



**Desarrollo de un Prototipo de Laparoscopia Basado en el Modelo Continuo Redundante *Snake Cable Robot* Para Ser Usado en un Entorno Físico Simulado.**

Laura Catalina López Riaño  
Julián David Medina Alfonso  
Camila Valentina Osorio Peña

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Bioingeniería  
Bogotá, Colombia.  
2020.

**Desarrollo de un Prototipo de Laparoscopia Basado en el Modelo Continuo  
Redundante *Snake Cable Robot* Para Ser Usado en un Entorno Físico Simulado.**

Laura Catalina López Riaño  
Julián David Medina Alfonso  
Camila Valentina Osorio Peña

Trabajo de Grado Presentado como Pre-Requisito para optar por el título de Bioingeniero

Tutor:  
Hernando Efraín León Rodríguez

Cotutor:  
Mario Fernando Jiménez Hernández

Universidad El Bosque  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Bioingeniería  
Bogotá, Colombia.  
2020.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos primeramente a Dios, a cada una de nuestras familias por el gran esfuerzo que han estado realizando a lo largo de nuestra vida para darnos una buena calidad de vida y una buena educación.

Por otro lado, le damos las gracias y le dedicamos este trabajo a los docentes Hernando León y Mario Jiménez por acompañarnos, guiarnos y esforzarse con nosotros para lograr que el proyecto saliera adelante; como también a los jurados Brayan Valencia y Rafael Arrazola por exigirnos y ayudarnos a ver nuestros errores para así lograr superarlos.

Finalmente, a la Universidad El Bosque por ayudarnos a crecer profesional y personalmente a lo largo de nuestro pregrado con la finalidad de salir preparados para enfrentarnos a la vida profesional.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	18
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	20
2. JUSTIFICACIÓN .....	22
3. OBJETIVOS .....	24
3.1. Objetivo general.....	24
3.2. Objetivos específicos .....	24
4. MARCO REFERENCIAL .....	25
4.1. Técnicas quirúrgicas.....	25
4.1.1. Tipos de técnicas quirúrgicas .....	25
4.2. Laparoscopia .....	25
4.2.1. Método de examen .....	25
4.2.2. Herramientas usadas (Instrumentación quirúrgica) .....	26
4.2.3. Usos.....	26
4.2.4. Ergonomía del médico durante la cirugía laparoscópica. ....	27
4.3. Anatomía Implicada en la laparoscopia .....	29
4.4. Enfermedades Asociadas a la Laparoscopia .....	29
4.4.1. Apendicitis.....	29
4.5. Tipos de laparoscopia.....	30
4.5.1. Colectectomía Laparoscópica .....	30
4.5.2. Apendicetomía Laparoscópica.....	30
4.5.3. Resección Laparoscópica de Colón .....	30
4.5.4. Laparoscopia Urológica.....	30
4.6. Apendicetomía Laparoscópica .....	30
4.7. Robótica .....	31
4.7.1. Robots Quirúrgicos.....	31
4.7.2. Características Geométricas y Funcionales de los Robots continuo-redundantes. ....	31
4.7.2.3. Geometría diferencial de curvas .....	32
4.7.3. Cinemática de los Robots Continuo-Redundantes .....	34
□ Modelo 2D (Planar).....	35
□ Modelo 3D (Espacial) .....	37
Análisis cinemático inverso .....	40
□ Método exhaustivo.....	41
4.7.4. Dinámica de los Robots.....	41
4.7.5. Herramientas matemáticas para la representación espacial. ....	42
□ Ángulos de Euler.....	42
4.7.5.1. Notación Denavit-Hartenberg .....	43
4.7.6. Sensor Inercial (Verificación de la Posición Final) .....	44
4.7.6.1. Acelerómetro.....	44
4.7.6.2. Giroscopio. ....	45
4.7.7. Control de Posición .....	45
4.7.8. Actuadores.....	46

□ Actuadores eléctricos .....	46
4.7.9. Control cinemático .....	47
4.7.10. Estructura mecánica .....	47
4.7.11. Control de movimientos .....	48
4.7.12. Grados de libertad .....	48
4.7.13. Robots hiper - redundantes .....	49
4.7.14. Robots Continuo-Redundantes .....	50
4.7.15. Equipos médicos: .....	51
Marco Normativo del uso de dispositivos médicos en Colombia .....	51
4.8. Estado del arte: .....	52
5. METODOLOGÍA .....	57
Desarrollo de la estructura mecánica del prototipo laparoscópico. ....	58
Diseño de la estructura mecánica del robot.....	58
Construcción de la Estructura del Robot.....	69
Desarrollo del control del prototipo laparoscópico. ....	85
1. Requerimientos de los subsistemas que integran el control del prototipo laparoscópico. ....	85
2. Requerimientos de los componentes .....	87
Desarrollo del simulador de la cavidad pélvica abdominal. ....	108
Implementación del prototipo laparoscópico en el entorno físico simulador .....	117
Plan de pruebas del sistema.....	118
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	122
Desarrollo de la estructura mecánica del prototipo laparoscópico .....	122
Desarrollo del control del prototipo laparoscópico. ....	133
Desarrollo del simulador de la cavidad pélvica abdominal. ....	143
Pruebas del sistema .....	144
7. CONCLUSIONES .....	154
8. RECOMENDACIONES.....	155
BIBLIOGRAFÍA .....	156
ANEXOS .....	169

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Anatomía Implicada en la laparoscopia.....	29
Tabla 2 Matriz de decisión del software CAD para el diseño de los módulos del robot. ....	60
Tabla 3 Matriz de decisión para los módulos y los segmentos del prototipo con la propuesta 1.....	70
Tabla 4 Matriz de decisión para tensores de módulos en la propuesta 1. ....	70
Tabla 5 Matriz de decisión para soporte de los motores de la propuesta 1. ....	71
Tabla 6 Matriz de decisión para material de soporte del prototipo de la propuesta 1. ....	71
Tabla 7 Matriz de decisión para los módulos y los segmentos del prototipo con la propuesta 2.....	72
Tabla 8 Matriz de decisión para los resortes en la propuesta 2.....	72
Tabla 9 Matriz de decisión para tensores de módulos en la propuesta 2. ....	73
Tabla 10 Matriz de decisión para el resorte interno de la propuesta 3.....	74
Tabla 11 Matriz de decisión para los resortes externos de la propuesta 3. ....	75
Tabla 12 Matriz de decisión para las arandelas de la propuesta 3.....	75
Tabla 13 Matriz de decisión para los cables tensores de la propuesta 3.....	76
Tabla 14 Características de encoder funcionales para el prototipo propuesto. ....	88
Tabla 15 Características de los encoder funcionales para el prototipo propuesto.....	88
Tabla 16 Características de tarjetas IMU funcionales para el prototipo propuesto.....	89
Tabla 17 Evaluación de tarjetas IMU funcionales para el prototipo propuesto. ....	90
Tabla 18 Características de tarjetas joystick propuestos para el prototipo .....	90
Tabla 19 Evaluación de tarjetas joystick propuestos para el prototipo .....	91
Tabla 20 Características de microcontroladores funcionales para el prototipo propuesto. ....	92
Tabla 21 Evaluación de microcontroladores funcionales para el prototipo propuesto. ....	93
Tabla 22 Características de drivers funcionales para el prototipo propuesto.....	93
Tabla 23 Evaluación de drivers funcionales para el prototipo propuesto. ....	94
Tabla 24 Características de motorreductores.....	95
Tabla 25 Matriz de decisión de motorreductores.....	95
Tabla 26 Matriz de decisión del material de la base.....	110
Tabla 27 Matriz de decisión material de la cubierta.....	111
Tabla 28 Matriz de decisión material de moldeo.....	112
Tabla 29 Matriz de decisión del material del negativo (molde).....	112
Tabla 30 Matriz de decisión material del positivo (Relleno).....	113
Tabla 31 Medida de cada uno de los órganos realizados para el simulador .....	113
Tabla 32 Proporciones de los materiales utilizados para cada uno de los órganos. ....	116
Tabla 33 Matriz de prueba para los sensores.....	118
Tabla 34 Matriz de prueba para el controlador.....	119
Tabla 35 Plan de prueba de visualización del Prototipo. ....	120
Tabla 36 Características de impresión los módulos del prototipo No.1 .....	123
Tabla 37 Comparación de las opciones de distribución de los actuadores para la propuesta 1. ....	125
Tabla 38 Características de impresión los módulos del prototipo No.2 .....	127
Tabla 39 Comparación de las opciones de distribución de los actuadores para la propuesta 2. ....	128
Tabla 40 Características de impresión de las arandelas del prototipo No.3.....	130
Tabla 41 Resultados de la prueba de posición.....	144
Tabla 42 Resultados prueba para el controlador.....	146
Tabla 43 Distancia de la prueba uno a partir de la posición inicial y final .....	146
Tabla 44 Plan de prueba de visualización del Prototipo. ....	148
Tabla 45 Componentes seleccionados para la implementación y evaluación del prototipo robótico .....	153

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Árbol Problema .....	21
Figura 2 Zonas del cuerpo de un cirujano afectadas por lesiones musculoesqueléticas durante la realización de una laparoscopia. ....	28
Figura 3 . Apendicitis Tomado de: (MedlinePlus, 2019).....	30
Figura 4 Apendicetomía Laparoscópica Tomado de: (Somaruga, s.f).....	30.
Figura 5 Representación gráfica de las longitudes características. h y L, de un robot continuo redundante. ....	32
Figura 6 Descripción de las curvas en el espacio (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018) .....	33
Figura 7 Descripción del teorema del Vogt 's para una curva. (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).....	34
Figura 8 Esquema de un segmento del robot con sus variables geométricas (Tonapi, 2014).....	35
Figura 9 Modelos de cambio de apariencia y longitud (Tonapi, 2014) .....	36
Figura 10 Esquema de un segmento del robot con sus variables geométricas (Tonapi, 2014). ....	37
Figura 11 Matriz de transformación homogénea (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018). ....	43
Figura 12 Representación del sistema de referencia local (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).....	43
Figura 13. Definición de la matriz A (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).....	44
Figura 14 Clasificación de los actuadores por el tipo de energía de alimentación. Tomado de: (Corona Ramírez, Abarca Jiménez & Mares Carreño, n.d.) .....	47
Figura 15 Control de Lazo abierto Tomado de: (Li, 2002). ....	48
Figura 16 Control de Lazo cerrado Tomado de: (Li, 2002). ....	48
Figura 17 Grados de libertad esquemáticamente. Tomado de: (Li, 2002). ....	49
Figura 18 Robot manipulador Hiper-redundante Tomado de:(Muñoz González, 2013) .....	50
Figura 19 Robot manipulador Continuo-redundante. Tomado de:(Jones & Walker, 2006) .....	50
Figura 20 Grados de libertad Continuo vs Discreto. Tomado de: (Burgner Kahrs, Rucker & Choset, 2015) .....	51
Figura 21 Robot manipulador Hiper-redundante bioinspirado Tomado de: (Muñoz González, 2013). ....	54
Figura 22 Morfología del BHRM Tomado de: (González, Turiel, Fraile & de la Fuente, 2014) .....	55
Figura 23 Secuencia de 30 módulos y detalle del extremo final Tomado de: (González, Turiel, Fraile & de la Fuente, 2014). ....	55
Figura 24 El robot manipulador de robot continuo compuesto por 1 segmento, 6 secciones y juntas libres entre secciones. Tomado de: (Mosqueda, Moncada, Murrugarra & Leon-Rodriguez, 2018). ....	56
Figura 25 Diferentes tipos de articulaciones con sus grados de libertad .....	59
Figura 26 Alternativa 1 de la base del módulo .....	59
Figura 27 Alternativa 2 de la base del módulo .....	60
Figura 28 Paso 1. del Modelo en 3D de la base del módulo .....	60
Figura 29 Paso 2. del Modelo en 3D de la base del módulo. ....	60
Figura 30 Paso 3. del Modelo en 3D de la base del módulo. ....	60
Figura 31 Paso 4. del Modelo en 3D de la base del módulo. ....	61
Figura 32 Paso 5. del Modelo en 3D de la base del módulo. ....	61
Figura 33 Diseño No. 1. Distribución del robot en tres segmentos conformados cada uno por cinco módulos. ..	61
Figura 34 Vista inferior del módulo. Distribución de los orificios que permiten el paso de los cables tensores. .	62
Figura 35 Vista lateral de la distribución de los cables Diseño No. 1. ....	62
Figura 36 Localización de los cables tensores para el Diseño No. 1. ....	63
Figura 37 Distribución en circunferencia de los motores en la caja de actuación .....	63
Figura 38 Distribución de forma matricial de los motores en la caja de actuación .....	63
Figura 39 Diseño No. 2. Distribución del robot en dos segmentos conformados cada uno por siete módulos. ...	64
Figura 40 Diseño de los módulos con los resortes integrados .....	64
Figura 41 Vista lateral de la distribución de los cables en el diseño No. 2. ....	65

Figura 42 Localización de los cables tensores con sus respectivos resortes para el diseño No. 2. ....	65
Figura 43 Distribución en filas de los motores en la caja de actuación .....	65
Figura 44 Distribución de forma matricial de los motores en la caja de actuación .....	66
Figura 45 Diseño del módulo del diseño No. 3. ....	66
Figura 46 Diseño No. 3. Distribución del robot en dos segmentos conformados cada uno por dos módulos. ....	67
Figura 47 Base de la arandela. ....	67
Figura 48 Vista lateral de la estructura interna de la arandela final .....	67
Figura 49 Diseño de la arandela final del robot. ....	68
Figura 50 Vista lateral de la distribución de los cables en el diseño No. 2. ....	68
Figura 51 Localización de los cables tensores en las arandelas presente en el diseño No. 2. ....	68
Figura 52 Rollo de PLA .....	70
Figura 53 Rollo de NYLON .....	70
Figura 54 Tubos de aluminio. ....	71
Figura 55 MDF de 5mm. ....	71
Figura 56 Rollo de ABS .....	72
Figura 57 Guayas de Acero .....	73
Figura 58 Resorte de tensión .....	74
Figura 59 Resorte de compresión .....	75
Figura 60 Impresión 3D .....	76
Figura 61 14 Nylon 100 Lb .....	77
Figura 62 Impresión 3D de los módulos del robot con el material del prototipo No. 1. ....	78
Figura 63 Visualización del archivo .dxf de las partes que forman la estructura de soporte del Robot.....	78
Figura 64 Impresión 3D de los módulos del robot con el material del prototipo No. 2. ....	79
Figura 65 Visualización del archivo .dxf de las partes que forman la estructura de soporte del Robot.....	79
Figura 66 Impresión 3D de las arandelas del prototipo No. 3. ....	80
Figura 67 Visualización del archivo .dxf de las partes que forman la estructura de soporte del Robot en el prototipo No. 3 .....	80
Figura 68 Unión de la base de la estructura de soporte. ....	81
Figura 69 Ubicación de los tubos que conforman la caja de actuación en la propuesta 1. ....	81
Figura 70 Montaje final de la estructura mecánica del prototipo No. 1. ....	82
Figura 71 Ubicación de los resortes en cada uno de los módulos .....	83
Figura 72 Ubicación de los tubos que conforman la caja de actuación en el diseño No. 2. ....	83
Figura 73 Montaje final de la estructura mecánica del prototipo No. 2. ....	83
Figura 74 Montaje final de la estructura mecánica del robot para la propuesta 3. ....	84
Figura 75 Subsistema de unidad central de procesamiento .....	85
Figura 76 Subsistema del controlador .....	85
Figura 77 Subsistema de los sensores y transductores.....	86
Figura 78 Subsistema de los actuadores .....	86
Figura 79 Subsistema mecánico .....	86
Figura 80 Vínculos de los sensores.....	87
Figura 81 Vínculo del controlador.....	91
Figura 82 Componentes internos del arduino mega.....	93
Figura 83 Componentes internos del driver L293D .....	94
Figura 84 Vínculo de los actuadores.....	94
Figura 85 Fuente de poder ATX 600W .....	96
Figura 86 Transformaciones de los parámetros .....	96
Figura 87 Transformación de parámetros para la Cinemática directa .....	98
Figura 88 Cinemática inversa (Diseño propio).....	99
Figura 89 Transformación de parámetros para la Cinemática inversa.....	100
Figura 90 Diagrama de flujo del algoritmo de simulación de la posición del efector final de un segmento. ....	101
Figura 91 Diagrama de flujo del algoritmo del espacio de trabajo de la estructura móvil del robot. ....	102
Figura 92 Diagrama de flujo del algoritmo de los movimientos del robot .....	103



Figura 93 Diagrama de flujo del funcionamiento del control PID.....	104
Figura 94 Diagrama de bloques del controlador PID inicial para la estructura (Planta).....	105
Figura 95 Transformaciones desde las señales generadas por joystick hasta el control del motor por medio del encoder .....	105
Figura 96 Diagrama de bloques del controlador PID para los motores. ....	106
Figura 97 Funcionamiento del algoritmo correspondiente a la IMU (MPU6050).....	106
Figura 98 Diagrama de Flujo de la velocidad de giro de los motores.....	107
Figura 99 Arquitectura interna del software .....	108
Figura 100 Cavidad pélvica abdominal .....	109
Figura 101 Vista isométrica del Diseño CAD en FUSION 360 del simulador de entorno.....	109
Figura 102 Modelo 3D del robot desarrollado realizando una inspección del entorno simulado. ....	109
Figura 103 Vista lateral ampliada del snake cable robot dentro del simulador de entorno físico.....	110
Figura 104 MDF blanco 5mm. ....	111
Figura 105 Acrílico.....	111
Figura 106 Plastilina .....	112
Figura 107 Alginato Dental .....	112
Figura 108 Silicona de caucho.....	113
Figura 109 Modelado en plastilina del intestino grueso .....	114
Figura 110 Modelado en plastilina del hígado.....	114
Figura 111 Porción de alginato .....	114
Figura 112 Mezcla de alginato y agua. ....	114
Figura 113 Introducción en el alginato del órgano previamente moldeado. ....	115
Figura 114 Molde final .....	115
Figura 115 Pruebas de textura de material.....	115
Figura 116 Positivo de silicona en el molde de alginato.....	116
Figura 117 Estómago realizado con silicona de caucho. ....	116
Figura 118 Cámara laparoscópica .....	117
Figura 119 Laparoscópico convencional. ....	119
Figura 120 Esquema general del diseño del Robot para la propuesta No.1 .....	122
Figura 121 Vistas isométricas del diseño de un módulo del snake cable robot .....	122
Figura 122 Organización de los módulos en grupos 5.....	123
Figura 123 Organización de forma lineal de cada uno de los segmentos que componen al robot. con la propuesta .....	123
Figura 124 Diseño de la distribución de los cables tensores a lo largo de la estructura del prototipo No. 1 .....	124
Figura 125 Unión del cable tensor al actuador por medio de un tornillo sin fin.....	124
Figura 126 Modelo 3D del diseño mecánico del robot del prototipo No. 1.....	125
Figura 127 Estructura mecánica del Prototipo No. 1 .....	126
Figura 128 Esquema general del diseño del Robot para la propuesta No.2 .....	126
Figura 129 Organización de los módulos en grupos 7.....	127
Figura 130 Organización de forma lineal de cada uno de los segmentos que componen al robot. con la propuesta 2 .....	127
Figura 131 Diseño de la distribución de los cables tensores a lo largo de la estructura del prototipo No: 2 .....	128
Figura 132 Modelo 3D del diseño mecánico del robot en el prototipo No. 2.....	128
Figura 133 Estructura final del prototipo No.2 .....	129
Figura 134 Esquema general del diseño del Robot para la propuesta No.3 .....	130
Figura 135 Diseño de los módulos pertenecientes al prototipo No. 3 .....	131
Figura 136 Vista lateral del diseño de los segmentos pertenecientes al prototipo No. 3 .....	131
Figura 137 Ubicación de los cables tensores en el prototipo No. 3. ....	131
Figura 138 Modelo 3D del diseño mecánico del robot en el prototipo No. 3.....	132
Figura 139 Estructura mecánica del Prototipo No. 3 .....	132
Figura 140 Secuencia de Movimientos que realiza el prototipo laparoscópico basado en el modelo robótico Snake cable Robot.....	133

Figura 141 Vista superior del espacio de trabajo simulado de un segmento de la estructura móvil del robot...	133
Figura 142 Vista isométrica del espacio de trabajo simulado de un segmento de la estructura móvil del robot .	134
Figura 143 Espacio de trabajo de la estructura móvil del robot.....	134
Figura 144 Vista isométrica del espacio de trabajo de la estructura móvil del robot.....	134
Figura 145 Simulación del circuito de control para un motor (PIN 10 y PIN 11 Desactivados). ....	136
Figura 146 Simulación del circuito de control para un motor con el PIN 10 activado y PIN 11 desactivado. ..	136
Figura 147 Simulación del circuito de control para un motor con el PIN 10 desactivado y PIN 11 activado. ...	136
Figura 148 Simulación del circuito de control para un motor para verificar su voltaje .....	137
Figura 149 Simulación del circuito de control para un motor para verificar su corriente.....	137
Figura 150 Simulación del circuito de control para un motor para verificar su corriente.....	137
Figura 151 Esquemático de los sensores MPU6050.....	138
Figura 152 Simulación en PROCESSING de la posición de los sensores en la estructura móvil del robot .....	138
Figura 153 Simulación en PROCESSING de una posición cualquiera obtenida por las IMU .....	139
Figura 154 Localización de las los sensores MPU 6050 en la estructura móvil del robot.....	139
Figura 155 Montaje en protoboard del circuito de control de los motores .....	140
Figura 156 Montaje en protoboard del circuito perteneciente a los sensores MPU .....	140
Figura 157 Diseño del circuito de control de los motores en la PCB (Modelo 2D) .....	141
Figura 158 Diseño del circuito de control de los motores en la PCB (Modelo 3D) .....	141
Figura 159 Circuito del control de los Motores en PCB .....	141
Figura 160 Estructura final de prototipo laparoscópico snake cable robot .....	142
Figura 161 Partes que integran la estructura final de prototipo laparoscópico snake cable robot .....	142
Figura 162 Órganos de la cavidad pélvica abdominal simulados en silicona de caucho .....	143
Figura 163 Vista superior del entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal .....	143
Figura 164 Vista isométrica del entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal. ....	144
Figura 165 Ubicación de los marcadores en el entorno físico simulado .....	146

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Relación entre las variables $h$ y $L$ .....	32
Ecuación 2 Evolución de la curva (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).....	33
Ecuación 3 Función Vectorial de las coordenadas cartesianas (Reyes Cortés, 2011).....	34
Ecuación 4 Longitudes del arco de curvatura del segmento (Tonapi, 2014). ....	35
Ecuación 5 Factor de compresión uniforme (Tonapi, 2014).....	36
Ecuación 6 Configuración de la forma del segmento en un plano 2D (Tonapi, 2014). ....	37
Ecuación 7 Cambios de longitud (Tonapi, 2014) .....	37
Ecuación 8 Cambios de compresión (Tonapi, 2014) .....	38
Ecuación 9 Modelos cinemáticos (Tonapi, 2014).....	38
Ecuación 10 Configuración de la forma del segmento en un espacio 3D (Tonapi, 2014). ....	38
Ecuación 11 Determinación de $\alpha$ (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013) .....	39
Ecuación 12 Valor permitido cuando la configuración en diferenciate de 0 (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).....	40
Ecuación 13 Cálculo del error final de posición $\epsilon_p$ (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).....	41
Ecuación 14 Cálculo del error final de orientación $\epsilon_p$ (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013). ....	41
Ecuación 15 Cálculo del error completo (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013). ....	41
Ecuación 16 Modelo Dinámico de un robot (Reyes Cortés, 2011).....	42
Ecuación 17 Ángulos de Euler .....	42
Ecuación 18 Malla Cerrada (Reyes Cortés, 2011). ....	44
Ecuación 19 Control PD con compensación de gravedad (Reyes Cortés, 2011).....	45
Ecuación 20 Control Integral Derivativo (Reyes Cortés, 2011). ....	46
Ecuación 21 Principio de funcionamiento del actuador lineal Tomada de: (Corona Ramírez, Abarca Jiménez & Mares Carreño, n.d.) .....	46
Ecuación 22 Filamento conductor por el cual una corriente eléctrica Tomada de: .....	46
Ecuación 23 Parámetro de curva en cinemática inversa .....	96
Ecuación 24 Parámetro de curva en cinemática inversa .....	97
Ecuación 25 Espacio de trabajo .....	97
Ecuación 26 Parámetro de trabajo .....	97
Ecuación 27 Largo tensor $L_1$ .....	97
Ecuación 28 Largo tensor $L_2$ .....	97
Ecuación 29 Largo tensor $L_3$ .....	97
Ecuación 30 Parámetro de trabajo en cinemática directa .....	98
Ecuación 31 Ecuación 31. Parámetro de trabajo en cinemática directa.....	98
Ecuación 32 Ecuación 32. Parámetro de curva en cinemática directa.....	98
Ecuación 33 Parámetro de curva en cinemática directa.....	98
Ecuación 34 Ecuación 34. Planteamiento geométrico .....	99
Ecuación 35 Planteamiento geométrico.....	99
Ecuación 36 Obtención de theta según la distancia final.....	100
Ecuación 37 Cinemática inversa - fórmulas de proyección.....	100
Ecuación 38 Proporción de volumen del órgano .....	115
Ecuación 39 Proporción volumen de aceite.....	115
Ecuación 40 Volumen total de proporciones para el material de los órganos simulados .....	115
Ecuación 41 Volumen del catalizador implementados en la simulación de los órganos .....	116
Ecuación 42 Volumen final de los órganos .....	116
Ecuación 43 Cálculo del porcentaje de error .....	145

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Planos de los módulos que conforman la estructura móvil del prototipo No. 1 .....	169
Anexo 2 Planos de la estructura móvil del prototipo No. 1 .....	170
Anexo 3 Planos de la estructura mecánica del prototipo No. 1 .....	170
Anexo 4 Planos de la estructura móvil del prototipo No. 3 .....	171
Anexo 5 Planos de la estructura mecánica del prototipo No. 3 .....	172

## **ABREVIATURAS**

- MIS: Técnica mínimamente invasiva.
- DOF: Degree of freedom (Grados de libertad).
- D-H: Denavit-Hartenberg .
- TF: Función de transferencia.

## GLOSARIO

- *Acelerómetro*: Dispositivo electromecánica con capacidad de medir fuerzas de aceleración estática o dinámica (Mecatronica, n.d.).
- *Alginato*: Polisacárido aniónico, conocido por ser capaz de hacer negativos (moldes) del objeto que se quiera usar ("Alginatos Dentales | Distribuidor - DentalCost", 2020).
- *Altura de capa*: Parámetro fundamental al momento de realizar una impresión 3D, puesto que será el indicador para la máquina de la cantidad de material y la distancia que tendrá cada capa a lo largo de la impresión del objeto (Createc 3D, 2012).
- *Anatomía*: Cuenta con raíz etimológica en el palabra griega “*Anatemnein*”, siendo esta una ciencia que se basa en descripciones minuciosas de la disposición de las estructuras en el organismo (Antonio Montero, 2011).
- *Ángulo de flexión*: Es el ángulo máximo subtendido por un cable generando así una línea perpendicular (Unitex, 2020).
- *Apendicectomía laparoscópica*: Es una técnica la cual por medio de una incisión y utilizando un instrumento recto y reutilizable con el fin de realizar una revisión, exponer y atender al apéndice (Cir & Original, 2014).
- *Apendicitis*: Es la inflamación del apéndice, la cual puede ocurrir cuando el apéndice se infecta o se bloquea con heces, objetos foráneos o con un tumor (RadiologyInfo, 2019).
- *Biomimética*: Método por el cual se diseñan objetos a partir de información adquirida a través de investigaciones biológicas en la concepción de procesos y productos sustentables que imitan procesos naturales (Rangel, 2014).
- *Cinemática de los Robots*: Es el estudio que realiza el robot geoméricamente, teniendo presente su posición, velocidad y aceleración desde una punto fijo de coordenadas y los momentos causantes de los movimientos (Ramirez, 2015).
- *Control de trayectoria*: Se basa en el modelo cinemático que tenga el robot en uesto, proponiendo a su vez una estrategia de control en cuanto a la velocidad lineal y angular que pueda alcanzar el mismo (Guerrero-Castellanos et al., 2014).
- *Corte Láser*: Proceso de separación termina, donde el rayo láser incide en la superficie del material que se está utilizando con fuerza que lo derrite o lo derrite por completo, haciendo recorridos geométricos únicamente en 2 dimensiones (Fibra, 2020)
- *Curvatura*: Serie de conceptos relacionados en diferentes áreas de la geometría (Al, 2002).
- *Dimensiones*: Es una magnitud que sumadas a otras, funciona para definir un fenómeno físico (Concepto de dimensión, 2020).
- *Dinámica de Robots*: Está relacionada con los movimientos y las fuerzas del robot, establecimiento y relacionando la matemática con las coordenadas articulares, sus derivadas como la velocidad y aceleración, las fuerzas y los parámetros del robot (Automatización, 2017).
- *Encoder*: Transductor rotativo incorporado a un motor de corriente continua, con el fin de transformar el movimiento mecánico en pulsos digitales para ser interpretados por un sistema de control electrónico y de desplazamientos del motor (VATIA, n.d.).
- *Entorno*: Es todo aquello que rodea a una persona o a un objeto teniendo en cuenta las circunstancias y los factores morales, sociales, culturales, entre otros ("Definición de entorno— Definicion.de", 2020).
- *En tiempo real*: Es el tiempo en el cual el sistema responde a la velocidad que le lleguen las salidas y restricciones temporales entre cada evento (entrada y salida) y la respuesta (Ise, 2011).
- *Equipos médicos*: Son un instrumentos, aparato, máquina e implante utilizado para diagnosticar, tratar y/o curar una enfermedad o ser tratada ("Seguridad de los equipos médicos: MedlinePlus en español", 2020) (Cecmed, 2005).
- *Fuente de alimentación*: Esta proporciona un valor de tensión adecuado para el funcionamiento de cualquier dispositivo (Abreu, 2005).

- *Fraguado*: Tiempo en el que reacciones químicas endurecen según sea la composición del material, teniendo presente factores como temperatura, relación con agua, contenido de cemento, aditivos y mezclado (López Bautista, 2016).
- *Giroscopio*: Dispositivo electromecánico que cuenta con un disco circular simétrico ubicado en un eje libre, con el fin de ubicar su centro de gravedad (Ecured, 2020).
- *Grados de libertad*: Son los grados de libertad (como su nombre lo dice) que puede tener un robot en un solo eje de rotación dependiendo de las articulaciones que tenga el mismo (Cisneros, n.d.), es decir, las dimensiones ortogonales que el robot puede tomar (Patricia et al., n.d.).
- *Impresión 3D*: Método que coloca en capas sucesivas en secciones transversales materiales especiales en un modelo 3D (Autodesk, 2020).
- *Incisiones*: Proviene del latín “*Incidere*”, siendo el procedimiento inicial de los procedimientos quirúrgicos sobre la piel, mucosas y tejidos implícitos provocados por el cirujano para acceder a determinado organismo (Dr. Zama, 2014).
- *Inspeccionar*: Proviene del latín “*inspectio*”, el cual hace relación a la acción de examinar, investigar y revisar algo determinado (“Definición de inspección — Definicion.de”, 2020).
- *Laparoscopia*: Exploración de la cavidad abdominal por medio de cámaras ópticas insertadas por incisiones en el abdomen, teniendo como objetivo observar los órganos abdominales (Instituto Mexicano del Seguro Social, n.d.).
- *Longitud*: Magnitud física la cual permite diferenciar la distancia que hay entre dos puntos en el espacio (“Definición de longitud — Definicion.de”, 2020).
- *Magnetómetro*: Dispositivo funcional para cuantificar en fuerza o dirección las señales magnéticas en un espacio de trabajo (Educalingo, 2020).
- *Manejabilidad*: Propiedad de simplicidad y facilidad con que se puede manejar cierta estructura al momento de su fabricación y su uso posteriormente (Determinación, n.d.).
- *Matriz de transformación*: Es una matriz representativa de una transformación lineal en dos tipos de espacio vectoriales en determinadas dimensiones (Mart, n.d.).
- *Modelado 3D*: Son líneas en 2D y 3D que tienen como fin generar objetos tridimensionales por medio de diversas técnicas (SENATI, n.d.).
- *Modelos matemáticos*: Son derivados de modelos científicos que se emplean para determinar, abstraer e interpretar variables y parámetros para obtener un resultado e implementarlo (Matem, 2010).
- *Módulos*: Proviene del latín “*modulus*”, el cual quiere decir que hace parte de una estructura de piezas con el fin de ubicarla lo mejor posible para hacer la construcción más sencilla, regular y económica (“Definición de módulo — Definicion.de”, 2020).
- *Molde*: Recipiente hueco de diferente material el cual da forma a la sustancia líquida que se le está colocando cuando esta seque y quede modificada (“Concepto de molde - Definición en DeConceptos.com”, 2020).
- *Motorreductores*: Son instrumentos mecánicos los cuales son capaces de modificar la velocidad del proyecto que se esté ejecutando (automantenimiento.net, n.d.).
- *Movimientos*: Son los cambios de posición de un objeto a lo largo de un lapso de tiempo, además de traslación, rotación y vibración (Grupo SIRP, 2020) pasando de estar en un sistema de referencia en reposo a otro, generando un cambio de lugar o posición (Prodanoff, n.d.).
- *Orientación*: Corresponde al ángulo de orientación que pueda tener el robot cuando este se mueva en los diferentes grados de libertad que tenga, es decir las coordenadas en las cuales se encuentre según el eje dentro del espacio de trabajo del robot (Gómez Ramos, 2015).
- *Posición*: Ubicación de un objeto en el espacio definido por un vector, además de identificar la distancia desde otro punto y un ángulo de referencia (Arosemena, n.d.).
- *Posiciones cartesianas*: Son coordenadas ortogonales utilizadas para la representación gráfica en un plano cartesiano para determinar la posición física de lo que se está evaluando (Alsina, n.d.).
- *Prototipo*: Es el primer modelo de un proyecto, el cual funciona como representación de un producto final; por medio de este, se logran verificar las características físicas y funcionales proyecto (Conejero et al., 2012) (“¿QUÉ ES UN PROTOTIPO Y PARA QUÉ SIRVE? - Sendekia”, 2020).

- *Rendimiento*: Concepto el cual se asocia el trabajo realizado por maquinarias, personal, instrumentos, etc, es decir, su cociente entre el trabajo útil en cierto intervalo de tiempo (Síndrome et al., 2008).
- *Rigidez*: Se caracteriza por ser una medida cualitativa de la resistencia a las deformaciones elásticas que pueda tener el material con el cual se está tratando, identificando principalmente la capacidad del elemento estructural ("Rigidez", 2020).
- *Robot manipulador*: Esta clase de robots, cuentan con capacidad de mover objetos por medio de un "brazo" el cual le permite moverse de manera adecuada pues cuenta con segmentos deslizantes o articulados ("Robot manipulador - RIVAS ROBOTICS - HURTADORIVAS", 2020).
- *Robots redundantes*: Son aquellos robots que cuentan con varios grados de libertad, aportando beneficios como atravesar obstáculos, mayores articulaciones y ventajas cinemáticas (Martín et al., 1992).
- *Robótica*: Ciencia tecnológica, encargada de estudiar la construcción de máquinas con capacidad de desarrollar diferentes tipos de tareas (González & Espina, n.d.).
- *Robótica quirúrgica*: Son equipos los cuales buscan facilitar principalmente las cirugías mínimamente invasivas, donde estos sean capaces de ser controlados por voz, sujeten cámara y se dispongan a las órdenes arrojadas por el médico cirujano (Moreno-Portillo et al., 2014).
- *Rotación*: Movimiento de cambio de orientación de determinado elemento de un punto a otro manteniendo una distancia constante (Serway, 2001) Giro sobre un eje a cierta velocidad angular de los puntos respecto al centro de giro de la misma (Universidad Simón Bolívar, n.d.).
- *Sensores / transductores*: Dispositivos que proporcionan algún tipo de respuesta a estímulos o señales físicas o químicas, convirtiendo dicha respuesta en una señal electrónica. (Fraden et al., 2002).
- *Simulaciones*: Cuenta con la capacidad de ejecutar tareas interrelacionadas y proyectarlas mediante diferentes materiales ya sea físicos como computacionales sobre el funcionamiento futuro de cierto proyecto (Carmen & Elena, 2009).
- *Snake Cable Robot*: Conocidos como robots de brazo de serpiente, cuentan con uniones o construcciones continuas permitiendo su flexibilidad con el fin de acceder a lugares confinados (Dong et al., 2014).
- *Soporte tipo falda*: Es un tipo de soporte el cual se determina previo a la impresión, en donde éste únicamente estará en la base del objeto que se está imprimiendo y la placa que lo sujeta, con el fin de no obstruir los orificios que tiene el modelo a imprimir 3D (Hernández, n.d.).
- *Tarjeta de control*: Esta se integra un microcontrolador y un conjunto de pines de conexión de entradas y salidas que permiten, mediante cierto algoritmo, interaccionar con el medio físico mediante sensores y actuadores electrónicos (EDUBASICA, 2015).
- *Técnicas quirúrgicas*: estudia la ejecución reglada y sincrónica de las maniobras operatorias, para beneficio del paciente (Bertone & Lujan, 2017).
- *Técnica quirúrgica mínimamente invasiva*: Son técnicas como su nombre lo dice implementadas en técnicas de imagen, con el fin de introducir herramientas en alguna zona del cuerpo para interactuar con estas (OPTI & FENIN, 2004).
- *Vectores*: Segmento recto dirigido en el espacio (SENATI, n.d.).
- *Velocidad*: Capacidad de realizar varios movimientos en el mejor tiempo posible o el que se tarde en recorrer determinada distancia (Simarro, n.d.).
- *Versatilidad*: Proviene de latín "*versatilis*" en referencia de la capacidad de algún objeto o persona que es capaz de adaptarse con rapidez y facilidad a diferentes espacios ("Definición de versátil — Definicion.de", 2020).



## RESUMEN

Las aplicaciones de los robots continuo-redundantes en el campo de la medicina, gracias a su hiperflexibilidad y a su capacidad de deslizarse a través de curvilíneas complejas, los hace ideales para procedimientos quirúrgicos. Con el fin de aumentar la versatilidad de manejo para el cirujano al momento de la realizar una cirugía mínimamente invasiva, es necesario que este cuente con una herramienta práctica, la cual sea capaz de moverse al interior del paciente de forma fluida; A sí mismo, se debe considerar la ergonomía del médico a lo largo de la intervención quirúrgica, pues es fundamental que el usuario esté cómodo al momento de manipularla, de tal manera que no presente molestias físicas y/o anatómicas durante el procedimiento.

En este proyecto de grado se realizó el diseño, la construcción y el control de un robot continuo redundante, impulsado por cables tensores, basado en el modelo robótico *snake cable robot*; Se realizaron pruebas en un entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal, con el cual se verificó su correcto funcionamiento. En cuanto al control del sistema se hizo uso de la cinemática inversa la cual permitió relacionar las diferentes variables del mismo, utilizando los programas de MatLAB y Arduino Su manipulación se realizó por medio un joystick y se empleó un controlador PID. Para evaluar el rendimiento del sistema se registraron por medio de cálculos la posición del efector final, así como la longitud de los cables tensores en cada movimiento y su respectiva curvatura y ángulos, debido a que estos datos son los que permitieron saber si el sistema estaba siguiendo las trayectorias de forma correcta o presentaba fallas en el proceso.

Palabras claves: Robot continuo redundante, laparoscopia, control de posición.

## **ABSTRACT**

The applications of continuous redundant robots in the field of medicine, thanks to their hyper flexibility and their ability to slide through complex curvilinear, make them ideal for surgical procedures. In order to increase the versatility of operation for the surgeon at the moment of performing minimally invasive surgery, it is necessary that the surgeon has a practical tool, which is able to move smoothly inside the patient; The ergonomics of the physician should be considered throughout the surgical procedure, since it is essential that the user is comfortable when handling the procedure, so that he/she does not present physical and/or anatomical discomfort during the procedure.

In this degree project was performed the design, construction and control of a redundant continuous robot, powered by tensor cables, based on the robotic model snake robot cable; Tests were performed in a simulated physical environment of the abdominopelvic cavity, with which its proper functioning was verified. As for the control of the system, use was made of the reverse kinematics which allowed the different variables of the system to be related, using the MATLAB and Arduino programs. In order to evaluate the performance of the system, the position of the final effector, as well as the length of the tensioning cables in each movement and their respective curvature and angles, were recorded by means of calculations, because these data are what allowed to know if the system was following trajectories correctly or had faults in the process.

**Keywords:** Redundant continuous robot, laparoscope, position control.

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, el estudio de la robótica se ha incrementado potencialmente, permitiendo el desarrollo de un sin fin de nuevas tecnologías que posibilitan nuevas soluciones a determinadas necesidades tanto cotidianas como de tipo industrial o médica.

Este documento se centra específicamente en el desarrollo de un prototipo robótico de tipo continuo redundante (*Snake cable robot*), basado en los principios funcionales de un laparoscopio para la exploración de un entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal, debido a que este ofrece ventajas cinemáticas con respecto a los robots clásicos (Berthet-Rayne *et al.*, 2018). La estructura de los robots continuo-redundantes les permite realizar movimientos fluidos con amplios grados de libertad, logrando así que presenten una mayor habilidad para esquivar obstáculos, tener un rango mayor de visión y así mismo una adaptación en espacios confinados.

Gracias al tipo de locomoción que posibilitan los múltiples segmentos que constituyen al *Snake cable robot*, además de proporcionar las ventajas cinemáticas mencionadas anteriormente, también le permite al usuario (en este caso un médico cirujano de MIS (Técnica mínimamente invasiva)) una mayor ergonomía y un mayor rango de visualización de la zona abdominal que se está inspeccionando al momento de estar realizando un procedimiento quirúrgico. Los laparoscopios convencionales no solamente generan que el médico presente limitaciones de visualización y por ende pérdida de la percepción de la zona, sino que también, produce que este únicamente pueda realizar movimientos rígidos, causándole múltiples dolencias en la zona del brazo y la espalda ocasionando así problemas musculoesqueléticos (Millán, 2016); Por esta razón se pensó en el desarrollo de un laparoscopio basado en el modelo robótico *Snake cable robot*, puesto que el cirujano ya no va a tener contacto directo con el dispositivo, es decir, no va a manipular el laparoscópico desde el mango como lo hace normalmente, sino que lo va a controlar por medio de un joystick que le permitirá realizar los movimientos necesarios para poder realizar la inspección de la cavidad pélvica abdominal, logrando así ventajas para el médico, pues según un estudio de la Universidad Ricardo Palma titulado “Innovaciones Internacionales en Robótica Médica para Mejorar el Manejo del Paciente”, los robots quirúrgicos permiten que el cirujano se encuentre en una posición ergonómica, ocasionado que este ya no presente dolores durante el procedimiento, y de este modo pueda realizar un análisis específico de la anatomía del paciente sin incidentes visuales (Cornejo *et al.*, 2019).

Es por esto, que el prototipo robótico construido en el presente trabajo, se basó principalmente en el rediseño de robots continuo redundantes desarrollados en diversos estudios, adaptándolo específicamente a los pocos rangos de visión que tienen los cirujanos al momento de realizar una apendicectomía laparoscópica, debido a que el laparoscopio convencional sólo permite una vista bidimensional y no posibilita ver la profundidad del espacio pélvico abdominal que se está inspeccionando de manera completa y cómoda (García-Galisteo, Tejero, Vílchez, García-Galisteo & González, 2011); de tal manera que el rediseño del mismo se planeó en que fuese capaz, óptimo y favorable para lograr determinados DOF (Degree of freedom) sin que éste dejase de ser una cirugía mínimamente invasiva.

Por otro lado, la construcción del software y el hardware para el control del robot consistió en el previo análisis de modelos matemáticos por medio de la cinemática inversa, que permiten saber cuál es la posición del efector final del robot en el espacio. Así mismo, permite conocer los cambios de longitud de los cables tensores en cada movimiento que generan los segmentos; Teniendo como resultado la elaboración de un sistema de control el mecanismo desarrollado.

Finalmente, para la evaluación tanto mecánica como a nivel de control del dispositivo robótico desarrollado, se construyó un espacio físico simulado de la cavidad pélvica abdominal tomando como referencia la apariencia de la anatomía implicada en el examen de apendicectomía laparoscópica;

Gracias a esto se evidenció la funcionalidad y las ventajas que pueden proporcionar los robots continuo-redundantes en las MIS.

A continuación, se presenta una breve descripción de los capítulos que conforman este documento.

1. Capítulo I. Definición del problema: En esta sección se presenta la definición del problema asociado con las limitaciones visuales que genera un laparoscopio convencional en su operación.
2. Capítulo II. Justificación: Se muestran las razones por las cuáles se requiere abordar el planeamiento del problema y por ende proponer una posible solución.
3. Capítulo III. Objetivos: Se exhibe el objetivo general junto a los objetivos específicos asociados al desarrollo del prototipo de laparoscopio basado en el modelo robótico continuo redundante *Snake cable robot*.
4. Capítulo IV. Marco referencial: En este capítulo se exhibe una explicación detallada acerca de: Técnicas quirúrgicas, laparoscopia, tipos de laparoscopia, anatomía implicada, enfermedades asociadas a la laparoscopia y robótica
5. Capítulo V. Metodología: Se desglosa el paso a paso para la realización de cada objetivo específico teniendo en cuenta los requerimientos establecidos.
6. Capítulo VI. Resultados y análisis: Se exponen los resultados con su respectivo análisis de acuerdo con los objetivos específicos planteados.
7. Capítulo VIII Conclusiones: Se presentan las consideraciones finales de los resultados y la discusión obtenida del prototipo de laparoscopio continuo redundante realizado.
8. Capítulo IX. Recomendaciones: Se indican las posibles sugerencias para mejorar el desarrollo del prototipo laparoscópico.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las técnicas quirúrgicas son aquellas que se implementan durante la ejecución sincrónica y ordenada de maniobras operatorias para beneficio del paciente (Luján, Bertone, Cocco, Aramayo & Boatti, n.d.). La laparoscopia es una práctica de este tipo, que consiste en la revisión de la cavidad pélvica-abdominal a través de pequeñas incisiones por las que se introduce una cámara de vídeo, permitiendo al equipo médico observar el campo quirúrgico (anatomía) dentro del paciente y trabajar en el mismo (López & Quijano Collazo, n.d.). Esta técnica quirúrgica se considera de tipo MIS, y se utiliza con el fin de diagnosticar patologías como: tumores abdominales protocolizados, colitis, apendicitis, úlceras, estadios (grado de extensión de un tumor maligno) y linfomas presentes en la zona abdominal (American Society of Colon and Rectal Surgeons s.f.).

Ahora bien, por medio de esta técnica quirúrgica, se puede realizar específicamente un examen llamado apendicectomía laparoscópica, el cual es el procedimiento de emergencia más común en los servicios quirúrgicos de tipo MIS (Ullauri, s.f.). Esta intervención se realiza cuando un paciente presenta síntomas como dolor en el cuadrante inferior derecho del abdomen, fiebre y un recuento elevado de glóbulos blancos ocasionados por una obstrucción entre el apéndice y el intestino causando una infección, inflamación y distensión en la zona. El examen se realiza por medio de incisiones mínimas en forma de ojo de cerradura. Por medio de este procedimiento, al paciente se le realiza la inspección y la extracción total del apéndice, con el fin de evitar una ruptura o perforación que le pueda ocasionar la muerte. (Nucleus Medical Media, 2011).

A pesar de las ventajas que tiene este examen, la ejecución de dicha técnica presenta limitaciones en cuanto a la visualización de la zona que se quiere inspeccionar, puesto que el instrumento quirúrgico (laparoscopio) que se utiliza habitualmente, presenta inestabilidad en la plataforma de la cámara, tiene pocos grados de movimiento y solamente permite una vista bidimensional, es decir, que solo posibilita imágenes de la cavidad abdominal desde una perspectiva, impidiendo una observación detallada de la misma (García-Galisteo, Tejero, Vílchez, García-Galisteo & González, 2011). Es por esta razón que cuando un médico cirujano realiza este tipo de intervenciones quirúrgicas, tiende a perder la percepción del espacio, ocasionando que no pueda realizar un análisis específico de la anatomía del paciente y que al momento de pronosticar un resultado concreto presente mayor dificultad, conllevado a una posible extensión de la enfermedad (Díaz, 2016). Adicional a esto, se pueden presentar otros inconvenientes visuales a lo largo de esta técnica, ya que las estructuras anatómicas difieren de la gravedad de la patología del paciente las cuales pueden afectar o intervenir en el procedimiento si no son contempladas de manera adecuada (García *et al.*, 2018).

