
Ejercicio 3	2	3	0	0	3	2

La Tabla 24 muestra los resultados obtenidos con respecto a la eficiencia.

Tabla 24

Desempeño con respecto a la eficiencia

	Fase 1			Fase 3		
	1	3	5	1	3	5
Eficiencia						
Ejercicio 1	1	4	0	0	2	3
Ejercicio 2	2	3	0	0	3	2
Ejercicio 3	1	4	0	0	3	2

Los resultados mostrados en la Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24, muestran el avance en la curva de aprendizaje acorde al experto y los resultados obtenidos con el entrenador laparoscópico con sensorización avanzada presentados en la sección 5.3.4. y 5.3.5 contrastan la opinión del experto, siendo este de gran utilidad para asignar las calificaciones. Al comparar las tablas se puede observar como en la fase 3 más estudiantes poseen una calificación de 5 puntos a comparación de la fase 1.

5.4.Satisfacción del sistema

5.4.1. Satisfacción del sistema a nivel experto

El proyecto está enfocado al área de medicina, específicamente en el entrenamiento laparoscópico, el doctor Fernando Torres (experto), es la persona que durante el desarrollo del sistema de sensorización avanzada aplicado a un entrenador laparoscópico, brindó sugerencias y retroalimentaciones en base a su experiencia, de la misma manera fue quien al final realizó la valoración del equipo a nivel experto, que consta en validar el correcto funcionamiento del equipo y que satisfaga las necesidades planteadas antes del diseño del mismo.

La valoración dada por el experto fue que es un equipo práctico que le ayudará a conocer y evaluar aspectos que no se podían encontrar anteriormente en entrenadores tradicionales. Esto ayudará a mejorar notoriamente las habilidades de los practicantes antes de pasar a niveles más complejos como entrenadores apticos y cirugía real.

5.4.2. Satisfacción a nivel usuario

Con el objetivo de conocer el grado de satisfacción a nivel usuario se aplicó una encuesta a los 5 estudiantes que realizaron los ejercicios en el entrenador laparoscópico con sensorización avanzada.

La encuesta consta de 10 preguntas en donde 8 de ellas son de selección y obligatorias, una corresponde a una pregunta con condición y una pregunta abierta para que los 5 estudiantes nos brindaran sus sugerencias acerca del equipo, en el ANEXO C se presenta la encuesta realizada a los estudiantes.

La pregunta 1 correspondía a “¿Tiene usted experiencia con el uso de entrenadores laparoscópicos tradicionales?”, los resultados fueron que 3 estudiantes poseían una experiencia previa y 2 no poseían ninguna experiencia.

La pregunta 2 correspondía a “Si la pregunta 1 fue afirmativa indique su nivel de destreza. (Alto, medio o Bajo)”, 3 estudiantes fueron los que respondieron afirmativamente la pregunta 1 y de ellos 1 estudiante afirma que posee un nivel de destreza medio y 2 afirman que poseen un nivel de destreza bajo.

La pregunta 3 correspondía a “¿Ha usado usted un entrenador laparoscópico con sensorización avanzada?”, en esta pregunta 2 estudiantes respondieron afirmativamente y 3 estudiantes negativamente.

La pregunta 4 correspondía a “¿Cuál fue su nivel de satisfacción con respecto a la calidad de video?”, en esta pregunta todos los estudiantes afirmaron que su nivel de satisfacción fue alto.

La pregunta 5 correspondía a “¿Pudo notar algún retraso en la transmisión de video?”, en esta pregunta todos los estudiantes respondieron que no notaron ningún retraso en la transmisión de video.

La pregunta 6 correspondía a “¿Cree usted que el uso de la página web es intuitivo?”, en esta pregunta todos los estudiantes respondieron afirmativamente.

La pregunta 7 correspondía a “¿Cómo califica usted la movilidad de las pinzas dentro de los módulos de sensorización avanzada?”, en esta pregunta 1 estudiante respondió que la movilidad de las pinzas es media mientras que 4 estudiantes respondieron que la movilidad de las pinzas es alta.

La pregunta 8 correspondía a “Seleccione si tuvo un problema al momento de utilizar el entrenador.”, en esta pregunta un estudiante seleccionó que tuvo un problema en la movilidad de la pinza, un estudiante que tuvo un problema al usar la pantalla táctil y 3 respondieron que no tuvieron ningún problema.

La pregunta 9 correspondía a “¿Cuál fue su nivel de satisfacción con respecto al uso del entrenador?”, en esta pregunta todos los estudiantes respondieron que su nivel de satisfacción fue alto.

La pregunta 10 correspondía a brindar una recomendación sobre el equipo, la gran parte de las recomendaciones fueron en torno a sugerencias a incorporar nuevos elementos dentro del entrenador, entre ellas están:

- Incorporar luz en las pinzas para que se pueda percibir la profundidad.
- Mejorar la maniobrabilidad de las pinzas
- Una pantalla táctil más grande

5.5. Validación de la hipótesis mediante el método T-Student

Con la ayuda del experto se determinó que si el estudiante reduce su tiempo de entrenamiento este mejorará sus habilidades motrices. Por lo que se realizó la validación de la hipótesis utilizando el método T-Student para los parámetros de tiempo, las condiciones de validación de la hipótesis se muestran en la Tabla 20.