Además de lo mencionado anteriormente, además de las limitaciones visuales que presenta el laparoscopio, este también ocasiona complicaciones ergonómicas para el cirujano durante la realización del examen, puesto que en promedio de cada 78 especialistas dedicados a la laparoscopia el 81% de ellos presentan dos o más síntomas musculoesqueléticos localizados principalmente en el cuello (25%), hombros (19%), muñecas (25%), codos (19%) y espalda (46%) durante la ejecución de la cirugía (Millán, 2016). Provocando así, que el médico cirujano esté expuesto a la realización de movimientos rígidos causados por dolencias y que en algunos de los casos que su procedimiento no sea el más adecuado al momento de determinar un diagnóstico específico sobre un paciente, así mismo, esto ocasiona que el cirujano presente una amplificación en el temblor fino y que haya un aumento en la tensión tanto mental como física del mismo dificultando la práctica de este procedimiento (Isla-Ortiz *et al.*, 2019).

Es por esto que se plantea un prototipo laparoscópico con movilidad continuo redundante, el cual permita en un futuro la obtención de mayores rangos de visualización en la cavidad abdominal que los laparoscopios estándar, para que de esta forma se puedan obtener diagnósticos certeros.

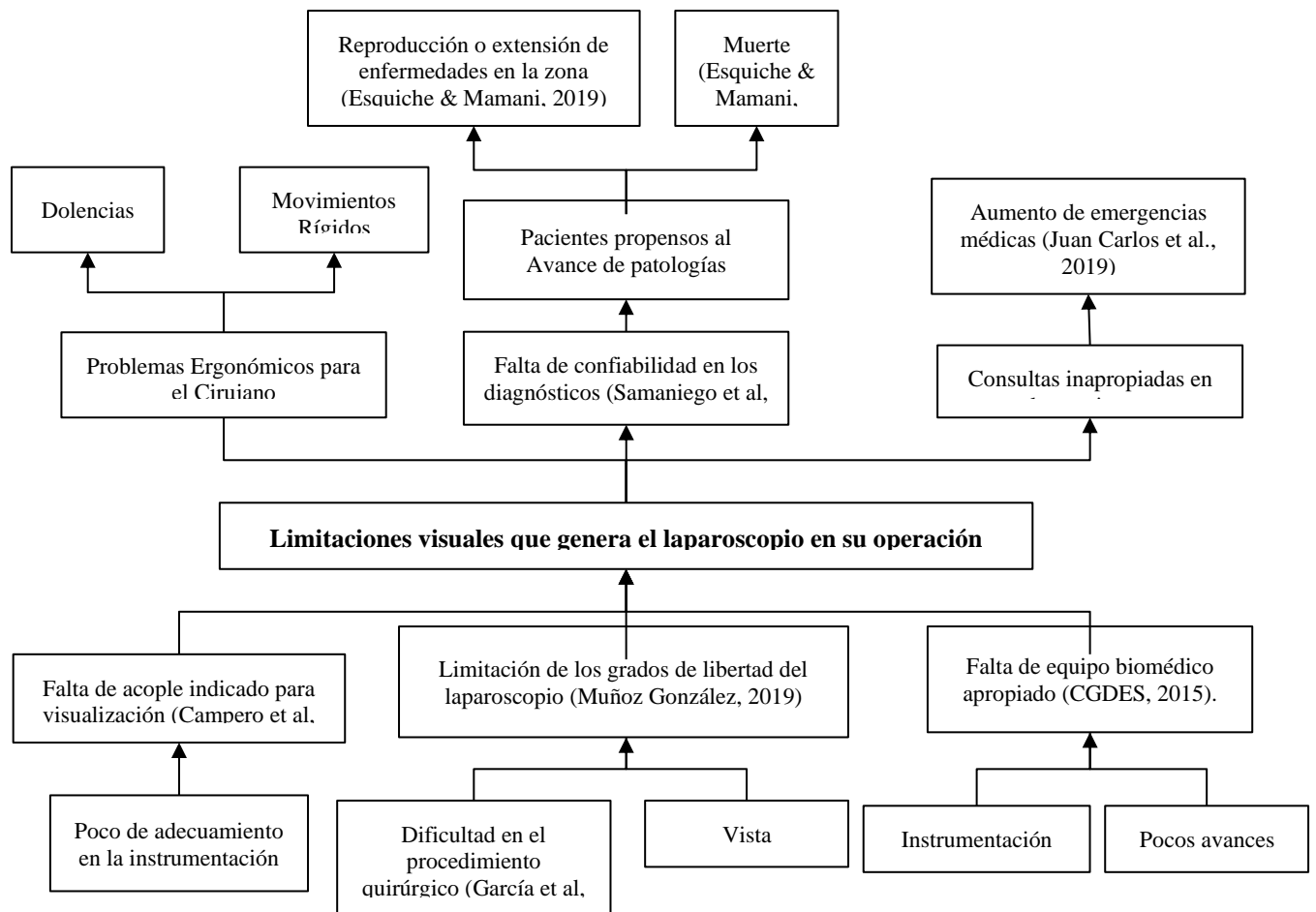


Figura 1 Árbol Problema

## 2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia se practican al año aproximadamente 60.000 exámenes laparoscópicos ya sea de manera urgente o electiva (Serna *et al.*, 2019), en donde la apendicectomía laparoscópica es la emergencia quirúrgica más común. Se estima que aproximadamente 1 de cada 15 personas está propensa a padecer apendicitis en alguna etapa de su vida (Aguirre, 2016). A pesar de que esta intervención quirúrgica es mínimamente invasiva y presenta ventajas al paciente como lo son la reducción del dolor postoperatorio, un menor grado de infección en las heridas quirúrgicas, menos tiempo de hospitalización y un porcentaje de mortalidad del 0,1% (Chousleb *et al.*, 2010), también presenta una serie de limitaciones tanto ergonómicas como visuales para el cirujano causadas por el equipo de visualización llamado laparoscopio. El uso del laparoscopio presenta una reducción en la libertad de los movimientos ocasionado que aproximadamente el 53% de los especialistas padezcan incomodidades físicas producidas por posturas anómalas durante periodos largos de tiempo, provocando una disminución en su rendimiento y precisión, implicando la aparición de fatiga física y dolencias músculo esqueléticas (Ferrero Herrero, 2015). El desgaste físico del médico puede conllevar a que, al momento de realizar un diagnóstico, éste no sea totalmente confiable y le pueda ocasionar al paciente una posible extensión de la enfermedad (Samaniego *et al.* 2002).

Actualmente, gracias a los avances tecnológicos, existen diferentes tipos de robots quirúrgicos (Octavio *et al.*, 2012), los cuales han sido incorporados gradualmente a las cirugías mínimamente invasivas, teniendo ventajas en exámenes como la apendicectomía laparoscópica. Estos robots pueden ayudar al cirujano a lo largo de este procedimiento quirúrgico, debido a que con ellos se dispone de una visión tridimensional con alta definición (HD), un mayor rango de inspección en la zona y mayores grados de maniobrabilidad en el instrumento sin afectar la ergonomía del especialista (Campero *et al.*, 2018). Así mismo, las cirugías robóticas presentan un menor porcentaje de complicaciones con respecto a las cirugías convencionales (48,5% y 76,5% respectivamente), y el tiempo de operación se disminuye aproximadamente en un 2% (García-Galisteo, Tejero, Vílchez, García-Galisteo & González, 2011).

Existe un modelo robótico continuo redundante llamado *Snake cable robot*, el cual utiliza una locomoción bio-inspirada con continuaciones flexibles, teniendo como peculiaridad una propiedad física redundante (posibilidad de ergonomía) (Berthet-Rayne *et al.*, 2018). Esta característica especial ayuda a mejorar la visualización, a tener una mayor capacidad de acceso a lugares confinados y a minimizar el trauma de acceso en cirugías intraabdominales, con lo cual se obtienen mejores resultados en estos procedimientos quirúrgicos y diagnósticos más precisos (Wright *et al.* 2007).

Lo que logra diferenciar el modelo continuo redundante *snake cable robot* de los demás robots quirúrgicos que se utilizan en la actualidad, es que estos cuentan con una forma y estructura tipo DOF (Degree of Freedom), es decir, que pueden realizar movimientos tridimensionales permitiéndoles tener  $n$  grados de libertad, ya que su principio de funcionamiento se basa en la rotación cinemática de cada uno de los segmentos que lo integran (Burgner-Kahrs, 2015). Además, los robots actuales presentan desventajas como lo son el costo incrementado de los equipos y la robustez de los mismos, provocando fallas en los brazos robóticos o en la consola de mando, ocasionado un cambio repentino del procedimiento que se estaba llevando a cabo (CGDES, 2015), por esta razón los robots continuo redundantes son ideales para las cirugías tipo MIS, debido a que estos modelos son más sencillos de manipular, su mantenimiento no es tan complejo y se pueden miniaturizar a la escala que requiera la cirugía, con el fin de proporcionar un acceso flexible la zona y operar con mayor destreza.

En cuanto al papel que desarrolla un bioingeniero, éste busca y usa los principios de la biología y las herramientas de la ingeniería para diseñar y desarrollar productos que incluyen dispositivos médicos, equipos médicos, materiales biocompatibles, energías renovables, desarrollos en biotecnología, entre otros (Universidad El Bosque, 2019).

De tal manera que el desarrollo del equipo mencionado anteriormente basado en *Snake cable robot*, se hace posible gracias a la formación complementaria de ciencias básicas, ciencias básicas de la ingeniería

e ingeniería se fundamenta con el foco misional de la salud, pues tiene como finalidad hacer un aporte en la técnica quirúrgica de laparoscopia, lo que conlleva a un mejoramiento en la calidad de vida del paciente.



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Desarrollar un prototipo de laparoscopia basado en el modelo continuo redundante *Snake cable robot* con el fin realizar movimientos tridimensionales para obtener un mejor rango de visualización y accesibilidad que los laparoscopios estándar.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Diseñar un prototipo de laparoscopia basado en el modelo continuo redundante *Snake Cable Robot* con el propósito de aumentar los grados de libertad que tienen los laparoscopios estándar.
- Construir el prototipo de laparoscopia que realice movimientos tridimensionales durante las pruebas en el simulador.
- Elaborar el control de movimiento del prototipo continuo redundante que permita un manejo intuitivo del mismo.
- Realizar un entorno físico basado en la simulación anatómica implicada en el examen de apendicetomía laparoscópica.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo en cuanto a su desplazamiento, grado máximo y mínimo de flexión, velocidad y posición, usando el entorno físico simulado.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1. Técnicas quirúrgicas

Las técnicas quirúrgicas, tienen como fin curar enfermedades o accidentes a través de intervenciones quirúrgicas, es decir, maniobras que pueden ocasionar grandes incisiones (o cortes) a través de la piel, músculos y otras capas del cuerpo. (American Cancer Society, 2019).

#### 4.1.1. Tipos de técnicas quirúrgicas

- Cirugía Abierta: En la cirugía tradicional “abierta”, el cirujano usa una sola incisión ("Cirugía Laparoscópica | ASCRS", n.d.) para realizar las operaciones necesarias.
- Cirugía Mínimamente Invasiva (MIS): En esta clase de cirugía, los médicos hacen uso de ciertas técnicas para realizar operaciones que produzcan menos daños en el cuerpo que una cirugía abierta. Comúnmente, la MIS se asocia con menos dolor y menos complicaciones. (Foundation for Medical Education and Research (MFMER, 2019).
- Cirugía endoscópica transluminal (NOTES): NOTES, se caracteriza por tener la capacidad de realizar técnicas quirúrgicas intraperitoneales mediante la entrada en la cavidad peritoneal y a través de los orificios naturales como el estómago, vagina, recto, vejiga. (Noguera Aguilar et al. 2010).

### 4.2. Laparoscopia

La laparoscopia es una cirugía que se caracteriza por ser MIS, pues esta se realiza por medio de pequeñas incisiones ya sea una o más. (Foundation for Medical Education and Research (MFMER), 2019)

Esta consiste en una exploración de la cavidad abdominal a través de ópticas introducida por orificios en el abdomen, que tiene como objetivo la observación de los órganos abdominales, por medio de incisiones pequeñas (Ortega-Deballona, Delgado-Millána & Jover-Navalónb, n.d.). Específicamente la superficie peritoneal en su gran mayoría, parte del hígado, vesícula, estómago, píloro y primera porción del duodeno, bazo, intestino delgado, colon y órganos pélvicos (Scelza, n.d.).

El dispositivo implementado para practicar la laparoscopia cuenta con una luz y una cámara de video, enviando imágenes de los órganos a una pantalla de computadora para que el médico pueda ver los órganos, los tejidos y los instrumentos quirúrgicos (Intermountain Healthcare, 2016), evitando la necesidad de hacer una operación más grande e invasiva más adelante (Intermountain Healthcare, 2016) (Vanuno, 2005).

Esta técnica quirúrgica es uno de los exámenes más importantes y beneficiosos para lograr determinar un diagnóstico frente a alguna patología a lo largo de la zona pélvica abdominal.

#### 4.2.1. Método de examen

Para realizar la técnica de laparoscopia, se debe tener en cuenta:

- La administración anestesia para que el paciente se duerma (Intermountain Healthcare, 2016).
- La realización de pequeñas incisiones cerca del ombligo (Intermountain Healthcare, 2016).
- Utilizar el laparoscopio para ver si hay daños o alguna enfermedad (Intermountain Healthcare, 2016).
- El laparoscopio y los instrumentos se retiran del cuerpo (Intermountain Healthcare, 2016).

Para realizar la intervención quirúrgica de laparoscopia, se hacen tres pequeñas incisiones de acuerdo a la distribución.

1. La primera de 0.01 m (10 mm) se hace cercana al ombligo o sobre éste, para introducir el sistema de visión (Intermountain Healthcare, 2016).
2. La segunda de 0.01 m (10 mm) se realiza 0.05 m por debajo del xifoides en la parte superior del abdomen, por la cual se introducen los instrumentos para cortar, disecar y coagular durante la intervención (Intermountain Healthcare, 2016).
3. La tercera de entre 0.005 m (5 mm) y 0.01 m (10 mm) se realiza 0.05 m debajo de las costillas del lado derecho del paciente, ésta se utiliza para introducir pinzas que mueven el hígado, la vesícula y sus conductos (Intermountain Healthcare, 2016).

#### 4.2.2. Herramientas usadas (Instrumentación quirúrgica)

Instrumentos básicos:

- Laparoscopio (Scelza, n.d.).
- Tijeras (Scelza, n.d.).
- Disector (Scelza, n.d.).
- Porta aguja (Scelza, n.d.).
- Pinza de presión (Scelza, n.d.).
- Bisturís (Scelza, n.d.).
- Clipadora (Scelza, n.d.).
- Máquina de sutura (Scelza, n.d.).
- Sistema irrigador y aspirador (Scelza, n.d.).

#### 4.2.3. Usos

En las personas con síntomas abdominales, la cirugía laparoscópica se puede usar para diagnosticar: ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019)

- Tumores y otras protuberancias.
- Obstrucciones.
- Sangrado sin motivo aparente ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019)
- Infecciones. ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019)
- Fibromas, tumores que se forman dentro o fuera del útero. La mayoría no son cancerosos. ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019)
- Quistes ováricos, bolsitas llenas de líquido que se forman en un ovario o sobre su superficie. ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019)
- Endometriosis, enfermedad en la que el tejido que normalmente recubre el interior del útero crece fuera de él. ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019)
- Prolapso pélvico, un problema en el que los órganos reproductores protruyen y salen por la vagina. ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019)
- Extraer un embarazo ectópico, un embarazo que crece fuera del útero. El óvulo fertilizado no puede sobrevivir. Para una mujer embarazada, puede ser mortal. ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019)
- Hacer una histerectomía, la extirpación del útero. La histerectomía se puede hacer para tratar un cáncer, un sangrado anormal u otras enfermedades. ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019)

- Hacer una ligadura de trompas, un procedimiento para prevenir el embarazo bloqueando las trompas de Falopio. ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019).
- Tratar la incontinencia urinaria, la pérdida accidental o involuntaria de orina. ("Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio", 2019).

#### 4.2.4. Ergonomía del médico durante la cirugía laparoscópica.

La ergonomía se define como la ciencia que estudia la relación del cuerpo humano con relación a su entorno teniendo en cuenta aspectos como las posturas que se realizan al momento de elaborar una tarea determinada, el manejo de cargas, los movimientos repetitivos, entre otros; estos aspectos tienen como objetivo la reducción de fatigas o alteraciones que se pueden producir por la sobrecarga física (Velasco, 2013).

Básicamente el criterio fundamental de ergonomía que se pretende para los cirujanos al momento de que estos estén realizando una intervención quirúrgica, es la disposición de un material de trabajo adecuado, ya que gracias a esto se procura que se generen complicaciones como la aparición de fatiga muscular y dolencias musculoesqueléticas asociadas al procedimiento, que pueden causar la disminución de la precisión y el rendimiento durante el acto quirúrgico (Pérez Duarte et al., 2012).

A pesar de las múltiples ventajas que presenta para los pacientes la realización de una técnica quirúrgica mínimamente invasiva como lo es la laparoscopia, esta intervención, genera una serie de riesgos para el cirujano que la está realizando; estos riesgos van relacionados directamente a la poca libertad que tienen al momento de realizar movimientos durante el procedimiento, provocando así, la adopción de posturas forzadas y ocasionando en ellos una mayor fatiga muscular en comparación con las cirugías convencionales (Pérez Duarte et al., 2012).

La postura del cirujano durante una cirugía laparoscópica se ve influenciada principalmente por los siguientes cinco aspectos:

1. Posturas corporales estáticas.
2. La altura de la mesa quirúrgica.
3. El diseño del instrumental quirúrgico.
4. La posición del monitor.
5. El empleo de pedales.

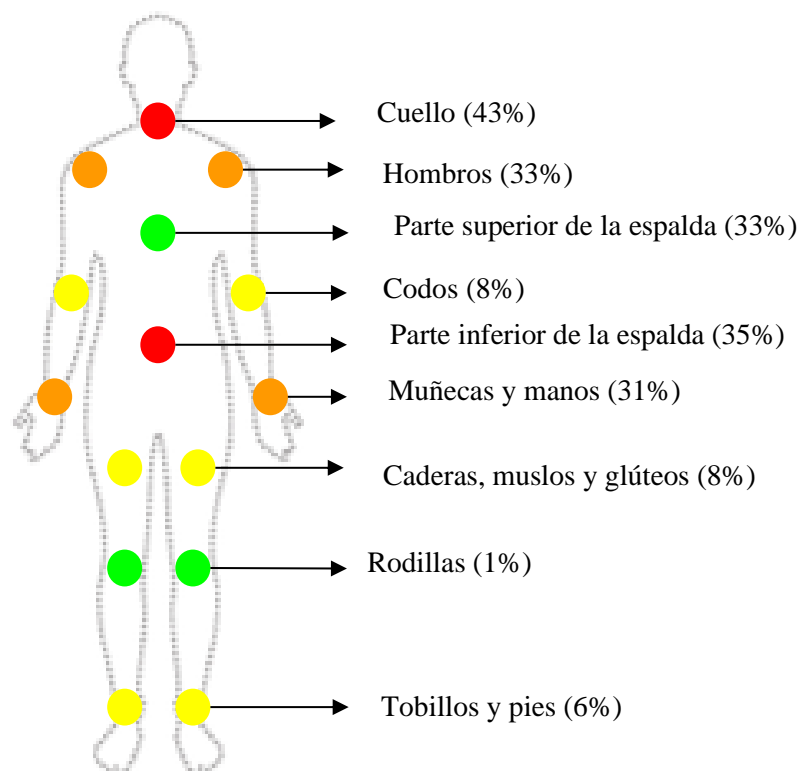
En la mayoría de los casos cuando se realiza una laparoscopia, esta se lleva a cabo en salas de operaciones diseñadas para cirugías convencionales, es por esto que las pautas para una configuración ergonómica de la posición los instrumentos son mínimas, puesto que los aspectos mencionados anteriormente no están orientados a la función que deben cumplir en ese momento, ocasionado que no se tenga en cuenta la facilidad del uso de los instrumentos y el confort del cirujano (Zeheter, Kaltenbacher. Wayand, & Shamiyeh, 2006). Por otra lado, también se tiene que tener en cuenta que esta intervención quirúrgica al contar un amplio número de instrumentos que se visualizan a través una pantalla bidimensional por medio de un laparoscopio, ocasiona que el cirujano pierda toda sensación táctil causando una restricción en su movilidad a causa de los múltiples orificios fijos que se realizan para la introducción los instrumentos laparoscópicos, ocasionado así, que una tarea que dura segundos en cirugía convencional, en la laparoscopia pueda llegar a durar hasta minutos, por lo que los cirujanos se ven obligados a realizar posturas forzadas e incómodas durante largos periodos de tiempo que provocan fatiga tanto física como mental (Nguyen et al, 2001).

En diferentes estudios que se han realizado hasta la actualidad sobre la ergonomía de los cirujanos en este tipo de intervención quirúrgica, se ha demostrado que el instrumental laparoscópico que se utiliza durante el procedimiento incrementa significativamente la actividad muscular en la zona del hombro, del antebrazo y de la mano (Berguer, Forkey. & Smith, 2001), causando de este modo la aparición de

fatiga muscular local y entumecimiento en las extremidades superiores y en la zona del cuello-hombro, por esta razón es que se afirma que los médicos especializados en la realización de laparoscopia son un grupo de profesionales con un elevado riesgo de padecer lesiones musculoesqueléticas (Breedveld, Meijer, Jakimowicz, & van Lunteren, 2004).

Gracias a la realización de un estudio titulado “Problemas músculo-esqueléticos en los cirujanos de laparoscopia” elaborado por la facultad de ciencias del deporte de la universidad Extremadura en España, en este trabajo se logró realizar un análisis sobre las tareas, herramientas utilizadas y modos de producción asociados con el desempeño que tienen los cirujanos al momento de realizar la laparoscopia, teniendo como objetivo principal estudiar la epidemiología de las molestias musculoesqueléticas que sufren los cirujanos con el fin de conocer su intensidad, localización y frecuencia.

Allí lograron obtener datos de 52 cirujanos con rangos de edad entre 30 y 65 años con aproximadamente un trabajo semanal de 7 a 13 horas, en donde se comprobó que estos profesionales sufren de problemas musculoesqueléticos localizados específicamente en las zonas que se pueden observar en la figura 2.



*Figura 2 Zonas del cuerpo de un cirujano afectadas por lesiones musculoesqueléticas durante la realización de una laparoscopia.*

Con respecto al manejo de la instrumentación utilizada, los cirujanos encuestados expresaron experimentar ciertas dificultades en el manejo de las mismas, en donde: El laparoscopio presenta un 39% de dificultad en su uso, por sus movimientos limitados y su poco rango de visualización; el disector un 4% de dificultad; el aspirador - irrigador un 15% de dificultad; tijeras un 6% de dificultad; porta-agujas un 22% de dificultad; equipos de diatermia un 6% de dificultad y el monitor de video un 8% de dificultad (Skledapoulos & Momno, 2008).

### 4.3. Anatomía Implicada en la laparoscopia

Órgano	Función
Apéndice	Es un órgano linfoide (tejido linfático), el cual cuenta con funciones inmunitarias; está más desarrollado en los niños, tiende a atrofiarse y a enriquecerse en tejido conjuntivo con la edad. Este es normalmente flexuoso y está ubicado en la vertiente izquierda del ciego por debajo del ángulo ileocecal (García Porrero <i>et al.</i> , 2013).
Bazo	Este órgano, está integrado en el sistema linfático, el cual tiene como objetivo combatir infecciones y mantener el equilibrio de los líquidos del cuerpo además de ayudar a controlar la cantidad de sangre del organismo. (Medlineplus, 2020).
Estómago	Es un órgano que forma parte del sistema digestivo, el cual tiene forma de tubo dilatado, estos presentan estructuras musculares mucosas, además de estar ubicado entre el esófago y el duodeno. Este órgano es el encargado de almacenar transitoriamente los alimentos deglutidos, donde comienza la etapa de la digestión (García Porrero <i>et al.</i> , 2013).
Hígado	Es el órgano encargado de regular los niveles de sustancias químicas en la sangre y secretar bilis, de tal manera que ayuda a transportar los desechos, como también procesa la sangre que sale del estómago y los intestinos, separando sus componentes, equilibrando y creando nutrientes. (Stanford Children 's Health, 2020).
Intestino Grueso	Este órgano tiene como función la absorción de líquidos y en la elaboración de las heces, se encuentra en la parte terminal del tubo digestivo, desde allí este se extiende desde el íleon hasta el orificio anal. Mide aproximadamente 1.5 m. y está conformado por de tres partes: ciego (unido el apéndice vermiforme), colon y recto. (García Porrero <i>et al.</i> , 2013).
Intestino Delgado	Este órgano está conformado por 3 segmentos, el primero corresponde al duodeno, el segundo y tercer segmento del intestino delgado está constituido por el yeyuno y el íleon, situadas debajo del duodeno encargadas de la absorción de nutrientes y grasas.. (Atenodoro R. Ruiz, Jr, 2017)
Vesícula Biliar	Este órgano se encarga de almacenar la bilis producida por el hígado con el fin de dirigir las grasas. (Medlineplus, 2020)

Tabla 1 Anatomía Implicada en la laparoscopia

### 4.4. Enfermedades Asociadas a la Laparoscopia

#### 4.4.1. Apendicitis

La apendicitis constituye una versión de una diverticulitis (inflamación o infección de la zona), en la cual el apéndice representa un largo divertículo con una luz estrecha, ocasionando una obstrucción al final del intestino grueso, ya sea por materia fecal espesada (fecalito), hiperplasia linfoidea, cuerpos extraños, parásitos, tumor carcinoide, etc (Cuervo, 2014).

Los síntomas más frecuentes y característicos de la apendicitis consisten en la aparición de dolor abdominal difuso o localizado en epigastrio, que migra a fosa ilíaca derecha, asociado a fiebre, anorexia, náuseas y/o vómitos (Zarate, Garlaschi & Raue, n.d.). La mayoría de los estudios concuerdan en que el grupo de edad más propenso a padecer esta enfermedad oscila entre los 10 y 19 años, en donde los hombres resultan ser el género más afectado, con una frecuencia de 8,6 %, en comparación con un 6,7% en mujeres (Zarate, Garlaschi & Raue, n.d.).

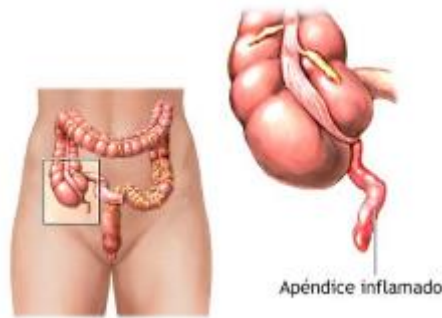


Figura 3 . Apendicitis Tomado de: (MedlinePlus, 2019)

#### 4.5. Tipos de laparoscopia

- 4.5.1. Colectomía Laparoscópica
- 4.5.2. **Apendicetomía Laparoscópica**
- 4.5.3. Resección Laparoscópica de Colón
- 4.5.4. Laparoscopia Urológica

#### 4.6. Apendicetomía Laparoscópica

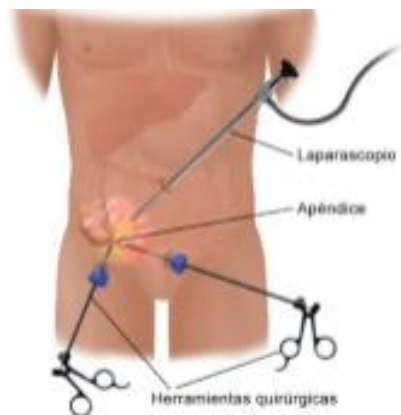


Figura 4 Apendicetomía Laparoscópica Tomado de: (Somaruga, s.f)

##### 4.6.1.1. ¿Cómo se realiza?

- Esta hace uso de una cánula (instrumento estrecho y tubular), el cirujano accede al abdomen (sages, s.f). por medio de un laparoscopio que se inserta a través de una cánula, lo cual ofrece al cirujano cierta vista de los órganos internos del paciente en una pantalla de televisión (sages, s.f).
- Posteriormente se insertan varias cánulas adicionales a fin de permitir que el cirujano trabaje por dentro y extirpar el apéndice (sages, s.f).
- La totalidad del procedimiento se puede completar a través de las cánulas o al alargar una de las pequeñas incisiones para las cánulas (sages, s.f).
- Es posible que se coloque un drenaje durante el procedimiento (sages, s.f).

## 4.7. Robótica

### 4.7.1. Robots Quirúrgicos

El uso de la robótica en la medicina juega un papel fundamental puesto a que se ha convertido en una herramienta que permite incrementar la exactitud en los movimientos y la precisión de maniobras para obtener una ejecución exitosa de procedimientos quirúrgicos (Reyes Cortés, 2011).

En forma general los robots están constituidos por los siguientes elementos y componentes:

- Articulaciones: Son uniones formadas, las cuales permiten tanto la conexión como el movimiento de cada uno de los segmentos que constituyen el robot, a partir del tipo movimiento que se desee para el robot, las articulaciones pueden ser rotacionales o lineales también conocidas como prismáticas (Reyes Cortés, 2011).
- Actuadores: Estos elementos son los que permiten la suministración de las señales necesarias para que las articulaciones puedan generar movimientos (Reyes Cortés, 2011).
- Sensores: Estos proporcionan la información del estado interno del robot, en donde la posición y la velocidad siendo estas las variables más comunes en el sistema de sensores y así por medio de estos se puede mejorar la percepción del robot ya que permiten responder a su entorno de manera versátil y autónoma (Reyes Cortés, 2011).
- Sistema mecánico: El cual consiste en la secuencia de eslabones o también llamados segmentos conectados por medio de las articulaciones (Reyes Cortés, 2011).

Consola de control: Este se compone por un sistema electrónico que cuenta con una etapa de potencia encargada de suministrar la energía suficiente demanda por el robot para que este genere movimiento, como también cuenta con una serie de algoritmos de control con el fin de que este desarrolle sus tareas (Reyes Cortés, 2011).

### 4.7.2. Características Geométricas y Funcionales de los Robots continuo-redundantes.

#### 4.7.2.1. Características generales

Debido que el modelo robótico *snake cable robot* está inspirando tanto por la locomoción como por la morfología de las serpientes, esto permite que la estructura mecánica del mismo esté diseñada para que tenga un tamaño pequeño y un gran número de grados de libertad en cuanto a sus movimientos, dando como garantía que se pueda desplazar en espacios confinados e irregulares sin problema alguno (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

Gracias a su base biomimética, este tipo de robot permiten un movimiento hacia adelante y hacia atrás logrando la realización de diferentes posiciones que posibilitan la inspección total de una zona reducida, además de esto, gracias a la flexibilidad que presenta por sus múltiples módulos y segmentos que conforman la columna vertebral del robot, hace que los movimientos tengan mayor precisión al realizarlos facilitando así su capacidad de análisis en la zona (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).

#### 4.7.2.2. Características geométricas

La configuración modular es una de las principales características para la realización de simulaciones de robots basados en el modelo continuo redundante *snake cable robot*, debido a que simplifica tanto el diseño como el modelado y la construcción del mismo (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).



Estas características geométricas no sólo permiten disponer de la longitud que se requiere al momento del diseño de un robot, si no también considera cada módulo como una etapa que va dependiendo de las que realizan las serpientes en un movimientos (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

Uno de los objetivos que se tienen que tener en cuenta al momento de la realización de un robot continuo redundante, es tener en cuenta tanto la cinemática inversa como la directa, tomando en consideración tanto la distancia mínima ( $h$ ) del punto central que pueden llegar a tener los módulos, como la longitud ( $L$ ) de cada uno de ellos (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013), como se puede ver a continuación (Figura 5).

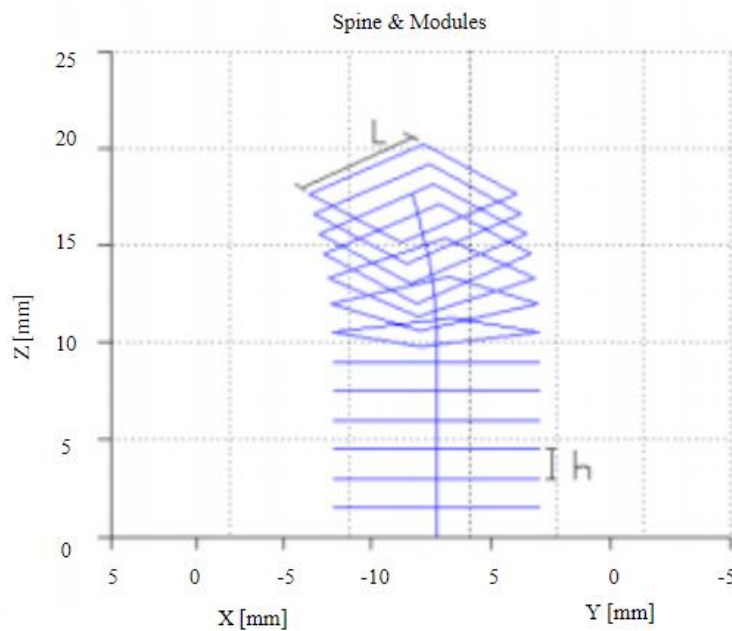


Figura 5 Representación gráfica de las longitudes características.  $h$  y  $L$ , de un robot continuo redundante.

Los parámetros  $L$  y  $h$  son los que permiten la obtención de una gran flexibilidad, siempre y cuando se cumpla la relación expresada en la siguiente ecuación (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013):

$$\frac{h}{L} \leq 1$$

Ecuación 1 Relación entre las variables  $h$  y  $L$ .

Tan  $L$  como  $h$  son importantes para el desarrollo de robots continuo-redundantes, puesto que estas variables cuentan con una relación directa descrita por el ángulo de torsión de cada uno de los módulos, en otras palabras, se puede decir que entre más alta sea la relación entre dichas variables, más rígido van a ser los movimientos del robot (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).

#### 4.7.2.3. Geometría diferencial de curvas

La geometría diferencial de las curvas es la que funciona como base en el desarrollo tanto de la cinemática como de la dinámica de un robot continuo. Cuando se trata con estructuras redundantes, se debe realizar la revisión del sistema de coordenadas con el propósito de que este permita describir cuáles son las propiedades cinemáticas a lo largo de una curva continuo en un espacio euclidiano tridimensional (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).

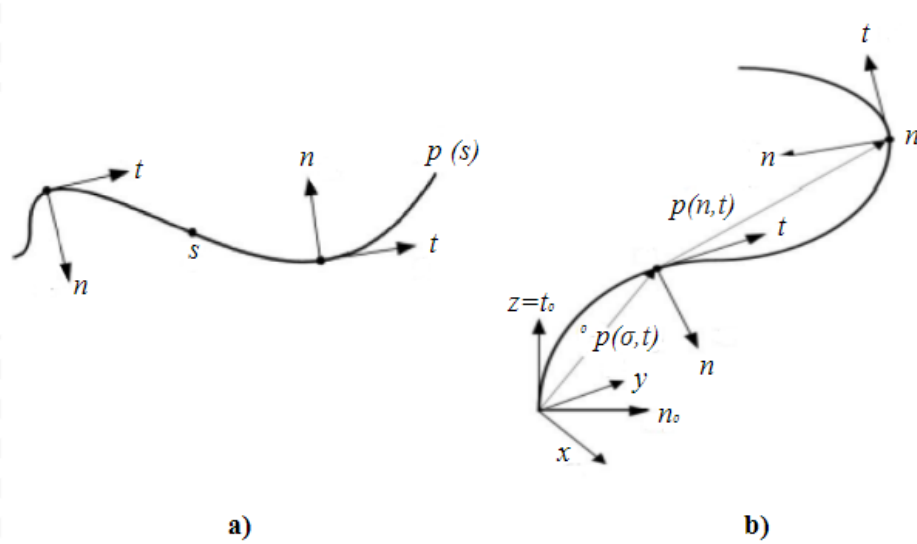


Figura 6 Descripción de las curvas en el espacio (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018)

En la figura 6. se puede observar que la curva  $p(s)$ , está parametrizada gracias a la longitud de la curva  $s$ , en donde tomará un valor igual a  $[0,1]$ . Sabiendo lo anterior, se puede dar a lugar el marco F-S. el cual va a estar compuesto por tres vectores principales, los cuales se definen como: vector unitario  $t(s)$  que está tangente de la curva  $p(s)$  en la posición de  $s$ ; el vector unidad  $n(s)$  normal a la curva asociada a  $t(s)$ ; y finalmente el vector unitario binomial  $b(s)=t(s)*n(s)$ . Gracias a esto, el tramo F-S se denomina comúnmente como trama TNB y los tres ejes como torsión, curvatura y radio de curvatura, allí se puede observar claramente que este marco es local en el movimiento de la curva (cabe aclarar que no es necesario que esta sea constante), en donde su evolución está definida por Frenet-Serret como se puede observar en la ecuación 2. (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).

$$\begin{aligned}\frac{dt(s)}{ds} &= k(s)n(s) \\ \frac{dn(s)}{ds} &= -k(s)t(s) + \tau(s)b(s) \\ \frac{db(s)}{ds} &= -\tau(s)n(s)\end{aligned}$$

Ecuación 2 Evolución de la curva (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018)

Además de la ecuación descrita anteriormente, también se debe tener en cuenta el teorema de Vogt's, el cual permite definir por medio puntos finales de un arco en espiral los cambios tanto de disminución o aumento de la curvatura. También se debe tener en cuenta que el ángulo de la tangente al arco en B debe ser igual a de la tangente en A con  $AB=0$ , pero esto solamente se puede cumplir si la curvatura es igual a cero (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018), como se puede observar en la Figura 7.

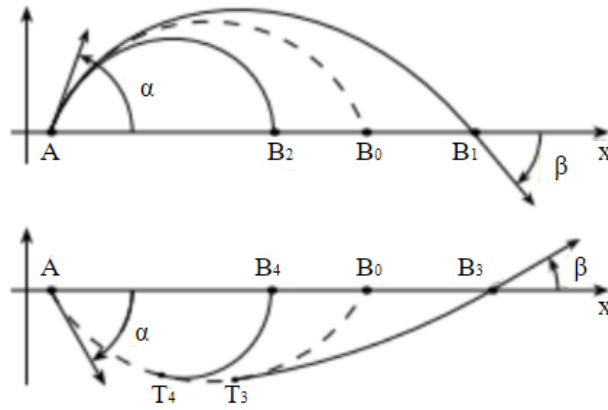


Figura 7 Descripción del teorema del Vogt 's para una curva. (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018)

#### 4.7.3. Cinemática de los Robots Continuo-Redundantes

La cinemática es la rama de la física que aborda la descripción geométrica del movimiento de los sistemas mecánicos, y por ende tiene presente las fuerzas que los producen. (Reyes Cortés, 2011). Esta permitirá analizar y diseñar el desplazamiento de las trayectorias del robot, así como de la orientación de la herramienta de trabajo (Reyes Cortés, 2011).

El estudio de la cinemática en robótica no involucra ecuaciones diferenciales como en el caso de la dinámica, debido a que la cinemática directa es la encargada de convertir las coordenadas articulares del robot a coordenadas cartesianas, a través de una función vectorial de la siguiente forma (Reyes Cortés, 2011):

$$[x \ y \ z \ \theta \ \phi \ \psi]^T = fR(q)$$

*Ecuación 3 Función Vectorial de las coordenadas cartesianas (Reyes Cortés, 2011).*

Donde  $\mathbf{q} \in \mathbf{R}^n$  representa el vector de posiciones articulares del robot,  $\theta \ \phi \ \psi \in \mathbf{R}$  son la orientación de la herramienta final del robot,  $fR$  es una función continua y diferenciable en la variable de estado  $\mathbf{q}$  y  $[x \ y \ z]^T$  son las coordenadas cartesianas (Reyes Cortés, 2011).

Hacer uso de la cinemática directa resulta útil, debido a que es mucho más fácil programar al robot en coordenadas cartesianas que en ángulos (Reyes Cortés, 2011). Para la representación de movimientos del robot es necesario el uso de sistemas coordenados cartesianos los cuales especifican tanto posición como orientación del extremo final del robot. Estas herramientas matemáticas que involucran operaciones de rotación y traslación, dentro de una matriz que estructura el modelo de cinemática directa llamado transformación homogénea, en donde también se puede hacer uso de la cinemática inversa, ya que esta permite la relación entre la posición cartesiana y la orientación de la herramienta colocada en el extremo final del robot con el fin de poder obtener cuáles son los ángulos que tendrán cada una de las articulaciones del robot (Reyes Cortés, 2011).

Además de lo mencionado, también se debe tener como base teórica un enfoque de modelado, esto con el fin de poder lograr las configuraciones deseadas (movimientos), debido a que se deben establecer relaciones entre tales movimientos y las cantidades medibles (es decir, las longitudes de cada uno de los segmentos) (Tonapi, 2014), en donde para poder llevar a cabo lo dicho anteriormente se debe tener en cuenta:

- Modelo 2D (Planar)

### Determinación de las variables de cambio de longitud y comprensión del modelo robótico

Estas variables principalmente se basan en las fórmulas cinemáticas del avance continuo del robot, debido a que tienen como objetivo principal incorporar los efectos del acoplamiento entre flexión y extensión de cada uno de los segmentos que constituyen el modelo robótico continuo redundante (Tonapi, 2014)

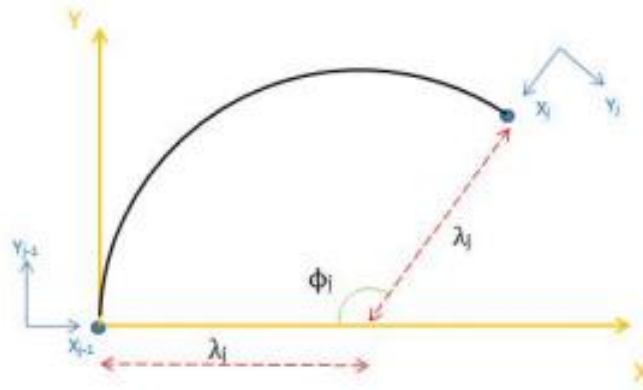


Figura 8 Esquema de un segmento del robot con sus variables geométricas (Tonapi, 2014)

Cada uno de los segmentos que incorporan al robot se deben aproximar mediante modelos de curvatura constante utilizando variables de forma, para determinar  $\lambda$ ,  $\varphi$  y  $\theta$  como se muestra en la figura 8; en donde  $\lambda$  es el radio de la curvatura del segmento,  $\varphi$  determina la elevación del ángulo, y  $\theta$  es ángulo de flexión en función de los cambios de longitud ( $g_j = [l_{j1} \ l_{j2} \ l_{j3}]^T$ ) con respecto a la longitud original ( $L_0$ ) (Tonapi, 2014), en donde son representadas por medio del uso de la ecuación 4.

$$\lambda_j(q_j) = \frac{(3L_{j0} + l_{j1} + l_{j2} + l_{j3})r_j}{2\sqrt{l_{j1}^2 + l_{j2}^2 + l_{j3}^2 - l_{j1}l_{j2} - l_{j2}l_{j3} - l_{j1}l_{j3}}}$$

$$\varphi_j(q_j) = \frac{2\sqrt{l_{j1}^2 + l_{j2}^2 + l_{j3}^2 - l_{j1}l_{j2} - l_{j2}l_{j3} - l_{j1}l_{j3}}}{3r_j}$$

$$\theta_j(q_j) = \tan^{-1}\left\{\frac{\sqrt{3}(l_{j3} - l_{j2})}{l_{j2} + l_{j3} - 2l_{j1}}\right\}$$

$$s_j = \frac{s_j = \lambda_j \varphi_j}{3}$$

$$s_j = \frac{(3L_{j0} + l_{j1} + l_{j2} + l_{j3})}{3}$$

Ecuación 4 Longitudes del arco de curvatura del segmento (Tonapi, 2014).

Sin embargo, la formulación anterior no se puede aplicar directamente, puesto que el modelo robótico continuo redundante *snake cable robot* presenta características de contracción, que combinan la flexión de los segmentos. Por esta razón, para modelar este efecto, se debe introducir un factor de comprensión uniforme  $c_j \in \mathbb{R}^+$  en la formulación cinemática de  $\lambda$  y en  $s$  como se muestra en la ecuación 5:

$$\lambda_j(q_j) = \frac{(3(L_{j0} + c_j) + l_{j1} + l_{j2} + l_{j3})r_j}{2\sqrt{l_{j1}^2 + l_{j2}^2 + l_{j3}^2 - l_{j1}l_{j2} - l_{j2}l_{j3} - l_{j1}l_{j3}}}$$

$$s_j = \frac{(3(L_{j0} + c_j) + l_{j1} + l_{j2} + l_{j3})}{3}$$

Ecuación 5 Factor de compresión uniforme (Tonapi, 2014).

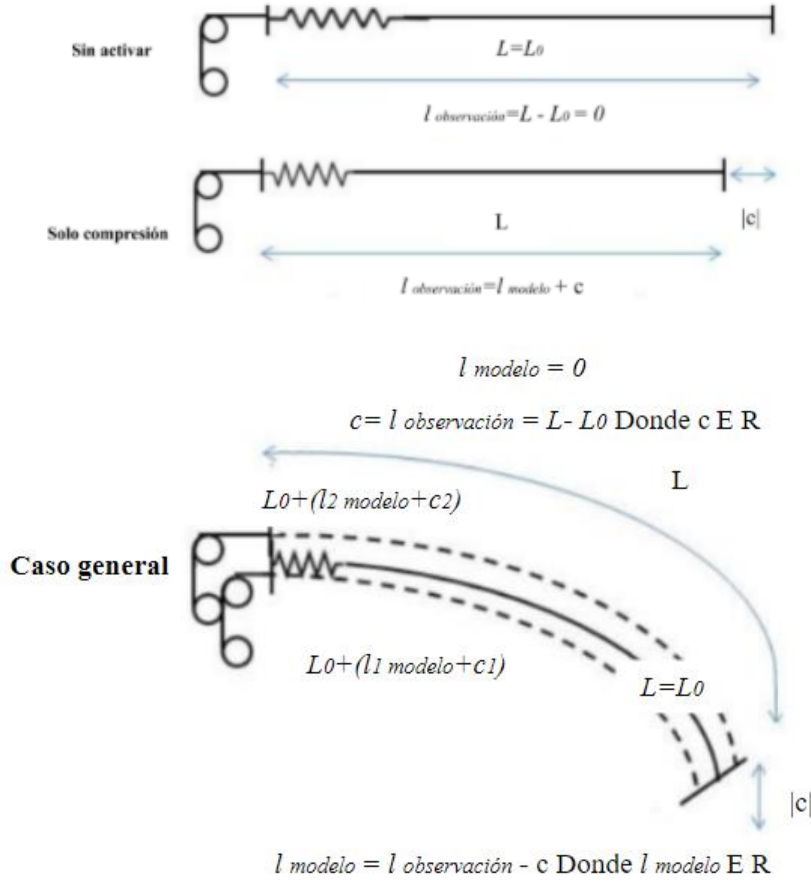


Figura 9 Modelos de cambio de apariencia y longitud (Tonapi, 2014)

En la figura 9 se puede ver una representación de uno de los cables o tendones que controlan columna vertebral del segmento, en donde inicialmente se cuenta con una longitud inicial  $L_0$ ; estos tendones están conectados a los respectivos motores a través de una polea. Cuando la columna vertebral está en estado de relajación, el cambio de longitud  $l_{observación} = 0$ , así mismo cuando todos los tendones se tiran de la misma manera que en la figura 9 (centro), la columna vertebral se comprime y se convierte en  $L - L_0$ , y representa el cambio de longitud observado en el actuador. Sin embargo, en un caso general como lo muestra la imagen inferior de la figura 9, tanto la compresión como la flexión ocurren simultáneamente y el cambio de longitud  $l_{observación}$  contiene tanto efectos de compresión como de flexión (Tonapi, 2014).