Para validar la hipótesis mediante el método T-Student para muestras pareadas (Dietirchson, 2019), se utiliza la Ec. 9.

$$T = \frac{\overline{X}_D}{\frac{S_D}{\sqrt{n}}} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

T = valor T-Student calculado

\overline{X}_D = media de la diferencia de las muestras

S_D = desviación estándar de la diferencia de las muestras

n = número de muestras

Validación del tiempo de ejecución en el ejercicio 1

Para ejecutar el análisis T-Student se toman como muestras los tiempos de ejecución del segundo intento del entrenador tradicional y avanzado; se consideró un nivel de confiabilidad de 95%, se plantean las siguientes hipótesis:

H_0 = el tiempo de ejecución del ejercicio 1 en el entrenador tradicional es igual al tiempo de ejecución del ejercicio 1 en el entrenador avanzado.

H_1 = el tiempo de ejecución del ejercicio 1 en el entrenador tradicional es mayor al tiempo de ejecución del ejercicio 1 en el entrenador avanzado.

En base a la Ec. 5 se obtiene la media aritmética de la diferencia de cada una de las muestras y esta corresponde a 25,4 y en base a la Ec. 7 se determina la desviación estándar de la diferencia de las muestras que corresponde a 42,627. Reemplazando estos datos en la Ec. 9 se determina:

$$T = 1,93$$

El número de grados de libertad es de 8, el valor T obtenido es $t_{\alpha} = 1,8595$, por lo tanto:

$$1,93 > 1,8595$$

El tiempo que le toma a un estudiante ejecutar el ejercicio 1 en el entrenador tradicional es mayor con respecto al tiempo que le toma ejecutar al mismo estudiante el mismo ejercicio en el entrenador avanzado.

Validación del tiempo de ejecución en el ejercicio 2

Para ejecutar el análisis T-Student se toman como muestras los tiempos de ejecución del segundo intento del entrenador tradicional y avanzado; se consideró un nivel de confiabilidad de 95%, se plantean las siguientes hipótesis:

H_0 = el tiempo de ejecución del ejercicio 2 en el entrenador tradicional es igual al tiempo de ejecución del ejercicio 2 en el entrenador avanzado.

H_1 = el tiempo de ejecución del ejercicio 2 en el entrenador tradicional es mayor al tiempo de ejecución del ejercicio 2 en el entrenador avanzado.

En base a la Ec. 5 se obtiene la media aritmética de la diferencia de cada una de las muestras y esta corresponde a 55 y en base a la Ec. 7 se determina la desviación estándar de la diferencia de las muestras que corresponde a 25,981. Reemplazando estos datos en la Ec. 9 se determina:

$$T = 4,733$$

El número de grados de libertad es de 8, el valor T obtenido es $t_{\alpha} = 1,8595$, por lo tanto:

$$4,733 > 1,8595$$

El tiempo que le toma a un estudiante ejecutar el ejercicio 2 en el entrenador tradicional es mayor con respecto al tiempo que le toma ejecutar al mismo estudiante el mismo ejercicio en el entrenador avanzado.

Validación del tiempo de ejecución en el ejercicio 3

Para ejecutar el análisis T-Student se toman como muestras los tiempos de ejecución del segundo intento del entrenador tradicional y avanzado; se consideró un nivel de confiabilidad de 95%, se plantean las siguientes hipótesis:

H_0 = el tiempo de ejecución del ejercicio 3 en el entrenador tradicional es igual al tiempo de ejecución del ejercicio 3 en el entrenador avanzado.

H_1 = el tiempo de ejecución del ejercicio 3 en el entrenador tradicional es mayor al tiempo de ejecución del ejercicio 3 en el entrenador avanzado.

En base a la Ec. 5 se obtiene la media aritmética de la diferencia de cada una de las muestras y esta corresponde a 19 y en base a la Ec. 7 se determina la desviación estándar de la diferencia de las muestras que corresponde a 15,1658. Reemplazando estos datos en la Ec. 9 se determina:

$$T = 2,8014$$

El número de grados de libertad es de 8, el valor T obtenido es $t_{\alpha} = 1,8595$, por lo tanto:

$$2,8014 > 1,8595$$

El tiempo que le toma a un estudiante ejecutar el ejercicio 3 en el entrenador tradicional es mayor con respecto al tiempo que le toma ejecutar al mismo estudiante el mismo ejercicio en el entrenador avanzado.