Por medio de los cambios derivados de las longitudes y las compresiones generadas en función la cinemática inversa (Ver ecuación 2), el rendimiento cinemático del *snake cable robot* puede predecirse de manera efectiva., teniendo en cuenta la longitud original no activada  $L_{j0}$  con los valores de compresión adicionales  $c_{ji}$  para las secciones medias y distales del segmento del robot; dichas formulaciones modificadas se pueden implementar por medio de las siguientes ecuaciones que permiten

describir la configuración de la forma del segmento que presenta modelo robótico continuo redundante, estas son:

$$\lambda_j(\sigma_{ji}) = \frac{(3(L_{j0} + n_j \sum_{i=1}^3 \sigma_{ji}) + m_j \sum_{i=1}^3 \sigma_{ji})r_j}{2m \sqrt{\sigma_{j1}^2 + \sigma_{j2}^2 + \sigma_{j3}^2 - \sigma_{j1} \sigma_{j2} - \sigma_{j2} \sigma_{j3} - \sigma_{j1} \sigma_{j3}}}$$

$$\varphi_j(\sigma_{ji}) = \frac{2m \sqrt{\sigma_{j1}^2 + \sigma_{j2}^2 + \sigma_{j3}^2 - \sigma_{j1} \sigma_{j2} - \sigma_{j2} \sigma_{j3} - \sigma_{j1} \sigma_{j3}}}{3 r_j}$$

*Ecuación 6 Configuración de la forma del segmento en un plano 2D (Tonapi, 2014).*

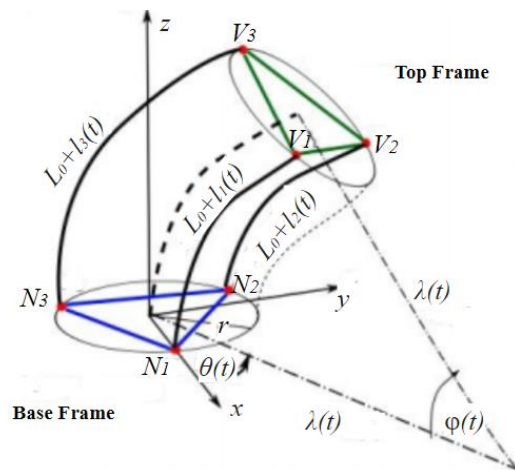
Cabe aclarar que en esta sección solamente se está analizando el ángulo de flexión  $\theta = \theta$  debido a que se está trabajando en un espacio bidimensional.

- Modelo 3D (Espacial)

### **Determinación de las variables de cambio de longitud y compresión del modelo robótico**

Esta sección se enfocará en la determinación de las variables tanto de longitud como de compresión enfocado al caso espacial (3D).

Para poder calcular el cambio de longitud modelado directamente relacionado con el ángulo  $\varphi$ , pues ahora este depende de más de un cambio de longitud, así mismo,  $\lambda$  también va a depender de los cambios ocasionados por los múltiples tenedores en cuanto a su longitud y compresión. Para este caso específico existe un sistema de ecuaciones que está definido con aún más incógnitas que en el caso planar, las cuales son: Un cambio de compresión y tres cambios de longitud (en donde se debe suponer que la compresión se distribuye por igual en los tres cambios de longitud), los cuáles permitirán que el cambio de la longitud obtenida cause una flexión efectiva (Tonapi, 2014).



*Figura 10 Esquema de un segmento del robot con sus variables geométricas (Tonapi, 2014).*

Ya sabiendo que  $\lambda$ ,  $\varphi$  y  $\theta$  son los que permiten la configuración del módulo (véase en sección 4.8.5.1.1.), el cambio de longitud para un tendón se puede calcular mediante la siguiente manera a partir de la geometría básica:

$$l_{j1 \text{ observado}} = \varphi_j(\lambda_j - r_j \cos \theta_j) - L_{j0}$$

*Ecuación 7 Cambios de longitud (Tonapi, 2014)*

En donde  $\lambda$  representa el radio del arco y  $\varphi$  es el ángulo subtendido por el, en necesario tener en cuenta que los tendones se tienen que curvar de manera que coincidan con la curvatura de la columna vertebral del segmento, es por esto que el parámetro  $r$  va a estar determinado por la distancia entre el centro del módulo hasta la ubicación del tendón (Tonapi, 2014).

Por otro lado, dado que la compresión ( $c_j$ ) es el cambio máximo de longitud, este puede calcular como se muestra en la ecuación 8:

$$\begin{aligned} l_{j1} &= l_{1 \text{ observación}} - c_j \\ l_{j2} &= l_{2 \text{ observación}} - c_j \\ l_{j3} &= l_{3 \text{ observación}} - c_j \end{aligned}$$

*Ecuación 8 Cambios de compresión (Tonapi, 2014)*

Gracias a las ecuaciones descritas anteriormente, tanto las compresiones como los cambios de longitudes se pueden expresar por medio de modelos cinemáticos (Tonapi, 2014), como lo indica la ecuación 9:

$$\begin{aligned} c_j &= g_c(\lambda_j, \varphi_j, \theta_j) \\ l_{j1} &= g_{l_{j1}}(\lambda_j, \varphi_j, \theta_j) \\ l_{j2} &= g_{l_{j2}}(\lambda_j, \varphi_j, \theta_j) \\ l_{j3} &= g_{l_{j3}}(\lambda_j, \varphi_j, \theta_j) \end{aligned}$$

*Ecuación 9 Modelos cinemáticos (Tonapi, 2014)*

Usando las aproximaciones descritas en las funciones derivadas de los cambios de longitudes y compresiones, la formulación cinemática modificada para describir la configuración de la forma del segmento del modelo robótico continuo redundante en un espacio en 3D (Tonapi, 2014), se expresa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \lambda_j(\sigma_{ji}) &= \frac{(3(L_{j0} + c_j) + l_{j1} + l_{j2} + l_{j3})r_j}{2\sqrt{l_{j1}^2 + l_{j2}^2 + l_{j3}^2 - l_{j1}l_{j2} - l_{j2}l_{j3} - l_{j1}l_{j3}}} \\ \varphi_j(\sigma_{ji}) &= \frac{2\sqrt{l_{j1}^2 + l_{j2}^2 + l_{j3}^2 - l_{j1}l_{j2} - l_{j2}l_{j3} - l_{j1}l_{j3}}}{3r_j} \\ \theta(\sigma_{ji}) &= \tan^{-1}\left\{\frac{\sqrt{3}(l_{j3} - l_{j2})}{l_{j3} + l_{j2} + 2l_{j1}}\right\} \end{aligned}$$

*Ecuación 10 Configuración de la forma del segmento en un espacio 3D (Tonapi, 2014).*

En donde cabe resaltar que tanto los cambios de longitud como de compresión van a estar dados por funciones polinómicas (Tonapi, 2014).

#### 4.7.3.1. Análisis cinemático

### Planificación de movimientos

Gracias a que los módulos de la estructura que integran a un snake *cable robot* presentan formas redundantes, su análisis cinemático se hace más complejo. El objetivo de esta planificación de movimientos es el estudio del control espacial de todas las estructuras que integran al robot, de modo

que este se puede mover en una zona irregular mientras se fija uno de los dos extremos (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

Para el caso de un robot quirúrgico, sus movimientos deben ser suaves para así evitar dañar algún tejido y así mismo facilitar su paso a través del espacio que está inspeccionado, puesto que allí se pueden encontrar superficies irregulares, curvilíneos y resbaladizo (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

En cuanto al análisis de los movimientos, hay que tener en cuenta que la cinemática inversa es la que se encarga de la creación de secuencias que permite evaluar tanto del coste energético como en la suavidad de los movimientos, dando así paso al proceso de planificación, que conlleva directamente a la cinemática directa la cual es la que permite la evaluación de la posición y orientación de cada uno de los módulos permitiendo así una representación gráfica de los mismos (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

Para desglosar mejor la información del párrafo anterior, a continuación, se van a mencionar las definiciones y características de cada una de las variables presentes tanto en la cinemática inversa como en la directa, las cuáles son:

- Coste energético: Su evaluación se basa en el intercambio de energía misma establecida entre cada uno de los módulos con el fin de obtener la configuración deseada, por esta razón es que después de recibir una configuración inicial y final ( $M_i, M_f$  respectivamente), se obtienen todas las matrices relacionadas con el cambio de cada una de las posiciones del módulo, permitiendo así una mayor autonomía en los movimientos del dispositivo (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).
- Suavidad: En cuanto a la suavidad de los movimientos, es primordial elaborar una selección de valores intermedios para cada uno de los módulos, esto con el fin de que su vector de salida sea una secuencia de configuraciones finales ( $M_f$ ) lo más aproximado al punto deseado en el bloque de cinemática inversa (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).
- Posición y orientación: Tiene como objetivo principal la generación de secuencias de configuraciones  $M_f$  que se aproximen tanto a la posición como a la orientación que se desea (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

### **Análisis cinemático directo.**

El problema que se tiene con la cinemática directa es que se refiera a la relación entre las articulaciones individuales que están presentes en el robot y a la posición y orientación de la herramienta que se encuentra en un extremo, es decir, que su complejidad se basa principalmente en la determinación de su efecto final teniendo en cuenta las variables conjuntas del robot (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013). Para lograr lo anterior, es necesario determinar los ángulos de operación ( $\gamma$ ), así como la altura ( $h$ ) de los módulos que se acordarán para cada una de las configuraciones del efector final (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

#### **1. Ángulo ALFA ( $\alpha$ )**

Este ángulo es el que permite describir la rotación de un módulo a lo largo del eje perpendicular en un vector normal del módulo anterior, es decir que es ángulo que gira inmediatamente a la configuración del módulo anterior (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013), para poder determinar  $\alpha$  se debe llevar a cabo la siguiente ecuación:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{h}{L}\right)$$

*Ecuación 11 Determinación de  $\alpha$  (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013)*



Donde  $h$  representa la distancia mínima entre los dos puntos centrales de cada uno de los módulos, y  $L$  es la longitud ya conocida por el módulo (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

## 2. Ángulo THETA ( $\theta$ )

Este ángulo es un código específico para cada una de las configuraciones de los módulos, por medio de este se permite describir cuántos grados se necesita para girar un módulo a lo largo del eje Z, con el fin de que se pueda obtener una línea gradiente que pueda apuntar hacia la dirección del eje Y. Dicha línea gradiente también es única para cada configuración excepto para  $M_i$  y  $M_f$ , ya que en estos casos es la misma, si está gradiente se proyecta en los planos XY posible que se pueda describir la dirección de inclinación de un módulo con respecto a su adyacente anterior (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

Cabe mencionar que esta variable solo se determina para obtener una descripción más completa de la traslación y rotación de un módulo de acuerdo a su configuración (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

## 3. Altura (H)

Dependiendo de la configuración que se realice, este parámetro sólo puede tener dos valores posibles, los cuáles son 0 y cualquier otro valor entre las configuraciones permitidas; en la siguiente ecuación se muestra que, para cualquier valor permitido, dicha configuración debe ser diferente de 0 y que el valor de la distancia entre el centro de los módulos debe coincidir con la distancia mínima (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

$$H = h + L \left[ \sin \left( \frac{asin(\frac{h}{L})}{2} \right) \right]$$

*Ecuación 12 Valor permitido cuando la configuración en diferenciate de 0 (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013)*

En donde para el valor mínimo añadido entre los módulos ( $h$ ) debe ser igual al componente vertical  $L$ , en donde este debe tener un ángulo definido por la mitad del ángulo de rotación de  $\alpha$  (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013)

## Análisis cinemático inverso

Este análisis se centra principalmente en el comportamiento de cada uno de los módulos que integra al robot, teniendo en cuenta una opción objetivo desde el comienzo para así poder determinar las posiciones y orientaciones que estos van a tener inicialmente (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

Para poder describir la cinemática inversa del robot se tiene que llevar a cabo un análisis matemático riguroso por medio de técnicas basadas en la geometría diferencial con el objetivo de poder describir la cinemática ajustando movimientos curvos en el espacio. Este enfoque de la geometría diferencial describe a la curva como una serie de movimientos básicos que se origina de la base del robot, que progresan a lo largo de la longitud para poder terminar en un efector final (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

Por esta razón para poder minimizar tanto el tiempo de procesamiento como el error de la posición y la orientación, se puede realizar un método exhaustivo (Muñoz Gonzáles, Samuel; Herreros López, 2013).

- Método exhaustivo

Este método tiene como fin probar cada una de las combinaciones válidas para la configuración de los módulos, calculando para cada una de ella una función de error, gracias a esto se pueden evaluar dichos errores devolviendo el de menor valor para que de esta forma el error se haga nulo. Utilizando el método exhaustivo siempre se va a encontrar la combinación de los módulos que se consiguen sin error al destino deseado, pero hay destacar que este proceso genera un número elevado de interacciones (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).

Con la ecuación que se muestra a continuación, se puede calcular el error final de posición ( $\epsilon_p$ ), calculado mediante una distancia euclidiana, donde  $P_u$  representa al vector de posición que “define el usuario” y  $P_c$  es el vector de posición final calculado. En los casos de  $P_x, P_y$  y  $P_z$  representan las direcciones de x,y,z de los vectores tanto calculados como los que define tanto el usuario (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).

$$\epsilon_p = \sqrt{(P_{u_x} - (P_{c_x}))^2 + (P_{u_y} - (P_{c_y}))^2 + (P_{u_z} - (P_{c_z}))^2}$$

*Ecuación 13 Cálculo del error final de posición  $\epsilon_p$  (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).*

Basándose en la ecuación anterior, también se utilizó la misma metodología para el cálculo del error de orientación final ( $\epsilon_A$ ) (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013), como se puede ver en la siguiente ecuación:

$$\epsilon_A = \sqrt{(A_{u_x} - (A_{c_x}))^2 + (A_{u_y} - (A_{c_y}))^2 + (A_{u_z} - (A_{c_z}))^2}$$

*Ecuación 14 Cálculo del error final de orientación  $\epsilon_p$  (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).*

En donde A es un vector que indica la orientación del último plano al vector normal, y en donde la única diferencia con el cálculo del error de posición final es que, ambos vectores  $A_u$  y  $A_c$  (uno especificado por el usuario y el otro calculado), son unitarios, y por lo tanto indica que  $\epsilon_A$  varían entre los siguientes parámetros limitados:  $0 < \epsilon_a < 2$  ((Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013)

Adicional a los cálculos del error final tanto de la posición como del error, también es necesario disponer de una ecuación de error completo y definitivo que permita comparar los métodos descritos anteriormente. Como se puede observar en la ecuación 14 el parámetro  $\lambda$  se utiliza para hacer hincapié en la prioridad del tipo de error que el usuario desea residir, mientras que el parámetros  $\beta$  es una constante que permita crear una expresión físicamente coherente ya sea para  $\epsilon_p$  que es el encargado de medir las unidades de longitud, como para  $\epsilon_p$  que es una transformación unitaria de la dirección del vector (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).

$$\epsilon = \frac{\epsilon_p^2}{\lambda} + \epsilon_A^2 + \frac{\epsilon_p \epsilon_A}{\beta}$$

*Ecuación 15 Cálculo del error completo (Muñoz González, Samuel; Herreros López, 2013).*

#### 4.7.4. Dinámica de los Robots

El modelo dinámico de un robot es aquel que permite explicar los fenómenos físicos que se encuentran en su estructura mecánica (extrínsecos), tales como efectos inerciales, fuerzas centrípetas, gravitacional, fricción y cuáles son los fenómenos físicos intrínsecos o propios de la naturaleza dinámica del robot (Reyes Cortés, 2011).

Para poder realizar el diseño de algoritmos que permitan el control del robot, es primordial conocer el modelo dinámico, sobre todo cuando la técnica de diseño se basa en la estructura del modelo dinámico, como lo es la teoría de estabilidad de Lyapunov; en este caso las propiedades matemáticas del modelo dinámico son explotadas con el fin de facilitar el análisis y propuesta de nuevas estrategias de control (Reyes Cortés, 2011).

Cuando se planea la construcción de un robot con  $n$  grados de libertad, su modelo dinámico está representado por una ecuación diferencial compleja de naturaleza continua multivariable que contiene propiedades fundamentales para facilitar el diseño y análisis de control de los fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica del robot dados por una cadena de cinemática abierta (Reyes Cortés, 2011).

$$\tau = M(\mathbf{q})\mathbf{q}' + C(\mathbf{q}, \mathbf{q}')\mathbf{q}' + g(\mathbf{q}) + f_f(\mathbf{q}f_e)$$

*Ecuación 16 Modelo Dinámico de un robot (Reyes Cortés, 2011).*

En el caso de que el robot que se planea construir tenga eslabones flexibles, es necesario incorporar dentro del modelo dinámico, el fenómeno físico de elasticidad y flexibilidad en los eslabones, debido a que si se exceden los límites de velocidades articulares o el amplificador electrónico se encuentra funcionando en los límites de saturación, entonces puede aparecer otro tipo de dinámica no modelada y en este escenario es mucho más complicado explicar el comportamiento dinámico de este tipo de robots (Reyes Cortés, 2011).

#### 4.7.5. Herramientas matemáticas para la representación espacial.

Para un correcto análisis de los movimientos que realizan los segmentos de un robot continuo redundante en un espacio tridimensional, es necesario el uso de herramientas matemáticas que permita definir tanto la posición como la orientación del efector final con respecto a su base, teniendo en cuenta las relaciones entre el robot y su entorno.

- **Ángulos de Euler.**

Uno de los métodos más empleados para el análisis de la orientación de las arquitecturas que componen los robots continuo-redundantes son los ángulos de Euler  $(\varphi, \theta, \psi)$ , puesto que ellos permiten definir la orientación de un sistema de referencia con respecto a un sistema de coordenadas fijas; usualmente los ángulos de Euler varían entre los siguientes intervalos: (Computacionales, 2007).

$$\begin{aligned} 0 &\leq \varphi \leq 360 \\ 0 &\leq \theta \leq 180 \\ 0 &\leq \psi \leq 360 \end{aligned}$$

*Ecuación 17 Ángulos de Euler*

- **Matrices de transformación homogénea**

En cuanto al posicionamiento de un robot en el espacio tridimensional generalmente requieren de 6 coordenadas, en donde 3 de estas representan el extremo terminal del robot  $(x,y,z)$  y las otras 3 coordenadas son las encargados de describir la orientación en términos de los ángulos de Euler (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).

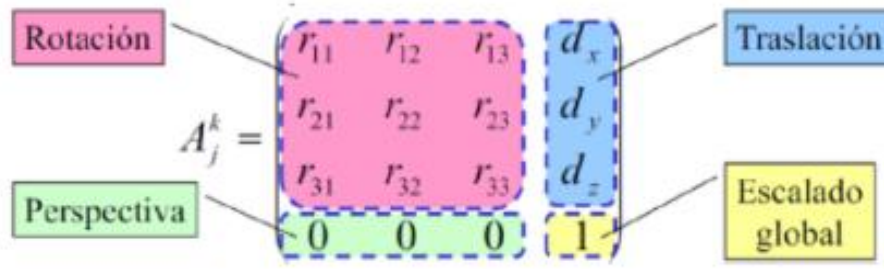


Figura 11 Matriz de transformación homogénea (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).

#### 4.7.5.1. Notación Denavit-Hartenberg

La metodología o notación Denavit-Hartenberg (DH) es la que permite establecer la ubicación de los sistemas de referencia en los eslabones de los modelos robóticos que presentan articulaciones en su estructura mecánica, en donde cabe resaltar que así estas articulaciones presenten formas tanto prismáticas como de revolución, sus movimientos van a estar definidos por cadenas cinemáticas abiertas. En otras palabras, esta metodología se basa fundamentalmente en un procedimiento sistemático para describir la estructura cinemática de una cadena articulada constituida por diversas articulaciones que solamente presentan un grado de libertad (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).

Por esta razón es necesario que a cada una de las articulaciones que integran el robot se asigne un sistema de referencia local con origen en un punto  $O_i$  y ejes ortonormales  $(X_i Y_i Z_i)$ , comenzando con un S.R. fijo inmóvil en los ejes  $(X_0 Y_0 Z_0)$ , anclando a un punto fijo  $Q_0$  de la base sobre la cual está sujeta la estructura como se puede ver en la figura 12 (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).

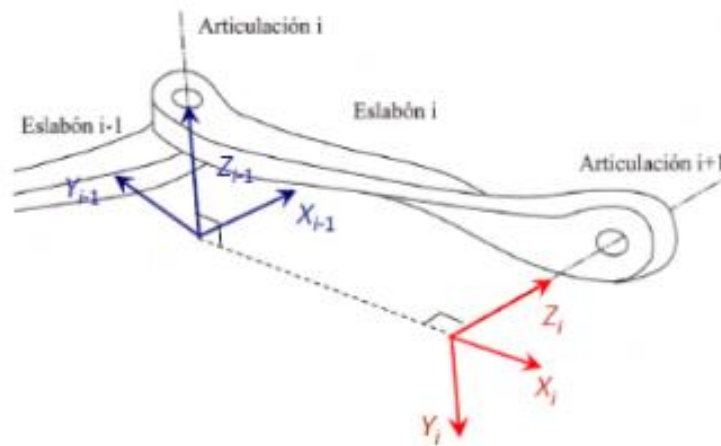


Figura 12 Representación del sistema de referencia local (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).

Donde:

- $d$ : Es la distancia de  $O_{i-1}$  a la intersección del eje  $X_i$  con el eje  $Z_{i-1}$  medida a lo largo de  $Z_{i-1}$
- $\theta$ : Es el ángulo que forma el eje  $X_{i-1}$  con el eje  $X_i$ , medido a lo largo de  $Z_{i-1}$ .
- $D$ : Es la distancia desde la intersección del eje  $X_i$  con el eje  $Z_{i-1}$  a  $O_i$ , medida a lo largo de  $X_i$
- $\alpha$ : Es el ángulo que forma el eje  $Z_{i-1}$  con el eje  $Z_i$ , medido a lo largo de  $X_i$ .

“Para las variables articulables  $\theta_i$  y  $d_i$ , solamente existen dos parámetros constantes que describen las características específicas del eslabón  $i$ -ésimo”

Gracias a lo anterior se puede definir la matriz  $A_i$ , la cual es la función de una sola variable que resulta de que tres de los cuatro parámetros sean constantes para un enlace dado, y que el cuarto parámetro ( $\theta_i$ ) sea variable para una articulación de revolución y  $d_i$  sea variable para el caso de una articulación prismática (Computacionales, 2007)

$$A_i^l = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & l_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & l_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 13. Definición de la matriz A (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).

#### 4.7.6. Sensor Inercial (Verificación de la Posición Final)

Los sensores inerciales, más conocidos como IMU (Inertial Measuring Unit), se utilizan tanto para el estudio como para el análisis del movimiento basado en variables de aceleración y velocidad angular, las cuales son obtenidas por medio del acelerómetro y el giroscopio que este contiene en su estructura. Estos dispositivos son altamente utilizados en el desarrollo de sistemas de navegación (ya sea inercial o guiada), que integran información necesaria para el cálculo de la posición o velocidad (Pozón, 2010).

##### 4.7.6.1. Acelerómetro

El acelerómetro es un sensor que permite conocer la aceleración que se produce al momento de realizarse un movimiento a lo largo del eje que se está trabajando; cabe resaltar que este tipo de sensor no mide la aceleración de la gravedad en sí, si no que mide una magnitud de aceleración en general (Pozón, 2010).

Una característica principal de este tipo de sensor es que también puede ser utilizado como un sensor de inclinación, lo cual permite que la gravedad se tome como un vector que permite determinar la orientación del espacio en el tiempo. En donde para obtener los valores en grados de los ángulos de inclinación se deben utilizar las fórmulas presentes en la ecuación 18 (Pozón, 2010).

$$\begin{aligned} PITCH &= ASIN\left(\frac{Ax}{1g}\right) \\ ROLL &= ASIN\left(\frac{Ay}{1g}\right) \\ YAW &= ASIN\left(\frac{Az}{1g}\right) \end{aligned}$$

Ecuación 18 Obtención de los ángulos de inclinación en los tres ejes por medio de un acelerómetro (Pozón, 2010).

#### 4.7.6.2. Giroscopio.

El giroscopio es un dispositivo que permite conocer la variación del Angulo en el tiempo mientras este esta rotando (velocidad angular), con el fin de poder determinar la actitud del móvil en el cual se encuentra posicionado. Actualmente su tamaño reducido, permite que presenten gran versatilidad en cuento a su uso (Pozón, 2010).

#### 4.7.7. Control de Posición

El objetivo del control de posición valga la redundancia es el de posicionar el extremo final del robot en un punto  $x$  y que permanezca ahí de manera indefinida hasta que el usuario desee cambiarlo. Formalmente, el objetivo del control de posición está determinado por encontrar una ley de control y que proporcione los pares aplicados a las articulaciones o servomotores del robot, de tal forma que la posición actual del robot y la velocidad articular de movimiento tienden asintóticamente hacia la posición deseada y velocidad cero, respectivamente, sin importar las condiciones iniciales, es decir que se deberá llegar a un punto de equilibrio entre estas dos variables (Reyes Cortés, 2011).

Lo que proporciona que se llegue a un punto de equilibrio, es la realización de un algoritmo de control de posición o regulación por medio de una fórmula o ecuación cuya principal característica sea generar un atractor en la ecuación de lazo cerrado formada por el modelo dinámico del robot y la estructura matemática del algoritmo de control. El desempeño de dicho algoritmo de control proporciona que se realicen de manera correcta y exacta las diversas tareas programadas para robot, lo que lo permite a llevar a cabo diversas aplicaciones de control punto a punto (Reyes Cortés, 2011).

Existe un algoritmo de control proporcional-derivativo (PD), el cual es el esquema de controlador más simple y popular que puede ser usado desarrollo del control de posición de los robots, para llevar a cabo la ejecución de este se debe también tener en cuenta la compensación de la gravedad, la cual está dada por la ecuación 19.

$$\tau = K_p q - K_v \dot{q} + g(q)$$

*Ecuación 19 Control PD con compensación de gravedad (Reyes Cortés, 2011).*

En donde  $q \in R^n$  es el vector de error de posicionamiento que se define como la diferencia entre la posición deseada la posición actual del robot  $q$ , el término  $g(q)$  se debe conocer como parte de la dinámica parcial del robot si el movimiento es en un plano vertical o en general en su espacio tridimensional (Reyes Cortés, 2011).

Para realizar el estudio cualitativo del control PD se deben llevar a cabo dos etapas, la primera consiste en estudiar únicamente el esquema de control proporcional sin incluir la acción derivativa, en donde se podrá observar la respuesta del péndulo sin freno en el sistema mecánico del robot y la segunda etapa consiste en incluir el efecto de amortiguamiento (Reyes Cortés, 2011).

Este control PD presta una desventaja pues presenta un error permanente de posición denominado offset; en otras palabras, el error de posición tiende a converger en una constante diferente de cero. Para disminuir este error se puede realizar la incorporación de una estructura matemática del PD, e cual es un término denominado acción de control integral, este es la integración de la suma del área bajo la curva del error de posición, lo que quiere decir que acumula energía canalizada adecuadamente y ayuda a disminuir la magnitud del error en el régimen estacionario, esta integración da origen al control proporcional integral derivativo (PID), el cual no representa un nuevo esquema de control, sino más bien es la versión modificada del control proporcional derivativo que pretende subsanar la deficiencia

del error en régimen estacionario, en donde la acción de este control resulta del siguiente esquema integral (Reyes Cortés, 2011).

$$\tau = K_p q - K_v \dot{q} + K_i \int_0^t q(\mu) d\mu + g(q)$$

*Ecuación 20 Control Integral Derivativo (Reyes Cortés, 2011).*

En donde  $K_p, K_v \in R^{n \times n}$  son matrices definidas positivas y se les denomina ganancias proporcional y derivativa, respectivamente.  $K_i \in R^{n \times n}$  es una matriz definida positiva denominada ganancia integral y todas las ganancias  $K_p, K_v, K_i$  son matrices definidas positivas. P.

Cabe mencionar que el algoritmo de control PID no genera ningún punto de equilibrio, únicamente genera una estabilidad asintótica local siempre y cuando las ganancias del control puedan satisfacer ciertas condiciones de sintonía muy complicadas (Reyes Cortés, 2011).

#### 4.7.8. Actuadores

La función de los actuadores es la de generar las fuerzas y los momentos de torsión necesarios para mover las coyunturas de robot. Tres clases de actuadores se usan en robótica: eléctricos, hidráulicos y neumáticos (Li, 2002).

- Actuadores eléctricos

Los actuadores eléctricos transforman la energía eléctrica en energía mecánica, ya sea rotacional o lineal; utilizados con gran frecuencia, ya que su fuente de alimentación es la energía eléctrica. (Corona Ramírez, Abarca Jiménez & Mares Carreño, n.d.) Estos cuentan con el principio de funcionamiento de que una partícula cargada eléctricamente ubicada dentro del espacio de acción del campo magnético está expuesta a una fuerza electromagnética (Corona Ramírez, Abarca Jiménez & Mares Carreño, n.d.)

$$F_E = e(B + v \times B')$$

*Ecuación 21 Principio de funcionamiento del actuador lineal Tomada de: (Corona Ramírez, Abarca Jiménez & Mares Carreño, n.d.).*

Donde:

- e: Carga del electrón [c].
- v: Vector de velocidad [m/s].
- B: Intensidad del campo magnético [T/m]
- B': Vector de inducción magnética [Wb ] m<sup>-2</sup>

Además de contar con esta característica, puede extenderse a un filamento conductor por el cual una corriente eléctrica (Corona Ramírez, Abarca Jiménez & Mares Carreño, n.d.), como se puede observar en la ecuación 22.

$$F_E = \int_0^L I dl \times B'$$

*Ecuación 22 Filamento conductor por el cual una corriente eléctrica Tomada de:*

Donde:

- L: Longitud del conductor [m].

- $I$ : Corriente eléctrica [A].
- $B'$ : Vector de inducción magnética [Wb]

Dicho filamento experimenta una fuerza electromagnética que induce un desplazamiento perpendicular a las líneas de acciones del campo magnético, con el fin de aumentar la magnitud de la fuerza de desplazamiento. (Corona Ramírez, Abarca Jiménez & Mares Carreño, n.d.)

En cuanto a la clasificación de actuadores eléctricos esta se hace de acuerdo del tipo de energía eléctrica con la que son alimentados, por el tipo de movimiento que genera y por la formación de excitación (Figura 14). (Corona Ramírez, Abarca Jiménez & Mares Carreño, n.d.).

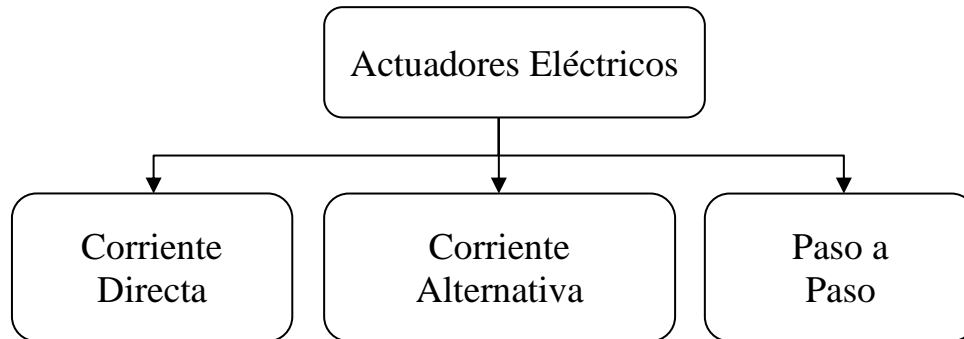


Figura 14 Clasificación de los actuadores por el tipo de energía de alimentación. Tomado de: (Corona Ramírez, Abarca Jiménez & Mares Carreño, n.d.)

#### 4.7.9. Control cinemático

El control cinemático busca interrelacionar las variables externas de determinado robot con las internas del mismo. (Li, 2002). Esto con el fin de controlar el robot para llevarlo a la posición deseada del área de trabajo, desde un punto inicial a una distancia tal que el brazo robótico pueda alcanzarla. (Li, 2002). Para ejecutar esta labor el brazo debe estar orientado correctamente y así lograr atrapar la pieza que se desea, sin embargo para esto se debe tener presente la retroalimentación abierta en la cual se puede posicionar en determinado punto y su capacidad de reprogramar la posición deseada. (Li, 2002).

En principio existen 2 maneras de asignar las coordenadas del robot:

- Coordenadas internas (o llamadas “coordenadas de unión”): Están definidas por valores escalares que describen la posición relativa de un punto respecto a otro punto del mismo par cinemático. Estas coordenadas se denotan por  $q_i$  y el vector de coordenadas internas de un brazo con  $n$  uniones es  $q=(q_1, q_2, \dots, q_n)$  (Li, 2002).
- Coordenadas externas: son las coordenadas cartesianas de un punto específico del robot con respecto al marco absoluto de coordenadas unido a la base del manipulador o a cualquier otro punto en el espacio de trabajo (Li, 2002). A este vector se le llama “ $s$ ” y en el caso general está formado por  $m$  coordenadas donde  $m$  es el número de coordenadas necesarias para describir la posición del brazo en una clase de labor particular (Li, 2002).

#### 4.7.10. Estructura mecánica

Los componentes necesarios o equivalentes en cuanto a su estructura mecánica para un robot en términos de componentes podrían ser un sistema de control, dispositivos de medición, un generador de potencia eléctrica, hidráulica o neumática, un manipulador y posiblemente un sistema para trasladarse. (Li, 2002).



#### 4.7.11. Control de movimientos

En el caso del control, según sea su estructura mecánica, hay dos tipos de control los cuales dependen del actuador que se utilice. (Li, 2002). En la figura 15 se observa un control de lazo abierto, mientras que en la figura 16 se observa un lazo cerrado mostrado en la figura 14, la posición de salida es censada y realimentada para dar una señal de error que es usada para manejar el actuador.

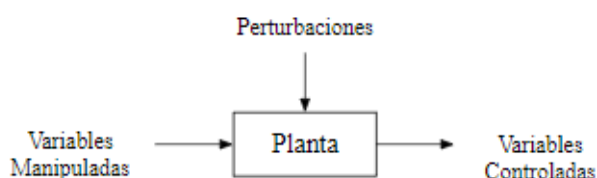


Figura 15 Control de Lazo abierto Tomado de: (Li, 2002).

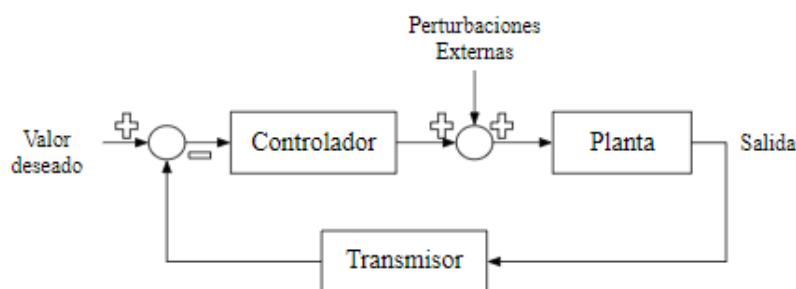


Figura 16 Control de Lazo cerrado Tomado de: (Li, 2002).

Para cualquier tipo de control que se emplee, el desempeño debe ser bueno bajo diferentes condiciones de operación, tales como cambios en la carga, variaciones en el comportamiento del sistema mecánico del robot, cambios en la fricción, y variaciones en las condiciones ambientales. (Li, 2002).

#### 4.7.12. Grados de libertad

Para definir la posición y orientación de un objeto en tres dimensiones, estas pueden ser definidas en coordenadas espaciales relativas a un mismo punto de referencia o también como la posición en coordenadas cilíndricas o esféricas (Li, 2002). Usando coordenadas cartesianas la orientación se puede definir por una secuencia de tres rotaciones sobre los ejes x, y, z. (Li, 2002).

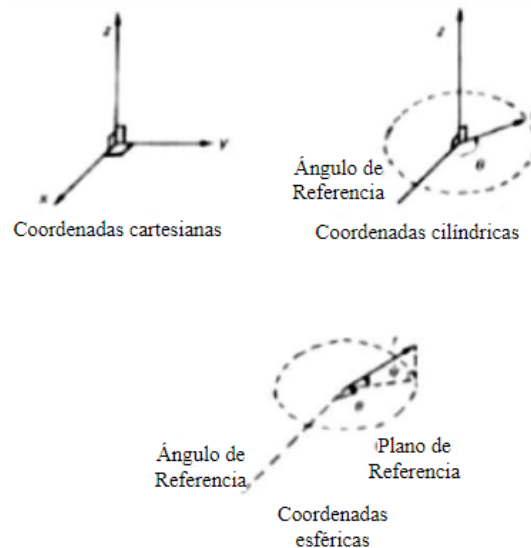


Figura 17 Grados de libertad esquemáticamente. Tomado de: (Li, 2002).

#### 4.7.13. Robots hiper - redundantes

Un robot hiper-redundante (Figura 18) es una cadena cinemática abierta compuesta de una secuencia de elementos estructurales rígidos, denominados eslabones, conectados entre sí a través de articulaciones, que permiten el movimiento relativo de cada par de eslabones consecutivos. (Zaplana, Claret and Basanez, 2018) Estos aparecieron por primera vez en los años 60, (Muñoz González, 2013) bio diseñado en miembros invertebrados, tales como tentáculos o trompas (Pareja Muñoz, 2019) ya sea la apariencia visual y el comportamiento (Pareja Muñoz, 2019). Estos robots híper-redundantes, se consiguen dotar a los prototipos de una gran flexibilidad y adaptabilidad (Pareja Muñoz, 2019).

Basándose en el principio de necesidades en los diseños con mayor número de grados de libertad (gl) para realizar una tarea concreta (Muñoz González, 2013). El puesto posee un mayor número de grados de libertad que los estrictamente necesarios para posicionarse y orientarse en el espacio (6 grados), donde esta característica le permite alcanzar una posición y una orientación determinada con diferentes configuraciones articulares (Muñoz González, 2013).

En el caso de implementar este sistema en determinada actividad, se busca superar estas limitaciones actuales desarrollando sistemas robotizados capaces de reproducir las características de los seres invertebrados que se encuentran en la naturaleza (Muñoz González, 2013). Es por esto que para el accionamiento local hace que el sistema robotizado se convierta en un sistema muy pesado y voluminoso debido a la utilización de motores de servicio pesados como los actuadores hidráulicos lineales (Muñoz González, 2013).

Ventajas:

- Este tipo de robots proporciona un beneficio en el desplazamiento debido a que se logran evitar obstáculos en ambientes irregulares (Muñoz González, 2013).
- La característica hiper-redundante brinda flexibilidad para al momento de visualizar entornos con limitaciones de espacio (Muñoz González, 2013).
- Este tipo de robots permite moverse en ambientes irregulares y con maniobrabilidad extrema, la cual es fundamental al momento de diagnosticar alguna patología de tipo abdominal. (Muñoz González, 2013).
- Proporciona la capacidad de alcanzar la longitud deseada (Muñoz González, 2013).

- Tienen una estructura antropomórfica que les permite realizar diversas tareas (Muñoz González, 2013).

Desventajas:

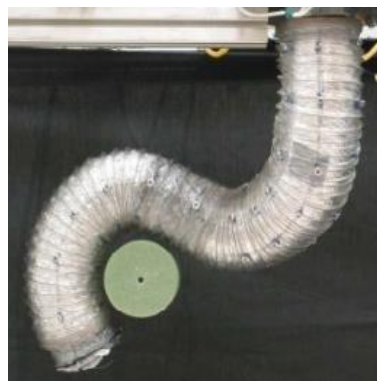
- La ejecución de los movimientos correctos y la obtención de dispositivos con dimensiones reducidas (Muñoz González, 2013).
- Les permiten moverse en superficies escarpadas, escalar, entrar en espacios confinados y agujeros, debido a su pequeño tamaño y la capacidad de adoptar múltiples formas (Muñoz González, 2013).



*Figura 18 Robot manipulador Hiper-redundante Tomado de:(Muñoz González, 2013)*

#### 4.7.14. Robots Continuo-Redundantes

Los robots Continuo-Redundantes tienen como característica el contraste con el enlace rígido tradicional robots, pues estos cuentan con una columna vertebral continua sin articulaciones (Jones & Walker, 2006) (Figura 19). Este está bioinspirado por troncos de elefante, lenguas de mamíferos y brazos de pulpo, pues estos apéndices poseen notables manipulaciones y habilidades de relación sin una estructura esquelética típica continua (Jones, Walker & McMahan, 2006). Gracias a esto su análisis cinemático es más complejo que los robots de enlace rígido desarrollaron cinemática en 2D para un número de robots (Burgner Kahrs, Rucker & Choset, 2015).



*Figura 19 Robot manipulador Continuo-redundante. Tomado de:(Jones & Walker, 2006)*

A partir de esto, los robots continuos tienen una estructura fundamentalmente diferente, siendo manipuladores convencionales compuestos por enlaces rígidos discretos conectados por juntas cuando un robot tiene más grados de libertad (Figura 20) (Burgner Kahrs, Rucker & Choset, 2015).

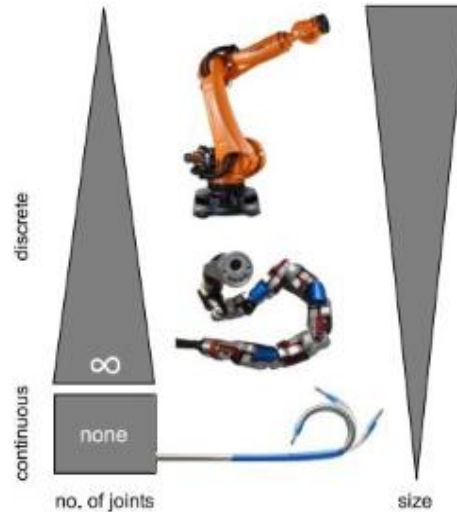


Figura 20 Grados de libertad Continuo vs Discreto. Tomado de: (Burgner Kahrs, Rucker & Choset, 2015)

En el límite según el número de articulaciones se acerca al infinito (y las longitudes del enlace se acercan a cero), la robot se acerca a lo que se conoce como un robot continuo (Burgner Kahrs, Rucker & Choset, 2015)

En cuanto a las ventajas que puede brindar un robot continuo redundante a diferencia de robots discretos (Figura 20), los discretos están compuestos de estructuras (eslabones) rígidos que limitan su capacidad de interactuar con su entorno pues estos cuentan con dificultades para operar en entornos no estructurados (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018). A diferencia de los continuos redundantes, como ya se mencionó anteriormente además de ser bioinspirados, este se basa en el modelo cinemático de curvatura constante para establecer una relación entre el modelo matemático, la viabilidad y desarrollo de los prototipos continuos redundantes para sus posibles aplicaciones industriales, médicas, búsqueda y rescate, entre otras (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).

#### 4.7.15. Equipos médicos:

Los equipos médicos, llamados así por su denominación en inglés Medical Device, son elementos médico – quirúrgicos y equipos médicos, recientemente mediante la expedición del Decreto 4725 de 2005 se han definido como cualquier instrumento, aparato, artefacto, equipo biomédico u otro artículo similar o relacionado, utilizado sólo o en combinación, incluyendo sus componentes, partes, accesorios y programas informáticos que intervengan en su correcta aplicación, destinado por el fabricante para uso en seres humano (equipos médicos, Invima, 2012).

Estos son esenciales para que la prevención, el diagnóstico, el tratamiento y la rehabilitación de enfermedades y dolencias sean seguros y eficaces (Organización Mundial de la Salud, 2019).

### Marco Normativo del uso de dispositivos médicos en Colombia

*“Resolución 434 de 2001, crea competencias para los entes del estado: INVIMA, las Direcciones Departamentales, Distritales y lo Municipales en cuanto a Vigilancia y Control de los dispositivos.” (MINISTERIO DE SALUD, 2001)*

#### Capítulo 1: Disposiciones generales

**Artículo 3ro:** Definiciones. En cuanto a la tecnología biomédica, esta se basa en la adaptación de conocimientos científicos e ingenieriles a cierto proyecto con fines a la salud como medicamentos, equipos, dispositivos y procedimientos médicos y quirúrgicos (*MINISTERIO DE SALUD, 2001*).

Además de contar con los dispositivos y equipos biomédicos, los cuales como instrumentos, aparatos, artefacto, equipos u otro artículo empleados individualmente o en conjunto, teniendo en cuenta sus componentes, accesorios y algoritmos informáticos, se busca que sean capaces de intervenir en procedimientos médicos como (*MINISTERIO DE SALUD, 2001*):

Diagnóstico, control de tratamiento curativo y/o paliativo, compensaciones, trastornos físicos y prevención de algún tipo de enfermedad en un paciente humano (*MINISTERIO DE SALUD, 2001*).

- Investigación de la anatomía humana o procesos fisiológicos.
- Detección y cuidados antes, durante la gestión humana y post parto.

Por lo anterior, se busca satisfacer a través del funcionamiento, fabricación y recomendación de uso, a los pacientes bajo diferentes circunstancias, gracias conocimientos en conjunto mencionados anteriormente. (*MINISTERIO DE SALUD, 2001*)

**Artículo 7o,** Clasificación de los equipos biomédicos por su estado físico:

1. Equipos biomédicos nuevos
2. Equipos biomédicos usados
3. Prototipos

**Parágrafo 3o - Prototipo:** Incorpora todos los equipos alojados en la fase de experimentación de manera que no se han empleado en la prestación de servicios, de manera que aún no cuenten con el certificado correspondiente de venta libre expedido por el registro sanitario. (*MINISTERIO DE SALUD, 2001*).

*“Resolución 2003 de 2014 “Por la cual se definen los procedimientos y condiciones de inscripción de los Prestadores de Servicios de Salud y de habilitación de servicios de salud”.”*

**Artículo 1.** Tiene como finalidad definir los procedimientos y las condiciones que deben cumplir los prestadores de servicios de salud y de habilitación de servicios de salud, de modo que se habiliten de manera correcta y específica los manuales de inscripción de prestadores y habilitación de servicio de salud.

A partir de las normativas mencionadas anteriormente, cabe resaltar que la normativa general de la cual se desglosan las demás en cuanto a prototipos de equipos y dispositivos médicos es el decreto 4725 de 2005, puesto que los demás decretos y normativas cuentan con el fin de proteger, satisfacer, facilitar y mejorar ya sea la calidad de vida del paciente, usuario o funcionarios que manipulan implementos (equipos y dispositivos) utilizados a lo largo de intervenciones quirúrgicas actualmente avalados y certificados por el INVIMA y demás autoridades reguladoras.

#### **4.8. Estado del arte:**

- *Eficacia de la cirugía ginecológica robótica comparada con la cirugía Laparoscópica”.*

El departamento de estudios e investigación de Salud en Cataluña, España, realizó un informe de evaluación de tecnologías sanitarias, el cual evalúa la eficacia de la cirugía ginecológica robótica comparada con la cirugía Laparoscópica. En la cual hacen una retoma bibliográfica encontrando información respecto a conversión a otra modalidad alternativa de cirugía en cuatro estudios con 337 participantes. De forma similar, el ensayo de Soto y colaboradores reportó un único caso de conversión

a laparotomía en el grupo de laparoscopia, y ningún caso en el grupo de cirugía robótica (Arévalo Rodríguez I, Roqué Figuls, 2017). Obteniendo de esta manera que el tiempo en practicar la técnica de laparoscopia robóticamente presentó un tiempo quirúrgico total mayor, pero sin diferencias significativas con respecto a la cirugía laparoscópica, con una diferencia promedio de 5 minutos (promedio de 106,6 minutos y 101,6 minutos para la cirugía robótica y laparoscópica, respectivamente) (Arévalo Rodríguez I, Roqué Figuls, 2017). En cuanto al sangrado, la cirugía robótica tiene un riesgo similar de sangrado y requerimiento de transfusión que la cirugía laparoscópica (Arévalo Rodríguez I, Roqué Figuls, 2017).

- *“Histerectomía laparoscópica asistida con robot”.*

En México, se desarrolla un caso clínico el cual se basa en Histerectomía laparoscópica asistida con robot. Reporte del primer caso en México, en el cual muestra un estudio bibliográfico de antecedentes tecnológicos y robóticos durante cirugías como ayudantes, una de ellas fue el Hospital Ángeles del Pedregal el equipo se adquirió en el año 2013 pero no fue sino hasta mayo de 2014 cuando se practicó la primera histerectomía laparoscópica asistida con robot en la Ciudad de México. (Gallardo-Valencia, 2014). El equipo quirúrgico lo compone el primer cirujano que gobierna al robot desde la consola, un ayudante que moviliza el útero y otro ayudante que apoya con instrumental laparoscópico de 5 mm y, además, personal de enfermería y anestesiología capacitado y acreditado. (Gallardo-Valencia, 2014). La cirugía robótica, según lo reportado en todo el mundo, constituye una herramienta útil para procedimientos que requieren una disección minuciosa de diferentes estructuras (Gallardo-Valencia, 2014).