5.6. Validación de la hipótesis

En base a los resultados en base a la curva de aprendizaje obtenidos en la sección 5.3.4, la calificación asignada por el experto en la sección 5.3.6 y la validación de la prueba T-Student en la sección 5.4, se procede a validar la hipótesis planteada en el proyecto, siendo que afirmativamente el entrenador laparoscópico con sensorización avanzada ayuda a mejorar las habilidades motrices del estudiante de cirugía. Debido a que la curva de aprendizaje al utilizar el entrenador laparoscópico con sensorización avanzada presenta una rapidez de aprendizaje mayor con respecto a la curva de aprendizaje tradicional, además de acuerdo con el criterio del experto las habilidades motrices de los estudiantes mejoraron notoriamente al utilizar el entrenador avanzado.

5.6. Análisis económico del proyecto

En la Tabla 25 se presenta a detalle los gastos realizados durante la ejecución del proyecto.

Tabla 25
Análisis económico de los materiales utilizados

Detalle	Cantidad	Precio Unitario [\$]	Precio Total [\$]
Material de ensamble general			
Canaleta	2	2.50	5.00
Termoflexible kit de varios tamaños	1	5.00	5.00
Plancha de acrílico 1200x600x4 mm	2	40.00	80.00
Plancha MDF 60 x 30 cm	1	5.00	5.00

Servicio de corte láser x minuto	60	0.35	21.00
Eje de fibra de carbono	1	5.00	5.00
Kit de mezcla caucho silicona	1	25.00	25.00
Extrusor para fibra de carbono	1	14.00	14.00
Filamento para impresión 3D	4	30.00	120.00
SUBTOTAL			280.00
Material eléctrico y electrónico			
Conector 2 pines	2	0.25	0.50
Conector 6 pines	2	0.50	1.00
Conectores RJ45 cat6	4	0.55	2.20
Conector interruptor con fusible	1	5.00	5.00
Conector HDMI	1	3.50	3.50
Cable flexible 12 AWG x 1 m	2	0.50	1.00
Cable flexible 22 AWG X 1 m	2	0.50	1.00
Cable UTP cat6 x 1m	4	0.80	3.20
Cable UTP conector RJ45 cat6	2	1.50	3.00
Cable HDMI x 1 m	1	2.00	2.00
Cable HDMI x 3 m	1	5.00	5.00
Cable extensor USB x 1 m	1	5.50	5.50
Cable serial USB	3	2.20	6.60
Cable de alimentación 110V	1	3.50	3.50
Cable JST 8 pines	10	2.00	20.00
Cable flex para Raspberry	1	6.00	6.00
Fuente conmutada 12v 20ª	1	25.00	25.00
Conversor DC/DC 5V 10ª	2	10.00	20.00
Led 12V	8	1.00	8.00
Led Emisor	2	3.50	7.00
Led Receptor	2	3.50	7.00
Teensy 3.2	1	40.00	40.00
Raspberry 3 B+	2	90.00	180.00
Pantalla táctil con puerto HDMI	1	35.00	35.00
Módulo de comunicación serial	1	15.00	15.00
Encoder Broadcom AS22	6	40.00	240.00
Cámara Arducam para Raspberry	1	55.00	55.00
SUBTOTAL			701.00

CONTINÚA 

Material mecánico			
Tornillos M5 x 10 mm	4	0.15	0.60
Tornillos M4 x 10 mm	22	0.15	3.30
Tornillos M3 x 8 mm	40	0.10	4.00
Tornillos M2 x 10 mm	28	0.10	2.80
Tuercas M5	4	0.15	0.60
Tuercas M4	14	0.15	2.10
Tuercas M3	40	0.10	4.00
Tuercas M2	4	0.10	0.40
Rotula GE20ES SKF	1	22.00	22.00
Rodamiento 606RS 17x6x6 mm	12	2.00	24.00
SUBTOTAL			63.80
Desarrollo WEB			
Dominio WEB x 1 año	1	12.00	12.00
Plataforma WEB X 1 mes	12	12.00	144.00
SUBTOTAL			156.00
TOTAL			1200.80

El valor total de la ejecución del proyecto es de 1200,80 dólares americanos, siendo económico a comparación de otros entrenadores que existen en el mercado que rondan por un precio de 2000 dólares americanos sin considerar los costos de envío y no poseen un sistema de sensorización avanzada, por lo tanto, se cumple el requerimiento del cliente de que el equipo sea de bajo costo.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Para el diseño del entrenador laparoscópico con sensorización avanzada se partió desde la investigación de los procedimientos y parámetros involucrados en la cirugía laparoscópica para tener el conocimiento sobre aspectos cómo: área de trabajo, ejercicios a ejecutar y movimiento de pinzas. Se determinó que el área de trabajo es el equivalente a un dorso humano y esta puede variar dependiendo de las aplicaciones, los ejercicios más comunes a ejecutar son: corte, sutura e incisiones y los movimientos de las pinzas son aleatorios dentro del cuerpo. Además, se encontró que la escala GOALS es la que se encarga de determinar el nivel de aprendizaje de un practicante de laparoscopia y esta permite asignar una puntuación acorde a su nivel de habilidad.
- Al momento de diseñar sistema para el módulo de sensorización avanzada se consideró el movimiento de la pinza laparoscópica en tres ejes X, Y y Z. Para cumplir con las condiciones de movimiento en el eje X y Y se decidió implementar el mecanismo de un joystick, sobre este se realizó una modificación que permite obtener la lectura del movimiento en el eje Z. La estructura del mecanismo presenta un ángulo de inclinación de 6 grados que permiten un área de trabajo de 20cm x 20cm, el módulo acepta todo tipo de pinzas laparoscópicas comerciales y adquiere los datos de distancia y ángulos recorridos que son mostrados al finalizar la práctica.
- Para realizar un determinado entrenamiento en un simulador tradicional se necesita de dos practicantes, uno que sujete la cámara que simula el endoscopio y otro que realice la