- *“Situación actual de la laparoscopia y robótica en la enfermedad inflamatoria intestinal”.*

El grupo Andaluz de Coloproctología, realiza un estudio llamado “Situación actual de la laparoscopia y robótica en la enfermedad inflamatoria intestinal”. La continua evolución de la cirugía laparoscópica ha llevado a avances en la tecnología robótica quirúrgica. En particular, para la cirugía pélvica se utiliza cada vez más la técnica robótica para procedimientos de próstata, ginecológicos y rectales. Es por esto que presentan las principales ventajas de la cirugía robótica parecen estar relacionadas en las resecciones rectales, debido al espacio limitado de esta zona anatómica. Se piensa que trae ventajas en cuanto a la preservación de nervios y la posibilidad de mejorar los resultados oncológicos (Valdés-Hernández et al., 2018). Hay varias características que hacen que el da Vinci sea muy adecuado para trabajar en espacios estrechos como la pelvis, como por ejemplo la tecnología endo-muñeca o una cámara estable que permite la visualización tridimensional a través de la tecnología de telepresencia, así como la reducción del temblor dando como resultado mayor destreza o una posición más ergonómica para el cirujano (Valdés-Hernández et al., 2018).

- *“LAPBOT: Robot para cirugía laparoscópica”.*

En la ciudad de Popayán, Colombia, un grupo de estudiantes desarrollan un artículo sobre el diseño de un nuevo robot conocido como: LAPBOT: ROBOT PARA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA el cual posee una arquitectura de nueve grados de libertad que le permiten posicionar y orientar los instrumentos quirúrgicos dentro del abdomen de un paciente, pasando a través de un punto fijo en el espacio puntual (cartesiano) que representa la incisión. Para el estudio de los movimientos del robot se realiza el seguimiento de trayectorias de una laparoscopia (Salinas & Vivas Albán, 2009).

- *“Análisis de la Cinemática Inversa y Minimización de Errores Mediante Algoritmos de Optimización para un Robot Hiper-Redundante”*

La universidad de Valladolid acompañada de la Escuela de Ingenieros Industriales de España, desarrolló un Máster de “Análisis de la Cinemática Inversa y Minimización de Errores Mediante Algoritmos de

Optimización para un Robot Hiper-Redundante” el cual consiste en brazos robóticos híper-redundantes, accionados por fuerzas electromagnéticas han sido desarrollados para su aplicación en intervenciones quirúrgicas en la región abdominal. Un ejemplo de ello es el robot del proyecto Marcus (Micro Abdominal Robot Cooperative System) (Bauzano., 2019), donde este robot estará compuesto por una serie de mini-robots quirúrgicos dirigidos desde el exterior del paciente con campos magnéticos controlados por brazos manipuladores, implementando cámara iluminación y pinza, tal y como muestra la figura 21. Dichos mini-robots están compuestos por una serie de imanes permanentes lo cuales, una vez dentro del abdomen, son sujetos a la pared abdominal gracias a los holder magnéticos que se encuentran situados en los extremos de los brazos robóticos. Con el fin de realizar un sistema Endoscópico y capturar imágenes en el interior del cuerpo humano o animal (Muñoz González, 2013).

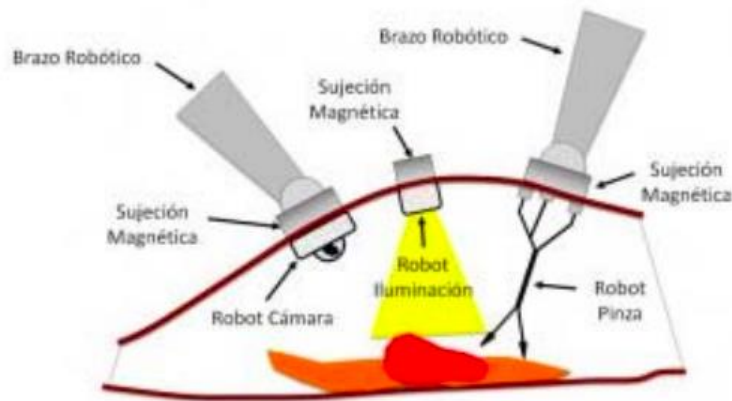


Figura 21 Robot manipulador Hiper-redundante bioinspirado Tomado de: (Muñoz González, 2013).

- *“Robot laparoscópico biomimético e híper-redundante: análisis preliminar de materiales magnéticos, guiado mediante visión artificial y primer estudio de su diseño”.*

En la Universidad de Valladolid y la Escuela de Ingenierías Industriales a lo largo del 2014, se desarrolló el análisis de un Robot Laparoscópico Biomimético e Híper-Redundante de Movimiento Autónomo y Supervisado (Martín Barrio, 2019) en el cual se resaltan las características principales de los robots hiper redundantes como mayor versatilidad y un mejor mantenimiento, estudiando su impacto, sostenibilidad, aplicaciones, beneficios y futuras líneas de investigación. En el campo de la medicina, específicamente en la técnica de laparoscopia (Martín Barrio, 2019).

- *“Modelado Cinemático De Un Manipulador Binario Hiper Redundante Para Aplicaciones En Cirugía Mínimamente Invasiva (Mis)”.*

El Instituto Universitario ITAP y la Universidad de Valladolid estudia, evalúa y desarrolla un prototipo llamado BHRM, donde su estructura modular consta de secuencias de materiales manejables no flexibles controladas por actuadores binarios, en donde el movimiento del robot está basado en la interacción electromagnética entre módulos consecutivos, provocando que estos se atraigan o se repelen según el sentido de circulación de las corrientes por las bobinas, generando determinados grados de libertad (González, Turiel, Fraile & de la Fuente, 2014).

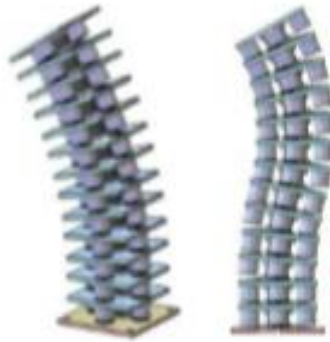


Figura 22 Morfología del BHRM Tomado de: (González, Turiel, Fraile & de la Fuente, 2014)

Posteriormente, este grupo de trabajo realiza un análisis cinemático de un robot permite estudiar el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia, determinando la posición y orientación del extremo final del robot con respecto a un sistema de coordenadas (González, Turiel, Fraile & de la Fuente, 2014).

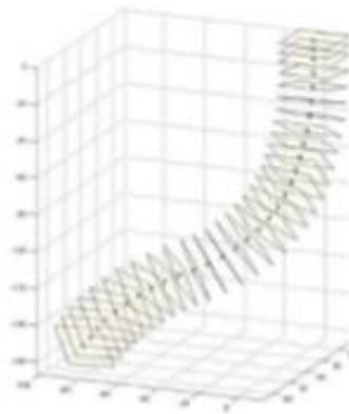


Figura 23 Secuencia de 30 módulos y detalle del extremo final Tomado de: (González, Turiel, Fraile & de la Fuente, 2014).

- “DA VINCI ROBOT: THE OPERATING ROOM OF THE FUTURE”.

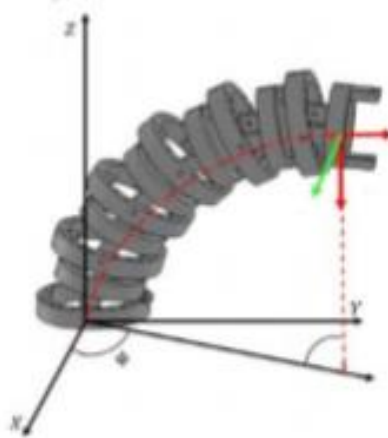
El ingeniero Ricardo John Palomares Orihuela, realiza una revisión bibliográfica de los métodos que se implementan actualmente en cirugías principalmente invasivas, enfocándose en avance que ha tenido progresivamente el instrumento Da Vinci , explicando los métodos de uso que este brinda como la combinación de una visión en tres dimensiones con instrumentos con un rango de movilidad superior, lo que entrega un grado de precisión mayor (Palomares Orihuela, 2016). controlado por una consola quirúrgica la cual consiste en un sistema que permite controlar a distancia los brazos del robot. Permite que el cirujano se apoye, sentado, y aproveche las características ergonómicas para realizar la cirugía (Palomares Orihuela, 2016). De esta manera determinar conclusiones puntuales sobre el uso de nuevas tecnologías en el campo de la medicina.

- “Constant Curvature Kinematic Model Analysis and Experimental Validation for Tendon Driven Continuum Manipulators ”.

En este artículo se realiza un análisis del modelo cinemático actual para robot continuo, (figura 24) con el objetivo de determinar la precisión de la validación experimental del modelo cinemático de curvatura constante para establecer una relación entre el modelo matemático y el robot continuo, y su factibilidad de aplicar para cualquier tipo de estructura continua, que mide la trayectoria planar del efector final en función del desplazamiento de cables pasivos (Mosqueda, Moncada, Murrugarra &



Leon-Rodriguez, 2018). Ubicado a lo largo de la estructura para probar el modelo cinemático, se fabricó un prototipo de robot continuo compuesto por 1 segmento con 7 secciones, controlado por 3 cables, por sección, también proponemos un segmento modular (enlace) con uniones libres, la modularidad permite extender la longitud del segmento y también permite agregar segmentos y conectarse en forma de cadena en serie y describir el radio de curvatura cóncava y / o convexa y permita que el robot manipulador siga diferentes trayectorias y desplazamientos en su espacio de trabajo. Se implementó el modelo cinemático de curvatura constante utilizado en robots continuos con errores de posicionamiento mínimos y probado (Mosqueda, Moncada, Murrugarra & Leon-Rodriguez, 2018).



*Figura 24 El robot manipulador de robot continuo compuesto por 1 segmento, 6 secciones y juntas libres entre secciones.  
Tomado de: (Mosqueda, Moncada, Murrugarra & Leon-Rodriguez, 2018).*

## 5. METODOLOGÍA

En el presente capítulo, se expone la metodología detallada del desarrollo de cada una de las fases del prototipo *Snake Cable Robot*, distribuidas de la siguiente manera:

1. Desarrollo de la estructura mecánica del prototipo laparoscópico.
2. Desarrollo del control del prototipo laparoscópico.
3. Desarrollo del simulador de la cavidad pélvica abdominal.
4. Implementación del prototipo laparoscópico en el entorno físico simulado
5. Plan de pruebas del sistema

En la primera fase “*Desarrollo de la estructura mecánica del prototipo laparoscópico*”, se realizó el diseño de la estructura mecánica del prototipo por medio del software FUSION 360, con el fin de caracterizar los materiales adecuados, y así identificar tanto las ventajas como las desventajas de los mismos para poder llevar a cabo la construcción del prototipo.

En cuanto a la fase “*Desarrollo del control del prototipo laparoscópico*”, se establecieron parámetros y levantamiento de requerimientos para cada uno de los componentes electrónicos, caracterizando e identificando los adecuados para su posterior uso. Haciendo uso de cinemática inversa, cinemática directa y ecuaciones equivalentes a partir de las matrices DH para establecer los movimientos adecuados del prototipo, y así mismo los ángulos, longitudes y velocidades obtenidos en el mismo.

Para la fase de “*Desarrollo del simulador de la cavidad pélvica abdominal*”, se identificaron los órganos implicados en la apendicectomía laparoscópica con el objetivo de realizar un simulador anatómico del entorno físico acotado a las dimensiones de un niño (11 años), haciendo uso de materiales seleccionados con anterioridad teniendo en cuenta los requerimientos planteados y haciendo uso de matrices de decisión que permitieron su caracterización.

En la cuarta fase de “*Implementación del prototipo laparoscópico en el entorno físico simulado*”, se realizó por medio del ajuste del prototipo laparoscópico sobre el simulador, verificando el funcionamiento del mismo sin lastimar los órganos y satisfaciendo los ángulos de flexión, posición y velocidad solicitados.

Finalmente, en la fase “*Plan de pruebas del sistema*”, se realizaron matrices evaluativas frente a los requerimientos planteados para cada una de las fases mencionadas anteriormente, determinando la variabilidad de los datos que se obtuvieron al momento de hacer la implementación del prototipo laparoscópico.

Cabe mencionar que, para la elaboración de la metodología expuesta, se establecieron ciertos requerimientos que se basaron en las necesidades del usuario, los cuales fueron:

- Asegurar la comodidad del usuario al momento de la manipulación y operación del prototipo laparoscópico, ya que en ningún momento se debe afectar la ergonomía del mismo.
- Los movimientos que realice el prototipo laparoscópico por medio del mando de control (joystick) deben estar sincronizados con respecto a los movimientos que realice el mecanismo móvil del robot.
- El prototipo laparoscópico tendrá integrado un sistema de iluminación que le permitirá al usuario ajustar la intensidad lumínica dependiendo de la zona que este desee inspeccionar.
- El espacio de trabajo deberá permitir movimientos con ángulos de 360° en el plano (x,y).
- La resolución de la cámara deberá ser de 1900x1080 pixeles, la cual permitirá la obtención de imágenes claras y de calidad.
- Garantizarle al usuario un manejo intuitivo del prototipo laparoscópico construido.

- Permitir que la conexión tanto de la cámara endoscópica como de la fuente de alimentación del prototipo sea fácil de realizar y a la vez segura.

## **Desarrollo de la estructura mecánica del prototipo laparoscópico.**

En este apartado se expondrán los pasos realizados tanto para el diseño como la construcción de la estructura mecánica que integra al prototipo robótico de laparoscopia *Snake cable robot*.

### **Diseño de la estructura mecánica del robot**

#### *1. Elección del modelo robótico.*

En cuanto al diseño del robot continuo redundante que se desarrolló en el presente proyecto de grado, se tuvieron en cuenta aspectos tanto constructivos (tamaño, color, forma), como aquellos que están relacionados con la realización de ciertas tareas específicas como lo son: la inspección visual de una zona que simula la cavidad pélvica abdominal y la habilidad de poder realizar movimientos suaves y precisos en espacios confinados.

El prototipo desarrollado al ser un robot continuo redundante permite que el movimiento del mismo se distribuya uniformemente por toda su estructura, consiguiendo así esquivar posibles obstáculos que se puede encontrar en una zona de inspección.

#### *2. Diseño preliminar del robot.*

##### *a. Tamaño del Robot.*

Teniendo en cuenta que se desarrolló un prototipo de laparoscopia basado el modelo robótico *snake cable robot*, un factor importante para la determinación del diseño fue la elección de las dimensiones que este iba a tener, debido a que se tenía que cumplir con las medidas que presentan los laparoscópicos convencionales, y así mismo, poder contar con componentes tanto mecánicos como electrónicos que se ajustaran a ese tamaño.

De acuerdo con los estándares dimensionales de los laparoscópicos convencionales, se encontró que en promedio estos elementos quirúrgicos cuentan con un largo que varía entre los 15 a 20 cm, con un grosor que va desde los 4mm a 10 mm. Específicamente para el presente trabajo, se definieron las dimensiones de 20 cm de largo y 7mm para la estructura móvil del robot, puesto que este es el tamaño del laparoscopio que utilizan los profesionales al momento de realizar una apendicectomía laparoscópica.

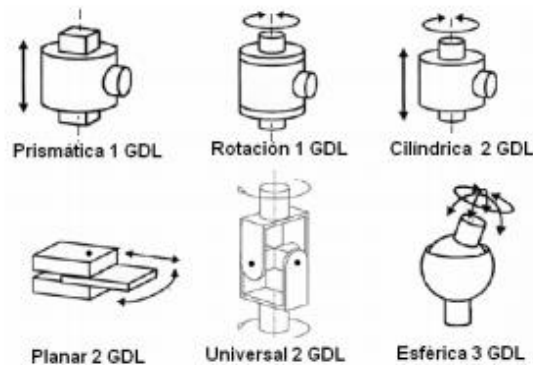
##### *b. Estructura del Robot*

Para llegar a un diseño que cumpliera con cada uno de los objetivos que se establecieron, se tuvo en cuenta la topología del mecanismo, es decir, se determinaron factores como son: la forma de las articulaciones, conexiones, acoplamientos, actuadores, etc., relacionados directamente con los movimientos deseados.

Con el propósito de cumplir con el desarrollo de un mecanismo ideal que permitiera tanto la visualización como la realización de movimientos suaves dentro de un espacio reducido como lo es el simulador de entorno físico de la cavidad pélvica abdominal; se elaboraron tres diseños diferentes (uno después del otro) del mecanismo, en donde, con el desarrollo de cada uno de estos, se logró observar y analizar las ventajas y desventajas que presentaban para así poder llegar al mecanismo final.

## DISEÑO DEL PROTOTIPO No. 1

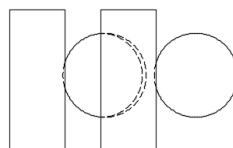
Para este diseño, en un principio se comenzó con la elección de las articulaciones, ya que con esto definido, se podía realizar una aproximación de la forma más adecuada que podría llegar a tener un módulo del robot; luego de varias revisiones teóricas, se llegó a la conclusión de que las articulaciones esféricas son el tipo de articulación que más grados de libertad posee (Véase en figura 25), y por ende, al contar con múltiples de ellas, se pueden generar cadenas cinemáticas abiertas que permiten que una junta rotacional mantenga constante la distancia entre los módulos que conforman el robot, y así mismo se pueda contar con la variación del ángulo que forma dichos módulos alrededor del eje que define a junta.



*Figura 25 Diferentes tipos de articulaciones con sus grados de libertad*

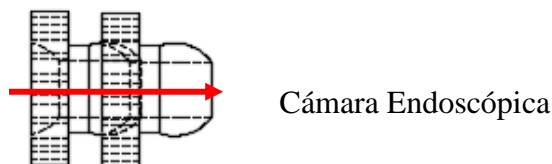
Ya definida la forma de la articulación, se consideró la forma de la base de los módulos, la cual le tenía que aportar al mecanismo la rigidez suficiente para sostener al robot en la posición y orientación deseada. Para esta elección se tuvo que representar la geometría de cada uno de los módulos, puesto que la distribución de masa de los mismos debía ser homogénea para que se logrará mantener el balance del robot tanto en estado estático como en estado dinámico, por esta razón se plantearon dos alternativas.

La primera alternativa de la base que se planteó se puede observar en la figura 26, cumple con el hecho de que la forma de la articulación es esférica, pero en cuanto a la unión base-articulación, al no tener el suficiente contacto, puede ocasionar la ruptura del módulo en el caso de que se realizará algún movimiento brusco o algún aumento de masa extra al momento de agregar más módulos a la estructura o al momento de instalar la cámara endoscópica, que específicamente para este caso no se podría situar, puesto que la unión base-articulación tampoco lo permite por su tamaño.



*Figura 26 Alternativa 1 de la base del módulo*

Posterior al análisis que se obtuvo de la forma de la base planteado en la alternativa 1, y detallando los pro y los contra, se llegó al desarrollo de una segunda alternativa (véase en figura 27), en la cual se tuvo en cuenta que para que una articulación sea esférica, no significa que toda la estructura que la compone lo sea, por esa razón, el segundo diseño presenta en un extremo en forma de media esfera, la cual permite realizar movimientos con 3 grados de libertad, permitiendo que se ampliará la unión base-articulación, para que la estructura pudiera soportar masas extra (ya sean de los módulos o de la cámara endoscópica) y movimientos bruscos en el caso que se llegaran a realizar sin el inconveniente de tener rupturas en su estructura.



Cámara Endoscópica

Figura 27 Alternativa 2 de la base del módulo

El diseño de estos módulos se realizó por medio del software CAD FUSION 360, puesto que este software presenta ventajas de modelado 3D en comparación a otros software que también se manejan, como se puede observar en la siguiente matriz de decisión (tabla 2):

CAD	Manejabilidad	Generación de planos con acotaciones	Simulación de esfuerzos físicos	Costos de Licencias	Total
FUSION 360	5	5	5	5	5
SOLIDWORKS	3	5	5	3	4
MAYA	5	2	5	3	4,3

Tabla 2 Matriz de decisión del software CAD para el diseño de los módulos del robot.

En cuanto a la generación del modelo 3D en el software, este se llevó a cabo de la siguiente manera:

- I. Para comenzar con la elaboración del diseño primero que todo se tiene que realizar un cilindro con base de 5 mm y altura de 1,2 mm como se muestra en la figura 28.

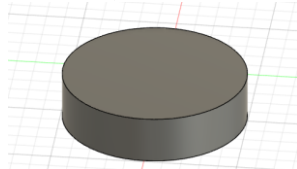


Figura 28 Paso 1. del Modelo en 3D de la base del módulo

- II. Posteriormente se vuelve a realizar un nuevo cilindro sobre la cara superior de la base del módulo, con medidas de 2.8 mm de diámetro y 0.7 mm de grosor, como se observa en la figura 29.

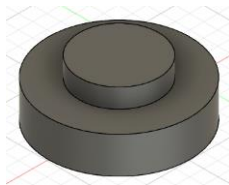


Figura 29 Paso 2. del Modelo en 3D de la base del módulo.

- III. Seguidamente se elabora la construcción de una esfera con diámetro de 2.8mm sobre la estructura que se tiene hasta el momento, véase figura 30

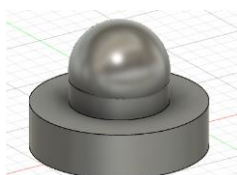


Figura 30 Paso 3. del Modelo en 3D de la base del módulo.

- IV. Después se corta aproximadamente 0.3 mm la parte superior de la esfera como se muestra en la figura 31.

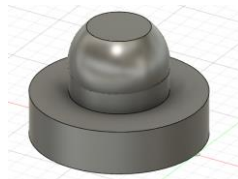


Figura 31 Paso 4. del Modelo en 3D de la base del módulo.

- V. Ya teniendo plana una parte de la esférica, se realiza una apertura como lo indica la figura 32.

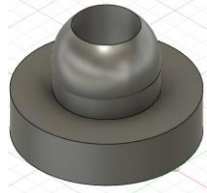


Figura 32 Paso 5. del Modelo en 3D de la base del módulo.

- VI. Finalmente, a la base se le agregan 9 orificios por los cuales pasarán los cables tensores como se observa en la figura 34.

Una vez definida la forma del módulo, se procedió con la determinación de la cantidad de módulos y segmentos que integrarían la parte móvil del robot. Ya conociendo las dimensiones que debe tener el prototipo de acuerdo a las especificaciones del laparoscopio convencional que se utiliza en la apendicectomía laparoscópica (20cm x 0,7 cm), se determinó que la parte móvil del robot contaría con un total de 3 segmentos conformados cada uno por 15 módulos como se observa en la Figura 33. Puesto que el hecho de que cuente con esta cantidad de segmentos permite que se realicen más curvaturas en el sistema, pero de este modo también hace que este sea más complejo.

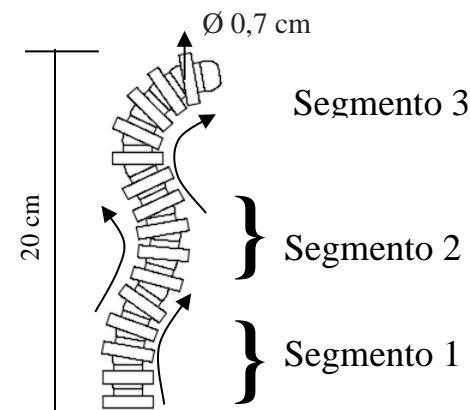


Figura 33 Diseño No. 1. Distribución del robot en tres segmentos conformados cada uno por cinco módulos.

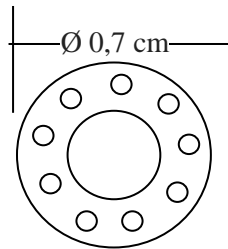
Adicionalmente esta distribución en cuanto a sus módulos y segmentos permite que no solo que presenten una repartición uniforme, sino que también puedan presentar zonas en las que el movimiento no es el mismo que en el resto de la estructura consiguiendo de este modo formas más suaves.

#### a. Ubicación de los cables tensores.

Después de definir la cantidad de segmentos que estarían presentes en la estructura móvil del robot, se comenzó con la determinación de la cantidad de cables tensores que tendría cada uno de ellos; gracias a la literatura y al estudio de modelos matemáticos, se pudo definir que los segmentos tenían que tener más de dos cables en ellos, puesto que si únicamente se contaban con dos, los movimientos que

realizaría el robot solamente serían de forma bidimensional, es decir en dos ejes, debido a que su ubicación estaría en contraposición, haciendo que los actuadores simplemente recojan y suelten el cable; mientras que si un segmento presenta tres cables o más, dependiendo de la ubicación que este tenga, el actuador adicional permitirá que se genere rotación en un tercer eje, logrando así la realización un movimiento tridimensional, es por esta razón que se definió contar con tres cables para cada uno de los segmentos, ya que al adicionarle más, no solamente el control del robot se hace más complejo, si no que también el desarrollo del mismo sería más costoso, puesto que cada cable tensor depende de un actuador.

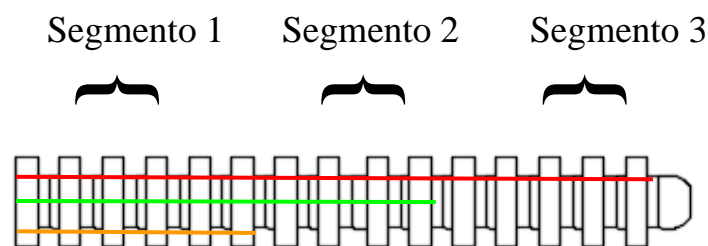
Posterior a lo mencionado anteriormente, se realizó la distribución de los orificios que permiten la conexión de los módulos para la generación de segmentos, teniendo en cuenta tanto el número total de cables tensores como la forma que se definió para la base del módulo.



*Figura 34 Vista inferior del módulo. Distribución de los orificios que permiten el paso de los cables tensores.*

Ya definida la distribución de los orificios, se prosiguió con la localización de los cables tensores, puesto que, dependiendo de la ubicación de cada segmento, se va a tener que variar la cantidad de cables en los mismos. Es decir que para la estructura móvil del robot se tuvo en cuenta lo siguiente:

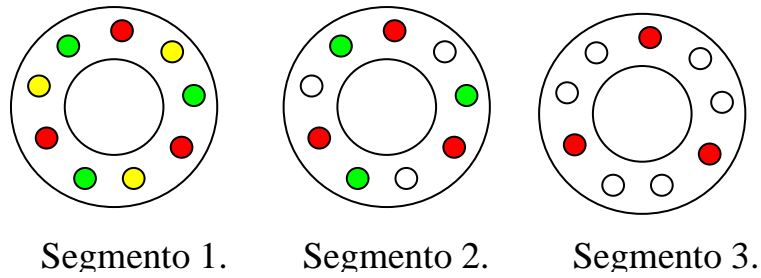
El segmento ubicado en la parte distal de la estructura contó con tres cables, esto con el fin de que los cables deberán pasar por los dos segmentos que lo anteceden, es decir, que el segmento proximal (1) contará con nueve cables, el segmento de la mitad (2) contará con seis para que de esta forma el segmento distal (3) pueda contar con tres cables (véase en la figura 35).



*Figura 35 Vista lateral de la distribución de los cables Diseño No. 1.*

Cabe mencionar que a pesar de que en las dos propuestas los segmentos tengan cables compartidos, los movimientos que cada uno de estos realizan son totalmente independientes.

Se determinó que la distribución de los tres cables para cada segmento fuera de forma perpendicular, para que, de este modo, al momento de la elaboración de los cálculos de las curvaturas que se requieren para cada uno de ellos, se puedan relacionar a partir de la altura y de la longitud del cable, teniendo en cuenta, que cada uno de los movimientos de los cables se distribuyen equivalentemente sobre los planos de desplazamiento.



*Figura 36 Localización de los cables tensores para el Diseño No. 1.*

*b. Estructura de la caja de actuación.*

Para el diseño de la estructura de los actuadores que permiten el movimiento de los segmentos, se tuvo que tener en cuenta una distribución que permitiera que los cables tensores al enrollarse y desenrollarse, no se enredan ni con ellos mismos, ni con los demás cables presentes en la estructura.

Adicional a lo anterior, también se debió tener presente que a diferencia de los laparoscópicos convencionales, este diseño iba a ser más robusto, puesto que la caja de actuación está compuesta por un gran conjunto de elementos, y por lo tanto la distribución de los mismos debía ser de tal forma que ocupará el menor espacio posible, puesto que es un actuador por cada cable, lo que quiere decir que la caja de actuación contó con nueve motores.

Para el presente diseño se plantearon dos opciones por medio de modelos 3D en el programa FUSION 360 del diseño de la estructura de actuación, con el fin de evaluar cuáles eran las dimensiones y distribuciones más adecuadas que iba a presentar la caja de actuación para que ésta ocupara el menor espacio posible, estas alternativas son:

1. Distribución circular de los actuadores: Esta opción consistió en ubicar los nueve actuadores formando una circunferencia.



*Figura 37 Distribución en circunferencia de los motores en la caja de actuación*

2. Distribución matricial de los actuadores: Esta propuesta consistió en ubicar los nueve actuadores en una matriz de 3x3, como lo muestra la figura 38.



*Figura 38 Distribución de forma matricial de los motores en la caja de actuación*

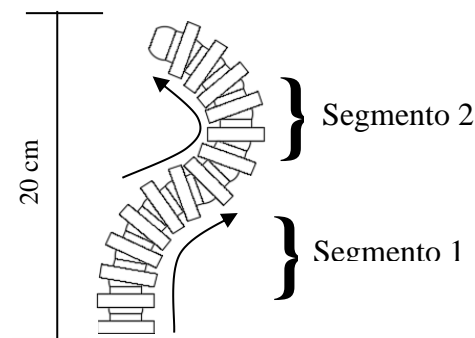
Cabe aclarar que las dimensiones de esta caja de actuación no influyen en las medidas propuestas de la estructura móvil del robot, puesto que el requerimiento definido que solicita que el laparoscopio cuente



con dimensiones de 20 cm x 0,7 cm aplica solamente para la parte que se va a introducir dentro del paciente, más no para las estructuras extra que lo componen.

## **DISEÑO DEL PROTOTIPO No. 2**

En cuanto al segundo diseño del prototipo, este se planteó en base a las ventajas y desventajas que se encontraron en el primer diseño, en donde en este se encontró, un fallo mecánico en cuanto a la localización de tres de los nueve actuadores utilizados, debido a que se notó que estos quedaban demasiado alejados del mecanismo móvil del robot, ocasionado que el segmento a los a cual estaban contactados, no produjera movimientos significativos, y que en algunos casos simplemente no se moviera, debido a que los cables tenores quedaban muy alejados desde los motores hasta el tercer segmento. Es por este motivo que se determinó que en el presente diseño contaría con un total de seis motores, para tener como resultado una estructura conformada por dos segmentos constituidos por 7 módulos en cada uno de ellos, a los cuales se les definió con una altura de 1,43 cm y un grosor de 7mm, para de esta forma cumplir con la especificación que indica que el laparoscopio para la apendicetomía laparoscópica es de 20 cm.



*Figura 39 Diseño No. 2. Distribución del robot en dos segmentos conformados cada uno por siete módulos.*

Además de la complejidad que generaba el primer diseño con la cantidad de segmentos que tenía, también se encontró otro problema en cuanto al diseño de los módulos, puesto que cuando se querían realizar ciertos movimientos en las articulaciones se generaba mucha fricción ocasionando que no se llegará la posición deseada y que los módulos se truncaran entre ellos, por esta razón se pensó que el diseño también debía contar con resortes de compresión entre módulo y módulo (Véase figura 40) que permitiera que los módulos se mantuvieran alineados entre ellos luego de realizar algún movimiento.



*Figura 40 Diseño de los módulos con los resortes integrados*

### *a. Ubicación de los cables tensores.*

Al igual que en el primer diseño, para el segundo se tuvo presente ubicar los cables tensores de manera perpendicular, pero como para este caso la estructura móvil del robot estará integrada por dos segmentos cada uno conformado por 7 módulos, se tuvo presente la siguiente distribución de los cables tensores:

El segmento ubicado en la parte distal debió contar con tres cables, para que de esta forma estos pasarán por el segmento que lo antecede, es decir, que el segmento proximal (1) contará con seis cables, para que de esta forma el segmento distal (2) pueda contar con tres cables (véase en la figura 41).

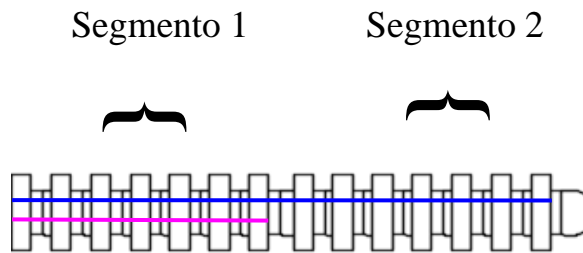


Figura 41 Vista lateral de la distribución de los cables en el diseño No. 2.

Gracias a esta distribución se determinó también la ubicación de los resortes que impedirían el desajuste los módulos, en donde se colocó un resorte por cada cable tensor, situados a lo largo de los dos segmentos como se observa en la Figura 42.

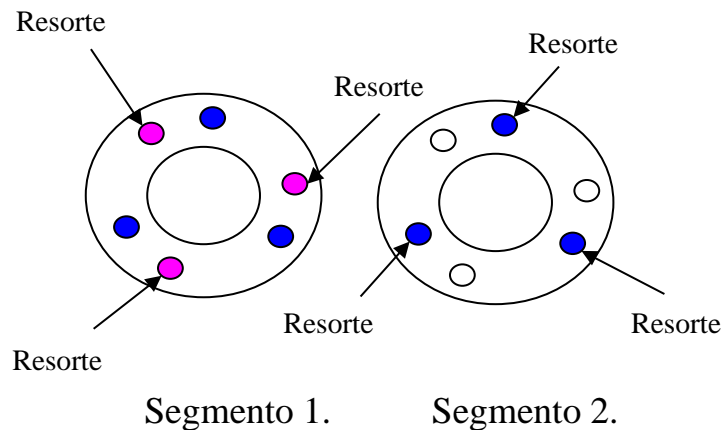


Figura 42 Localización de los cables tensores con sus respectivos resortes para el diseño No. 2.

*b. Estructura de la caja de actuación.*

Así mismo, para la propuesta el diseño No. 2 también se plantearon dos opciones por medio del programa FUSION 360 de la distribución de los actuadores, que en este caso son seis para la estructura de actuación que conforma este prototipo, con el motivo de poder definir cuál es la forma más eficiente que permita que dicha estructura ocupe el menor espacio posible, estas alternativas son:

1. Distribución lineal de los actuadores: Esta opción consistió en ubicar los seis actuadores formando dos filas constituidas por tres actuadores.

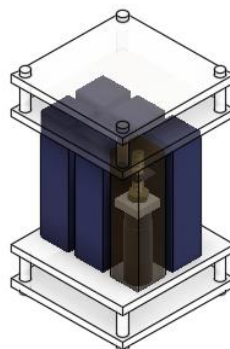


Figura 43 Distribución en filas de los motores en la caja de actuación

2. Distribución asimétrica de los actuadores: Esta propuesta consistió en ubicar los seis actuadores de forma lineal con respecto a la distribución de los cables tensores que unen a los segmentos.

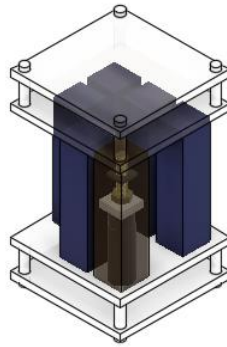


Figura 44 Distribución de forma matricial de los motores en la caja de actuación

### **DISEÑO DEL PROTOTIPO No. 3**

Después de ver tanto los pros como los contra que se encontraron en los diseños expuestos anteriormente, se llegó a la conclusión de que la mejor manera en la que el mecanismo pudiera realizar movimientos con  $n$  grados de libertad era quitando por completo las articulaciones, puesto que a pesar de que la articulación esférica es la que más grados de libertad posee, se genera demasiada fricción entre módulo y módulo y no se realizaban los movimientos con la suavidad que se deseaba; adicionalmente también se cayó en cuenta que la estructura necesitaba contar con una columna vertebral con el fin de que la estructura móvil del robot contará con cierta fuerza que le permitiera volver a la posición original por más movimientos que realizará.

Por esta razón se pensó en utilizar un resorte de compresión, con una constante de elongación de 125.83 N/m, que posibilitó movimientos suaves como columna vertebral, ya que este al ser una pieza elástica dispuesta en espiral permite que el mecanismo recobre su posición original después de haber sido deformado a causa de algún movimiento externo que se le haya realizado.

De igual forma que los dos diseños planteados previamente, este diseño también contó con segmentos y módulos, pero en este caso el diseño de los módulos sería completamente diferente, ya que, al contar con un resorte como la columna vertebral, los módulos estarían compuestos de un resorte de tensión, con una constante de elongación de 1235.1 N/m, el cual permitió la realización de las curvaturas internas deseadas, para que de esta manera, cada módulo quedará con un tipo de arandela cuya función principal es permitir el paso de los cables tensores a lo largo de toda la estructura móvil.

A continuación, se puede observar en la figura 45. la estructura de los módulos que conforman el diseño No. 3.

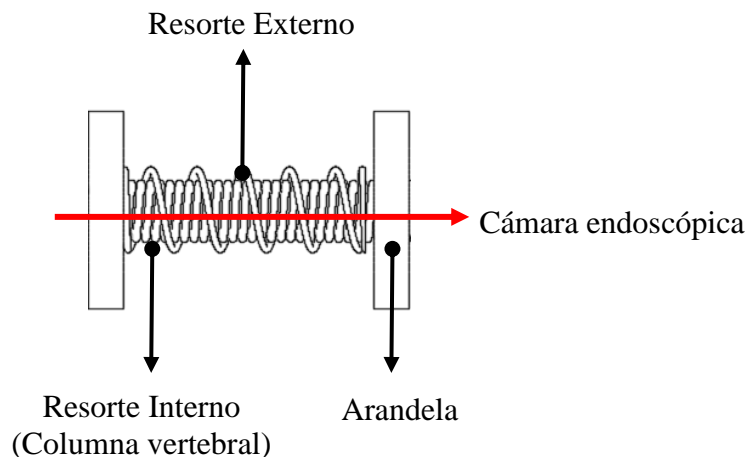


Figura 45 Diseño del módulo del diseño No. 3.

Para el caso de este diseño se determinó que la columna vertebral de la estructura contaría con un resorte interno de 20cm de largo y 7mm de grosor, además de esto, cada módulo iba a estar integrado por un resorte externo de 4 cm de alto y cada una de las arandelas que permiten el paso de los cables tensores iban a tener una altura de 1 cm. Ya con esto definido se obtuvo que el total de la estructura móvil del robot iba a estar constituida por cuatro módulos distribuidos en dos segmentos.

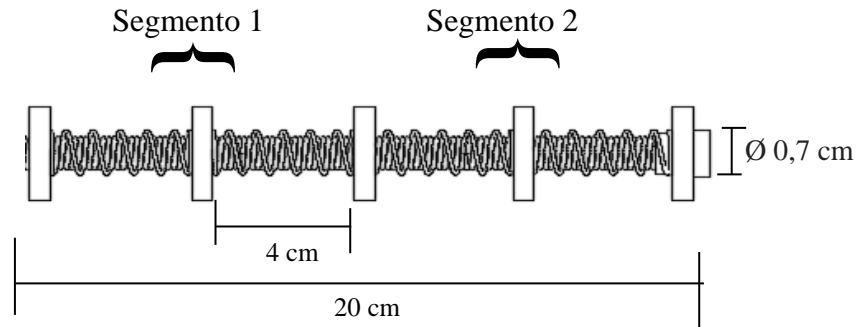


Figura 46 Diseño No. 3. Distribución del robot en dos segmentos conformados cada uno por dos módulos.

En cuanto al extremo distal del módulo final del robot, este se necesitaba que quedará fijo en la punta del resorte, y para esto se realizó un diseño especial de dicha arandela con el propósito que está quedará sujeta y no se corriera al momento de que el robot realizará algún tipo de movimiento. Por esta razón, para que dicha arandela no se moviera lo que se realizó fue colocar una base que se encajara en la mitad de los dos resortes, es decir que dentro de esta iba a pasar el resorte interno y por fuera iba a quedar el resorte externo, como se puede observar figura 47.

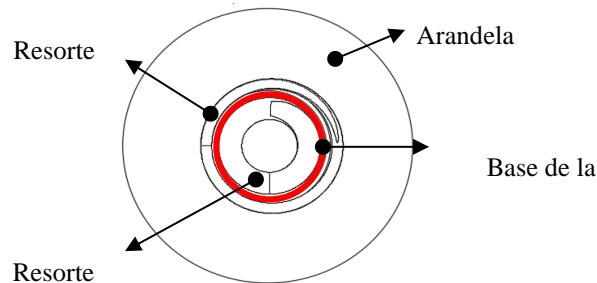


Figura 47 Base de la arandela.

Y para que el resorte interno no siguiera derecho como pasa en las otras arandelas, se creó un cilindro en la punta de dicha arandela, el cual permite solamente el paso de la cámara endoscópica y no el paso del resorte interno como se puede ver continuación en la figura 48.

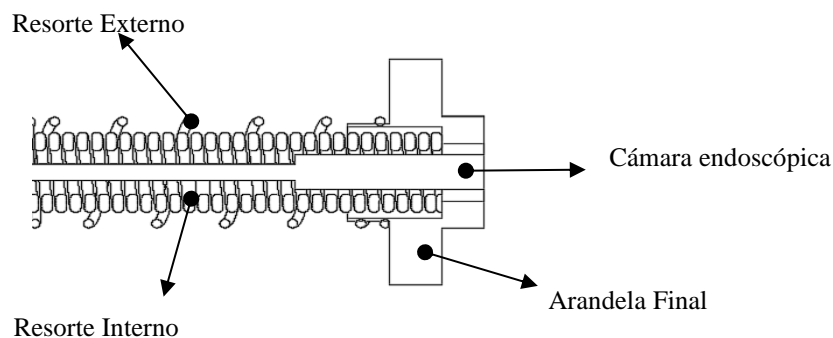


Figura 48 Vista lateral de la estructura interna de la arandela final

El diseño final de la arandela distal fue:



Figura 49 Diseño de la arandela final del robot.

Finalmente, por medio del software Arduino se establecieron los ángulos de curvatura máxima a los cuales iba a llegar cada uno de los segmentos, en donde se definió, que el primer segmento contaría con una curvatura máxima de  $60^\circ$  y el segundo segmento contaría con una curvatura máxima de  $45^\circ$ .

a. *Ubicación de los cables sensores.*

Así como se ubicaron los cables sensores en las bases de los módulos del segundo diseño, para el tercer diseño se tuvo en cuenta exactamente la misma ubicación, es decir de manera perpendicular, pero en este caso los cables pasaron a través de las arandelas que dividen cada uno de los módulos. Como el diseño de la presente estructura también cuenta con dos segmentos se tuvo en cuenta la siguiente distribución:

El segmento ubicado en la parte distal cuenta con tres cables sensores, estos pasan por el primer segmento, generando así que el segmento proximal (1) cuente con seis cables y el segmento distal (2) tenga tres cables (véase en la figura 50).

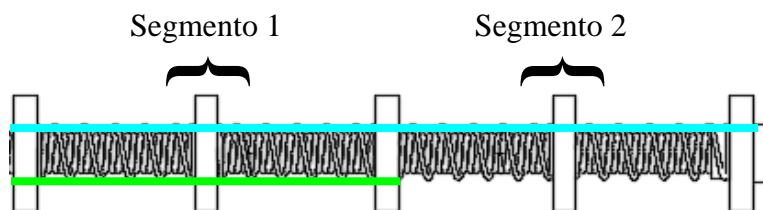


Figura 50 Vista lateral de la distribución de los cables en el diseño No. 2.

Aunque para la ubicación de los cables sensores también se hizo de forma perpendicular, los agujeros de las arandelas se hicieron un poco más alejados del centro por donde pasaba el resorte, debido a que si estos agujeros quedan muy pegados a la columna vertebral del mecanismo se generaba mucha fricción causando que el cable se tensionara a tal punto que no permitía realizar ningún movimiento, por esta razón la localización de los cables sensores en las arandelas del diseño No. 3 quedaron de la siguiente manera:

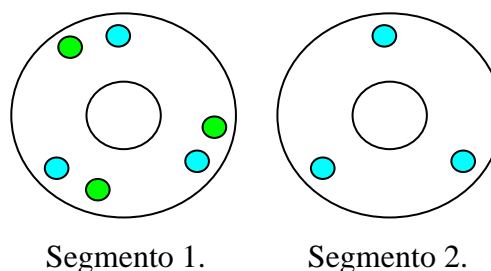


Figura 51 Localización de los cables sensores en las arandelas presentes en el diseño No. 2.

### *b. Estructura de la caja de actuación.*

Para la estructura de la caja de actuación del diseño No. 3, se siguió la misma distribución asimétrica de los motores expuesta en el diseño No. 2. Ya que de este modo los cables tensores pasan de forma directa desde el motor hasta cada uno de los agujeros de las arandelas, haciendo que no se genere fricción al momento de que los motores recojan o suelten los cables, ocasionado así movimientos más suaves.

## **Construcción de la Estructura del Robot.**

Para la construcción del laparoscopio basado en el modelo robótico *snake cable robot*, se inició con el montaje de la planta del prototipo No. 1 descrita anteriormente, a partir de esta y las pruebas realizadas correspondientemente se evidenciaron ventajas y desventajas en cuanto a su estructura y los materiales implementados, las cuales fueron vitales para la construcción de un segundo prototipo del mecanismo móvil, siguiendo con los pasos del prototipo No. 1 se determinaron las posibles opciones de cambio con el fin de mejorar su funcionalidad, de modo que se construye el prototipo No. 3 en base de las experiencias vividas con los prototipos No.1 y No. 2.

### **1. Caracterización de los materiales.**

En cuanto a la realización del montaje del robot, primero que todo se realizó la respectiva evaluación de cada uno de los materiales que constituyen el robot, esto con el fin de cumplir con los requerimientos expuestos a continuación:

- Requerimientos de calidad:
  - Los materiales con los que se construyó el equipo deben cumplir con propiedades mecánicas como son la maleabilidad, ductilidad y tenacidad, además de esto deben ser fáciles de limpiar.
- Requerimientos funcionales:
  - Los materiales que integran la mecánica del equipo deben permitir la realización de movimientos de forma redundante, los cuales ayudarán al usuario a tener una mejor inspección de la zona abdominal al momento de realizar el examen simulado de apendicetomía laparoscópica.

## **PROTOTIPO No. 1**

### ***A. Módulos y segmentos***

Para el material que integra tanto los módulos como los segmentos, inicialmente se buscaron algunos que contarán con características físicas y mecánicas como la rigidez, puesto que se necesitaba que las estructuras pudieran aguantar diferentes esfuerzos que se realizan a causa de los movimientos sin que estas llegaran a deformarse, además de esto también se buscaba que fueran ligeros, con el fin de que los actuadores no presentaran dificultad al moverlos, adicionalmente que fueran aptos para la impresión 3D, debido a que el modelo de los módulos se elaboró en un software CAD y se necesitaba que los todos módulos que conforman la estructura móvil del robot fueran exactamente iguales. También se buscó que el material fuera 100% renovable.

MATERIAL	Maleabilidad	Costo (\$)	Tamaño (m)	Rigidez	Ligereza	Total
PLA	3,5	5	2	3	5	3,7
Nylon	3	4	1	3	4	3
Tornear acero	2	3	1	5	3	2,8

Tabla 3 Matriz de decisión para los módulos y los segmentos del prototipo con la propuesta 1.

Gracias a la matriz de decisión presentada anteriormente (Véase tabla 3.) y a la evaluación de cada uno de los materiales presentes allí, se llegó a la conclusión de que el PLA es el material escogido para la elaboración de los módulos en el prototipo No. 1.

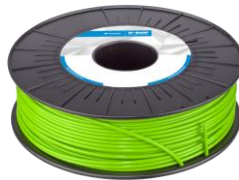


Figura 52 Rollo de PLA

### B. Cables tensores

En cuanto a la elección del material que compone a los cables tensores del robot, se tuvo que tener en cuenta que estos contarán con características como la elasticidad, ya que al momento de que el robot realizará movimientos curvilíneos estos se hicieran sin ningún problema, también se buscó que estos soportan altas tensiones, ya que era muy importante que no se soltaran o reventaran al momento que los actuadores los recogieran demasiado, así mismo, se tenía que considerar el grosor de los cables, puesto que ya establecido el tamaño de los orificios en el módulo, el cable tenía que atravesarlo fácilmente.

MATERIAL	Flexibilidad	Costo (\$)	Tamaño (Longitud)	Resistencia	Grosor	Total
Nylon 12lb	4	4	4,5	2	4,5	3,8
Hilo Textil	3	5	3	1	4,5	3,2
Fique	1	3,5	2	3,5	1	2,2

Tabla 4 Matriz de decisión para tensores de módulos en la propuesta 1.

De acuerdo con la matriz de decisión expuesta en la tabla 4, se definió que el material con mayor calificación fue el Nylon, y por ende este fue el que se utilizó para los cables tensores del robot, ya que este contaba con alta elasticidad lo cual permitía que el robot realizará los movimientos que se deseaban.



Figura 53 Rollo de NYLON

### C. Caja de actuadores

Para la estructura de la caja de los actuadores, se pensó en materiales que cumplieran características como la maleabilidad, ya que se quería que la estructura que rodea a los motores fueran láminas sencillas de moldear, adicional a esto, también se necesitaba que fueran tenaces, ya que en el caso de que sucediera algún accidente, los motores dentro de dicha estructura no sufrirían daños, así mismo, también se tuvo en cuenta el grosor, ya que si este era muy grueso se podrían aumentar las dimensiones de la caja y en el caso de ser muy delgado no soportaría el peso de la estructura y tendería a doblarse.

MATERIAL	Maleabilidad	Costo (\$)	Tamaño (m)	Grosor	Tenacidad	Total
Aluminio	5	5	4.7	5	5	4,94
PVC	3.5	5	3.5	4	3	3,8
Cobre	2	3	4	5	3	3,4

Tabla 5 Matriz de decisión para soporte de los motores de la propuesta 1.

Conforme a la evaluación de la tabla 5. se determinó que el material con el que se iba a construir la estructura de la caja de los actuadores iba a ser aluminio en forma de tubos cuadrados.

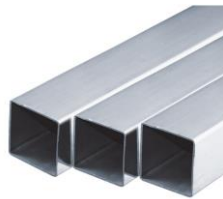


Figura 54 Tubos de aluminio.

#### D. Estructura de Soporte

La estructura de soporte del mismo, se buscaron materiales que presentarían propiedades que permitieran que la estructura total fuera resistente al soporte de los demás materiales mencionados en los ítems anteriores y que adicionalmente no tuvieran riesgo de quebrarse o romperse ocasionando daños en la integridad de la estructura.

MATERIAL	Manejabilidad	Costo (\$)	Tamaño (cm)	Dureza	Grosor	Total
MDF	4	3	5	4,5	4	4,1
MDP	3	2,5	5	4	3,5	3,8
OBS	2	2	5	5	2	3,2

Tabla 6 Matriz de decisión para material de soporte del prototipo de la propuesta 1.

Gracias a la evaluación realizada en tabla 6, se determinó que el MDF es el material que se utilizará para componer la estructura del robot debido a que fue el material que cumplía con la mayoría de propiedades físicas que se buscaban para el soporte del mismo.



Figura 55 MDF de 5mm.



## PROTOTIPO No. 2

### A. Módulos y segmentos

Pese a que el PLA fue el material escogido para el prototipo No. 1 ya que cumplía con la mayoría de características físicas que se estaban buscando, se notaron algunas irregularidades en cuanto al acabado de las mismas, ya que a pesar de que a estas se les realizó su respectivo post procesamiento, el material no permitía que las articulaciones de los módulos encajaran correctamente causando que el mecanismo realizaría movimientos forzados. Por esta razón se volvió a realizar una nueva evaluación con otros materiales para el prototipo No. 2 que se adaptarán a la impresión 3D y que cumplieran con algunas de las características físicas que se establecieron como lo muestra la tabla 7.

MATERIAL	Maleabilidad	Costo (\$)	Tamaño (m)	Rigidez	Ligereza	Total
ABS	4	5	4,5	4	5	4,5
PETG	5	3	3,5	2,5	4	3,6
Fibra de Carbono.	5	1	3	4,5	4	3,5

Tabla 7 Matriz de decisión para los módulos y los segmentos del prototipo con la propuesta 2.

Una vez realizada la comparación de los materiales propuestos en la tabla 7 se definió que el material a usar sería el ABS, ya que este presenta en sus propiedades físicas resistencia a la fatiga, resistencia a la fisuración por tensión y alta resistencia al impacto, lo cual es ideal ya que los módulos están expuestos a tensión permanente ocasionada por los cables, adicionalmente se notó que los detalles de los módulos en su post procesamiento permitieron que las articulaciones de estos encajaran fácilmente logrando así movimientos suaves y finos entre ellos.



Figura 56 Rollo de ABS

#### ● Resortes:

Con el fin de determinar los resortes apropiados para colocar entre cada uno de los módulos y que estos generan mayor estabilidad en el mecanismo móvil del prototipo se realizó la siguiente matriz de decisión (Tabla 8) en donde se puede evidenciar el resorte acorde para cumplir este requerimiento.

MATERIAL	Flexibilidad	Costo (\$)	Tamaño (Longitud)	Resistencia	Total
Resorte de compresión	5	5	5	5	5
Resorte de tensión	1	4	2	5	3

Tabla 8 Matriz de decisión para los resortes en la propuesta 2.

Como se puede evidenciar en la tabla anterior, los resortes de compresión permiten que el sistema pueda generar contracción y extensión al momento de realizar los movimientos a diferencia del resorte de tensión, provocando que el mismo retorne paulatinamente a la posición original, aunque cabe resaltar que el mecanismo no llega a la posición deseada de manera correcta, pues aun así se siguen presentando fricción entre las articulaciones de las impresiones impidiendo su movimiento adecuado.

### **B. Cables tensores**

A pesar de que el nylon fue la opción seleccionada para el prototipo No. 1, cuando se empezó a probar el mecanismo, este material se reventaba al momento de que los actuadores recogían mucho el cable, lo cual no solo hacía que el cambio de los mismos fuera tedioso, sino que también retrasaba y alteraba los movimientos que se establecían. Por esta razón, para el material de los cables tensores del prototipo 2, se buscó uno que además de contar con la característica de ser flexible, fuera resistente.

<b>MATERIAL</b>	<b>Flexibilidad</b>	<b>Costo (\$)</b>	<b>Tamaño (Longitud)</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Grosor</b>	<b>Total</b>
<b>Guayas de Acero</b>	5	5	5	5	5	5
<b>Hilo de pesca</b>	5	2,5	4,5	4	4,5	4,1
<b>Cáñamo</b>	4	3	4,5	4,5	4	4

*Tabla 9 Matriz de decisión para tensores de módulos en la propuesta 2.*

Luego de realizar la matriz de decisión presente en la tabla 9. se determinó que el material para usar en los cables tensores iba a ser las guayas de acero, ya que estas cuentan con múltiples hilos enrollados entre sí lo cual permite que resistan altas tensiones sin el riesgo de que se revienten, adicionalmente también proporciona una gran flexibilidad que permitió la realización de los movimientos curvilíneos que se estaban buscando y su grosor fue ideal en cuanto a su adaptación para cada uno de los módulos que integran al robot.



*Figura 57 Guayas de Acero*

### **C. Caja de actuadores**

Ya que este material no presentó ningún problema cuando se utilizó en el prototipo No. 1, se decidió también usarlo en la construcción del prototipo No. 2.

### **D. Estructura de Soporte**

Al igual que los materiales utilizados para la caja de actuación, para la estructura de soporte también se utilizaron los materiales propuestos en el prototipo No. 1, ya que no presentaron ninguna falla en cuanto a su funcionamiento.

### PROTOTIPO No. 3

#### a. Módulos y segmentos

Aun cuando ya se implementaron resortes de compresión, se observó que el prototipo No. 2 no genera los movimientos adecuados puesto que las articulaciones de las piezas impresas en PLA generaban fricción entre las mismas. Sin embargo, al verse que la disposición física de la estructura móvil del robot no era la precisa en cuanto a sus movimientos, se decidió optar por implementar un mecanismo móvil más flexible desde su interior a su exterior, de modo que: se hizo uso un resorte interno, resortes externos y arandelas.

- **Resorte Interno - “Columna vertebral”**

En cuanto al resorte interno, se estableció que este debía cumplir con la virtud de provocar que el mecanismo móvil del prototipo regresará a la posición inicial “home” sin necesidad que los motores se excedieran en su fuerza y que mantuviera su propiedad física antes y después de someterse diferentes movimientos a lo largo de los tres ejes (x,y,z). Por lo cual se evalúan tres tipos resortes (Tabla 10), con el fin de lograr identificar el más apropiado a los requerimientos mencionados anteriormente.

MATERIAL	Rigidez	Costo (\$)	Tamaño (Longitud)	Grosor	Total
Resorte de tensión	5	5	5	5	5
Resorte de torsión	4,3	4,5	4,5	4,5	4,4
Resortes de doble torsión	3	4	4	4,5	3.8

Tabla 10 Matriz de decisión para el resorte interno de la propuesta 3



Figura 58 Resorte de tensión

Teniendo en cuenta la tabla 10, se puede determinar que la opción más adecuada es el resorte de tensión de 20 cm de largo, el cual cumpliría la función de la “columna vertebral” (resorte interno) produciendo que el mecanismo tuviera la capacidad de regresar a la posición original “home” sin mayor esfuerzo y sin necesidad de saturar los motores a diferencia de los otros dos resortes puesto que el resorte de torsión permite sobrellevar una fuerza rotacional (torque) mayor a la necesaria, mientras que el resorte de doble torsión al contar con la unión de dos resortes de torsión como su nombre lo dicen provoca que este genere más fuerza al momento de realizar los movimientos deseados, además de que al contar con un puente en la mitad de su estructura impide los movimientos provocados por el mecanismo móvil no se generarán.

- **Resortes externos:**

Los resortes internos debían contar con la posibilidad de mantener los segmentos separados generando a su vez que la estructura estuviera proporcional y que al momento de realizar los movimientos en cualquiera de los tres ejes estos no sufrieran deformación y fuesen capaces de seguir el movimiento del

resorte interno sin interrumpir los mismo ni generar daño en este, de modo que en se hace la elección de los resortes más acordes a partir de la tabla 11.

MATERIAL	Rigidez	Costo (\$)	Tamaño (Longitud)	Grosor	Total
Resorte de compresión	5	5	5	5	5
Resorte de tensión	3	4,5	4	4,5	4
Resortes entrelazadles	3	4,5	4	4	3,8

Tabla 11 Matriz de decisión para los resortes externos de la propuesta 3.



Figura 59 Resorte de compresión

Luego de identificar de manera precisa cada una de las características puntuales de los resortes para el mecanismo móvil del prototipo, se descartaron los resortes de tensión y entrelazadles, puesto que el primero genera más fuerza de la necesaria, además que su estructura física al no contar con espacio entre sus anillos, no le permite comprimirse y el segundo, su fragilidad a lo movimiento no van a permitir que los módulos generen la compresión necesaria para producir los movimientos. De modo que el resorte de compresión es el más adecuado para el ensamble de la estructura, ya que es capaz de brindar la rigidez necesaria para que el mecanismo pueda realizar los movimientos generados por el usuario sin alterarlos, sin modificar su estructura física y sin interrumpir el movimiento sincrónico que está realizando el resorte interno (columna vertebral).

Teniendo en cuenta lo anterior, se hizo uso de 4 resortes de compresión en donde cada 2 resortes iban a formar un segmentos, es decir, 1 resorte equivale a un módulo generando que los movimientos solicitados por el usuario se cumpliera lo más preciso posible, pues se forman las curvaturas apropiadas para lograr el punto final, además de dar soporte y la distancia adecuada a cada uno de los módulos, pues a pesar de la fricción que se genere no cambiará sus propiedades mecánicas.

- **Arandelas:**

Para la elección del material de las arandelas, se buscaba que estas separaran los módulos y a su vez los segmentos, teniendo en cuenta que estas debían contar con un diámetro preciso, con un grosor que no interrumpiera los movimientos de los resortes en su recorrido (movimientos x,y,z) y que su material fuese resistente a la tensión que los cables tensores le fueran a producir en ellas con el fin de jalar los mismos, de modo que se establece la siguiente matriz de decisión, donde se exponen tres materiales diferentes (Tabla 12).

MATERIAL	Rigidez	Costo (\$)	Grosor	Diámetro	Total
Impresión 3D	5	4	5	5	4,7
Metal	5	4,5	3	5	4,3
Aluminio	4,5	4	2	5	3,8

Tabla 12 Matriz de decisión para las arandelas de la propuesta 3

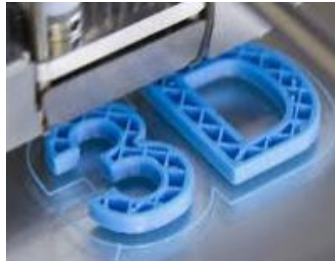


Figura 60 Impresión 3D

Se escogieron las arandelas impresas 3D específicamente en PLA, ya que estas piezas separan y sostienen cada uno de los resortes externos de manera apropiada pues el diseño contó con el acople de cada uno de los extremos de estos en cada una de las fichas, además el grosor que con el cual contaban no permitió que este ingresara a las separaciones de los resortes. En cambio, las arandelas de metal y aluminio a pesar de contar con una gran resistencia, rigidez y un costo inferior al de las impresiones 3D, estos materiales por su grosor interrumpían los movimientos que realizaba el mecanismo móvil pues al ser tan delgadas (contar con menos de 0,2 mm), se incrustaban principalmente en el resorte interno (columna vertebral) provocando que los resortes externos no generarán el movimiento adecuado puesto que detenían su compresión y extensión.

#### b. Cables tensores

A pesar de realizar pruebas en el prototipo No. 1 y No. 2 se probaron con Nylon y con Guayas estas no tuvieron buenos resultados, puesto que como se mencionó anteriormente, el nylon al estar sometido a tensión este se reventaba provocando que la estructura perdiera su objetivo principal (moverse), mientras que la guaya a diferencia del nylon si contaba con mayor resistencia, sin embargo su manejo y su estructura ergonómica era más compleja en cuanto a la manejabilidad, además al recogerse en el motor winch, no tomaba la posición adecuada y al contrario tendría a envolverse en el mismo provocando que este no soltara o recogiese lo solicitado y el mecanismo móvil no funcionará de manera adecuada.

Por ende, se procede nuevamente a realizar una matriz de decisión (Tabla 13) en la cual se exponen tres diferentes materiales teniendo en cuenta las características necesarias para el cumplimiento de los requerimientos para los cables tensores.

MATERIAL	Resistencia	Costo (\$)	Manejabilidad	Diámetro	Total
Nylon 100 LB	5	5	5	5	5
Nylon 12 LB	3	5	5	3	4
Guayas de acero 1/8	5	4	2	4	3, 2

Tabla 13 Matriz de decisión para los cables tensores de la propuesta 3

Como se evidencio en la tabla 13, el nylon de 100 LB cumple con todos los requerimientos puesto que a diferencia del nylon de 12 LB este cuenta con más resistencia provocando que no se rompa con facilidad y a su vez con mayor diámetro, aunque las guayas de acero también contaban con gran resistencia a movimientos fuertes, como se mencionó anteriormente estos no son tan fáciles de manejar y su estructura física no es funcional para relacionarse con los motores winch. De modo que en el prototipo No. 3 se decidió trabajar con el nylon de 100 LB, teniendo en cuenta su buen desempeño a lo largo de las pruebas.



Figura 61 14 Nylon 100 Lb

### c. Caja de actuadores

Ya que este material no presentó ningún problema cuando se utilizó en el prototipo No. 1, se decidió también usarlo en la construcción del prototipo No. 2.

### d. Estructura de Soporte

Al igual que los materiales utilizados para la caja de actuación, para la estructura de soporte también se utilizaron los materiales propuestos en el prototipo No. 1, ya que no presentaron ninguna falla en cuanto a su funcionamiento.

## 2. Acondicionamiento de los materiales.

### PROTOTIPO No. 1

Para realizar el acondicionamiento de los materiales que constituyen la estructura del robot planteada en el prototipo No. 1, se comenzó con la impresión de los módulos modelados en FUSION 360, como se indica a continuación:

- I. Para empezar con el proceso de impresión, se exportó el modelo 3D del módulo realizado en FUSION 360 en un archivo de tipo. stl
- II. Después se procedió a abrir este archivo a un programa llamado CURA, el cual es un software que está diseñado para imprimir archivos en 3D.
- III. Ya con el archivo del módulo escalado con las medidas especificadas en el ítem 2.b del diseño preliminar (1,3 cm x 0.7 cm), se siguió con la conexión de CURA a la impresora.

Nota: Para temas de ahorro de tiempo y gracias al tamaño de los módulos, (debido a que las impresiones 3D se demoran bastante tiempo al momento de imprimir un objeto), se acomodaron los 15 módulos para que de este modo todos se obtuvieron en una misma impresión.

- IV. Establecida dicha conexión, se precalentó la impresora con el motivo de que esta pudiera calentar el filamento (PLA) para que de esta manera pudiera moldearlo con el propósito de obtener la figura que se deseada.
- V. Una vez que se aseguró que el filamento estaba fluyendo correctamente, en CURA se ejecutó la opción "Print" y la impresora comenzó a hacer su trabajo.
- VI. Después de esperar aproximadamente 4 horas, con las fichas ya impresas, se continuó con la fase de post procesamiento, puesto que, al imprimirse las 15 fichas juntas, la impresora generó una capa que unió a los módulos en la base, como se puede ver en la figura 62.

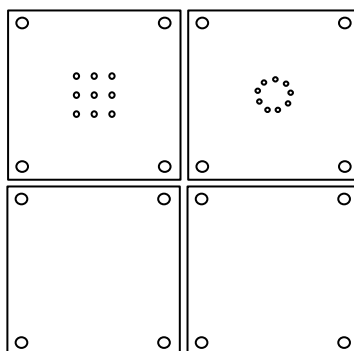


*Figura 62 Impresión 3D de los módulos del robot con el material del prototipo No. 1.*

- VII. Después de separar cada uno de los módulos de esa base que se creó, cada una de las figuras se bañaron en acetona para que se volvieran un poco más blandas y de este modo poder arreglar algunas estructuras que se deseaban remover y de este modo poder darles un acabado más fino.

Una vez impresos los módulos, se continuó con el corte laser del MDF que compone la estructura de soporte del robot, para esto se llevó a cabo la siguiente metodología:

- I. En un comienzo se elaboró el plano de las estructuras que integran el soporte en el programa fusion 360, estos planos contaron con cuatro placas cuadradas, a las cuales se les incluyó cuatro circunferencias de 0.7 cm de diámetro ubicadas en las cuatro esquinas de cada placa, adicionalmente, a una de ella se le agregó nueve orificios centrales de 0.1 cm diámetro, los cuáles son los que permiten el paso de los cables tensores desde los motores hasta los segmentos, y a otra de ellas se le agregó nueve orificios que encajaran con los orificios de la base del módulo.
- II. Seguidamente, dichos planos se exportaron en un archivo en .dxf (Como se muestra en la figura 63), ya que este es el formato que acepta RD Works (software que conecta la cortadora láser).



*Figura 63 Visualización del archivo .dxf de las partes que forman la estructura de soporte del Robot*

- III. Cuando se importó el archivo a RD Work, se marcó el punto desde donde el láser iba a comenzar el corte, en este caso desde la superficie superior derecha.
- IV. Luego de realizar la alineación del plano con el MDF, se configuró la velocidad y la potencia de corte y posteriormente se guarda del trabajo en REDWork.
- V. Con la configuración del programa lista, se continúa con la colocación del MDF en la cortadora láser, cuidando que la tabla quede perfectamente alineada con la base de la máquina.
- VI. Luego de realizada dicha alineación, se buscó que la altura del láser con respecto al material quede aproximadamente de 5 mm.
- VII. Una vez configurado esto, se colocó el archivo guardado de RD Work en el panel de control de la máquina, esta se encendió y se comenzó así con el corte respectivo.

Finalmente, se elaboraron los cortes respectivos de los tubos de aluminio, puesto que el tubo comprado contaba con una medida de 3m x 1 pulgada, por esta razón se dividió dicho tubo en 9 piezas de 12 cm de longitud (Cada una) con el fin de cubrir los actuadores en su totalidad.

## PROTOTIPO No. 2

En cuanto a la realización del procesamiento de los materiales que constituyen el prototipo No. 2 de la estructura del robot, se comenzó con la impresión de los módulos elaborados en FUSION 360, como se indica a continuación:

- I. Para estas impresiones se siguieron los pasos I y II descritos anteriormente en el prototipo No. 1.
- II. Ya con el archivo del módulo escalado con las medidas específicas definidas para la propuesta número 2 propuesta en el diseño preliminar de 1.43. cm x 0.7 cm, se siguió con la conexión de CURA a la impresora.

Nota: Para este caso, se imprimieron las fichas en intervalos de a 7 piezas por impresión con el fin de prevenir que se formará la capa extra que se generó en las fichas descritas en la propuesta uno, para que de este modo se logrará evitar la realización un post procesamiento que llegara a alterar la forma de los módulos y así poder lograr un acabado más fino sin ninguna modificación extra. Adicionalmente se le puso a todos los módulos un relleno del 100% para que quedarán macizos.

- III. Establecida dicha conexión, se precalentó la impresora con el filamento (ABS) puesto para que de esta manera se pudiera moldear y así obtener la figura determinada en la impresión.
- IV. Una vez con las fichas ya impresas, se retiraron de la impresora, se limpiaron y quedaron listas para el montaje del mecanismo del robot.



Figura 64 Impresión 3D de los módulos del robot con el material del prototipo No. 2.

Una vez impresos los módulos, se continuó con el corte laser del MDF que compone la estructura de soporte del robot, para esto se llevó a cabo la siguiente metodología:

- I. Se siguió el mismo procedimiento descrito en el paso uno de la primera propuesta descrita anteriormente, con la diferencia de que en vez de agregar nueve orificios a los planos realizados en FUSION 360, se agregaron seis orificios para que encajaran con los de la base de los módulos en una placa de MDF, y en otra se realizaron igualmente en 6 orificios pero para este caso para permitir el paso de los cables tensores desde los actuadores hasta los segmentos y un agujero extra a cada placa para el paso de la cámara.
- II. Seguidamente, dichos planos se exportaron en un archivo en .dxf (Como se muestra en la figura 65).

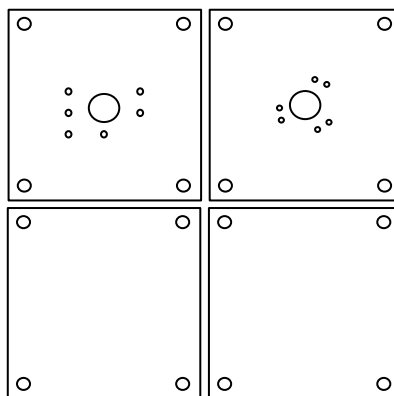


Figura 65 Visualización del archivo .dxf de las partes que forman la estructura de soporte del Robot



- III. Posteriormente se siguieron los mismos pasos del III al VII descritos en la metodología descrita en el prototipo No. 1 para el corte láser y de esta forma obtuvieron los cortes descritos en la figura 65.

Finalmente, se utilizaron los mismos tubos de aluminio utilizados en el prototipo 1, pero en este caso solo se usaron seis, ya que esta es la cantidad de actuadores presentes en el prototipo 2.

### PROTOTIPO No. 3

Para la elaboración del procesamiento de los materiales que constituyen la propuesta número No. 2 de la estructura del robot, se comenzó con la impresión de las arandelas que hacen parte de los módulos en FUSION 360, como se indica a continuación:

- I. Para estas impresiones nuevamente se siguieron los pasos I y II descritos en la propuesta No. 1.
- II. Ya con el archivo de la arandela escalado con las medidas específicas que se requieren para que estas se acomoden tanto al resorte interno como para el resorte externo que conforman la mecánica de la estructura móvil del robot , se continuó con la conexión de CURA a la impresora.
- III. Una vez determinada dicha conexión, se precalentó la impresora con el filamento (PLA).
- IV. Ya con las arandelas impresas, se retiraron de la impresora, se limpiaron y lijaron para darles un acabado más fino.



Figura 66 Impresión 3D de las arandelas del prototipo No. 3.

- a. Arandela ubicada a lo largo del resorte
- b. Arandela ubicada en la punta del resorte.

Una vez impresas las arandelas, se determinó usar las mismas placas de MDF utilizadas en el prototipo No. 2, con la diferencia de que en este caso solamente se utilizaron 3 placas (como se observa en la figura 66), ya que los cables tensores se colocaron directamente desde la placa que sostiene los actuadores, esto con el fin de que se generara menos fricción cuando se recogía y se soltaba el cable.

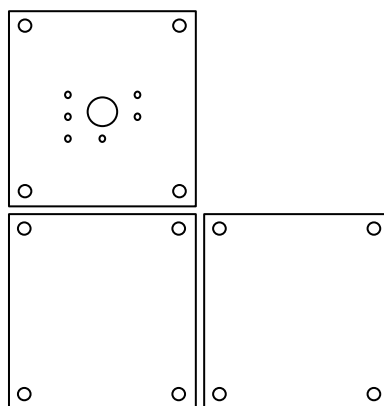


Figura 67 Visualización del archivo .dxf de las partes que forman la estructura de soporte del Robot en el prototipo No. 3

Cabe aclarar que también se utilizaron los mismos tubos de aluminio empleados en los dos prototipos anteriores.

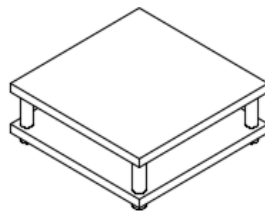
### 3. Montaje de la estructura del robot

#### PROTOTIPO No. 1

- I. Se unieron los primeros cinco módulos con el propósito de formar el primer segmento de la estructura móvil del robot por medio de tres cables tensores distribuidos de forma perpendicular.
- II. Ya teniendo el primer segmento integrado, se procedió hacer la misma metodología de unión descrita en el paso anterior con el segundo segmento, con la diferencia de que para poder unir los dos segmentos, los cables del segundo debían atravesar el primero, haciendo que el primer segmento contará con seis cables y el segundo con tres.
- III. Para finalizar, se repitió el paso uno con el tercer segmento, y al igual que en el caso anterior, para que el tercer segmento logrará contar con tres cables y a su vez estar conectado con el segmento uno y dos, se colocaron los respectivos cables de dicho segmento, haciendo que la estructura móvil final tuviera la siguiente distribución:
  - A. Segmento 1: 9 cables
  - B. Segmento 2: 6 cables
  - C. Segmento 3: 3 cables

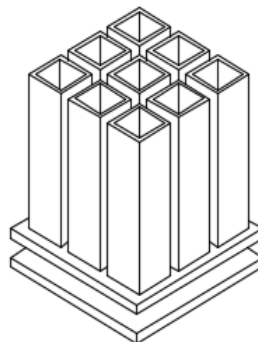
*Nota: cabe aclarar que la longitud de cada uno de los cables tensores es de aproximadamente 37 cm.*

Con la estructura móvil del robot ya integrada, se procedió con el montaje de la estructura de soporte, para esto se unieron dos de las cuatro las placas de MDF cortadas en láser, por medio de los orificios incorporados, se acomodaron de manera paralela dejando una distancia aproximada de 4 cm. cómo se observa en la figura 68.



*Figura 68 Unión de la base de la estructura de soporte.*

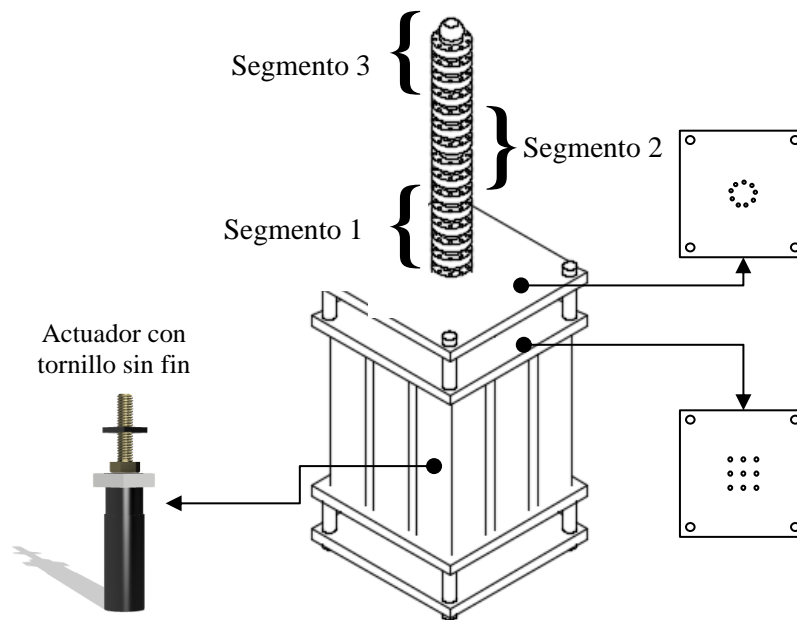
Después de tener construida la base, se continuó con el posicionamiento de los tubos de aluminio siguiendo una distribución matricial de 3x3 como se observa en la figura 69.



*Figura 69 Ubicación de los tubos que conforman la caja de actuación en la propuesta 1.*

Una vez acomodados y pegados los nueve tubos de aluminio que conforman la caja de actuación, a cada uno de estos se les agregó su respectivo actuador, a dichos motores se les integró un mecanismo por medio de un tornillo sin fin con el propósito de que allí se conectará cada cable tensor y de esta forma cuando el motor girará el cable se enrolla o se desenrolla generando los movimientos en los segmentos, después de haber puesto los motores en sus respectivos tubos, se terminó de ensamblar la estructura de la siguiente manera:

- I. A las dos placas que contienen los nueve orificios extra se les atravesó los nueve cables tensores para que estos pudieran ajustarse a sus respectivos actuadores.
- II. Luego de conectar los cables a los actuadores, por medio de un tornillo se unieron dichas tablas dejando una distancia de aproximadamente 4 cm, logrando así el montaje final de la estructura mecánica del robot, como se observa en la figura 70.



*Figura 70 Montaje final de la estructura mecánica del prototipo No. 1.*

## **PROTOTIPO No. 2**

- I. Se unieron los primeros siete módulos con el propósito de formar el primer segmento de la estructura móvil del robot por medio de tres cables tensores distribuidos de forma perpendicular.
- II. Ya teniendo el primer segmento integrado, se procedió hacer la misma metodología de unión descrita en el paso anterior con el segundo segmento, con la diferencia de que para poder unir los dos segmentos, los cables del segundo debían atravesar el primero, haciendo que el primer segmento contará con seis cables y el segundo con tres, haciendo que la estructura móvil final tuviera la siguiente distribución:

- A. Segmento 1: 6 cables
- B. Segmento 2: 3 cables

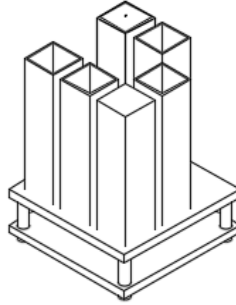
*Nota: cabe aclarar que la longitud de cada uno de los cables tensores es de aproximadamente 45 cm .*

- III. Ya teniendo integrados tanto los módulos como los segmentos, se les agregaron los resortes respectivos a cada uno de los módulos como se puede observar en la figura 71. Cada módulo contó con tres resortes, en donde estos iban ubicados alrededor de los cables tensores pertenecientes a cada segmento.



*Figura 71 Ubicación de los resortes en cada uno de los módulos*

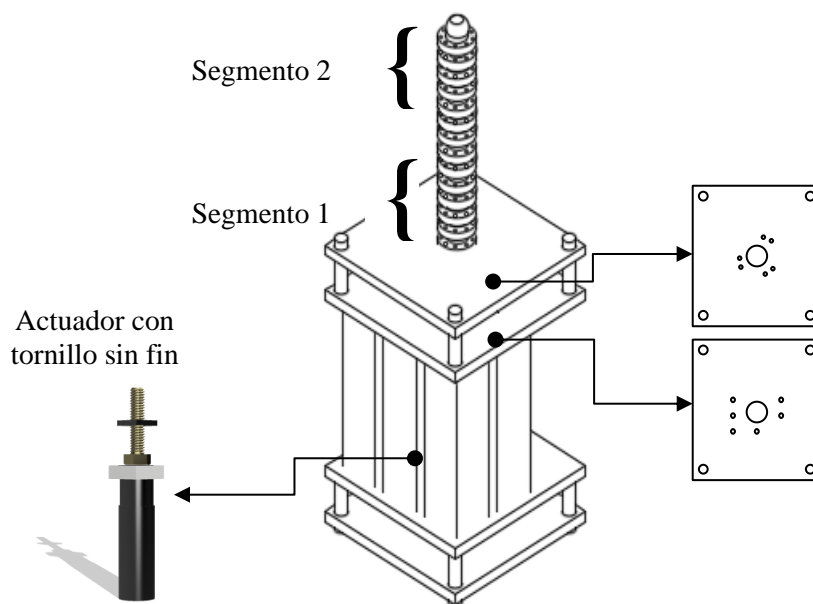
Para la integración de la estructura móvil del robot con la estructura de soporte y la caja de actuación, se siguió el mismo procedimiento que en el prototipo No. 1, con la diferencia de que en este caso la distribución de los tubos de aluminio sigue la distribución asimétrica como se observa en la figura 72.



*Figura 72 Ubicación de los tubos que conforman la caja de actuación en el diseño No. 2.*

Una vez acomodados y pegados los seis tubos de aluminio que conforman la caja de actuación, al igual que en el prototipo 1, a cada uno de estos se les agregó su respectivo actuador y se les integró un mecanismo por medio de un tornillo sin fin en donde allí se enrollaron los cables tensores para permitir el movimiento de los segmentos de la parte móvil del robot, para de esta forma terminar de ensamblar la estructura de la siguiente manera:

- I. A las dos placas de MDF restantes que contienen los seis orificios extra se les atravesaron los seis cables tensores para que estos pudieran ajustarse a sus respectivos actuadores.
- II. Luego de conectar los cables a los actuadores, por medio de un tornillo se unieron las láminas de MDF dejando una distancia de aproximadamente 4 cm, logrando así el montaje final de la estructura mecánica del robot, como se observa en la figura 73.



*Figura 73 Montaje final de la estructura mecánica del prototipo No. 2.*

### PROTOTIPO No. 3

- I. Para el montaje del prototipo No. 3 se unieron 3 placas de MDF por medio de 4 tornillos sin fin
- II. Ubicados en las esquinas de cada una de éstas (Véase figura 73), dejando una distancia de aproximadamente 10 cm entre las dos primeras placas, con el fin de acomodar en este espacio los cables de los actuadores y el circuito que permite el control; y una distancia de 12 cm entre la segunda y la tercera, en donde se integró la caja de actuación del mecanismo.
- III. Una vez con las placas de MDF acomodadas a lo largo de los 4 tornillos, se colocaron las 6 cajas de aluminio con su respectivo actuador organizados en la distribución asimétrica utilizada también en el prototipo No. 2 y se pasaron los cables tensores de cada uno de los motores a través de la tercera placa de MDF que tenía los respectivos agujeros integrados.
- IV. Ya con los cables tensores acomodados, se procedió con el montaje de la estructura móvil del robot; para esto se pasó el resorte interno que conforma la columna vertebral del mecanismo a través del agujero central de la tercera placa de MDF.
- V. Posteriormente se agregó un resorte externo que rodeó la columna vertebral del mecanismo móvil y luego se colocó una arandela, este proceso se repitió 4 veces hasta llegar con la arandela que va integrada en la punta del resorte interno, formado de esta manera 4 módulos y dos segmentos.
- VI. Después de acomodar tanto las arandelas como los resortes externos, se pasaron los cables tensores por cada arandela siguiendo la siguiente distribución:

Segmento 1: 6 cables

Segmento 2: 3 cables

*Nota: cabe aclarar que la longitud de los cables del primer segmento es de 40 cm y la longitud de los cables del segundo segmento es de 55 cm.*

- VII. Finalmente se ajustaron los cables tensores en las arandelas 2 y en la 4, dando como concluido el montaje del prototipo No. 3, cómo se puede visualizar en la figura 74.

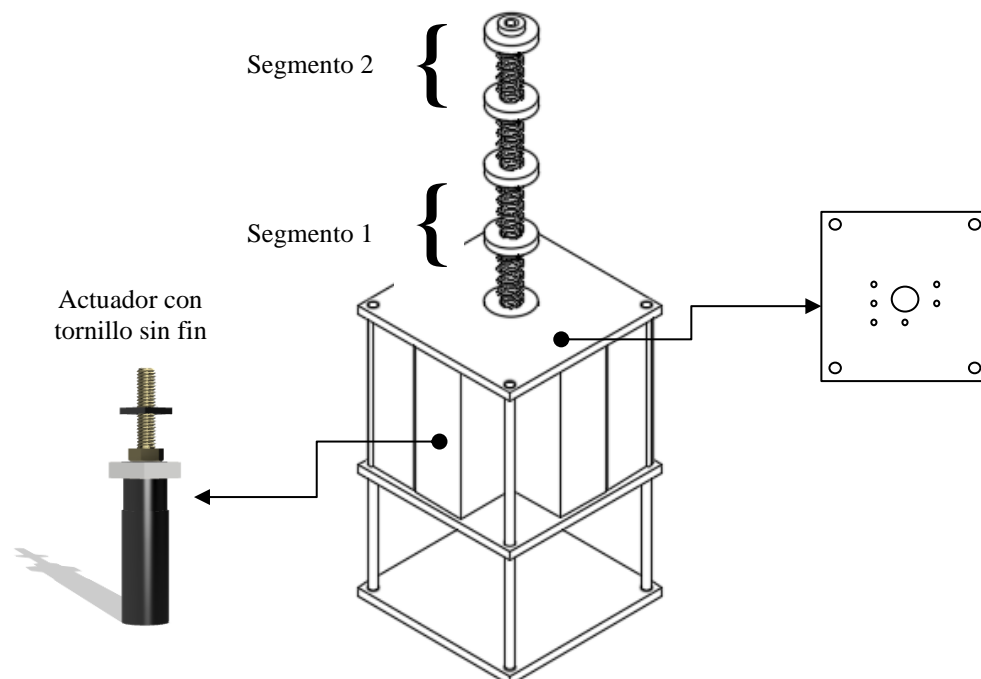


Figura 74 Montaje final de la estructura mecánica del robot para la propuesta 3.

## Desarrollo del control del prototipo laparoscópico.

En el presente apartado se describe de manera específica y puntual cada uno de los subsistemas que componen el control del prototipo de laparoscópico *snake cable robot*, a partir de la formulación de requerimientos.

### 1. Requerimientos de los subsistemas que integran el control del prototipo laparoscópico.

#### a. *Unidad central de procesamiento*



Figura 75 Subsistema de unidad central de procesamiento

Como se expone en la figura 75 las entradas y salidas de la unidad central de procesamiento corresponden a:

**Entrada 1:** Punto en las coordenadas X, Y,Z de un espacio de trabajo de 24 cm x 24 cm x 8 cm. Donde las dimensiones del espacio de trabajo corresponderán a 20 cm desde el inicio del prototipo laparoscópico hasta su extremidad y 8 cm cuadrados a las limitaciones dadas desde el algoritmo (Véase imagen 141).

**Entrada 2:** Cuenta con la velocidad de transmisión del puerto serial 115200 (máximo Baud rate del Arduino mega)

**Salida 1:** Determina la longitud de cable tensor que debe soltar o recoger el prototipo con la finalidad de moverlo.

#### b. *Controlador*

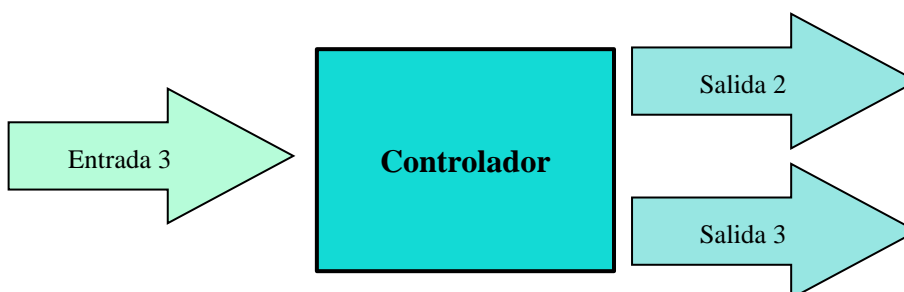


Figura 76 Subsistema del controlador

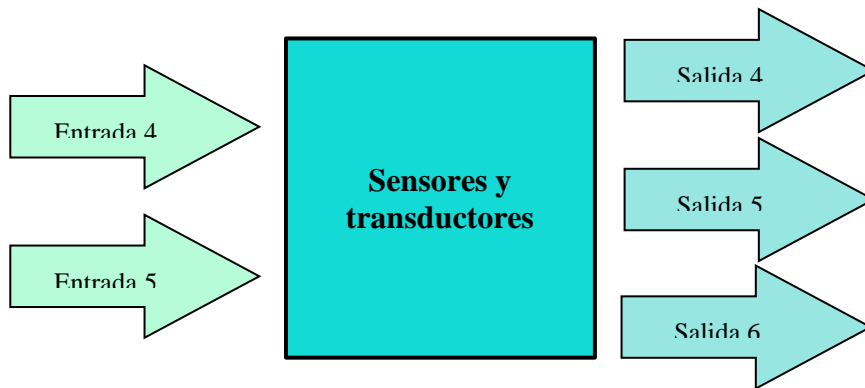
De acuerdo con la figura 76, las entradas y salidas del controlador corresponden a:

**Entrada 3:** Set point ( Pulsos del encoder (11 por vuelta)).

**Salida 2:** Posición para el efector final

**Salida 3:** Señal PWM con variaciones de ciclo útil entre el 50% y el 100% (adquirido por el control PID diseñado) y con amplitud máxima de 5 voltios.

*c. Sensores o transductores*



*Figura 77 Subsistema de los sensores y transductores*

Como se observa en la figura 77, las entradas y salidas correspondientes de los sensores y transductores son:

**Entrada 4:** Voltaje máximo de 5v.

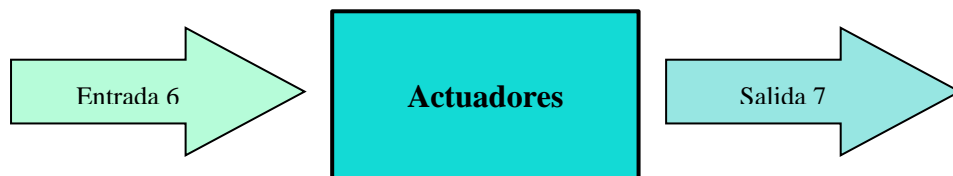
**Entrada 5:** Movimientos angulares producidos por los actuadores con máximo 77 RPM.

**Salida 4:** Señales análogas entre 0 y 5 voltios, correspondientes a la resolución de 0- 1023 Bits.

**Salida 5:** Set point en el espacio de trabajo, plano x, y, z e identificación por medio de tracking de posición.

**Salida 6:** Señales A del encoder y señal de giro.

*d. Actuadores*



*Figura 78 Subsistema de los actuadores*

En cuanto a las entradas y salidas del subsistema de actuación que se encuentran en la figura 78 corresponden a:

**Entrada 6:** El ingreso de señal PWM con amplitud de 12 voltios con variaciones de ciclo de vida útil entre el 50% y el 100% con el fin de generar un control de posición, obteniendo un giro y un movimiento adecuado y proporcional.

**Salida 7:** Dirección, velocidad y posición del movimiento de los actuadores.

*e. Mecánica*



*Figura 79 Subsistema mecánico*

Finalmente, en la figura 79 se puede visualizar la entrada y la salida correspondiente al subsistema mecánico, las cuales corresponden a:

**Entrada 7:** Movimiento de los actuadores.

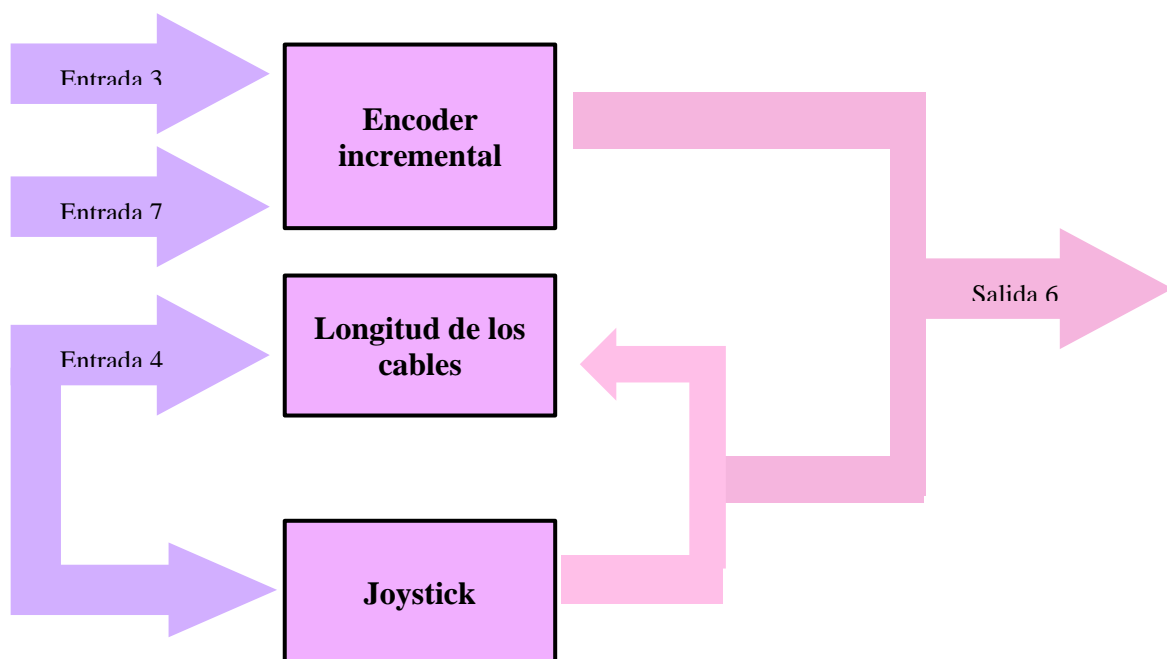
**Salida 8:** Punto final en el espacio de trabajo según las coordenadas X, Y y Z.

## **2. Requerimientos de los componentes**

En esta fase, se exponen la integración de los subsistemas mencionados en el apartado a, presentando sus entradas y salidas correspondientes.

### ***a. Sensores***

Esta etapa está constituida específicamente por tres subsistemas, en las cuales se tradujo las coordenadas x,y del joystick en longitud de cable, y está en pulsos para el encoder, para así posicionar de manera correcta los motores.



*Figura 80 Vínculos de los sensores*

En la figura 80. se puede observar las entradas y salidas pertenecientes a los vínculos que presentan los sensores, las cuales corresponden a:

**Entrada 3:** Pulsos del encoder

**Entrada 4:** Entrada de alimentación de 5v

**Salida 5:** Posición X,Y,Z deseada del punto final del prototipo robótico.



**Salida 6:** Obtención de la posición y ubicación de los sets point en el espacio de trabajo.

### **1. Requerimientos del encoder incremental**

- Alimentación máxima de 5 voltios.
- Desfase 90°
- Dos canales
- Velocidad de sensado 6000 RPM mínimo
- Encoder incremental



Continuando con lo anterior, se procedió a realizar la tabla 14, en la cual se logró identificar de manera específica los componentes solicitados con previamente de acuerdo a los codificadores rotatorios actuales en el mercado.

<i>Codificadores rotatorios</i>	<i>Requerimientos</i>			
	<i>Voltaje</i>	<i>Desfase</i>	<i>Canales</i>	<i>Velocidad del sensado</i>
Magnetic Encoder Pololu 	5v	$90^{\circ} \pm 45^{\circ}$	A,B	6000 RPM
Optical Encoder HKT22 	4.5 v - 5.5v	$90^{\circ} \pm 15^{\circ}$	A,B	6000 RPM

*Tabla 14 Características de encoder funcionales para el prototipo propuesto.*

La evaluación de los encoders de tabla 14 se realizó bajo los requerimientos planteados en el ítem anterior, donde el primero (Encoder magnético de Pololu), es un encoder incremental, alimentado por 5v, contando con dos canales, con un desfase de  $90^{\circ}$  y con una buena velocidad de sensado. Por otro lado, el encoder óptico HKT22, cuenta con rango de alimentación de 4.5v a 5.5v, desfase de ondas de aproximadamente  $90^{\circ}$  a  $15^{\circ}$ , con dos canales y velocidad de sensado de 6000RPM.

<i>Requerimientos</i>	<i>Magnetic Encoder Pololu</i>	<i>Optical Encoder HKT22</i>
<i>Voltaje</i>	Cumple	Cumple
<i>Desfase</i>	Cumple	Cumple
<i>Canales</i>	Cumple	Cumple
<i>Velocidad de sensado</i>	Cumple	No cumple

*Tabla 15 Características de los encoder funcionales para el prototipo propuesto.*

A partir de la tabla 15, los requerimientos en su gran mayoría cumplen para las dos opciones seleccionadas, sin embargo, por comodidad y por cumplir todos los requerimientos planteados, se hace uso del encoder Magnético de Pololu (León Rodríguez, Murrugarra Q., Moncada Linares & Mosqueda Velásquez, 2018).