práctica, esto resulta incómodo para el practicante; para evitar esta molestia se realizó la construcción de un mecanismo de fijación de la cámara laparoscópica, se utilizó como componente principal una rótula esférica que proporciona movimientos en tres ejes, esta característica es la que le permite al practicante ubicar la cámara en cualquier posición que desee ya que esta posee un sistema de fijación propio de la rótula. Adicionalmente el mecanismo posee elementos de fijación para el sistema a la estructura, un mango ergonómico y un eje de fibra de carbono en donde está ubicada la cámara.

- La página web del entrenador laparoscópico con sensorización avanzada se encuentra alojada en un servidor de pago adquirido por los autores, fue creada mediante el gestor de contenidos llamado WordPress para la parte de *Frontend* y se implementaron *plugins* para controlar la parte del *Backend* en base al lenguaje de programación PHP, además el *plugin* se encarga de conectar la página con la base de datos creada en MySQL, que se encarga de guardar la información de los usuarios y su avance en el entrenamiento, mediante el lenguaje SQL. La página web es intuitiva y adaptativa a todo tipo de dispositivo móvil o de escritorio.
- La representación de los datos obtenidos por el sistema de sensorización avanzada se la realizó en la página web y no directamente en el video debido a que los datos obstruyen la visibilidad del mismo y distraen al practicante con información que no es relevante al momento de realizar el procedimiento si no al final del mismo, los pasos que realiza el entrenador laparoscópico con sensorización avanzada son: adquirir los datos del controlador una vez finalizada la práctica luego subir estos datos a la base de datos

directamente desde el entrenador, simultáneamente se actualiza la información de la página web con los datos adquiridos por el equipo y son mostrados al usuario.

- El uso del protocolo FTP para la subida de video al servidor es útil en términos de velocidad pero tiene un problema en términos de seguridad, esta característica no fue relevante al momento de realizar el proyecto debido a que no se están manipulando videos de carácter confidencial, a pesar de que la velocidad de subida del video es alta esta va a depender enteramente del ancho de banda que ofrece el servidor y la velocidad de conexión a internet, la velocidad de subida es de 1 minuto para videos de 800mb con una velocidad de internet de 40mbps cabe recalcar que el ancho de banda proporcionado por el servidor en este caso es ilimitado.
- Con el diseño del sistema de sensorización, mecanismo de sujeción del laparoscopio y la página web se procedió a la construcción del sistema de sensorización avanzada mediante la integración de todos los componentes detallados anteriormente, para esto se diseñó una estructura de 45x40x20 centímetros el mismo que posee cuatro aberturas para acoplar los módulos de sensorización, dentro de la parte frontal de la estructura se encuentra toda la parte electrónica y en el espacio de trabajo se colocaron los sensores de presencia y el área que estará destinada para los juegos de entrenamiento laparoscópico que corresponde a un área de 144cm²
- Para ejecutar el levantamiento de información sobre el funcionamiento del entrenador laparoscópico se utilizaron 3 juegos que corresponden a: pasar bolitas de un recipiente a otro, realizar un nudo doble y atravesar una fibra a través de diferentes obstáculos con un diámetro mayor, todos estos ejercicios califican una habilidad distinta de la escala GOALS.

- Se elaboró un plan de recolección de datos para el registro de la información obtenida con los módulos de sensorización avanzada y de esta manera se determinó el nivel de precisión y exactitud del sistema después de realizar una medición en 15 eventos diferentes, en una distancia y ángulos conocidos de 50 *mm* y 25° respectivamente. Mediante el cálculo del porcentaje de error determinado se encontró que el sistema es exacto si el error de medición es menor a 4%; además es preciso si el valor de dispersión de los datos es menor a 2 unidades que corresponde a las distancias y ángulos en un 4% y 8% respectivamente, con el método T-Student se determinó que el sistema es tanto exacto como preciso ya que el error en los datos obtenidos es $< 2mm$ en el caso de las distancias y $< 2^\circ$ en el caso de los ángulos.
- Se compararon los tiempos obtenidos en el entrenador laparoscópico tradicional y en el entrenador laparoscópico avanzado, siendo el tiempo del segundo menor al ejecutar una misma práctica, esto debido a que los estudiantes poseen una medida de referencia con respecto a la distancia recorrida por cada pinza, lo que les permitió lograr una destreza bimanual optima, siendo esta la razón del avance notorio al ejecutar un segundo intento en el entrenador laparoscópico con sensorización avanzada.
- Con el método T-Student y los resultados asignados por el experto con respecto a la escala GOALS, se determinó que el entrenador laparoscópico con sensorización avanzada ayuda a mejorar las habilidades motrices de los estudiantes de cirugía en los parámetros de: destreza bimanual, percepción de la profundidad y eficiencia.