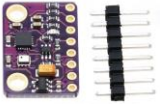
Específicamente los encoder magnéticos pololu, se caracteriza por ser incremental lo que le permite guardar el ángulo de posición del cual se desplaza transformándolo en una serie de impulsos digitales con el fin de realizar un desplazamiento (VATIA, n.d.). Además al ser magnético, no genera el contacto entre el sensor y el detector, es decir, elementos separados; al igual que al enviar determinado algoritmo, el encoder es capaz de interpretar y configurar la resolución necesaria por medio de los pulsos de vuelta para saber si soltar o abstraer el cable tensor, además las salidas de cuadratura A y B son señales digitales

que se pueden conectar directamente a un microcontrolador u otro circuito digital (Sensing, 2020) (Vistronica, 2020).

## 2. Requerimientos de la Tarjeta IMU - Tracking del sistema

- Alimentación máxima de 5 voltios.
- Contar con giroscopio y acelerómetro.
- Contar con 6 grados de libertad mínimo.
- Rango ajustable del acelerómetro y del giroscopio.
- No sobrepasar los 2 cm en cuanto a sus dimensiones.

Con los requerimientos planteados, se plantea la tabla 16, en el cual se hace una revisión bibliográfica de dos tipos tarjetas que pudiesen satisfacer las necesidades en el mercado.

<i>Tarjetas IMU</i>	<i>Requerimientos</i>				
	<i>Alimentación</i>	<i>Rangos ajustables</i>	<i>Componentes</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Grados de libertad</i>
MPU 6050 GY-521 	3v - 5v	Si	Acelerómetro y giroscopio	19mm x 15mm	6
MPU9250 BMP280 GY-91 	3v - 5v	Si	Acelerómetro, giroscopio y magnetómetro	14.3 mm x 20.5 mm	9

*Tabla 16 Características de tarjetas IMU funcionales para el prototipo propuesto.*

En cuanto a la estimación de la tarjeta IMU más apropiada para el sistema se plantearon los requerimientos mencionados anteriormente y se tomaron específicamente 2 alternativas MPU6050, el cual cuenta con tecnología MEMS, 3 ejes libres de por parte del acelerómetro y 3 ejes por el giroscopio, obteniendo en su totalidad 6 ejes de libertad, dispone de un hardware análogo-digital de 16 bits por cada canal (MACTRONICA, 2020). Por otro lado la tarjeta MPU 9250, cuenta con 9 ejes de libertad proporcionados por tener 3 ejes en el giroscopio, 3 del acelerómetro y 3 del magnetómetro, cuenta con un rango magnético de aproximadamente 4800 ut y con una salida de datos de 16 bits (MACTRONICA, 2020).

<i>Requerimientos</i>	<i>MPU9250 BMP 280 GY-91</i>	<i>MPU 6050 GY-521</i>
<i>Alimentación</i>	Cumple	Cumple
<i>Rangos ajustables</i>	Cumple	Cumple

<i>Componentes</i>	Cumple	Cumple
<i>Dimensiones</i>	No cumple	Cumple
<i>Grados de libertad</i>	Cumple	Cumple



*Tabla 17 Evaluación de tarjetas IMU funcionales para el prototipo propuesto.*

Como se evidencia en la tabla 17, los requerimientos en su gran mayoría cumplen para las dos opciones seleccionadas, sin embargo, por comodidad y por cumplir todos los requerimientos, se hace uso de la tarjeta MPU 6050 GY-521, pues cumple con las necesidades básicas y elementales del prototipo laparoscópico, como contar con un giroscopio encargado medir o evaluar la orientación en el espacio de algún objeto; cuenta con un acelerómetro con el fin de medir la fuerza de aceleración en estado estático o dinámico que pueda tener el mismo objeto, logrando que el sensor tenga 6 grados de libertad ajustables a la necesidad. Para este caso, no se tiene en cuenta el magnetómetro (brújula), puesto que el prototipo no se encuentra soportando fuerzas externas.

### 3. Requerimientos del Joystick

- Alimentación máxima de 5v
- Resistencia mínima de 10 KOhm
- Tamaño compacto de aproximadamente 3.7cm x 2.5cm x 3.2cm.
- Capacidad de controlar tres ejes (X,Y,Z)
- Interfaz analógica.

Teniendo en cuenta los requerimientos planteados anteriormente, se construye la tabla 18, en la cual se evidencian dos tipos de joystick en la cual se describen sus componentes principales.

<i>Joystick</i>	<i>Requerimientos</i>			
	<i>Alimentación</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Resistencia de palanca</i>	<i>Interfaz</i>
Módulo Joystick Palanca de Mando PS2 	5v	3.7 cm x 2.5 cm x 3.2 cm	10k Ohm	Analógica
MODULO JOYSTICK 5 DIRECCIONES 	2 v - 9v	2.5 cm x 4.1cm x 1.7 cm	15k Ohm	Analógica

*Tabla 18 Características de tarjetas joystick propuestos para el prototipo*

La estimación del joystick como debe satisfacer los requerimientos planteados anteriormente, pues este tiene como fin el manejo externo del prototipo robótico en cuanto a sus movimientos en dos ejes, por

lo tanto se expone el Módulo Joystick Palanca de Mando PS2 el cual cuenta con un voltaje de 5v, resistencia de palanca de cruz de 10 KOhms, cuenta con dos punes analógicos de salida, maneja los tres ejes (x, y por medio de la palanca y z del botón) y con un dimensionamiento de 3.7cm x 2.5cm x 3.2cm. Como también se encuentra el MÓDULO JOYSTICK 5 DIRECCIONES, característicos por ser alimentado de 2v a 9v, dimensiones de 25 mm x 41mm y funciona a temperaturas de -40° Celsius-85° Celsius (Vistronica, Angela & Adan, 2020) (MODULO DIRECCIONES - mactronica, 2020).

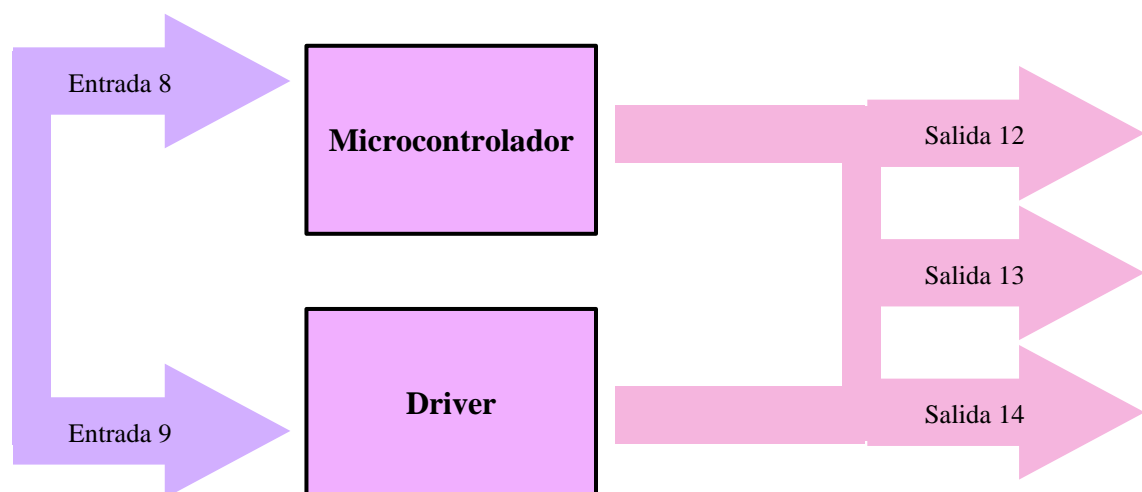
<i>Requerimientos</i>	<i>Módulo Joystick Palanca de Mando PS2</i>	<i>MODULO JOYSTICK 5 DIRECCIONES</i>
<i>Alimentación</i>	Cumple	Cumple
<i>Resistencia de palanca</i>	Cumple	No Cumple
<i>Interfaz</i>	Cumple	Cumple

*Tabla 19 Evaluación de tarjetas joystick propuestos para el prototipo*

Por lo anterior se decide hacer uso del Módulo Joystick Palanca de Mando PS2 puesto que cumple con todos los requerimientos planteados para la selección del mismo, teniendo en cuenta con la capacidad de proporcionar una información puntual y adecuada frente a los pulsadores. Este módulo está configurado con un sistema de balancín con dos ejes ortogonales, es decir, dos potenciómetros capaces de medir la posición de la palanca en el eje X, Y. como entradas analógicas, adicionando una señal analógica con el fin de hacer la detección de la pulsación del mando, aumentando la eficiencia del mismo (Llamas, 2016).

#### ***b. Sistema Embebido***

La fase del controlador se compone principalmente por el microcontrolador y el driver, donde el primero se encargó de producir la recopilación de los datos implícitos (figura 81)



*Figura 81 Vínculo del controlador.*

**Entrada 8:** Voltaje máximo del Arduino de 12v.

**Entrada 9:** A partir de la salida 5 mencionada anteriormente, se adquieren y se toman los datos generados por los sensores y transductores.

**Salida 12:** Datos acoplados. Velocidad limitada con información de movimientos descritos a lo largo del espacio de trabajo por medio del prototipo robótico.

**Salida 13:** Señal PWM, contando con vida útil entre el 50% y el 100%.

**Salida 14:** Permite la dirección del movimiento de los motores.

### 1. Requerimientos del microcontrolador.

- El microcontrolador debe contar con velocidad de transferencia de datos
- El microcontrolador debe contar con por lo menos 15 salidas PWM (Pulse Wide Modulation).
- El microcontrolador debe ser capaz de alimentarse a través de conexión USB.
- El microcontrolador debe contar con capacidad aproximada de 256 KB de memoria.
- El microcontrolador debe contar con 5 voltios de voltaje operativo.

Actualmente existen varios tipos de microcontroladores en el mercado, para este caso se seleccionan 3 tipos de placas Arduino con el objetivo de identificar sus componentes y capacidades principales e identificar el más apropiado para suplir los requerimientos planteados anteriormente.

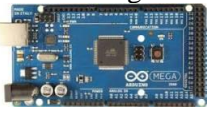


<i>Microcontroladores</i>	<i>Requerimientos</i>			
	<i>Voltaje operativo</i>	<i>Salidas PWM</i>	<i>Conexión USB</i>	<i>Capacidad de memoria</i>
Arduino mega 2560 	5v	14	si	256KB
Arduino UNO 	5v	4	Si	32KB
Arduino Nano 	5v	0	si	16KB

Tabla 20 Características de microcontroladores funcionales para el prototipo propuesto.

Para la evaluación de los microcontroladores, se caracterizó el Arduino mega 2560, el cual cuenta con 54 pines de entrada y salida, 14 pines digitales (PWM), 16 entradas análogas, oscilador de cristal de 16MHz, conexión puerto USB y memoria flash de 256 KB (Robotshop, 2015) ("A000067 - Sigma Electrónica", 2020). También se realizó la caracterización del microcontrolador Arduino uno de manera que este cuenta con 14 pines de entrada y salida, donde 6 pueden ser utilizados como PWM, oscilador de cristal de 16MHz, 6 entradas análogas, memoria de 32 KB e interfaz USB ("A000073 - Sigma Electrónica", 2020). Finalmente se tomó como opción hacer uso del Arduino nano, donde se pueden alimentar por puerto USB, cuenta con 8 canales de entrada análoga y tiene 16KB de memoria ("A000005 - Sigma Electrónica", 2020).

<i>Requerimientos</i>	<i>Arduino Mega</i>	<i>Arduino UNO</i>	<i>Arduino Nano</i>
<i>Voltaje operativo</i>	Cumple	Cumple	Cumple
<i>Salidas PWM</i>	Cumple	No Cumple	No Cumple
<i>Conexión USB</i>	Cumple	Cumple	Cumple

<i>Capacidad de memoria</i>	Cumple	No cumple	No cumple
-----------------------------	--------	-----------	-----------

Tabla 21 Evaluación de microcontroladores funcionales para el prototipo propuesto.

Según la tabla 21, se puede identificar que el microcontrolador que cumple con los requisitos planteados es el Arduino Mega, pues cuenta con la cantidad de pines necesarios para hacer las conexiones del control PID según la el PWM, con capacidad de memoria más alta que le permite procesar de manera más efectiva los datos.

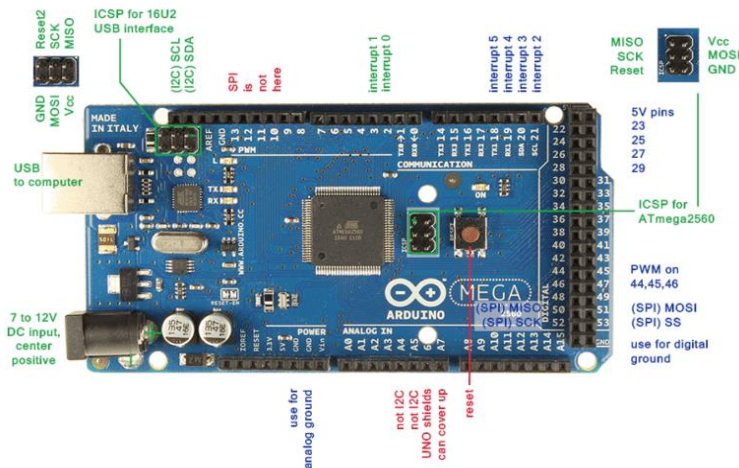


Figura 82 Componentes internos del Arduino mega

## 2. Requerimientos del driver

- Capaz de permitir el control de 2 motores.
- Control de velocidad del motor PWM y la dirección de giro.
- Voltaje de entrada entre 4.5v a 5v.
- Corriente de salida por canal  $\pm 600$  mA

A partir de los requerimientos anteriormente planteados, se realiza la tabla 22, en la cual se exponen las características principales de dos tipos de drivers (puentes H) en el mercado actual.



<i>Driver</i>	<i>Requerimientos</i>			
	<i>Alimentación</i>	<i>Motores</i>	<i>Velocidad de PWM</i>	<i>Corriente de salida por canal</i>
L293D 	4.5 v - 5v	2	Si	$\pm 600$ mA
Puente H VNH3SP30 SMD MultiPowerSO-30 	5.5 a 40 VDC	2	Si	30A

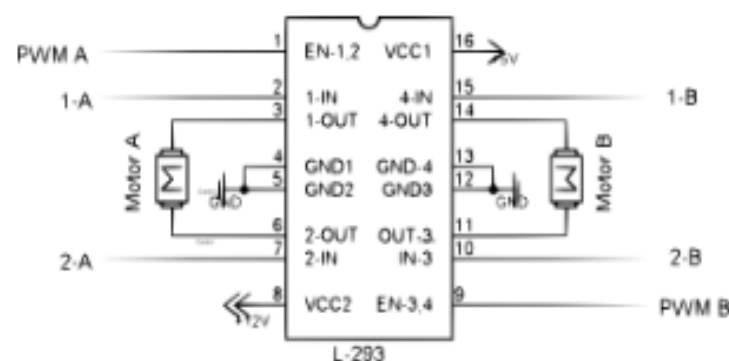
Tabla 22 Características de drivers funcionales para el prototipo propuesto.

La identificación principal de cada uno de los drivers permite identificar el adecuado suplir la necesidad de mover los motores, por ende, se encontró que el L293D cuenta con el voltaje de 5v, está capacitado para mover hasta 2 motores, con velocidad en las señales PWM y dispone de una corriente de salida por canal de  $\pm 600$  mA; mientras que el Puente H VN3SP30 SMD MultiPowerSO-30 sobrepasa lo niveles de voltaje y corriente requeridos, cuenta con frecuencia de PWM Hasta 10 KHz, sin embargo, a pesar de que pueda mover 2 motores no cumple con los requerimientos planteados para el driver necesario (Vistronica - Controlador MultiPowerSO-30, 2020), de modo que:

<i>Requerimientos</i>	<i>L293D</i>	<i>Puente H VN3SP30 SMD MultiPowerSO-30</i>
<i>Voltaje operativo</i>	Cumple	Cumple
<i>Salidas PWM</i>	Cumple	No Cumple
<i>Conexión USB</i>	Cumple	Cumple
<i>Capacidad de memoria</i>	Cumple	No cumple

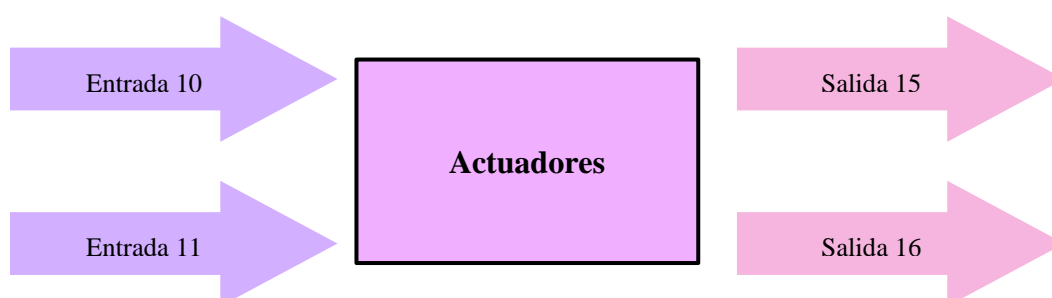
*Tabla 23 Evaluación de drivers funcionales para el prototipo propuesto.*

Como se había mencionado en el párrafo anterior, el Puente H VN3SP30 SMD MultiPowerSO-30 no cumplió para ser utilizado en el prototipo laparoscópico, a diferencia de driver L293D, pues este cuenta con un sistema integrado con el objetivo de controlar motores por medio de puente H, contando con 4 canales, haciéndolo capaz de ser configurado para manejar hasta 2 canales de puente H completos, generando así su versatilidad de uso (L293D, Omeider, Fabio, Oscar & sergio, 2020) (Mechatronics-driver 0.6A, 2020).



*Figura 83 Componentes internos del driver L293D*

### c. Actuadores



*Figura 84 Vínculo de los actuadores.*

En la figura 84. se puede observar las entradas y salidas de los actuadores, las cuales corresponden a:

**Entrada 10:** A partir de la Salida 14 se permite la dirección del movimiento de los motores.

**Salida 15:** Voltaje máximo de entrada 12v y 100 mA.

**Salida 16:** Longitud de cables, obteniendo la posición final (set point) en el espacio de trabajo.

### 1. Requerimientos de los actuadores lineales

- Alimentación de 12 voltios.
- Potencia de trabajar a 2.6 W.
- Contar 77 rpm/m máximo.
- Tolerancia aproximadamente de 30 kg.cm

A continuación, se muestran algunas de las tentativas en cuanto a los actuadores lineales para su uso:

REFERENCIA	V	rpm/m	mA	kg/cm	W	A	Kg.cm	mm
1 /9.28	12 v	1290	100	0.45	2.6	3.5	2.9	17
1/34	12 v	352	100	1.2	2.6	3.5	8	21
1 / 74.8	12 v	160	100	1.95	2.6	3.5	16	23
1 / 164	12 v	77	100	4.2	2.6	3.5	30	25

Tabla 24 Características de motorreductores

En cuanto a los motores, se requería que contarán principalmente con encoder incorporado, bajos rpm, alta resistencia de kg/cm y costo moderado, por lo cual se compararon algunas referencias y se determinó el más apropiado en la siguiente tabla (tabla 25).

REFERENCIA	Encoder incorporado	rpm/m	Kg /cm	Costo (\$)	Total
1 /9.28	5	2.5	2.5	3.2	3.3
1/34	5	3	3	3.2	3.5
1 / 74.8	5	3.8	3.8	3.2	3.9
1 / 164	5	4.5	4.7	3.5	4.4

Tabla 25 Matriz de decisión de motorreductores

### d. Alimentación

#### 1. Requerimientos de la alimentación

- Capacidad de generar 12v mínimo.
- Capacidad de generar 990 mA mínimo.





Figura 85 Fuente de poder ATX 600W

Se hace uso de la fuente de poder ATX 600W JW-PSB01, se caracteriza por contar con una alimentación de 600W, ventilador de 120 mm, entrada universal 115 V o 230 V y protección de: sobrevoltaje, sobrecarga, recalentamiento, bajo voltaje y corto - circuito, además de ser de fácil acceso, no necesita recargas a diferencia de las baterías y es compacta (Jawan - Fuente (600W), 2020).

### 3. Modelo matemático

#### a. Cinemática inversa para la simulación en Matlab.

Gracias al uso de la cinemática inversa en el presente trabajo de grado, se determinaron los movimientos de los segmentos de la estructura móvil del robot, que permitieron que el efector final logrará ubicarse en una posición deseada. El uso de esta cinemática inversa se realizó de la siguiente manera:

- I. Para comenzar se debió tener en cuenta que la cinemática inversa requiere de cambios de espacios, debido a que estos son los que reúnen las variables que rigen al prototipo.
- II. Considerando lo planteado anteriormente, se establecieron tres espacios, distribuidos de la siguiente manera (véase figura 86): trabajo, configuración y actuación.
- III.

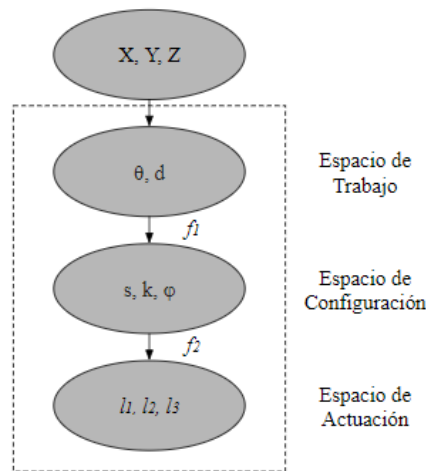


Figura 86 Transformaciones de los parámetros

- IV. Una vez definidos los espacios, se relacionaron cada uno de ellos por medio de funciones llamadas “ $f1$  y  $f2$ ”, las cuales permitieron el paso de un espacio a otro.
- V. Ya establecidas dichas funciones, se definió que  $f1$  iba a ser la función que permitiría el paso del espacio de trabajo al espacio de configuración en el que se encuentran los parámetros de curvatura, como se muestra a continuación:

$f1$ :

$$\varphi = \text{atan}(y/x)$$

Ecuación 23 Parámetro de curva en cinemática inversa

$$k = \frac{2||xy||}{(||xyz||)^2}$$

*Ecuación 24 Parámetro de curva en cinemática inversa*

$$\theta = \text{acos}(1 - (k * ||xy||))$$

*Ecuación 25 Espacio de trabajo*

$$s = \left(\frac{1}{k}\right)\theta$$

*Ecuación 26 Parámetro de trabajo*

Donde:

- x,y,z, son los puntos coordenados del final del efector
- k, es la distancia de curvatura del segmento.
- s, es la longitud del segmento.
- $\varphi$ , ángulo de curvatura.
- $\theta$ , ángulo doblado del segmento.

VI. En cuanto la función f2, se definió que está sería la encargada del paso del espacio de configuración al espacio de los actuadores por medio de las siguientes ecuaciones:

*f2:*

$$l1 = 2n * \sin\left(\frac{ks}{2n}\right) * \left(\frac{1}{k} - d\sin(\varphi)\right)$$

*Ecuación 27 Largo tensor L1*

$$l2 = 2n * \sin\left(\frac{ks}{2n}\right) * \left(\frac{1}{k} + d\sin\left(\varphi + \frac{\pi}{3}\right)\right)$$

*Ecuación 28 Largo tensor L2*

$$l3 = 2n * \sin\left(\frac{ks}{2n}\right) * \left(\frac{1}{k} - d\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right)\right)$$

*Ecuación 29 Largo tensor L3*

Donde:

- n son la cantidad de módulos por los que está compuesto.
- d es la distancia del centro, hasta los tendones.
- l1,l2,l3 es la longitud de los tendones.

VII. Finalmente, ya con esto establecido, se logró elaborar la relación entre la coordenada deseada para la longitud de los tendones y los parámetros de curvatura, dando como resultado la posición del efector final deseada.

#### ***b. Cinemática Directa para la simulación en Matlab.***

Por medio de la cinemática directa, se realizó la reducción de la matriz de DH, obteniendo una matriz homogénea relacionando la posición y orientación del prototipo robótico, en el espacio de trabajo definido (24cmx24cmx8cm).

En cuanto a la producción de movimientos generados luego de la transformación de la cinemática inversa mencionada anteriormente, la cinemática directa es la encargada de transformar de nuevo estos datos para generar los movimientos producidos.

- I. Se tomaron las longitudes de los tendones adquiridos previamente.
- II. Contando con las longitudes, se plantearon tres espacios de la misma manera que en la cinemática inversa.
- III. Teniendo claros los espacios, se relacionaron las funciones de cambio de uno a otro, por medio de las siguientes ecuaciones:

*Parámetro de trabajo (s):*

$$s = \frac{(n * d)}{\sqrt{\Sigma(I^2) - I(1) * I(2) - I(2) * I(3) - I(1) * I(3)}}$$

*Ecuación 30 Parámetro de trabajo en cinemática directa*

$$s = \frac{s * \cos(\sqrt{I^2 - I(1) * I(2) * I(3) - I(1) * I(3)})}{(3 * n * d)}$$

*Ecuación 31 Ecuación 31. Parámetro de trabajo en cinemática directa*

*Parámetro de curva (k):*

$$k = 2 * \sqrt{\frac{\Sigma(I^2) - I(1) * I(2) - I(2) * I(3) - I(1) * I(3)}{d \Sigma I}}$$

*Ecuación 32 Ecuación 32. Parámetro de curva en cinemática directa*

*Parámetro de curva ( $\varphi$ ):*

$$\varphi = \cot g * 2((\sqrt{\frac{3}{3}}) * I(3) + I(2) - 2 * I(1))$$

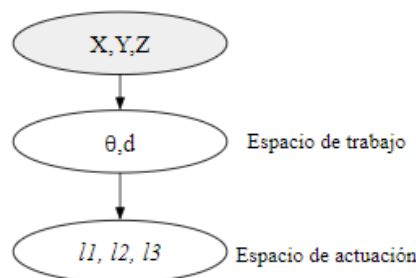
*Ecuación 33 Parámetro de curva en cinemática directa*

Donde los tres parámetros cumplen con:

- $n$  serán los números de módulos
- $d$  distancia del centro del soporte a los tendones.
- $l$  longitud de los tendones

### ***c. Cinemática Directa para la planta física.***

Se identifica el funcionamiento de los actuadores y su vez como los motores influyen en el movimiento del mecanismo móvil del prototipo, de manera que se realizó un planteamiento geométrico, logrando obtener las fórmulas adecuadas para determinar cómo las tensiones ejercidas sobre el mismo, determina el ángulo de cabeceo y la rotación del mecanismo móvil.



*Figura 87 Transformación de parámetros para la Cinemática directa*

Para lo anterior se realizaron pruebas de la efectividad del planteamiento geométrico a partir de valores de theta y gamma fijos (ecuación 34):

$$\begin{aligned} l_1 &= 10 - [1 \text{ cm} * \theta * \cos(\gamma)] \\ l_2 &= 10 - [1 \text{ cm} * \theta * \cos(\gamma + ^\circ)] \\ l_3 &= 10 - [1 \text{ cm} * \theta * \cos(\gamma - ^\circ)] \end{aligned}$$

*Ecuación 34 Ecuación 34. Planteamiento geométrico*

Donde:

- $l_{1-2-3}$  son las longitudes de los cables.
- $1 \text{ cm}$  es el radio de las arandelas.
- $\theta$  correspondió al ángulo de cabeceo del mecanismo ( $45^\circ$  para las pruebas.)
- $\gamma$  correspondió al ángulo de rotación del mecanismo ( $30^\circ$  para las pruebas.)
- $^\circ$  serán los ángulos de dos de los tres tensores que se encuentran en el efector final.
- 10 correspondió a la longitud inicial del segmento

*Nota: Los valores mencionados anteriormente para las pruebas se tomaron de manera aleatoria. Teniendo en cuenta que, al momento de realizar las pruebas físicas, los valores iban variando, dependiendo de la posición que se deseaba, comprobando así su funcionamiento.*

De modo que:

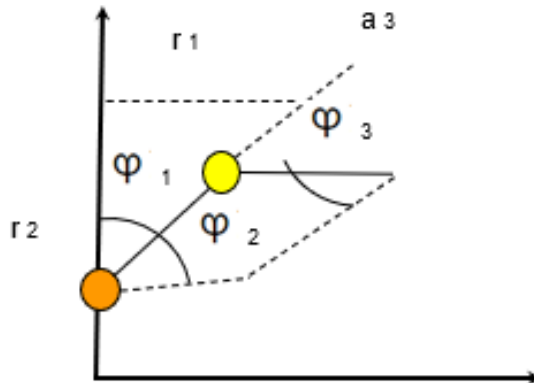
$$\begin{aligned} l_1 &= 10 - [1 \text{ cm} * 45 * \cos(30)] \\ l_2 &= 10 - [1 \text{ cm} * 45 * \cos(30 + 120^\circ)] \\ l_3 &= 10 - [1 \text{ cm} * 45 * \cos(30 - 120^\circ)] \end{aligned}$$

*Ecuación 35 Planteamiento geométrico*

Posteriormente, al verificar el funcionamiento del planteamiento geométrico, los valores de  $\gamma$  y  $\theta$  se suministraron por medio del movimiento del joystick. Siguiendo con este, al momento de obtener los valores  $\gamma$  y  $\theta$  se adquirió la longitud necesaria de los cables ya que  $\gamma$ ,  $\theta$  al contar con estos el mecanismo móvil fue apto para llegar a la posición deseada.

#### ***d. Cinemática Inversa para la planta física.***

Luego de realizar la cinemática directa, es decir, contar con cierta posición x,y,z a partir de la figura 88, se determina el ángulo  $\theta$ ,  $r$ ,  $\phi$  y  $\gamma$ .



*Figura 88 Cinemática inversa (Diseño propio)*

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) = \alpha_2$$

Ecuación 36 Obtención de theta según la distancia final

$$r_1 = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$r_2 = z - l$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$$

$$r_3 = \sqrt{r_1^2 + r_2^2}$$

$$a_3^2 = a_2^2 + r_3^2 - 2a_2r_3 \cos \phi_2$$

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{a_3^2 - a_2^2 - r_3^2}{-2a_2r_3}\right)$$

$$\gamma_1 = \phi_1 - \phi_2$$

$$\phi_3 = \cos^{-1}\left(\frac{r_3^2 - a_2^2 - a_3^2}{-2a_2a_3}\right)$$

$$\gamma_2 = 180 - \phi_3$$

Ecuación 37 Cinemática inversa - fórmulas de proyección

Donde:

- $a_2$  corresponde a 2 veces la longitud del mecanismo móvil, es decir,  $2l = 10 \text{ cm}$
- $r_{1-2}$  Catetos del triángulo rectángulo
- $\phi_{2-3}$  Obtenidos gracias a la ley del coseno

Las ecuaciones 37 cumplieron con la finalidad de obtener ángulos correspondientes a la posición (theta y gamma) correspondientes los xyz dados inicialmente al modelo como se muestra además en la figura 89.

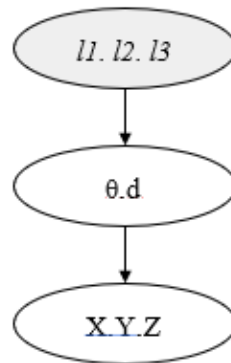


Figura 89 Transformación de parámetros para la Cinemática inversa

#### 4. Movimientos del prototipo

##### a. Workspace en Matlab de los movimientos del Robot

Para poder determinar la posición deseada del efector final de un segmento, se elaboró por medio del programa Matlab una simulación del campo de trabajo de los movimientos del prototipo.

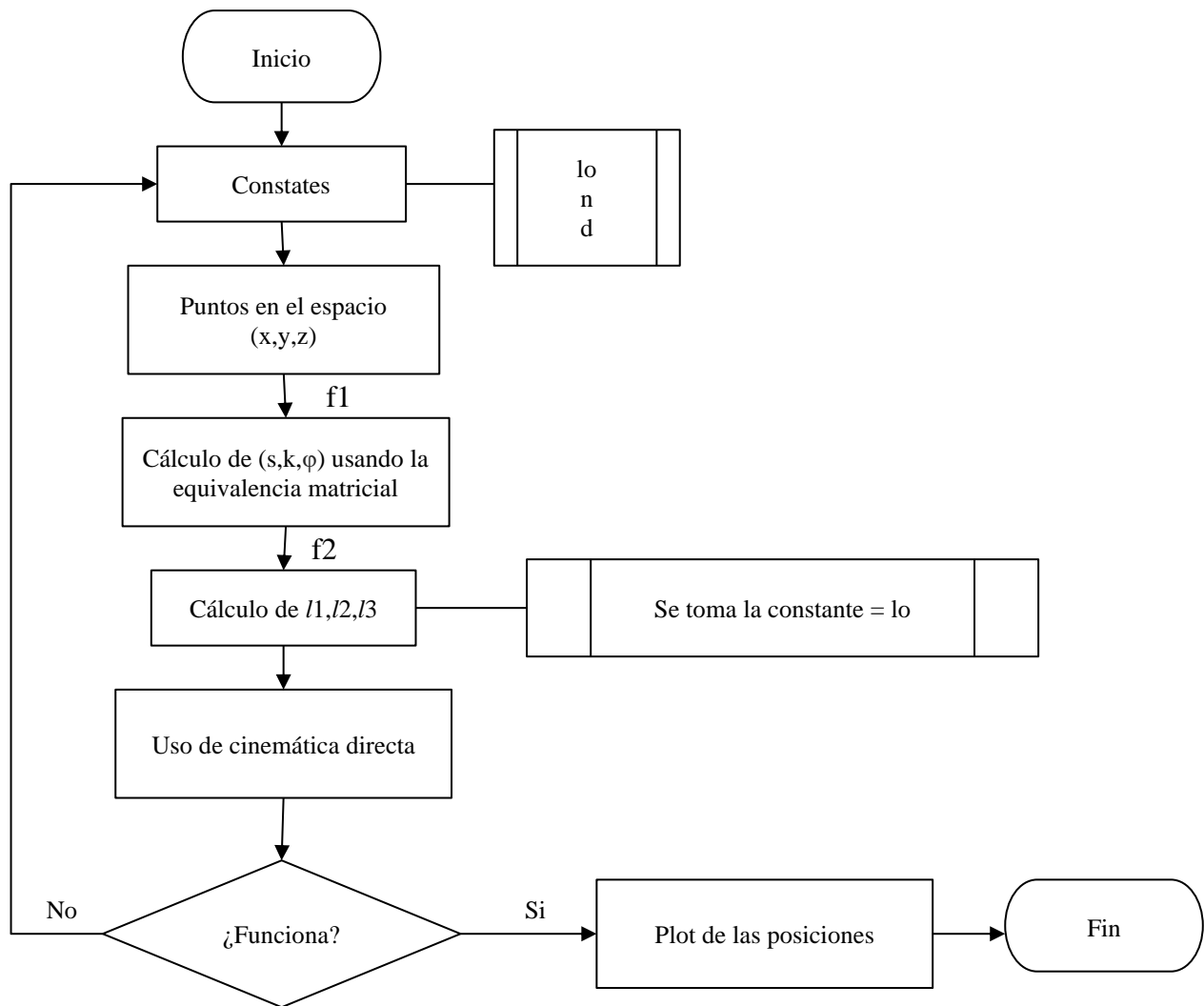


Figura 90 Diagrama de flujo del algoritmo de simulación de la posición del efector final de un segmento.

Donde:

- **Constantes**
  - lo = Longitud Inicial
  - n= Número de módulos por segmento
  - d= Distancia centro a los tendones
- **Puntos en el espacio:** Son los puntos que determinan la posición del efector final del segmento.
- **Cálculo de (s,k,φ):** Se utilizaron las ecuaciones equivalentes a la matriz de rotación con el fin de determinar (s,k,φ) para los puntos en el espacio previamente seleccionados utilizando la función de cinemática inversa en Matlab.
- **Cálculo de l1,l2,l3:** Nuevamente se usó la función de cinemática inversa para tomar los valores calculados de (s,k,φ) y transformarlos a valores de longitud l1,l2,l3 de los tendones que le darán movimiento al segmento.
- **Cinemática directa:** Se toman los valores de las longitudes obtenidas y se grafican por medio de cinemática directa.
- **Plot de las posiciones:** Se obtienen las posiciones de cada tendón en el espacio.

Después de realizar la simulación expuesta anteriormente, se elaboró nuevamente en el Software Matlab el espacio de trabajo real en el cual trabajaría de la estructura móvil del robot, como se muestra a continuación:

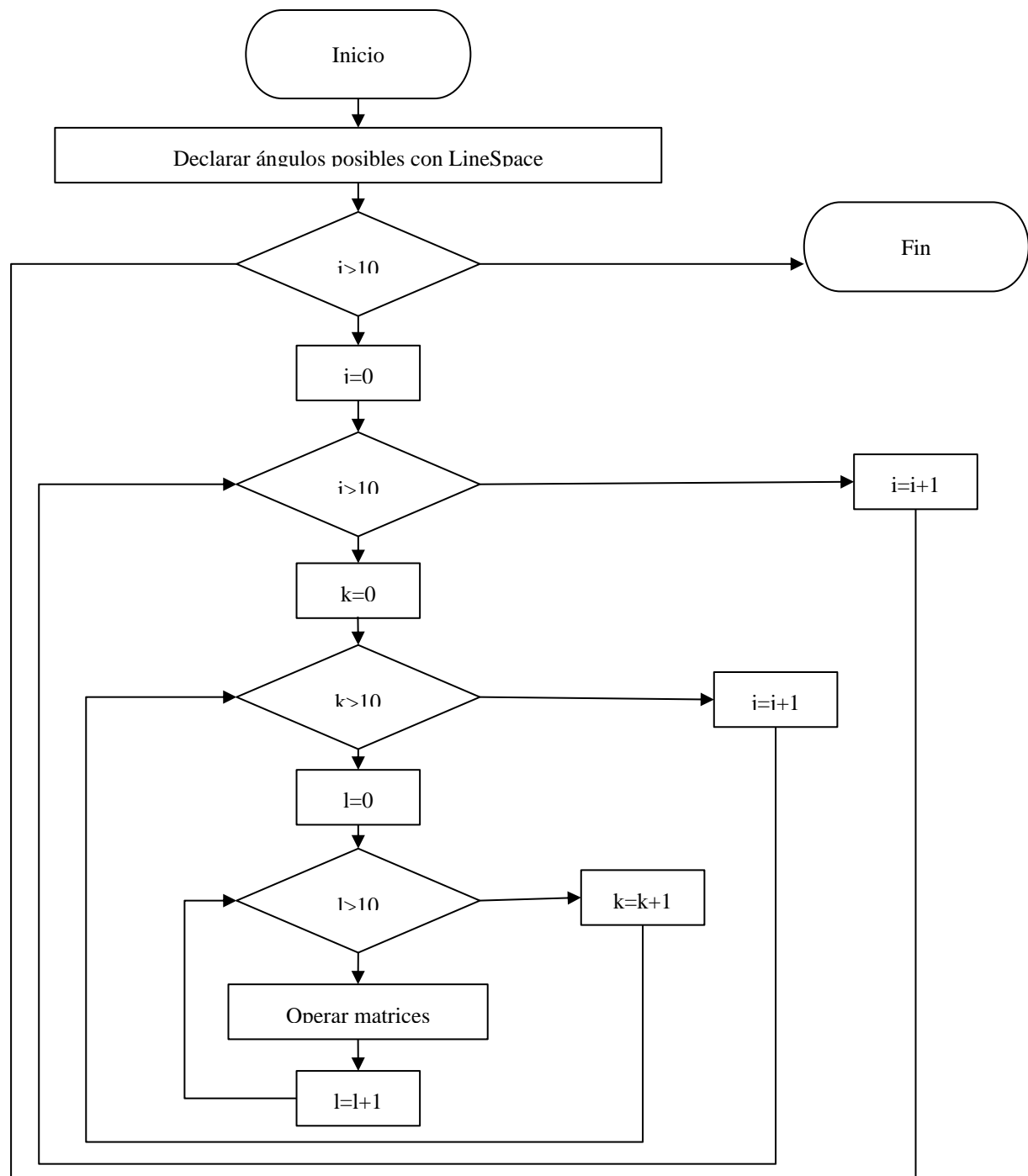


Figura 91 Diagrama de flujo del algoritmo del espacio de trabajo de la estructura móvil del robot.

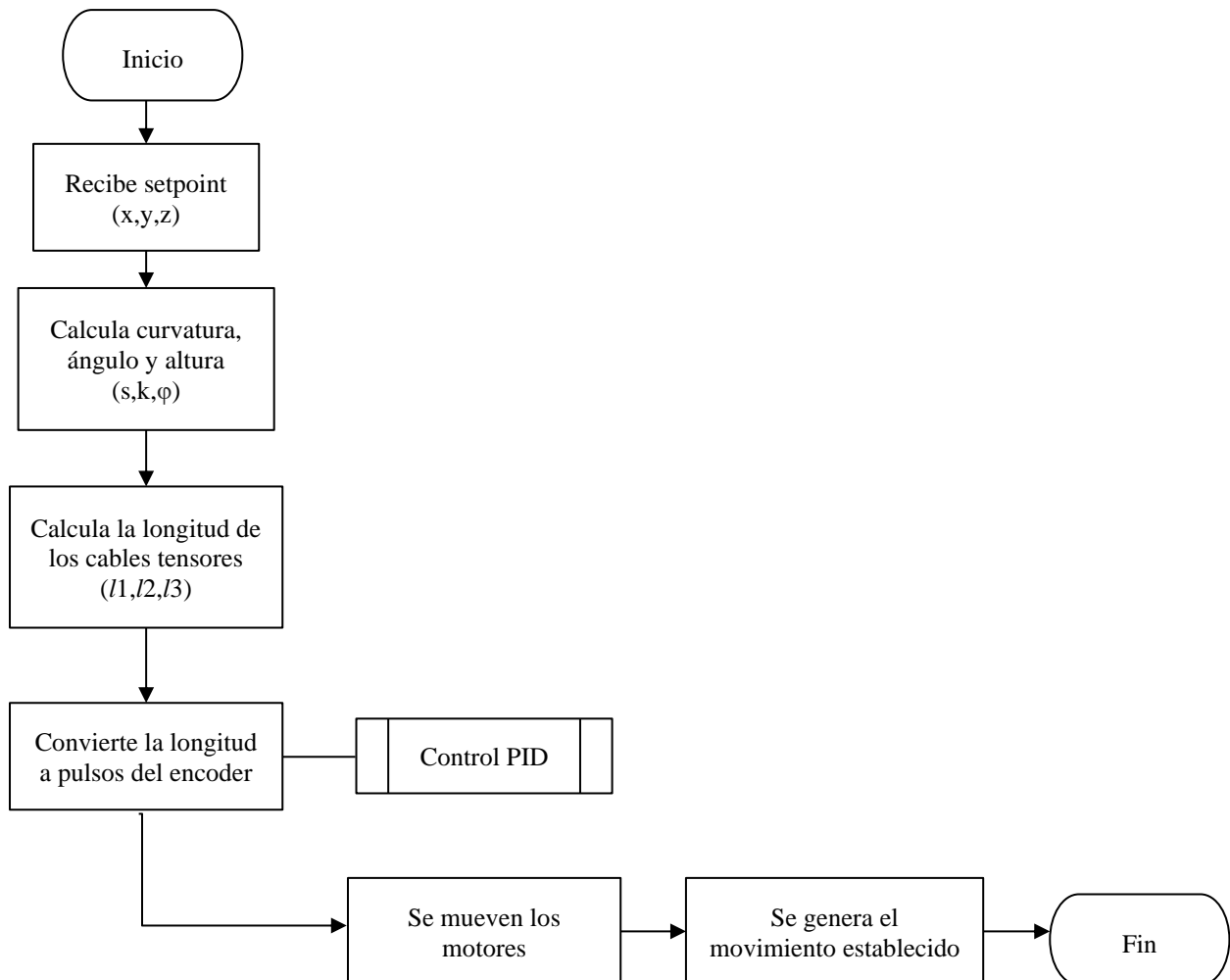
Donde:

- **LineSpace:** Función de MatLAB que permite la creación de vectores. Allí se establecieron los ángulos de giro desde un valor máximo hasta un valor mínimo con el fin de realizar un barrido de los datos que se iban obteniendo.

- **i:** Ángulo de rotación de la base del primer segmento.
- **j:** Ángulo de cabeceo del primer segmento.
- **k:** Ángulo de rotación de la base del segundo segmento.
- **l:** Ángulo de cabeceo del segundo segmento.
- **Operación de matrices:** Fórmula de transformación que incluye a posición inicial sumada con los vectores obtenidos en el Linespace

### *b. Algoritmo de control*

En cuanto al algoritmo de control, este se realizó por medio de un lazo cerrado tipo PID el cual se encargó de monitorear continuamente la señal obtenida de la posición que entregaban los sensores (joystick), con la finalidad de que se movieran los actuadores desde una posición inicial hasta una posición deseada con el menor error posible. En la figura 92. se describe el funcionamiento del dicho algoritmo de control.



*Figura 92 Diagrama de flujo del algoritmo de los movimientos del robot*

Donde:

- **Recibe setpoint:** Datos obtenidos por los sensores (Joystick)
- **Control PID:** El algoritmo de control PID se realizó de tipo lazo cerrado, puesto que se realiza retroalimentación por parte del encoder; donde la señal adquirida por los sensores/



transductores, se monitorea constantemente con el fin de mover de manera adecuada el actuador y a su vez, obtener la posición inicial a la posición solicitada por el usuario.

Donde se determinó que:

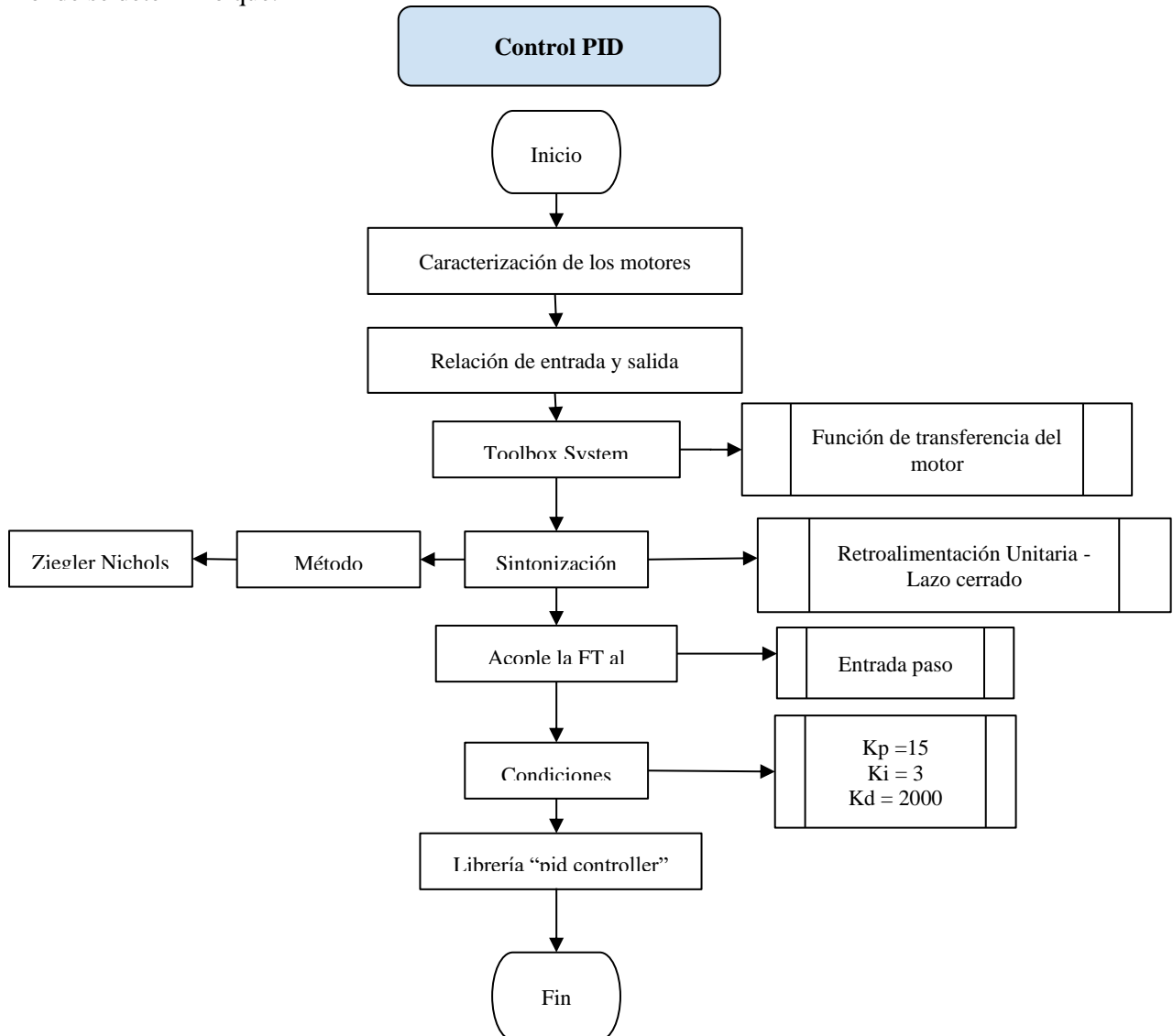


Figura 93 Diagrama de flujo del funcionamiento del control PID

Donde:

- **Caracterización de los motores:** Se proporcionaron valores de entrada a los motores correspondiente a 500 pulsos y se obtuvo como salida cantidad de giros que realiza el motor.
- **Relación de entrada y salida:** Se determinó el valor de la cantidad de pulsos ingresados con respecto a la cantidad de giros que genera el motor.
- **Toolbox System Identification:** Se generó el modelo dinámico que permitió la implementación de la función de transferencia de los motores correspondiente a:  $FT = \frac{83.3}{0.014s + 1}$
- **Sintonización PID:** Se utilizó el método Ziegler Nichols, comprende un sobre-pulso al ser un sistema retroalimentado, permitiendo definir las condiciones del PID por medio de una retroalimentación unitaria al ser un lazo cerrado.