6.2.Recomendaciones

- Concluida con la construcción del prototipo se encontró que para tener una mejor interacción entre el usuario y el entrenador al momento de ingresar los datos de configuraciones iniciales, se debería reemplazar la pantalla táctil por una más grande y para evitar el uso del lápiz, dicha pantalla debe ser de tipo capacitiva.
- Para evitar el uso de dos Raspberry PI 3 B+, se debe reemplazar estas por una Raspberry PI 4, debido a que esta posee dos módulos de salida HDMI los mismos que pueden trabajar de manera independiente, además posee un procesador de mayor tecnología y una tarjeta gráfica lo que permite la transmisión de video a una resolución de 2K.
- Para que el instructor pueda realizar la retroalimentación de las prácticas de una manera más sencilla se debe realizar un aplicativo móvil que posea las mismas características que fueron desarrolladas en la página web.
- Para que el sistema de la cámara simule un endoscopio real debe ser movilizadada por los diferentes puertos que posee el entrenador, para cumplir esto es necesario una cámara inalámbrica con conexión wifi para la transmisión de video
- Para que la subida de video desde el entrenador a la página web una vez culminada la práctica sea rápida, es necesario utilizar una conexión a internet con una velocidad de subida de datos superior a los 50 Mbps/s; adicionalmente esto le permitirá al usuario tener una mejor experiencia al momento de utilizar la página web
- Para que los módulos de sensorización avanzada tengan la capacidad de medir la distancia desplazada de la pinza al ingresar objetos, es necesario implementar un sistema de medición que le permita tener un diámetro mayor en la guía de entrada del eje Z.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- acrilico-y-policarbonato.com. (2017). *Propiedades del acrílico*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2019, de <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html>
- Aguilar, D. (2019). *Ledilux.com*. Recuperado el 12 de Julio de 2019, de <https://www.ledilux.com/que-es-led.html>
- Alba Smart. (9 de Marzo de 2018). *La Sensorización, la aparición de un nuevo protagonista en la ciudad*. Recuperado el 1 de Enero de 2020, de <http://albasmart.es/2018/03/la-sensorizacion-la-aparicion-nuevo-protagonista-la-ciudad/>
- altronics.cl. (2017). *Raspberry Pi LCD 3,5inch*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de <https://altronics.cl/pantalla-raspberrypi-35inch-tft>
- Arducam. (2019). *Arducam*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de <https://www.arducam.com/docs/cameras-for-raspberry-pi/>
- arduino.cl. (2019). *Arduino Due*. Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <https://arduino.cl/producto/arduino-due/>
- ASCERS. (12 de Enero de 2019). *Cirugía Laparoscópica*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <https://www.fascers.org/cirugia-laparoscopica>
- Begoña, O. (1 de Noviembre de 2019). *¿Qué es una página web?* Recuperado el 1 de Enero de 2020, de <https://www.about espanol.com/que-es-una-pagina-web-3202308>
- Blog del Fotógrafo. (12 de Abril de 2018). *Distancia Focal*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <https://www.blogdelfotografo.com/distancia-focal/>
- Blog del Fotógrafo. (12 de Enero de 2019). *Tecnología de los sensores*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <https://www.blogdelfotografo.com/tipos-caracteristicas-ventajas-sensores-cameras-fotos/>
- BROADCOM. (2017). *AS22 Series Miniature Kit Encoder*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de www.broadcom.com.
- CalibracionesHD. (s.f.). *Resoluciones de Pantalla*. Recuperado el 7 de Enero de 2020, de <https://calibracionhd.com/resoluciones-de-pantalla/>
- CampusMVP. (9 de Junio de 2014). *Diseñando una base de datos en modelo relacional*. Recuperado el 3 de Enero de 2020, de <https://www.campusmvp.es/recursos/post/Disenando-una-base-de-datos-en-el-modelo-relacional.aspx>
- Chapaval, N. (8 de Enero de 2018). *Qué es Frontend y Backend*. Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <https://platzi.com/blog/que-es-frontend-y-backend/>