- **Condiciones:** Los valores de los parámetros (Proporcionales, Integrador y Derivador) son basados por diseño propio, siguiendo con esto, se obtuvo:  $K_p = 15$ ,  $K_i = 3$  y  $K_d = 2000$ .
- **Librería “PID Controller”:** Se realizó de manera automática y autónoma el control del sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, se ajustó y/o capacitó el sistema robótico con los parámetros electromecánicos, alcances y restricciones tanto en el software como en el hardware del sistema.

- **Cálculo de  $(s,k,\phi)$ :** Al igual que en la simulación, se utilizaron las ecuaciones equivalentes a la matriz de rotación con el fin de determinar  $(s,k,\phi)$  para los puntos en el espacio previamente seleccionados utilizando la función de cinemática inversa en MatLAB.
- **Cálculo de  $l1,l2,l3$ :** Nuevamente se usó la función de cinemática inversa para tomar los valores calculados de  $(s,k,\phi)$  y transformarlos a valores de longitud  $l1,l2,l3$  de los tendones que le darán movimiento al segmento.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se realizaron los diagramas de bloques pertinentes al control del sistema como se muestra a continuación:

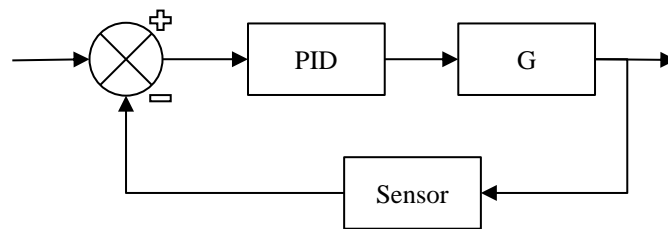


Figura 94 Diagrama de bloques del controlador PID inicial para la estructura (Planta)

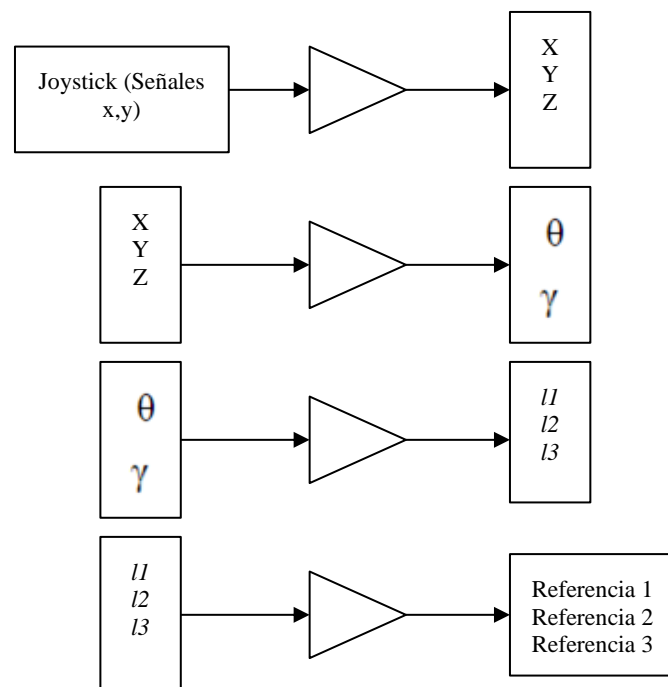


Figura 95 Transformaciones desde las señales generadas por joystick hasta el control del motor por medio del encoder

Donde:

1. Se traducen las señales en los ejes x,y que son proporcionadas por el joystick, ya que el eje z se calcula acorde de las señales mencionadas anteriormente para obtener la posición en x,y,z.
2. Transforma las posiciones de x,y,z por medio de la cinemática inversa en los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  necesarios.
3. A partir de los ángulos  $\phi$  y  $\theta$  se traducen en definir la longitud que deben tener los cables tensores gracias a la cinemática directa realizada.
4. Finalmente, las longitudes obtenidas, se convierten en el Arduino a través de la función roadmap en posiciones correspondientes para cada uno de los encoder.

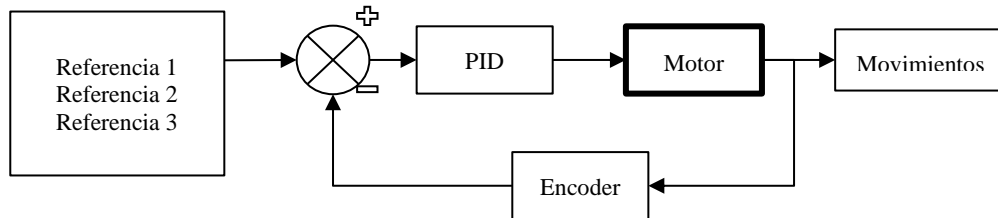


Figura 96 Diagrama de bloques del controlador PID para los motores.

Como se observa en la figura 96 se obtuvo el Lazo de control para los motores por medio de las posiciones asignadas anteriormente a cada uno de los encoder.

### c. Posición del efector final del mecanismo móvil.

Respecto a los sensores encargados de ubicar el efector final en la posición deseada por el usuario, esta se desempeñó por medio de 2 IMU 5060, donde cada una de estas haría parte de los segmentos que componen el mecanismo móvil, es decir, una por segmento. En la siguiente figura 97 se desglosa el funcionamiento de las IMU 5060 a partir del algoritmo correspondiente.

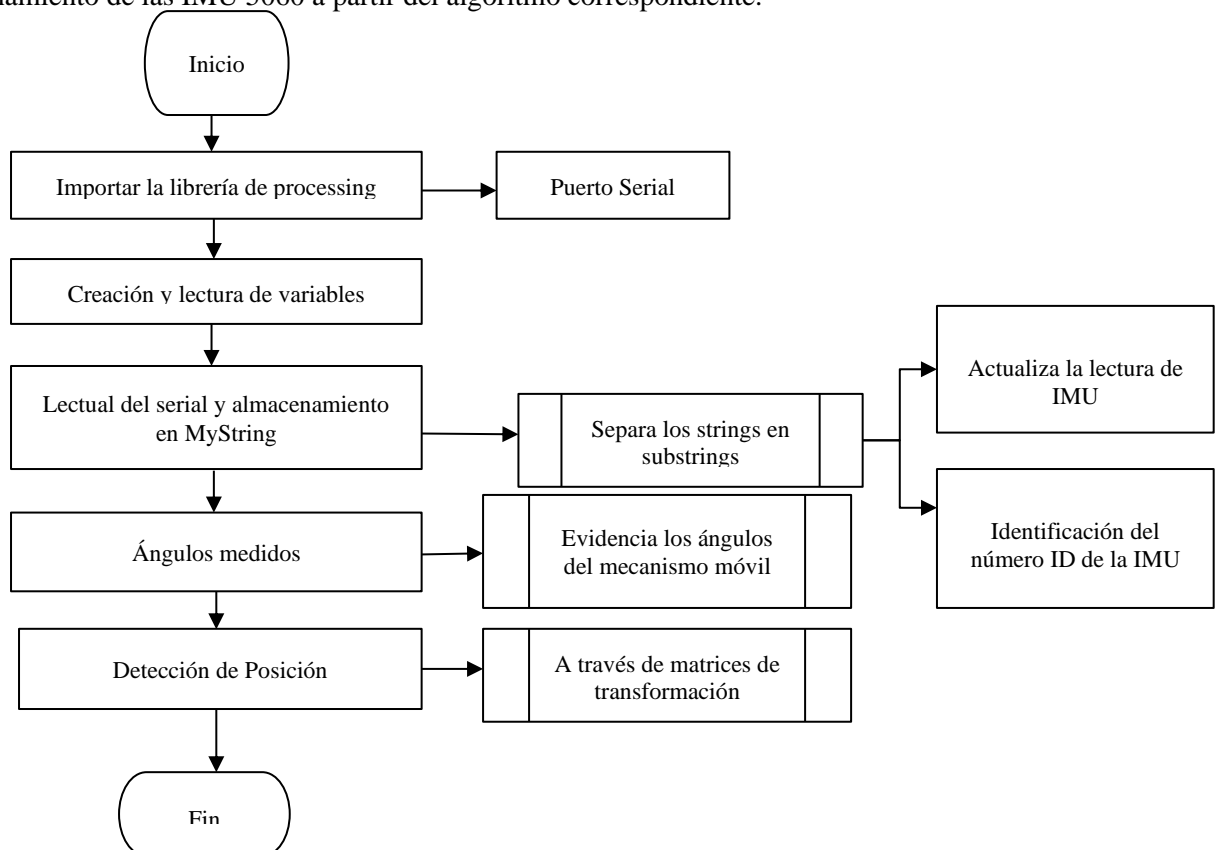


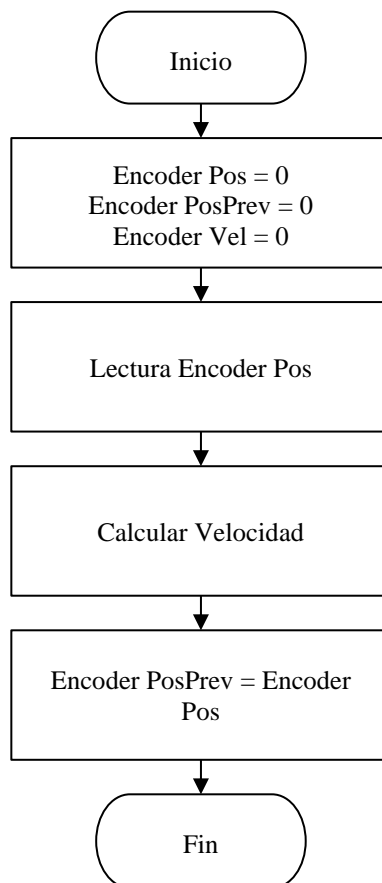
Figura 97 Funcionamiento del algoritmo correspondiente a la IMU (MPU6050)

Donde:

- **Puerto serial:** Toma los datos adquiridos del Arduino por medio del puerto serial.
- **Ángulos adquiridos:** A través del movimiento del mecanismo móvil
- **Detección de posición:** Mediante las matrices de transformación, el algoritmo es capaz identificar el punto al cual debe llegar, calculando las posiciones x,y,z.

*d. Velocidad de los Motores*

Para la determinación la velocidad de giro de los motores, se elaboró por medio del software Arduino un algoritmo que permitió calcular dichos valores de la siguiente manera:



*Figura 98 Diagrama de Flujo de la velocidad de giro de los motores*

Donde:

- **Encoder Pos:** Posición del Encoder.
- **Encoder PosPrev:** Posición anterior del encoder.
- **Encoder Vel:** Velocidad del Encoder.
- **Cálculo de Velocidad:** Realiza la resta de Encoder Pos con Encoder PosPrev creando una ventana con el fin de dividir este resultado con el tiempo de giro (medio segundo).

## 5. Unidad Central de procesamiento

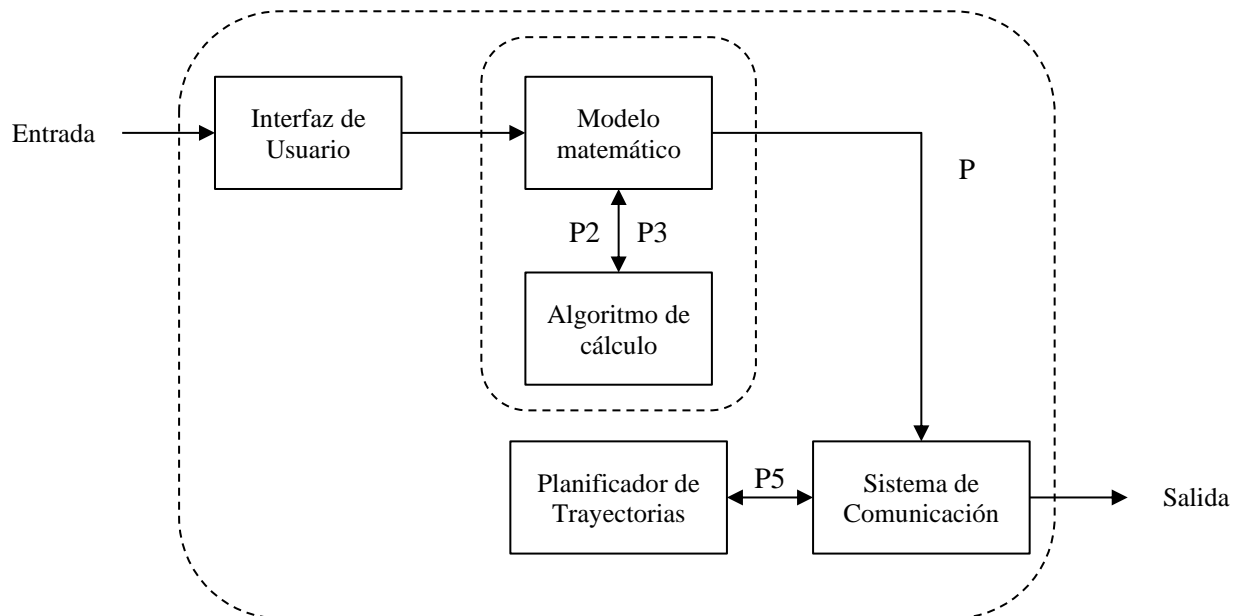


Figura 99 Arquitectura interna del software

**Entrada:** Punto en las coordenadas X,Y,Z de un espacio de trabajo de 24 cm x 24 cm x 8 cm.

**P1:** Movimiento del Joystick.

**P2:** Parámetros de curvatura, ángulo y altura (s,k,φ).

**P3:** Resultado del cálculo de ecuaciones cinemáticas.

**P4:** Valor de la longitud de los cables tensores.

**P5:** Comunicación de variables entre el algoritmo el control y planificador de trayectorias.

**P6:** Comandos de movimiento para los actuadores.

**Salida:** Longitud de cables, obteniendo la posición final (set point) en el espacio de trabajo.

## Desarrollo del simulador de la cavidad pélvica abdominal.

En el presente apartado se explicará la metodología realizada para el diseño y construcción del entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal que se utilizó para evaluar el funcionamiento del prototipo robótico de laparoscopia desarrollado.

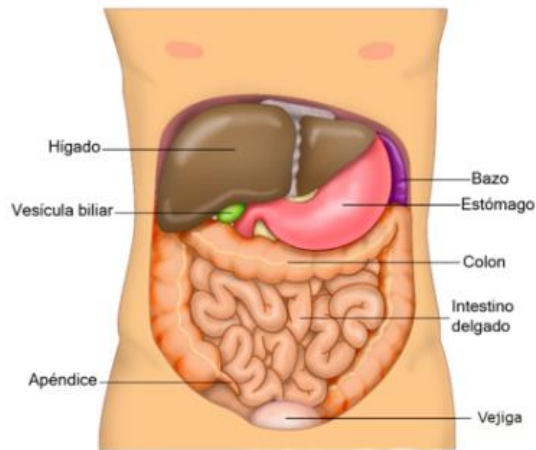
### Diseño del simulador.

Con el propósito de lograr la ubicación adecuada de los órganos que se seleccionaron para la realización del simulador, inicialmente se elaboró un modelo 3D por medio del programa FUSION 360, como se describe a continuación:

- I. Para comenzar con el diseño, lo primero que se realizó fue crear una base con dimensiones de 42 cm de largo x 52 cm de ancho.

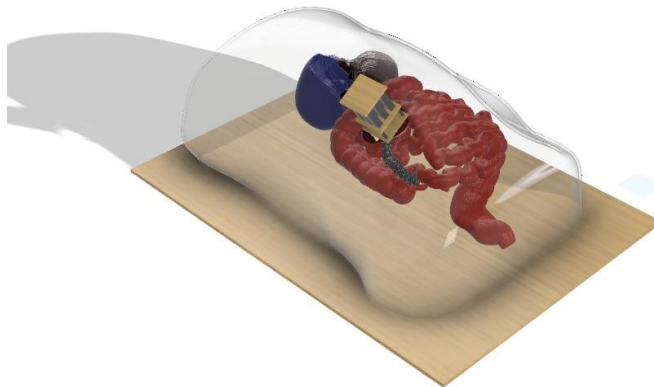
*Nota: Estas medidas se establecieron ya que el simulador que se realizó está basado en la anatomía de un niño de aproximadamente 11 años, con una altura de 1.52 m y un peso de 48 kg.*

- II. Luego de tener la base creada, se descargaron por medio de la galería de diseños pre creados de FUSION 360 los órganos implicados en la apendicetomía laparoscópica, los cuáles son: Estómago, bazo, vesícula biliar, hígado, intestino delgado e intestino grueso (véase en figura 100).

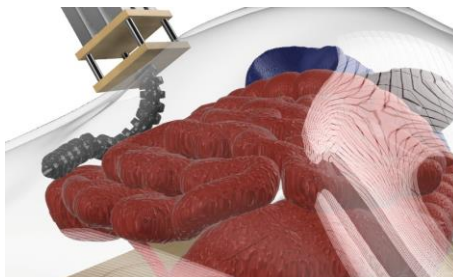


*Figura 100 Cavidad pélvica abdominal*

- III. Una vez acomodados dichos órganos de forma anatómicamente correcta, se procedió con el diseño de la estructura que cubrirá a los órganos. Debido a que cuando a un paciente se le realiza una laparoscopia, los cirujanos expanden con CO<sub>2</sub> la zona pélvica abdominal aproximadamente 15 cm, el alto de la cubierta se colocó de 20 cm de alto, puesto que los órganos miden en un rango de 5 cm a 9 cm de grosor.
- IV. A esta cubierta se le agregó un orificio de 4cm x 4cm por el cual ingresará el robot concluyendo así el diseño del simulador.
- V. Finalmente, al modelo 3D del simulador propuesto se le agregó el robot desarrollado para poder observar una posible visión futura de la evaluación del proyecto, como se puede observar en las Figuras 101, 102 y 103.



*Figura 101 Vista isométrica del Diseño CAD en FUSION 360 del simulador de entorno.*



*Figura 102 Modelo 3D del robot desarrollado realizando una inspección del entorno simulado.*



Figura 103 Vista lateral ampliada del snake cable robot dentro del simulador de entorno físico.

## 1. Caracterización de los materiales

En cuanto al desarrollo del entorno físico de la cavidad pélvica abdominal, lo primero que se realizó fue la respectiva evaluación de cada uno de los materiales que lo integran, con el propósito de determinar cuál de estos era el que más se adecuaba a los requerimientos del simulador establecidos a continuación:

- Requerimientos de calidad:
  - El simulador debe contar con órganos anatómicamente correctos en cuanto a su forma.
  - El simulador debe ser portátil.
  - El simulador cuenta con órganos que están implicados en una apendicetomía laparoscópica.
  - Los materiales con los que se realicen los órganos del simulador deben contar con propiedades mecánicas como lo es la elasticidad.
- Requerimientos funcionales:
  - El Simulador imita la cavidad de los órganos implicados de una apendicetomía laparoscópica.
- Requerimientos de restricción:
  - Este simulador es de propósito específico para la recreación del entorno físico estático de una apendicetomía laparoscópica, por esta razón los órganos no cuentan con ningún dispositivo mecánico o electrónico que les permitan el movimiento.

### a. Base

Para la base de simulador, se pensó en un material que resistiera altas cargas de masa, ya que en está se iban a sostener cada uno de los componentes que integran al simulador y adicional a esto, también iba a soportar el peso del robot desarrollado al momento de su evaluación; Por está razón se buscaron materiales con propiedades mecánicas que les permitieran el soporte de masas pesadas sin que sufrieran algún tipo de daño como quebraduras.

MATERIAL	Manejabilidad	Costo (\$)	Tamaño (cm)	Dureza	Grosor	Total
MDF	5	5	5	5	5	5
ABS	3	2	5	5	3	3,6
Pino	4	2	4	5	4	3,8

Tabla 26 Matriz de decisión del material de la base

De acuerdo con la matriz de decisión expuesta anteriormente, se llegó a la conclusión de que el material más adecuado para la base del simulador es el MDF, ya que además de cumplir con las propiedades mecánicas que se buscaban, también se eligió por el tema costo, puesto que este material a diferencia de los otros dos, es más comercial y por ende es más económico.



Figura 104 MDF blanco 5mm.

### b. Cubierta

En cuanto a la cubierta de los órganos, se buscaba un material que permitirá ver el contenido interno presente en el simulador, adicional a esto, también se buscaba que fuera resistente a cargas pesadas, debido a que en esta cuarta iba a estar sostenido el robot desarrollado

MATERIAL	Manejabilidad	Costo (\$)	Tamaño (cm)	Dureza	Transparencia	Total
Acrílico	4	5	4,5	5	5	4,7
Plástico	1	4	3	1	4	2,6
Acetato	3	4	3	1	4	3,0

Tabla 27 Matriz de decisión material de la cubierta

Gracias con la información obtenida por medio de la matriz de decisión propuesta en la tabla 27. se decidió utilizar acrílico para la elaboración de la estructura del simulador, puesto que dicho material fue el que obtuvo la mayor calificación en cuanto a la evaluación de las propiedades mecánicas que se requerían para la cubierta.



Figura 105 Acrílico

### c. Órganos

#### i. Material de moldeo

En cuanto al moldeo de los órganos, se buscaba un material que no solo fuera sencillo de moldear para lograr obtener la forma anatómica de los órganos presentes en el simulador, si no también que mantuviera su forma al momento utilizarlo para hacer el molde.

MATERIAL	Manejabilidad	Costo (\$)	Textura	Forma	Acabado	Total
Plastilina	4	5	5	5	5	4,8



<b>Porcelana moldeable</b>	3	4	2	3	4	3,2
<b>Foamy moldeable</b>	5	2	4	4	4	3,8

*Tabla 28 Matriz de decisión material de moldeo*

Conforme a la calificación obtenida en la tabla 28. se determinó que el material más adecuado para el moldeo de los órganos es la plastilina, debido a que está a diferencia de los otros dos materiales evaluados no necesita de métodos extra (como lo son el horneado o el secado) para lograr una forma definida.



*Figura 106 Plastilina*

## *ii. Negativo -Moldes*

En cuanto a la realización de los moldes, se buscó un material que permitiera la adaptación de cualquier forma predeterminada y que a su vez que fuera no solo de fácil acceso comercial sino que también su preparación fuera rápida y eficaz.

<b>MATERIAL</b>	<b>Manejabilidad</b>	<b>Costo (\$)</b>	<b>Textura</b>	<b>Tiempo de secado</b>	<b>Acabado</b>	<b>Total</b>
<b>Alginato</b>	4	5	5	5	4	4,6
<b>Elastómero</b>	2	2	3	1	4	2,4
<b>Yeso Tipo III</b>	5	5	3	4	3	4,0

*Tabla 29 Matriz de decisión del material del negativo (molde)*

Teniendo en cuenta la tabla 29. se llegó a la conclusión de que el alginato dental fue el material más adecuado para la elaboración de los moldes, ya que gracias a sus componentes este permite que tanto la preparación como el tiempo de secado sean muy rápidos, adicional a esto los acabados son idénticos a la forma que se pretende lograr.



*Figura 107 Alginato Dental*

### iii. Positivo - Relleno

Para la elección del material de relleno, se tuvo que tener en cuenta que este tenía que contar con propiedades tanto físicas como mecánicas que se asemejarán lo más posible a la apariencia de los órganos escogidos para el simulador.

MATERIAL	Preparación	Costo (\$)	Textura	Tiempo de secado	Acabado	Total
<b>Caucho Silicona</b>	3	2	5	2	5	3,4
<b>Poliuretano</b>	2	2	1	4	1	2
<b>Yeso tipo IV</b>	4	5	1	3	3	3,2

Tabla 30 Matriz de decisión material del positivo (Relleno)

De acuerdo con la tabla anterior se definió que el material con el que se iban a construir los órganos sería la silicona de caucho, debido a que éste al contar con materiales extra (aceite y catalizador) permite que su textura cambie dependiendo del órgano que se iba a realizar.



Figura 108 Silicona de caucho.

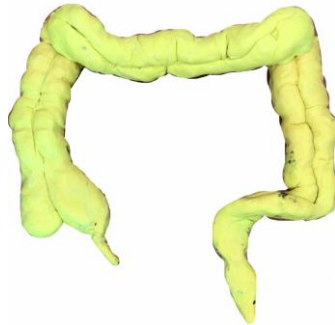
## 2. Construcción del simulador

Para la construcción del simulador primero se comenzó con la elaboración de los órganos, para esto se establecieron las dimensiones de los mismos (tabla 31) teniendo en cuenta las medidas antropométricas de un niño de aproximadamente 11 años con una altura de 1.52 cm con un peso de 48 kg.

ÓRGANO	Medida		
	Alto (cm)	Ancho (cm)	Grosor(cm)
Estómago	19	9	9,12
Hígado	12	18	6,57
Intestino grueso	43	3	1
Intestino delgado	49,5	16	1,2
Apéndice	4	1	0,2
Vesícula	3.5	3.5	0,7
Bazo	8	1.5	2,1

Tabla 31 Medida de cada uno de los órganos realizados para el simulador

Después de establecer dichas dimensiones, se procedió con el moldeado en plastilina de cada uno de los órganos presentes en la tabla 31, para esto se utilizó un programa en línea que permitió la visualización en 3D de los órganos implicados con el fin de obtener la misma forma para cada uno de ellos como se puede ver en las figuras 109 y 110.



*Figura 109 Modelado en plastilina del intestino grueso*



*Figura 110 Modelado en plastilina del hígado*

Posterior al modelamiento de cada uno de los órganos, se comenzó con la preparación de los moldes de alginato, para esto se llevó a cabo la siguiente metodología:

- I. Se determinó la proporción de alginato - agua para preparar la mezcla.  
*Nota: según la casa comercial la proporción es de 2 a 1, es decir, la porción de alginato corresponde a 20 g por cada 40 mL de agua.*
- II. Dependiendo del órgano que se quería replicar, se pesó el alginato y se agregó a una taza siliconada como se puede ver en la figura 111.



*Figura 111 Porción de alginato*

- III. Luego de esto, se añadió la cantidad precisa de agua según el alginato depositado, empleando una copa y se empezó a mezclar durante 30 segundos haciendo uso de una escápula, allí se empezó a notar que la mezcla empezó a tornarse de un tono rojizo.



*Figura 112 Mezcla de alginato y agua.*

- IV. Una vez la mezcla se volvió homogénea, esta se tornó amarilla y procedió a insertar la figura del órgano que se quería moldear.



*Figura 113 Introducción en el alginato del órgano previamente moldeado.*

- V. Finalmente, luego de aproximadamente 60 segundos, se retiró de manera cuidadosa la figura de plastilina con el fin de no dañar el molde elaborado.



*Figura 114 Molde final*

*Nota: Se realizó la misma metodología para cada uno de los órganos*

Una vez realizados los moldes de alginato de cada uno de los órganos, se continuó con el relleno de los mismos utilizando silicona de caucho con su respectivo catalizador (generador de rápida reacción) y fluido silicona o aceite (generador de textura) por medio de los siguientes pasos:

- I. Para comenzar se debe asegurar que la silicona de caucho cuente con las proporciones adecuadas de cada uno de sus componentes (catalizador y aceite), esto con el fin de obtener un resultado adecuado en cuanto a la rigidez y textura que se desee para cada órgano, por esta razón para verificar e identificar las cantidades necesarias, se realizaron pruebas de textura del material como se muestra en la figura 115.



*Figura 115 Pruebas de textura de material*

- II. Luego de realizar dichas pruebas de textura se realizaron las proporciones necesarias para cada uno de los órganos como se muestra en la tabla 32. por medio de los siguientes cálculos:

$$Volumen = Volumen\ del\ órgano$$

*Ecuación 38 Proporción de volumen del órgano*

$$Aceite = Volumen / 2$$

*Ecuación 39 Proporción volumen de aceite*

$$VT = Volumen + Aceite$$

*Ecuación 40 Volumen total de proporciones para el material de los órganos simulados*

$$\text{Catalizador} = VT * 0.03$$

*Ecuación 41 Volumen del catalizador implementados en la simulación de los órganos*

$$\text{Órgano} = VT + \text{Catalizador}$$

*Ecuación 42 Volumen final de los órganos*

ÓRGANOS	CAUCHO SILICONA	ACEITE SILICONA	CATALIZADOR
Intestino grueso	40 ml	20 ml	1.8 g
Intestino delgado	130 ml	65 ml	5.8 g
Estómago	60 ml	30 ml	2.7 g
Hígado	80 ml	40 ml	3.6 g
Bazo	40 ml	20ml	1.8 g
Vesícula	20ml	10ml	0.9 g
Apéndice	25ml	12.5ml	1.1 g

*Tabla 32 Proporciones de los materiales utilizados para cada uno de los órganos.*

- III. Ya teniendo las proporciones establecidas, se procedió con el llenado de cada uno de los moldes de alginato realizados anteriormente como se muestra en la figura 116.

*Nota: Para el color de cada órgano se utilizaron pinturas acrílicas que se aplicaron directamente en la mezcla de silicona de caucho, catalizador y aceite.*



*Figura 116 Positivo de silicona en el molde de alginato*

- IV. Para finalizar, se esperaron aproximadamente 15 minutos y se comenzó con el desmoldamiento del cada órgano realizado (véase figura 117)



*Figura 117 Estómago realizado con silicona de caucho.*

Ya con cada uno de los órganos realizados en silicona de caucho, se continuó con el pos-procesamiento de los mismos con el objetivo de hacerlos más estéticos y así poder montarlos en la base de MDF a la cual se le agregó una impresión de la cavidad pélvica abdominal, posterior a dicho pos-procesamiento, se acomodaron y pegaron cada uno de los órganos en la base de MDF para finalmente poder agregar la cobertura de acrílico.

## Implementación del prototipo laparoscópico en el entorno físico simulador

Este apartado se desglosó de manera puntual los pasos correspondientes para la identificación del funcionamiento del prototipo laparoscópico, para esto se incorporó una cámara endoscópica, con el fin obtener imágenes que permitieron el contacto con el simulador anatómico de la cavidad pélvica abdominal.

Por lo anterior, se hizo levantamiento de los siguientes requerimientos:

### Requerimientos de la cámara:

- Generación de 80W de luz.
- Interfaz USB.
- Resolución 640 \* 480 píxeles
- Distancia de enfoque de 1.2 -3.2 in

En cuanto a los requerimientos mencionados anteriormente, la generación de luz es un factor importante durante las técnicas quirúrgicas y más si estás de hacer de manera mínimamente invasivas, pues el doctor debe lograr ver de manera clara el estado actual de la cavidad pélvica abdominal, logrando identificar algún tipo de anomalía en el paciente, además se resalta que generalmente las cámaras que cuentan con generación de luz mayores a 80W, permiten una mejor profundidad en la imagen adquirida pues se tendrá una apertura del lente media, por otro lado los pixeles posibilitan que la imagen adquirida cuenta con mayor rango de profundidad y menor disminución de igual manera que la distancia de enfoque. Finalmente, la interfaz USB permite una conexión genérica, aceptada por los computadores empleados para el desarrollo de las pruebas.



*Figura 118 Cámara laparoscópica*

La cámara se sujeta de la extremidad del prototipo laparoscópico como se evidencia en la figura 118, de modo que sea capaz de registrar gráficamente los movimientos que realice el mismo dentro de la cavidad pélvica abdominal simulando un procedimiento quirúrgico. Para que esto se debe seguir:

- I. Se estableció un espacio de trabajo físico el cual permite la comodidad del usuario.
- II. Se verificaron que las conexiones sean las apropiadas para cada uno de los subsistemas del prototipo laparoscópico.
- III. Se conectó la cámara al dispositivo en el cual se quiera evidenciar su visión, en este caso se conecta al computador por medio de su interfaz USB.
- IV. Se verificaron los movimientos del prototipo y el registro de imagen por parte de la cámara.
- V. El simulador se encuentra en una superficie plana a una distancia máxima de 50 cm, evitando inconvenientes a nivel electrónico.

Al contar con los implementos funcionando de manera eficiente se dispuso a encajar el prototipo laparoscópico en la superficie superior del simulador pélvico abdominal, de manera que la extremidad de este entrará en el orificio superior del simulador para hacer el recorrido y la inspección adecuada de la cavidad por medio de la cámara registrando de manera visual los datos correspondientes y la existencia de la patología existente a lo largo de la cavidad.

## Plan de pruebas del sistema

El plan de pruebas del prototipo robótico desarrollado consistió en dos fases fundamentales para la evaluación y validación del mismo, esto con el objetivo de verificar el cumplimiento de cada uno de los requerimientos establecidos. Por consiguiente, estas son las dos metodologías de evaluación:

### 1. Plan de prueba de los subsistemas

Este plan consistió en probar los subsistemas de sensores y control desarrollados en la metodología, con el propósito de verificar el funcionamiento de sus respectivos componentes interactuando entre sí de manera conjunta.

#### a. *Sensores:*

- Por medio del joystick se establece una posición cualquiera en los ejes x,y,z.
- Comparar la posición obtenida por medio del joystick con una posición establecida por medio de las IMU.
- Medir la posición real del efector final por medio de una regla en el espacio de trabajo establecido.
- Comparar la posición de las IMU con la posición real del efector final.
- Completar la tabla de resultados.

Prueba	Posición Joystick	Posición IMU	Posición Real
1			
2			
3			
4			

*Tabla 33 Matriz de prueba para los sensores*

#### b. *Controlador:*

En esta prueba se movió el efector final a una posición predeterminada en los ejes x,y,z, teniendo en cuenta tanto la posición inicial como la posición final, con el fin de comprobar la capacidad de control del sistema.

- Para que la prueba muestre porcentajes de error, se tomaron datos con diferentes posiciones iniciales, pero con la misma posición final.

Prueba	Posición Inicial	Posición Final	Porcentaje de error
1			
2			

3			
4			

Tabla 34 Matriz de prueba para el controlador

## 2. Plan de pruebas del campo de visualización que permite el dispositivo.

Este plan de visualización se basó principalmente en realizar una comparación entre campo de visualización que permite un laparoscopio convencional y el campo de visualización que permite el laparoscopio basado en el modelo robótico *snake cable robot*.

Para simular la estructura de un laparoscopio convencional (véase en figura 119), lo que se hizo fue tomar un tubo de PVC con un grosor de 7mm y un largo de 23 cm e intégrale la cámara laparoscópica también utilizada en el prototipo elaborado, para así poder observar los movimientos que este permite realizar y así mismo las imágenes que este posibilita con el propósito de comparar dichas imágenes con respecto a las que se obtienen con el laparoscopio robótico desarrollado en el presente trabajo de grado.



Figura 119 Laparoscópico convencional.

Nombre de la Prueba	Comparación del campo de visualización entre un laparoscopio convencional y el laparoscopio basado en el modelo robótico <i>snake cable robot</i>			
Laparoscopio	Convencional		<i>Snake Cable Robot</i>	
Marcador 1	Imagen de la posición del laparoscopio	Imagen obtenida por la cámara	Imagen de la posición del laparoscopio	Imagen obtenida por la cámara
Marcador 2	Imagen de la posición del laparoscopio	Imagen obtenida por la cámara	Imagen de la posición del laparoscopio	Imagen obtenida por la cámara
Marcador 3	Imagen de la posición del laparoscopio	Imagen obtenida por la cámara	Imagen de la posición del laparoscopio	Imagen obtenida por la cámara



<b>Marcador 4</b>				
	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>
<b>Marcador 5</b>				
	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>
<b>Marcador 6</b>				
	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>

Tabla 35 Plan de prueba de visualización del Prototipo.

### 3. Plan de pruebas de la velocidad del dispositivo

Para los dos laparoscopios evaluados (convencional simulado y prototipo desarrollado), en cuanto a la realización de las pruebas de velocidad, se utilizaron seis marcadores presentes en diferentes zonas de la cavidad pélvica abdominal construida, y se hallaron las velocidades a las cuales se demoraban cada uno de los laparoscopios en llegar hacia determinado punto, para esto, se realizaron los siguientes pasos:

- Disponer los laparoscopios en la parte superior de la cavidad pélvica abdominal.
- En el caso del laparoscopio convencional simulado: Ajustar la posición desde la parte proximal del mismo.
- Para el caso del prototipo desarrollado: Ajustar la posición por medio del joystick, el cual realiza la actuación necesaria del mismo para llegar al marcador.
- Por medio de un cronómetro se toma el tiempo que gasta cada uno de los laparoscopios en llegar al marcador solicitado.
- Realizar 3 pruebas por cada marcador con los dos laparoscopios.
- Completar tabla 36.
- Realizar un tiempo promedio.
- Completar tabla 37.

Marcador en la cavidad pélvica abdominal simulada	Velocidades de laparoscopios - Segundos (s)					
	Convencional (Actual)			Prototipo desarrollado		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1						

2						
3						
4						
5						
6						

*Tabla 36. Comparación de velocidad entre un laparoscopio convencional y el desarrollo del prototipo laparoscópico con 3 pruebas.*

Marcador en la cavidad pélvica abdominal simulada	Velocidades de laparoscopios - Milisegundos (ms)	
	Convencional (Actual)	Prototipo desarrollado
1		
2		
3		
4		
5		
6		

*Tabla 37 Comparación de la velocidad promedio entre un laparoscopio convencional y el desarrollo del prototipo laparoscópico*

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

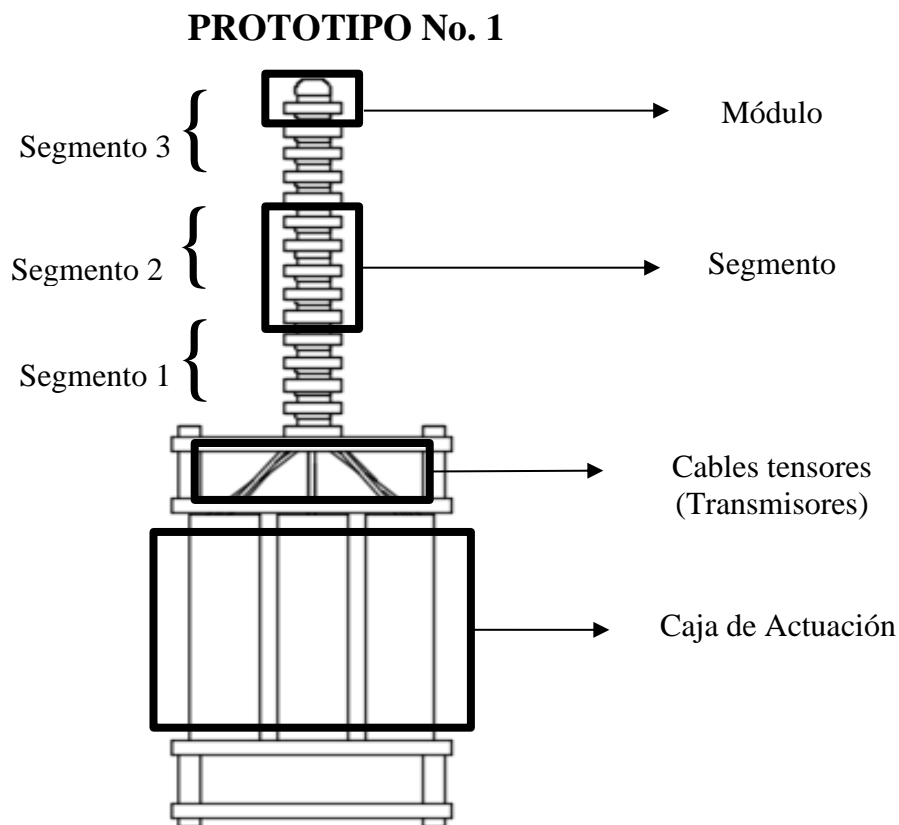
En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos con su respectivo análisis de cada una de las fases desarrolladas en la metodología expuesta en el capítulo 5, adicional a esto también se mostrarán los gastos generales invertidos en el presente proyecto de grado.

### Desarrollo de la estructura mecánica del prototipo laparoscópico

#### PROTOTIPO No. 1

##### Diseño mecánico del robot.

A continuación, en la Figura 120 se expondrá el esquema general del diseño que se elaboró para el desarrollo del prototipo No. 1



*Figura 120 Esquema general del diseño del Robot para la propuesta No.1*

#### 1. Módulos.

Para el cuerpo de robot se utilizaron los módulos descritos en la metodología de diseño del prototipo No. 1, obteniendo lo que se puede observar en la figura 121.



*Figura 121 Vistas isométricas del diseño de un módulo del snake cable robot*

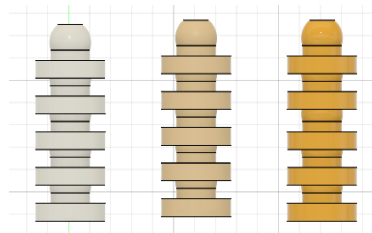
Las características del módulo seleccionado son las siguientes:

<b>Tipo de articulación</b>	Esférica
<b>Proceso de elaboración</b>	Modelado 3D
<b>Material del modelado</b>	PLA
<b>Altura de Capa</b>	1.5 mm
<b>Velocidad de impresión</b>	60 m/s
<b>Relleno</b>	25%
<b>Soporte</b>	Tipo falda
<b>Diámetro</b>	7 mm
<b>Altura</b>	1,33 cm

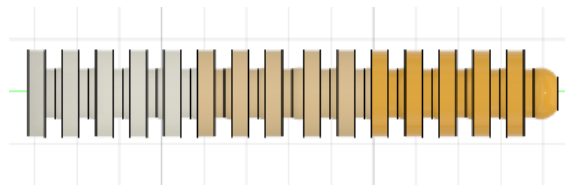
*Tabla 38 Características de impresión los módulos del prototipo No.1*

## 2. Segmentos

Para el diseño de los segmentos al igual que el de los módulos, se elaboraron modelos 3D en el programa FUSION 360, allí: Ya que para el prototipo No. 1 se tenía definida la distribución de los módulos y los segmentos, lo que se hizo en el programa de diseño CAD fue organizar los módulos en las cantidades ya establecidas, es decir que se distribuyeron en tres segmentos con agrupaciones de 5 módulos para cada uno de ellos, obteniendo así como se puede ver en la figura 122 y 123



*Figura 122 Organización de los módulos en grupos 5.*



*Figura 123 Organización de forma lineal de cada uno de los segmentos que componen al robot, con la propuesta*

## 3. Transmisores (Cables tensores).

Como se puede observar en la figura 124. El primer segmento (blanco) cuenta con nueve cables tensores que unen sus módulos, el segundo segmento (beige) cuenta con seis cables que unen sus módulos y finalmente el tercer segmento (blanco) cuenta con tres tensores que unen sus módulos con los demás segmentos.

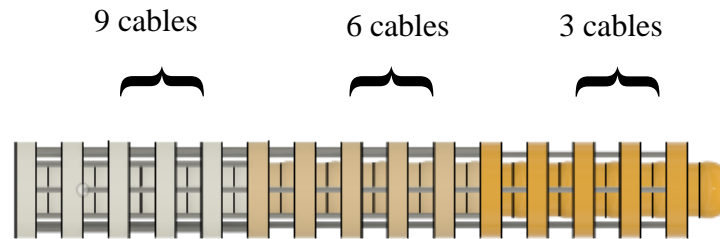


Figura 124 Diseño de la distribución de los cables tensores a lo largo de la estructura del prototipo No. 1

Cabe resaltar que el diseño que se elaboró para la unión de los cables tensores a los actuadores para para el prototipo No, 1 se elaboró mediante un tornillo sin fin, ya que este permite enrollar el cable, de forma tal que cuando el motor gira en un sentido el cable se enrosque, y cuando gire en sentido contrario se desenrosque. Adicionalmente también se diseñó en un espacio libre entre los actuadores los actuadores y la estructura móvil de robot (véase en figura 125), esto con el fin de que en los cables entrarán de manera directa a los módulos para que de esta forma se generará la menor fricción posible cuando los actuadores recogían y soltaban el cable.

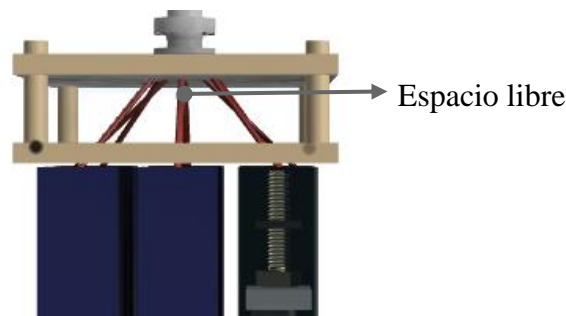


Figura 125 Unión del cable tensor al actuador por medio de un tornillo sin fin.

#### 4. Caja de actuación.

Debido a que la caja de actuación es la composición de todos los elementos necesarios para realizar el movimiento del robot, allí se ubicaron tanto los motores como las conexiones a los motores y a los controladores de los mismos.

De acuerdo con la metodología de diseño descrita en la distribución de la estructura de la caja de actuación y gracias al desarrollo de las dos propuestas allí, se evaluaron los pros y los contras de cada una de las opciones de distribución que se plantearon el fin de determinar cuál de ellas era la más adecuada para que se implementara en la estructura de la caja.

*Nota: Cabe resaltar que estas opciones se están evaluando con la suposición de que los cables tensores cuenten con la misma longitud.*

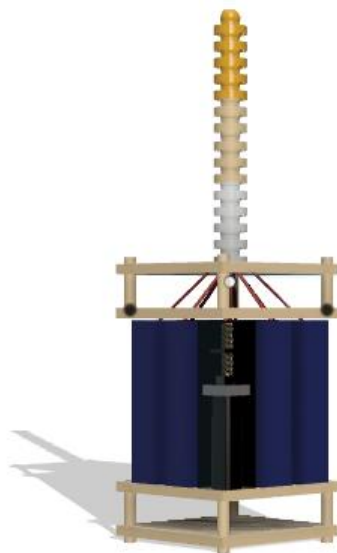
Alternativas	Distribución matricial	Distribución en circunferencia
Evaluación	Hace más compacta la caja de actuación.	Aumento en las dimensiones de la caja.
	Al posicionar los motores en esta distribución habría un punto medio en la tensión, haciendo que los movimientos que se realizan por medio de los cables tensores no sean rígidos, pero que a su vez	Aumento en la tensión en los transmisores, ocasionado que se generen movimientos rígidos que requieran mayor esfuerzo o posibles rupturas en los mismos. Se requería de más materiales para su

	mantengan firmeza en la estructura.	construcción, por ende, aumentando el costo del sistema.
--	-------------------------------------	--

*Tabla 39 Comparación de las opciones de distribución de los actuadores para la propuesta 1.*

Gracias a la elaboración de la tabla 39, se llegó al resultado de escoger la opción número dos (distribución matricial), puesto que está además ser la que menos contra tiene, es la que más se adapta al proyecto desarrollado.

A continuación en la figura 126, se puede ver el modelo 3D que se obtuvo del diseño de la estructura mecánica del robot con todas sus partes integradas.



*Figura 126 Modelo 3D del diseño mecánico del robot del prototipo No. 1.*

### **Construcción de la Estructura del Robot**

El objetivo de la construcción del prototipo No.1 era evidenciar y a su vez evaluar la viabilidad de los materiales físicos con los cuales estaba armado el mismo, es decir, piezas impresas, cables tensores, tornillos sin fin y placas de soporte (véase figura 127) en cuanto a su ensamble y al momento de realizar los movimientos deseados por el usuario.