- Darling, K. (2019). *Roles de Menú Wordpress*. Recuperado el 23 de Julio de 2019, de <https://profiles.wordpress.org/helgatheviking/>
- Delgado, D. (2017). Hardware design of a video acquisition system based on USB webcam. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, 38, 50-53. Recuperado el 7 de Enero de 2020, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282017000200001
- Dietrichson, A. (22 de Junio de 2019). *Métodos Cuantitativos*. Recuperado el 14 de Enero de 2020, de <https://bookdown.org/dietrichson/metodos-cuantitativos/prueba-t-para-muestras-pareadas.html>
- Fernandez, A. (23 de Febrero de 2018). *¿Qué es un CMS? Conoce los mejores gestores de contenido*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2019, de <https://www.webempresa.com/blog/que-es-cms-los-mejores-gestores-de-contenido.html>
- Fernández, M., Angós, J., & Salvador, J. (23 de Febrero de 2001). Interfaces de usuario: Diseño de la visualización de la información como medio para mejorar la gestión del conocimiento y resultados obtenidos por el usuario. *La representación y organización del conocimiento : metodologías, modelos y aplicaciones*, (págs. 25-27). Zaragoza. Recuperado el 8 de Enero de 2020
- Ferrer, O. (2009). Endomicroscopía en Anatomía Patológica. Biopsia óptica. *Revista Española de Patología*, 42. Recuperado el 7 de Enero de 2020, de <http://www.patologia.es/volumen42/vol42-num3/42-3n02.htm>
- FilamentoPrinting. (2019). *PLA Fibra de Carbono Proto-Pasta*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2019, de <https://filament2print.com/es/pla-especial/656-fibra-carbono-proto-pasta.html>
- Flores, J. (25 de Agosto de 2015). *Qué es HTML*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2019, de <https://codigofacilito.com/articulos/que-es-html>
- Galindo, J., & Visbal, L. (27 de Enero de 2007). *Simulación, herramientas para la educación médica*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <http://www.scielo.org.co/pdf/sun/v23n1/v23n1a09.pdf>
- García, J., Arias, M., & Valencia, É. (2011). Diseño de prototipo de simulador para entrenamiento en cirugía laparoscópica. *Ingeniería Biomédica*, 13-19. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <http://www.scielo.org.co/pdf/rinbi/v5n9/v5n9a03.pdf>
- García, J., Arias, M., & Valencia, É. (2011). Diseño de prototipo de simulador para entrenamiento en cirugía laparoscópica. *Revista Ingeniería Biomédica*, 13-19. Recuperado el 23 de Septiembre de 2019
- GlosarioIT.com. (9 de Septiembre de 2019). *Joystick*. Recuperado el 9 de Enero de 2020, de <https://www.glosarioit.com/Joystick>

- Grupo SIRP. (1 de Octubre de 2010). *Tipos de movimiento y grados de libertad*. Recuperado el 2 de Enero de 2020, de <https://es.slideshare.net/EducaredColombia/tipos-de-movimiento-y-grados-de-libertad>
- Hernández, J. (23 de Julio de 2017). *¿Qué es CSS?* Recuperado el 8 de Enero de 2020, de https://lenguajecss.com/p/css/introduccion/que-es-css#disqus_thread
- Hernández, J. (1 de Febrero de 2019). *Lenguaje Javascript*. Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <https://lenguajejs.com>
- IMIBIC. (6 de Enero de 2012). *Junta de Andalucía*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de Pinzas para laparocopia: https://www.juntadeandalucia.es/ott/sites/default/files/touchpro/ot-fibico-70_0.pdf
- Impresoras3D. (12 de Enero de 2017). *ABS y PLA*. Recuperado el 2 de Diciembre de 2019, de <https://www.impresoras3d.com/abs-y-pla-diferencias-ventajas-y-desventajas/>
- Leandro. (7 de Junio de 2018). *Definición del desarrollo web*. Recuperado el 7 de Enero de 2020, de http://www.alegsa.com.ar/Dic/desarrollo_web.php
- Ledbox. (2016). *Diferencia entre lúmenes y luxes*. Recuperado el 13 de Enero de 2020, de <https://blog.ledbox.es/informacion-led/diferencias-entre-lumens-y-luxes>
- León, N. (s.f.). *ISO en Fotografía: Qué es y cómo se usa*. Recuperado el 7 de Enero de 2020, de <https://www.dzoom.org/es/sensibilidad-iso-que-es-y-como-funciona/>
- Lopes, A., Ramírez, M., & Ruiz, J. (2006). *Modelos artesanales de simulación para el entrenamiento laparoscópico*. Recuperado el 23 de Mayo de 2019, de <http://scielo.isciii.es/pdf/aue/v30n5/v30n5a07.pdf>
- Luz, S. D. (2016). *Redes Zone*. Recuperado el 23 de Junio de 2019, de <https://www.redeszone.net/2016/02/06/conoce-el-nuevo-mini-ordenador-odroid-c2-uno-de-los-mas-potentes-del-mercado/>
- Maderas Santana. (2015). *Características de los tableros o madera MDF*. Recuperado el 2 de Enero de 2020, de <https://www.maderassantana.com/caracteristicas-tableros-madera-mdf/#>
- Makeitfrom. (12 de Marzo de 2015). *Materiales de impresión 3D PLA*. Recuperado el 3 de Septiembre de 2019, de <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>
- Martínez, F. (2015). *Sistemas de Coordenadas*. Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/63801/secme-?sequence=1>
- Martínez, M., Calil, C., & Fiorelli, J. (2002). RESISTENCIA MECANICA DE LOS TABLEROS DE DENSIDAD MEDIA PARTE 1: RESISTENCIA A LA TRACCION PARALELA A

- LA SUPERFICIE. *Maderas, Cienc. tecnol. v.4 n.2 Concepción 2002*, 179-185. Recuperado el 2 de Enero de 2020, de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2002000200008
- Matus, D. (8 de Enero de 2020). *Te explicamos qué es FTP y para qué sirve este protocolo*. Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <https://es.digitaltrends.com/computadoras/que-es-ftp-y-para-que-sirve/>
- Miranda, C. (2008). Entrenador Laparoscópico. *Revista Mexicana de Cirugía Pediátrica*, 3. Recuperado el 29 de Octubre de 2018, de <http://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=26718>
- Mott, R. (2009). *Resistencia de materiales*. México: Pearson Education. Recuperado el 12 de 1 de 2020
- naylamp. (2019). *Teensy 3.2*. Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <https://naylampmechatronics.com/arduino-tarjetas/319-teensy-32.html>
- Network net Services. (s.f.). *FTP*. Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <https://goc.networktech.com.ar/knowledgebase/20/iQue-es-FTP.html>
- Olmedo, L. (12 de Marzo de 2019). *Tipos de sensores en fotografía y sus características*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <https://blog.foto24.com/tipos-de-sensores-en-fotografia/>
- Operarme.es. (1 de Noviembre de 2015). *Operarme.es especialistas en cirugía*. Recuperado el 1 de Enero de 2020, de *¿Qué es un laparoscopia y para qué sirve?:* <https://www.operarme.es/noticia/365/que-es-un-laparoscopia-y-para-que-sirve/>
- Orange Pi. (2019). *Orange Pi*. Recuperado el 12 de Octubre de 2019, de <http://www.orangepi.org>
- Ortega, D. (2 de Agosto de 2011). *Tipos de conexiones multimedia*. Recuperado el 7 de Enero de 2020, de <http://recursostic.educacion.es/observatorio/web/en/equipamiento-tecnologico/hardware/1002-tipos-de-conexiones-multimedia>
- Ortiz, A. (19 de Noviembre de 2011). *Lenguaje de base de datos*. Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <https://es.slideshare.net/Anita325/lenguajes-de-bases-de-datos-10238259>
- Pérez, D. (26 de Octubre de 2007). *¿Qué son las bases de datos?* Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <http://www.maestrosdelweb.com/que-son-las-bases-de-datos/>
- Pérez, M. (29 de Agosto de 2011). *Tipos y características de los sensores de cámaras de fotos*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <https://www.blogdelfotografo.com/tipos-caracteristicas-ventajas-sensores-camaras-fotos/>
- Projects. (2018). *Electronics Projects*. Recuperado el 29 de Diciembre de 2019, de https://www.pjrc.com/teensy/td_download.html

- Proyecto Repara. (2017). *Sensorización avanzada y Big Data*. Recuperado el 1 de Octubre de 2019, de <http://www.proyectorrepara.com/bigdata.php>
- Quirúrgica. (20 de Diciembre de 2019). *Cirugía laparoscópica*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <https://www.quirurgica.com/cirugia-laparoscopica/>
- Ramos, F., Quintero, N., & Hernández, T. (1 de Enero de 2010). *Modelo para entrenamiento de cirugía laparoscópica urológica*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <http://www.elsevier.es/es-revista-revista-mexicana-urologia-302-articulo-modelo-entrenamiento-cirugia-laparoscopica-urologica-X2007408510498841>
- Raspberry. (2019). *Raspberry.org*. Recuperado el 1 de Octubre de 2019, de <https://www.raspberrypi.org>
- Red gráfica Latinoamérica. (03 de Marzo de 2010). *Lenguaje de programación PHP*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2019, de <http://www.redgrafica.com/El-lenguaje-de-programacion-PHP>
- Rodríguez, O. (29 de Mayo de 2014). *Comparativa entre gestores de contenidos (CMS)*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2019, de <https://www.hiberus.com/crecemos-contigo/comparativa-entre-gestores-de-contenidos-cms/>
- Romero, J. (29 de Abril de 2018). *Medios de transmisión*. Recuperado el 7 de Enero de 2020, de <https://247tecno.com/medios-de-transmision/>
- Ruiz, M., García, J., & Mesa, J. (2010). ERROR, INCERTIDUMBRE, PRECISIÓN Y EXACTITUD,. *I Congreso Internacional sobre catastro unificado y multipropósito*, 95-102. Recuperado el 30 de Diciembre de 2019
- SECLA. (09 de Diciembre de 2004). *Telecirugía: La revolución silenciosa de los robots*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de http://www.seclaendosurgery.com/secla/seclan9/art01_06.htm
- SKF. (2019). *Rótulas esféricas radiales*. Recuperado el 6 de Noviembre de 2019, de <https://www.skf.com/cl/products/bearings-units-housings/plain-bearings/general/radial-spherical-pb/radial-spherical-plain/index.html?designation=GE%2020%20ES-2RS>
- Soto, M. I. (5 de Diciembre de 2005). *Medwave*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de Revista biomédica revisada por pares: <https://www.medwave.cl/link.cgi/Medwave/Enfermeria/InstrumentistasACS2005/1/2705>
- Superdroid. (2019). *Superdroid Robots TOBSUN*. Recuperado el 19 de Septiembre de 2019, de <https://www.superdroidrobots.com/shop/item.aspx/5v-25-watt-dc-dc-converter/2120/>
- SYSPO. (28 de Marzo de 2018). *DESARROLLO DE UN SISTEMA AVANZADO DE MONITORIZACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA MEJORA DE LAS MÁQUINAS MULTHILO DE CORTE DE PIEDRA (IN852A 2018/28)*. Recuperado el 6

de Enero de 2020, de <http://sysproautomation.com/desarrollo-de-un-sistema-avanzado-de-monitorizacion-y-adquisicion-de-datos-para-la-mejora-de-las-maquinas-multihilo-de-corte-de-piedra-in852a-2018-28/>

Tadlock, J. (2019). *WordPress Members Plugin*. Recuperado el 23 de Octubre de 2019, de <https://es.wordpress.org/plugins/members/#description>

termister.com. (26 de Septiembre de 2017). *Características de la fibra de vidrio*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de <https://www.termiser.com/caracteristicas-tecnicas-de-la-fibra-de-vidrio/>

THEWEBFOTO. (12 de Marzo de 2015). *Enfoque*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <http://www.thewebfoto.com/2-hacer-fotos/210-enfoque>

Torres, F. (2018). Requerimientos para simuladores de laparoscopia. (A. Ramírez, & R. Cangui, Entrevistadores) Recuperado el 3 de Septiembre de 2019

Training&Competence. (2019). *Productos*. Recuperado el 1 de Agosto de 2019, de <https://www.training-competence.com>

Troconis, E. (1 de Marzo de 2012). *Dr. ET EndoTrainer*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <https://drendotrainer.com/caracteristicas/>

Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y Desarrollo de Productos*. México: Mc Graw Hill. Recuperado el 26 de Octubre de 2019

Ultimate Member. (2019). *Ultimate Member*. Recuperado el 12 de Julio de 2019, de <https://es.wordpress.org/plugins/ultimate-member/>

Universidad de Antioquia. (s.f.). *Parámetros estadísticos*. Recuperado el 13 de Enero de 2020, de http://docencia.udea.edu.co/cen/MetodosNumericos/capitulo5/parametros_estadisticos.html

Universidad de Barcelona. (2018). *Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS)*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs>

Vegas, L., Sanchez, A., Rodríguez, O., & Sánchez, R. (2013). Sutura y anudado laparoscópico asistido por robot: estudio comparativo de la curva de aprendizaje. *Vitae*, 56. Recuperado el 4 de Diciembre de 2019

VIEUR. (5 de Enero de 2020). *Caja de entrenamiento laparoscópico*. Recuperado el 6 de Enero de 2020, de <https://www.amazon.es/VIEUR-Entrenamiento-laparoscópica-Entrenador-Dispositivos/dp/B07TTDJ7Y9>

WordPress. (2019). *WordPress Codex*. Recuperado el 13 de Julio de 2019, de <https://codex.wordpress.org>

Yacuzzi, E., & Martin, F. (2016). *Ucemar*. Recuperado el 31 de Diciembre de 2019, de <https://ucema.edu.ar/publicaciones/download/documentos/234.pdf>

Zaforas, M. (2018). *¿Es Python el lenguaje del futuro?* Recuperado el 8 de Enero de 2020, de <https://www.paradigmadigital.com/dev/es-python-el-lenguaje-del-futuro/>

ANEXOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

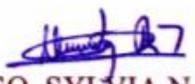
CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue realizado por los señores **CANGUI LAICA, RICAR SANTIAGO** y **RAMÍREZ GAVILÁNEZ, ANDRÉ SEBASTIÁN**.

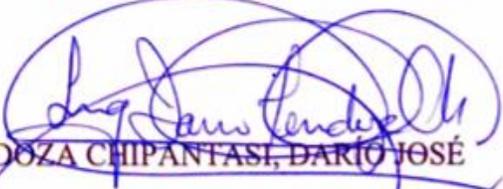
En la ciudad de Latacunga, a los 23 días de mes de enero del 2020.

Aprobado por:




ING. REA MINANGO, SYLVIA NATHALY

DIRECTOR DEL PROYECTO


ING. MENDOZA CHIPANTASI, DARIÓ JOSÉ

DIRECTOR DE CARRERA


DR. VACA CORRALES, JAIME RODRIGO

SECRETARIO ACADÉMICO