En cuanto a los resultados obtenidos con este diseño, se encontró que a pesar de que en simulaciones computacionales el movimiento de la estructura móvil del robot no presentó problemas, sin embargo a lo largo del desarrollo de las pruebas físicas, se identificaron inconvenientes en la maleabilidad y ductilidad principalmente en las piezas impresas, puesto que las articulaciones no encajaban de manera adecuada entre ellas, provocando el mecanismo móvil no contará con posición precisa en el punto cero “home”, al momento de realizar los movimientos solicitados y posición final, ya que generaban bastante fricción entre ellos; esto conllevaba a que los cables tensores (Nylon) hicieran movimientos indebidos, incitando que los motores se sobre esfuerzan y reventaran los cables tensores.

Según mencionado anteriormente, el prototipo No. 1 presentó bajo rendimiento, pues no se producían los movimientos, flexibilidad y versatilidad deseada por el usuario, por lo cual no iba a ser capaz de cumplir con los requerimientos mencionados a lo largo del documento, como impedir que fuese capaz de evitar obstáculos en un entorno “real”.



Figura 127 Estructura mecánica del Prototipo No. 1

Por otro lado, teniendo en cuenta las placas de soporte el prototipo cuenta con 4 a lo largo de su estructura fija, generando que este se mantenga firme en una superficie plana, posibilitando que cuando la estructura móvil del robot realice movimientos, los demás componentes del sistema se mantengan estáticos, adicionando que gracias a que las uniones de las placas se realizaron por medio de tornillos sin fin, resultó más sencillo el desmontaje de la estructura al momento en el que pasarán inconvenientes como tener que cambiar los cable tensores o reacomodar la posición de los motores.

## PROTOTIPO No. 2

### Diseño mecánico del robot.

Posteriormente a las evaluaciones realizadas en el diseño del prototipo No. 1, se continuó con el desarrollo del diseño para la propuesta No. 2. A continuación en la Figura 129 se muestra el esquema general que se obtuvo del mecanismo diseñado.

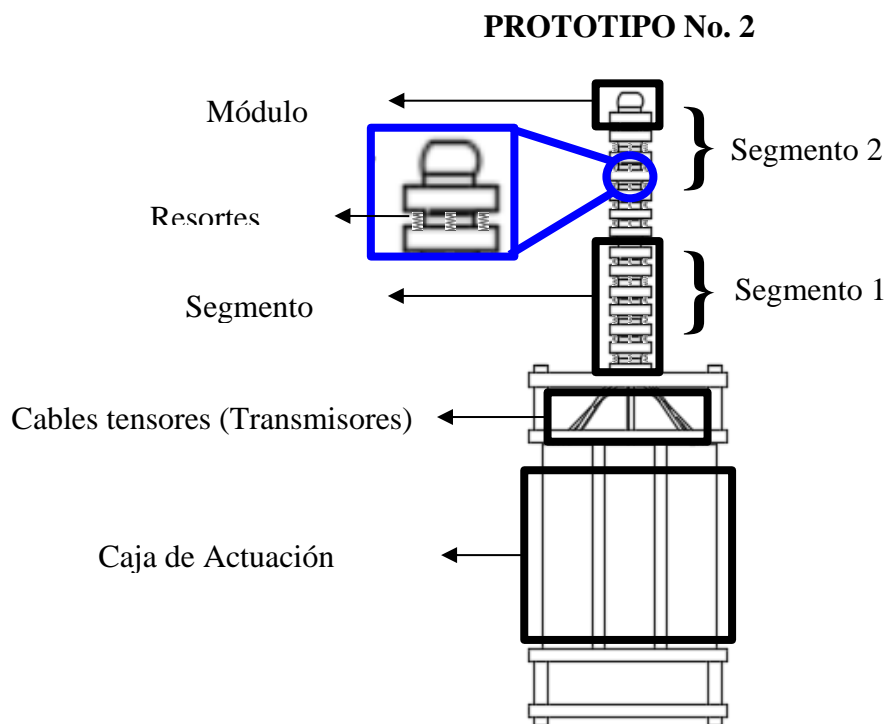


Figura 128 Esquema general del diseño del Robot para la propuesta No.2

## 1. Módulos

Para los módulos utilizados en el prototipo No. 2 se utilizó exactamente el mismo diseño del prototipo número uno, con la diferencia que para este caso se utilizaron diferentes características de impresión 3D, ya que con el anterior se requirió demasiado post procesamiento, ya que se les agregó un soporte tipo falda, ocasionado que las piezas generan una capa de filamento extra que alteraba su forma inicial. Por esta razón las características que se establecieron para los módulos presentes en este diseño fueron las siguientes:

<b>Tipo de articulación</b>	Esférica
<b>Proceso de elaboración</b>	Modelado 3D
<b>Material del modelado</b>	ABS
<b>Altura de Capa</b>	0,12 mm
<b>Velocidad de impresión</b>	40 m/s
<b>Relleno</b>	100%
<b>Soporte</b>	Sin soporte
<b>Diámetro</b>	7 mm
<b>Altura</b>	1,43 cm

Tabla 40 Características de impresión los módulos del prototipo No.2

## 2. Segmentos.

Como para la distribución tanto de los segmentos como de los módulos de la propuesta No. 2 se le quería reducir complejidad al sistema, en el diseño se distribuyeron los 14 módulos a lo largo de 2 segmentos, es decir que se organizaron 7 módulos para un segmento y 7 módulos para el otro segmento como se puede observar a continuación:

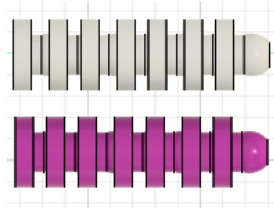


Figura 129 Organización de los módulos en grupos 7.

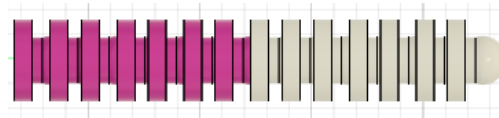


Figura 130 Organización de forma lineal de cada uno de los segmentos que componen al robot. con la propuesta 2

Adicionalmente, para evitar que los módulos se desacomodaran entre ellos provocando que tocará acomodarlos manualmente cada vez que se iba a realizar un nuevo movimiento, entre módulo y módulo se agregaron unos resortes ubicados alrededor de los cables tensores, que permitieron al módulo volver a su posición original.



### 3. Transmisores (Cables tensores).

Para los cables tensores, al igual que en el prototipo anterior se utilizó un espacio libre que permitirá que los cables pasen de manera directa a la base de la estructura móvil de robot (proximal a las láminas de soporte), con la diferencia de que en ese caso se contaría con seis cables para el primer segmento y 3 para el segundo.

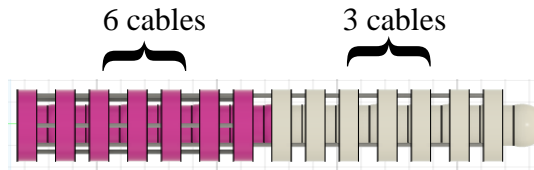


Figura 131 Diseño de la distribución de los cables tensores a lo largo de la estructura del prototipo No: 2

### 4. Caja de actuación.

Gracias a las dos alternativas mencionadas en la metodología de la distribución de los actuadores en el prototipo No. 2, se evaluaron los pros y los contra de cada una de ellas con el fin de determinar qué localización era la más adecuada para la caja de actuación, ya que como para este diseño se le eliminaron 3 actuadores, su ubicación tenía que ser redistribuida para adaptarse a dicha cantidad de motores. En la tabla 41 se puede observar la comparación de las dos distribuciones.

Alternativas	Distribución lineal	Distribución asimétrica
<b>Evaluación</b>	Colocar los motores en forma de distribución lineal produce que el mecanismo cuente con mayor estabilidad ya que estará centrado su punto de masa, sin embargo, los cables de los motores deben salir de los tubos de aluminio que los cubre de manera directa, es decir, no se deben obstaculizar puesto que pueden ocasionar daños en los cables y futuras interrupciones y cortos en los mismos.	La distribución asimétrica permite que el sistema tenga de igual forma estabilidad ya que los pesos están distribuidos a lo largo de la caja de los actuadores permitiendo a su vez mayor posicionamiento de los tubos de aluminio de manera que, los cables de los motores no se ven afectados e interrumpidos por estar en medio de las cajas de aluminio y están de manera perpendicular a los orificios de la placa superior de la caja de actuadores.

Tabla 41 Comparación de las opciones de distribución de los actuadores para la propuesta 2.

Gracias a la tabla anterior se concluyó que la mejor distribución para los motores dentro de la caja de actuación sería la distribución asimétrica, ya que además de ser la que cuenta con más ventajas, es la que permite que los cables pasen de manera directa por los agujeros presente en la base los los módulos.

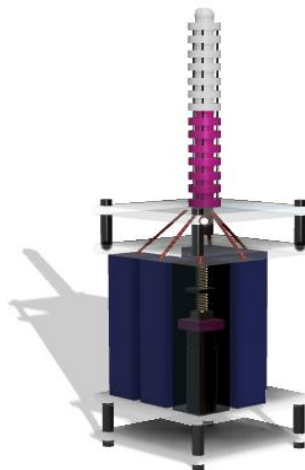


Figura 132 Modelo 3D del diseño mecánico del robot en el prototipo No. 2.

## Construcción de la Estructura del Robot

La estructura construida del robot del segundo prototipo presentó algunos problemas en cuanto a movilidad, ya que a pesar de que se mejoró la calidad de la impresión 3D de los módulos, igualmente las articulaciones generaban fricción impidiendo movimientos fluidos en el robot, adicionalmente, al momento de implementar la cámara endoscópica se notó que esta tenía que quedar localizada por fuera de la estructura móvil (véase Figura 133), debido a que como el diseño de los módulos era tan pequeño no dejaba que la cámara quedara dentro del mismo, ya que cuando se introducía, la cámara contaba con una base de aproximadamente 5 cm dejando inmóvil los módulos en donde se localizaba, puesto que su estructura es rígida y ocasionó que el mecanismo móvil presentara dimensiones superiores a las establecidas para el prototipo (20 cm x 0.7 cm) además de quitarle también la propiedad redundante que caracteriza al robot. Así mismo, el hecho de que la cámara quedara por fuera causaba que la posición del efector final estuviera desfasada por aproximadamente 5 cm (largo de la base de la cámara) .

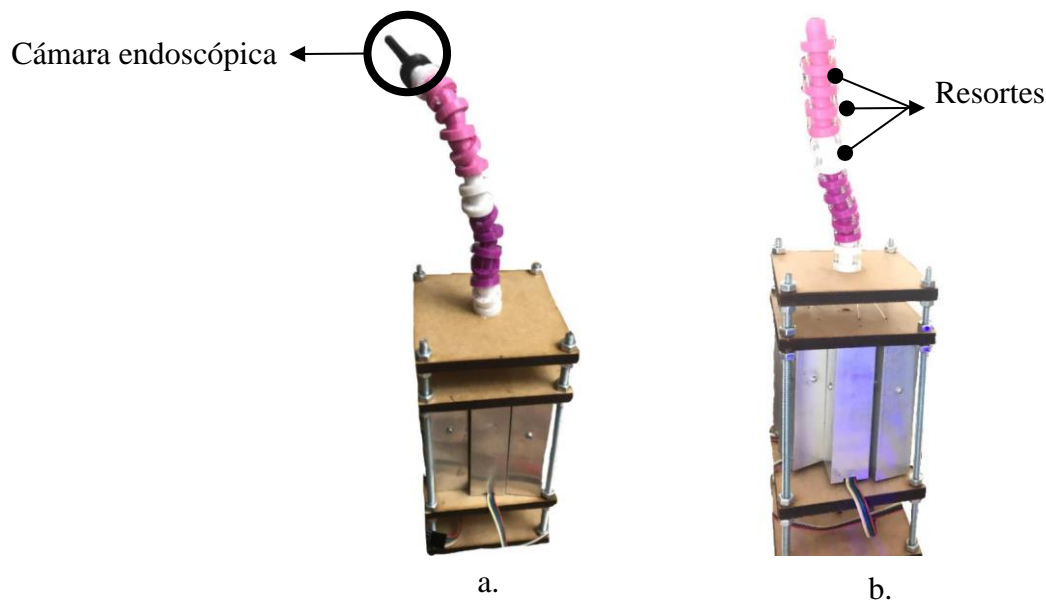


Figura 133 Estructura final del prototipo No.2

- a. Posición de la cámara endoscópica dentro de la estructura móvil del robot del prototipo No.2.
- b. Posición de los resortes en la estructura final del prototipo No.2

Aunque los resortes ayudaron a que los módulos no se desacomodaran tanto entre ellos y así mismo que se produjeran movimientos más suaves comparados con el prototipo No 1, cuando se quería que el robot llegara a la posición original (home) no cumplía el recorrido por completo, puesto que como se evidencio en el Prototipo No.1 el problema radica en la fricción ocasionada por las articulaciones de los módulos, ocasionando un margen de error bastante alto y por ende que no se llegara correctamente a la posición que se deseaba.

## PROTOTIPO No. 3

### Diseño mecánico del robot.

Para el diseño del prototipo No. 3 se decidió cambiar totalmente la estructura móvil del robot, ya que a pesar de que los resortes si ayudaron a que el prototipo No. 2 se moviera de mejor manera, todavía se encontraron fallos en cuanto al posicionamiento del efector final que se deseaba para la estructura móvil del robot; por esta razón se optó por utilizar resortes que permiten un movimiento mucho más suave, ya que estos al no contar con ningún tipo de articulaciones permiten que el mecanismo llegue a la

posición que se desea y retorne a su forma original sin ningún problema. A continuación, en la Figura 134 se mostrará el esquema general del mecanismo realizado para la propuesta No. 3.

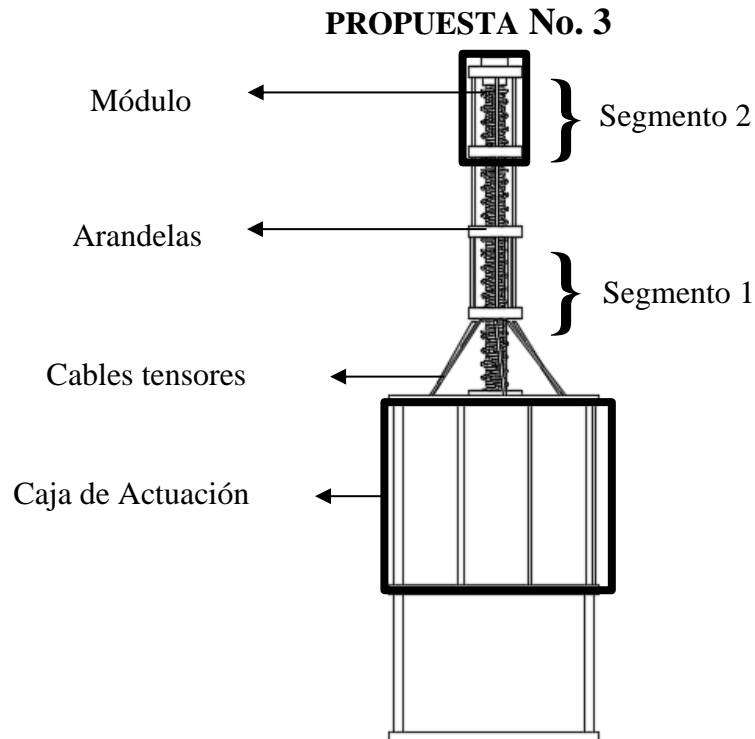


Figura 134 Esquema general del diseño del Robot para la propuesta No.3

### 1. Módulos y segmentos

Como se realizó un cambio total en la estructura del robot, en este caso los módulos se diseñaron por medio de resortes y arandelas. En cuanto a las arandelas, estas se decidieron imprimir en 3D ya que al comienzo en prototipo se probó con arandelas de metal y estas al estar puestas en una posición diagonal se encajaban con los anillos del resorte interno y ocasionaron que no se realizará el movimiento, mientras que con el filamento de impresión 3D a pesar de que estuviera la arandela posicionada diagonalmente está si permite un deslizamiento causando el movimiento que se quería. Mencionado lo anterior, las características de impresión de dichas arandelas fueron:

<b>Tipo de articulación</b>	Ninguna
<b>Proceso de elaboración</b>	Modelado 3D
<b>Material del modelado</b>	PLA
<b>Altura de Capa</b>	0.02 mm
<b>Velocidad de impresión</b>	60 m/s
<b>Relleno</b>	75%
<b>Soporte</b>	Sin soporte
<b>Diámetro</b>	7 mm
<b>Altura</b>	5 mm

Tabla 42 Características de impresión de las arandelas del prototipo No.3

En cuanto los dos tipos resortes que se encuentran en la tanto en los segmentos como en los módulos de la estructura móvil del robot (véase figura 135), se utilizaron dos, uno que funciona como columna vertebral y otro que funciona para que las arandelas no se deslicen a través del resorte interno y permite la realización curvaturas generadas por el movimiento que se elabora al momento de posicionar el robot en algún punto



Figura 135 Diseño de los módulos pertenecientes al prototipo No. 3

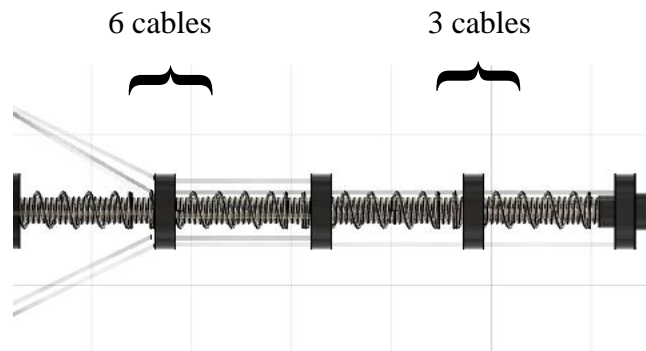


Figura 136 Vista lateral del diseño de los segmentos pertenecientes al prototipo No. 3

## 2. Transmisores (Cables tensores).

Con el fin de lograr movimientos de manera pertinente, era necesario que los transmisores salieran de manera directa al prototipo móvil del robot (véase figura 137) sin que se tuviese contacto con otras láminas de soportes como ocurría en el prototipo No. 1 y prototipo No. 2, ya que al momento de pasar por dicho soporte los tensores se desviaban y finalmente llegaban al mecanismo móvil, sumándole a esto que se provocara fricción y que el tensor tuviese más posibilidades de romperse durante su funcionamiento.

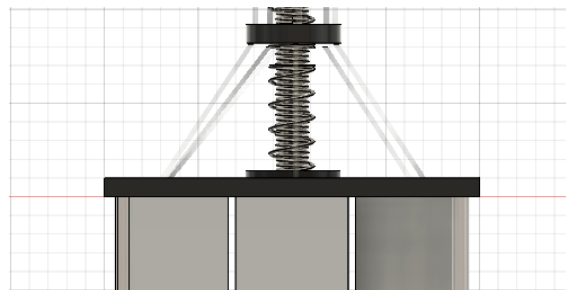
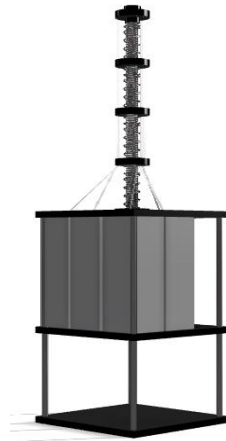


Figura 137 Ubicación de los cables tensores en el prototipo No. 3.

## 3. Caja de actuación.

Para la caja de actuación del prototipo No. 3 no se realizó ningún cambio con respecto a la organización del prototipo anterior, ya que en ambos se controla la estructura móvil del robot por medio de seis actuadores, y en las cuándo se elaboraron las pruebas de funcionamiento no se encontró ningún

inconveniente en cuanto a la distribución asimétrica, dando como resultado el diseño presente en la figura 138.



*Figura 138 Modelo 3D del diseño mecánico del robot en el prototipo No. 3.*

### **Construcción de la Estructura del Robot**

Como se observa en la figura 139, el prototipo está construido por dos mecanismos, fijo (soportes y motores) y móvil, donde el primero al igual que el Prototipo No. 1 y prototipo No. 2, está conformado por 2 placas de soporte cortadas en MDF unidas por tornillos sin fin, los cuales permiten ajustar de manera ideal cada uno de los componentes a su medida, como los motores, pues estos al contar con un cuerpo rígido ayuda a que el mecanismo esté fijo y evite interrupciones a lo largo del funcionamiento por el desplazamiento de alguna placa o de los mismos motores. El segundo mecanismo (móvil), está conformado por un resorte de tensión interno (Columna vertebral) el cual permite que el sistema llegue sin saturar los motores a los puntos deseados, contando con resortes de compresión para cada uno de los módulos, tolerando así curvaturas adecuadas sin que se deforme el mismo antes, durante y después de ejecutar algún tipo de movimiento, estando ligadas a su vez a las arandelas diferenciadoras de segmento y la disposición de cada uno de los resortes externos a lo largo del funcionamiento; en cuanto a los transmisores, cuentan con las propiedades físicas adecuadas para realizar los movimientos sin interrupciones como ocurría en el prototipo No. 2 con las guayas (por ser un material demasiado rígido) y no es tan débil para luxarse en medio de un movimiento. Finalmente, para el acople de la cámara endoscópica, esta no impide los movimientos del efector final. Cabe anotar que el prototipo tiene 38 cm de longitud incluyendo el mecanismo fijo y móvil (18 cm y 20 cm respectivamente), con diámetro externo de 3 cm e interno de 7 mm en el segundo mecanismo mencionado.



*Figura 139 Estructura mecánica del Prototipo No. 3*

Retomando lo anterior, la estructura construida para el prototipo No. 3 dispone de las características deseables cumpliendo con los requerimientos planteados a lo largo del presente proyecto de grado, ya que dicho mecanismo logró cumplir con propiedades mecánicas que se especificaron como los son la maleabilidad, ductilidad, tenacidad, entre otras ; adicional a esto, también presentó gran desempeño en cuanto a la realización de movimientos flexibles y versátiles (Véase en figura 140), que le permiten al robot llegar lo más cercano al punto deseado. Así mismo, al ser capaz de realizar movimientos armoniosos, cumple específicamente con estar basado en un modelo “*Snake Cable Robot*”.



Figura 140 Secuencia de Movimientos que realiza el prototipo laparoscópico basado en el modelo robótico *Snake cable Robot*

## Desarrollo del control del prototipo laparoscópico.

### Simulación en MATLAB del espacio de trabajo del prototipo robótico

A partir de la realización del algoritmo expuesto en la figura 90. que posibilitó simular el espacio de trabajo de un segmento de la estructura móvil del prototipo laparoscópico *Snake cable robot*, se lograron obtener gráficas (véase Figura 141 y figura 142) que permitieron visualizar y conocer en un espacio tridimensional los puntos límites a los que pudo llegar el extremo distal de un segmento.

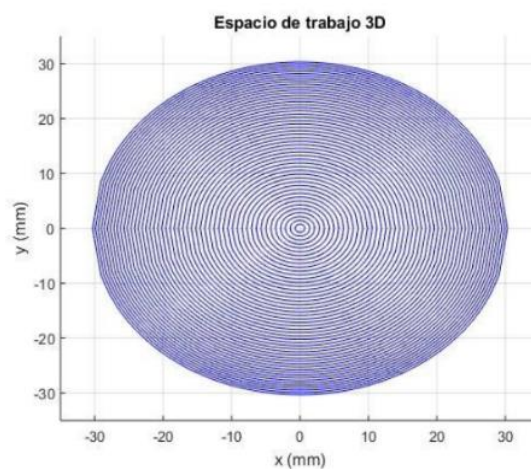


Figura 141 Vista superior del espacio de trabajo simulado de un segmento de la estructura móvil del robot

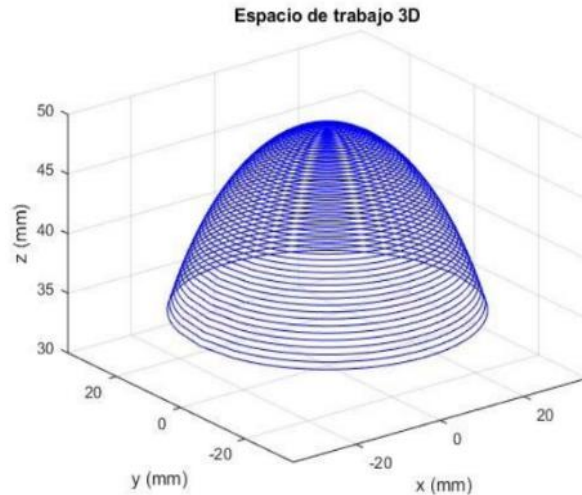


Figura 142 Vista isométrica del espacio de trabajo simulado de un segmento de la estructura móvil del robot

Con la utilización de la cinemática directa, se determinó el espacio de trabajo de un segmento de 5 cm de alto. En la figura 142. se pueden observar los diferentes puntos por los cuales pasaría el efector final en un entorno real al momento de que los actuadores recojan o suelten los cables tensores; allí se indica el punto máximo al que llegaría el segmento, en donde en el plano x,y alcanza puntos de aproximadamente 3cm con respecto a su posición original, y en el plano z consigue llegar a un punto de 5 cm de alto, debido a que esta es la distancia del segmento cuando este se encuentra totalmente recto.

Así mismo, gracias a los resultados obtenidos por medio del algoritmo expuesto en la Figura 91, se obtuvieron las gráficas pertenecientes al espacio de trabajo de la estructura móvil del robot.

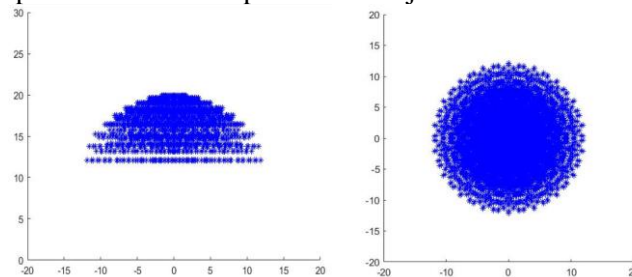


Figura 143 Espacio de trabajo de la estructura móvil del robot.

- a. Vista lateral
- b. Vista superior

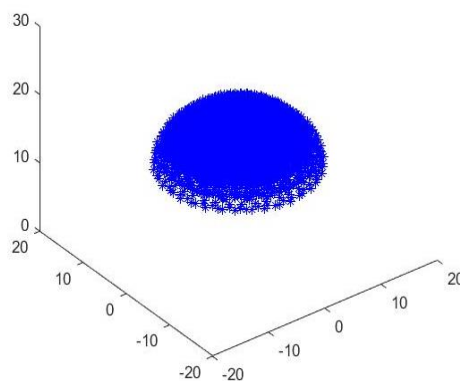
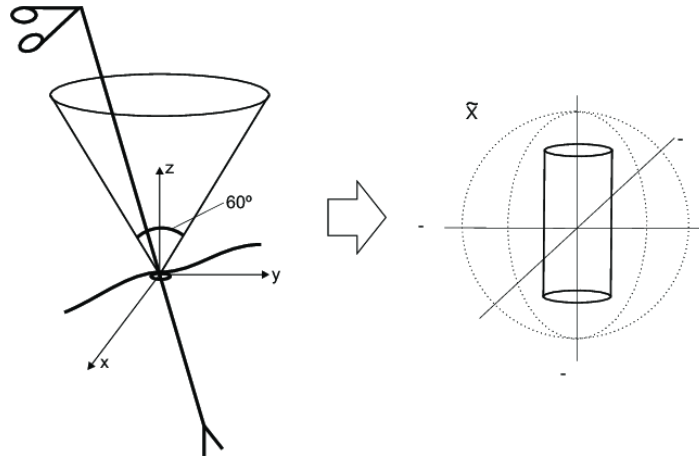


Figura 144 Vista isométrica del espacio de trabajo de la estructura móvil del robot



En las figuras 143 y 144, se puede observar el espacio de trabajo de la estructura móvil del robot. Este espacio permitió que el prototipo pudiera realizar movimientos de 360° a lo largo del plano (x,y), dando como resultado, que se generara una semiesfera o sombrilla, la cual posibilitó que el efector final llegara a los puntos periféricos del mismo.

Gracias a lo obtenido anteriormente, se elaboró una comparación del espacio de trabajo adquirido con respecto al espacio de trabajo que permite un laparoscopia convencional.



*Figura 145. Espacio de Trabajo de un Laparoscopia Convencional (OpenSurg, 2013)*

Como se observa en la figura 145, un laparoscopia convencional genera un espacio de trabajo en forma de cono, en donde desde la punta de este, solamente se permiten movimientos con un ángulo máximo de 60°, pues dicho instrumento al estar conformado por una estructura rígida, no posibilita que se realicen curvaturas que puedan ampliar dicho rango de movimiento, obteniendo así, que el prototipo realizado, presente ventajas en cuanto al espacio de trabajo, pues este además de permitir 300° más de movimiento, también permite que el rango de visualización de la zona a inspeccionar sea mucho mayor.

### **Esquemáticos del control de los actuadores del sistema**

Para los tres prototipos que se realizaron se utilizaron las mismas conexiones presentes en los esquemáticos que se muestran a continuación, igualmente, para los tres se utilizó el mismo sistema de control planteado en la metodología.

La simulación del circuito electrónico que se utilizó para la elaboración del control del prototipo laparoscópico se elaboró por medio del software proteus, en donde en dicha simulación se relacionó el funcionamiento de los motores con respecto a los comandos de control de dirección de movimiento de los mismos, siendo estos los encargados de realizar los cambios de longitud de los cables tensores presentes en la estructura móvil del sistema. Para este caso en específico, se realizó la conexión pertinente de un motor DC a un driver L293D con dos alimentaciones, una que simula el voltaje que proporciona el Arduino (5V) y la otra que simula el voltaje proporciona la fuente de alimentación (12V). Como el software proteus no cuenta con componentes electrónicos como lo son el Arduino y el joystick, estos se reemplazaron por una batería de 5v y switch (PIN 10, PIN 11) respectivamente, que tuvieron como objetivo emular el control de dirección del motor que deseaba el usuario. Cabe aclarar que el esquemático presentado en la siguiente figura 145, sólo presenta las conexiones respectivas para el control de un solo motor.



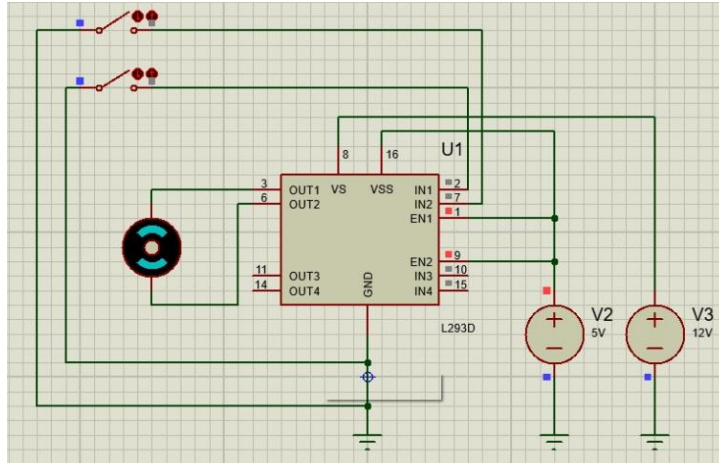


Figura 146 Simulación del circuito de control para un motor (PIN 10 y PIN 11 Desactivados).

*Nota: Para los seis motores se realizó la misma conexión expuesta anteriormente.*

Como se puede observar en la figura 146, al estar el PIN 10 y el PIN 11 desactivados, no pasa voltaje al motor provocando que este se encuentre estático, de modo que al activar el PIN 10, se puede observar en la figura 147. que el voltaje empieza a pasar al motor ocasionado que este empiece girar a la derecha, mientras que como se observa en la figura 148. con el PIN 11 el motor gira hacia la izquierda, es decir el sentido del giro del motor cambia según el movimiento del joystick (switch).

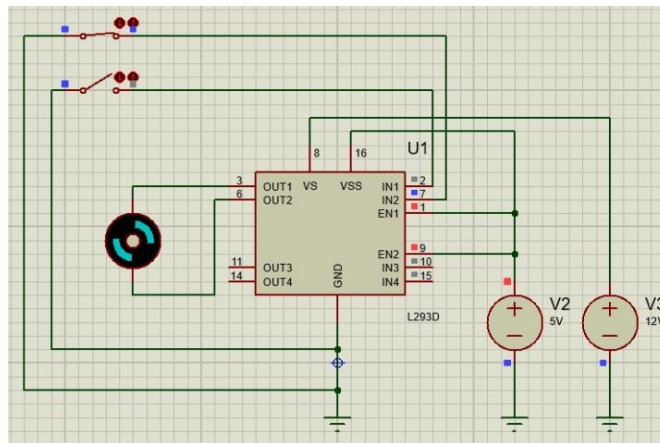


Figura 147 Simulación del circuito de control para un motor con el PIN 10 activado y PIN 11 desactivado.

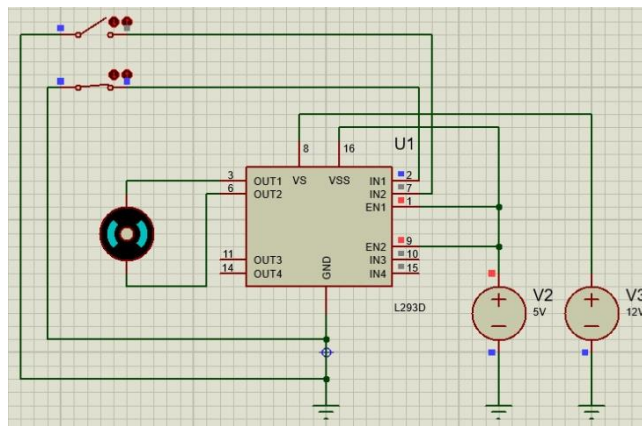


Figura 148 Simulación del circuito de control para un motor con el PIN 10 desactivado y PIN 11 activado.

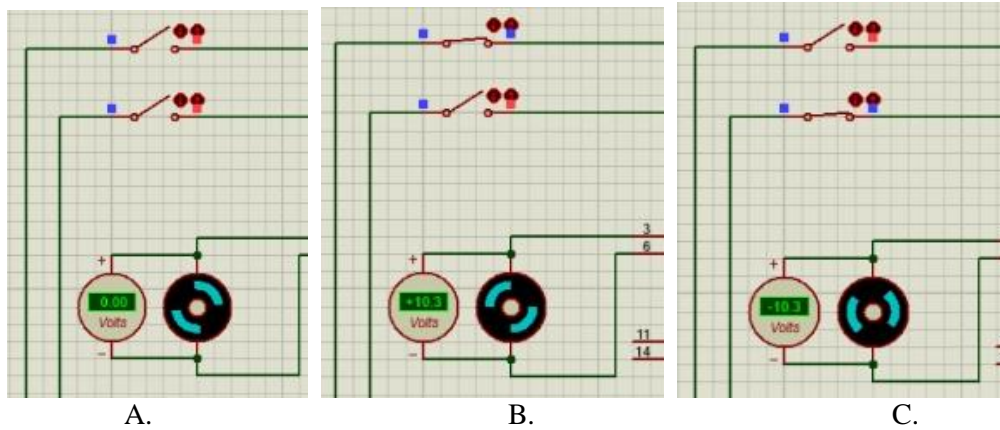


Figura 149 Simulación del circuito de control para un motor para verificar su voltaje.

A. Switch sin ser accionados B. Switch superior activado C. Switch inferior activado.

De acuerdo con lo anterior, se midió el voltaje en cada una de las fases del motor como se muestra en la figura 149, a partir del accionamiento de los switch, evidenciando así que cuando ninguno está activado, el voltaje permanece en cero (Figura 149 A), es decir que el motor no gira para ninguna dirección, mientras que si se conecta el PIN 10 el giro se accionará hacia la derecha produciendo de esta manera un voltaje positivo (Figura 149 B), cosa inversa al PIN 11, pues cuando este se activa, se obtiene un voltaje negativo provocando un giro a la izquierda (Figura 148 C).

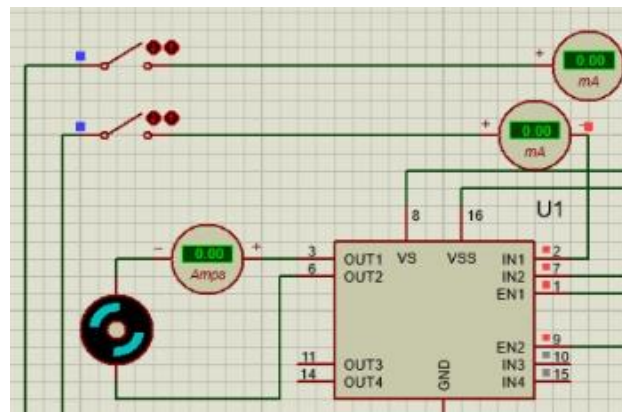


Figura 150 Simulación del circuito de control para un motor para verificar su corriente.

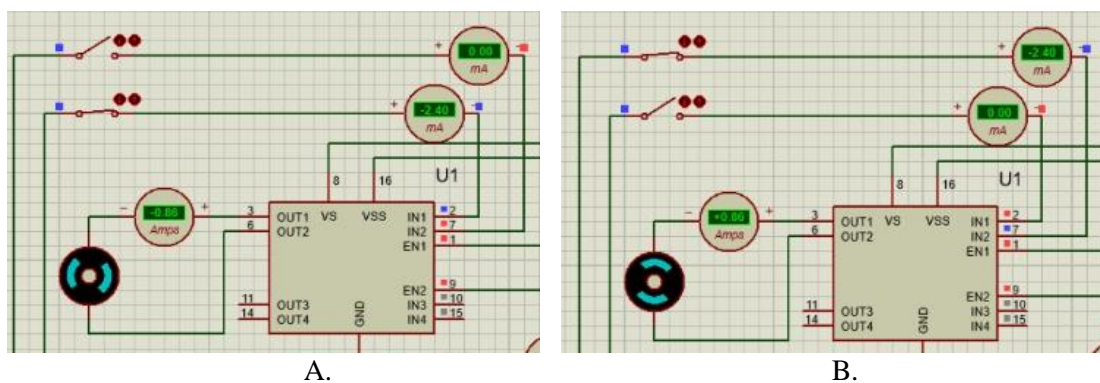


Figura 151 Simulación del circuito de control para un motor para verificar su corriente.

A. Switch superior sin ser accionado  
B. Switch superior presionado

De mismo modo se midió la corriente en cada una de las fases del motor figura 150 a partir de la inactividad de los switch se evidencia que esta permanece en cero (Figura 150), es decir no se mueve, mientras que si se conecta el PIN 10 el giro será hacia la derecha  $+0.86A$  pues le está ingresando al switch  $-2.4mA$  ya que se está produciendo un corriente positiva (Figura 151 A), y el PIN 11, pues se obtiene corriente negativa provocando un giro a la izquierda (Figura 151 B).

### Esquemáticos de la implementación de las IMU en el sistema

En la figura 152. se puede observar una simulación del circuito esquemático de la implementación de los sensores de unidad de medición inercial (IMU). Este se compuso por un Arduino UNO y dos sensores MPU 6050, los cuáles se utilizaron con el fin de obtener la posición del efector final por medio de matrices de transformación y los ángulos arrojados por las mismas. Las dos IMU funcionan a partir de una fuente de alimentación de 5V que es proporcionada por el Arduino, además de contar con la programación adecuada para que estas funcionen correctamente y un condensador que es el que permite estabilizar la señal obtenida por los sensores, en donde estos cuentan con 5 pines, el primero (VCC) va conectado a la fuente de alimentación, el segundo (GND) va a tierra, el tercero (SCL) y el cuarto (SDA) van conectados a dos pines analógicos del Arduino y finalmente el quinto (AD0) va conectado al pin digital del Arduino.

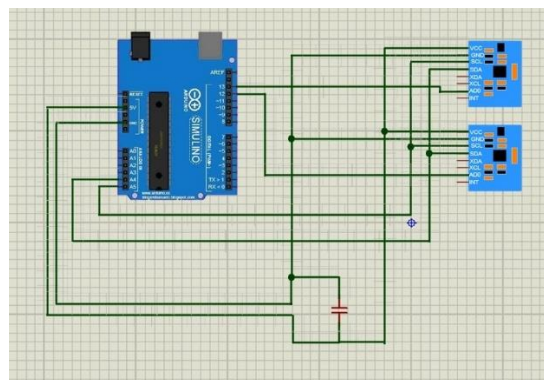


Figura 152 Esquemático de los sensores MPU6050

Una vez establecidas las conexiones respectivas de los sensores MPU6050, se realizó una simulación digital por medio de un software llamado PROCESSING que permitió emular las posiciones y los movimientos de los sensores en un espacio de trabajo 3D el cual se diseñó basado en la estructura mecánica del prototipo laparoscópico snake cable robot. En la figura 153. se muestra dicha simulación en la cual se representaron los módulos del robot y las IMU por medio de cubos y esferas respectivamente.

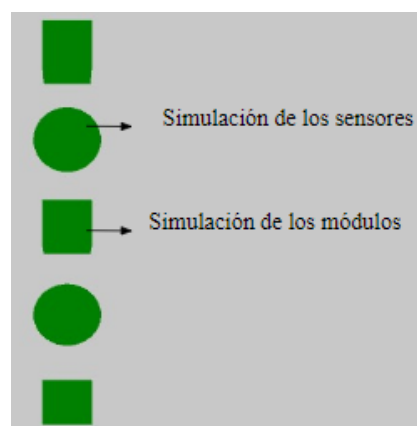
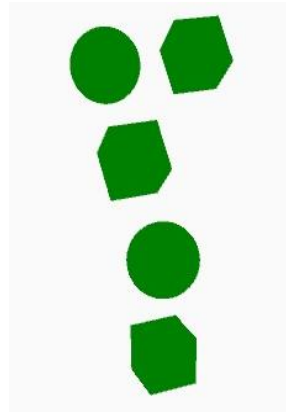


Figura 153 Simulación en PROCESSING de la posición de los sensores en la estructura móvil del robot

Posteriormente se realizó la comunicación Arduino-PROCESSING, con el fin de que en la simulación las esferas tomarán los ángulos dados por las IMU, y se movieran de la misma forma, en la figura 154 se presenta un ejemplo del movimiento de la estructura simulada, adquiriendo los datos por parte de la IMU con el robot en movimiento.



*Figura 154 Simulación en PROCESSING de una posición cualquiera obtenida por las IMU*

Gracias a la simulación presentada anteriormente, se determinó la ubicación de los sensores MPU en la estructura móvil del mecanismo, como lo que se quería era obtener la posición del efector final del robot, la localización de los sensores se hizo sobre las arandelas que establecen el fin de cada uno de los segmentos, es decir que la primera IMU se posicionó en la segunda arandela y la segunda IMU se posicionó en la cuarta arandela (efector final).

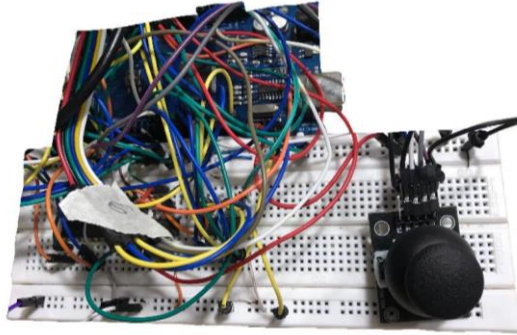


*Figura 155 Localización de los sensores MPU 6050 en la estructura móvil del robot*

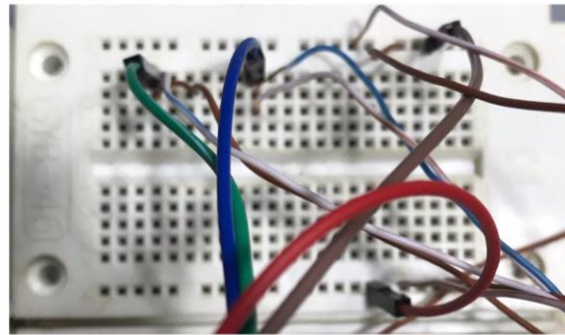
La razón por la cual se decidió por la utilización de dos sensores MPU6050 en el sistema móvil del robot, fue porque al momento de analizar los movimientos del sistema se observó que este presentaba en su estructura dos puntos de giro significativos, los cuales se encontraban localizados en la extremidad distal de cada uno de los segmentos, permitiendo así que las IMU pudieran realizar la detección de los ángulos de los movimientos generados por cada segmento, posibilitando la estimación del punto final del efector.

## Montaje del Circuito en Protoboard

Después de seleccionar y comprar los componentes electrónicos del montaje, se realizó el montaje completo de todo el sistema en protoboards. En la primera Protoboard como se observa en la figura 156 se puede observar el montaje final del circuito de los motores conectados al Arduino MEGA por medio de tres drivers L293D y al joystick que es el que permite el control de la estructura móvil del robot; Mientras que en la Figura 157. se expone el montaje respectivo en Protoboard de las IMU con su respectivo Arduino UNO.



*Figura 156 Montaje en Protoboard del circuito de control de los motores*



*Figura 157 Montaje en Protoboard del circuito perteneciente a los sensores MPU*

Durante la implementación de ambos circuitos se demostró la importancia de realizar correctamente las conexiones de los componentes electrónicos y la selección de una fuente apropiada de alimentación, ya que en caso de no realizar lo dicho anteriormente, los elementos se pueden recalentar causando pérdidas de energía e incluso llegar a dañarse; además, si se utiliza una fuente que no brinde la cantidad de voltaje que se requiere, al conectar el circuito este va a responder como si en el hubiese un corto ocasionado que no funcione.

## Montaje del Circuito en PCB

A partir de las simulaciones y el montaje del circuito en la Protoboard para el control de los motores, se realizó el diseño de la PCB en el software KiCAD, como se muestra a continuación:



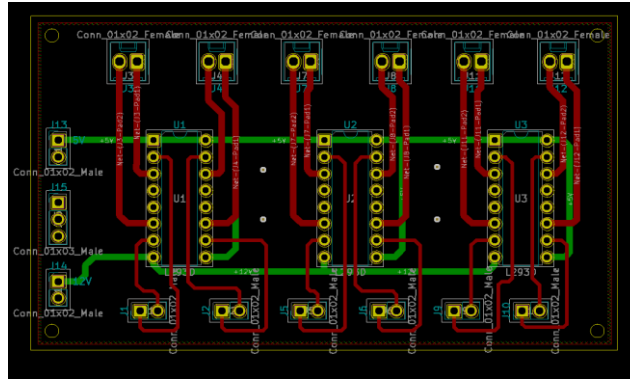


Figura 158 Diseño del circuito de control de los motores en la PCB (Modelo 2D)

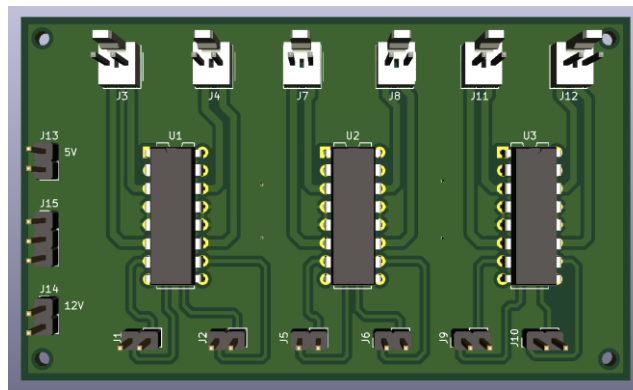


Figura 159 Diseño del circuito de control de los motores en la PCB (Modelo 3D)

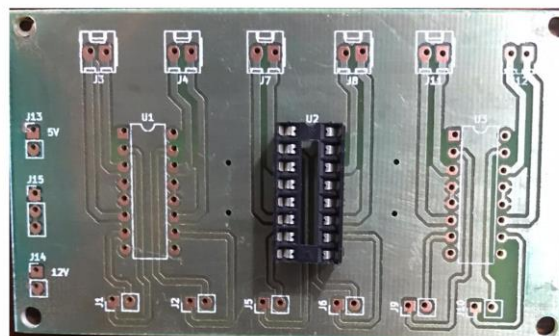


Figura 160 Circuito del control de los Motores en PCB

El hecho de que el circuito del control de los motores se pasará de una Protoboard a una placa PCB fue con el propósito de evitar que se desacomodaron las conexiones realizadas al momento de integrarlo en la estructura final del sistema, debido a que, si una sola conexión no presenta el contacto correcto, el circuito completo presentaría fallos o dejaría de funcionar por completo. Adicionalmente la placa PCB también se implementó por su tamaño compacto y por su inmunidad al movimiento, puesto que como en ella los componentes electrónicos se mantienen fijos al tablero de flujo, esto posibilita que al momento de realizar algún desplazamiento del circuito no se produzcan cortocircuitos o daños en las conexiones.

Cabe aclarar que para el montaje del circuito de las IMU no se les realizó diseño en PCB, ya que este al ser tan simple, la placa quedaría con pocos componentes dentro de la misma, puesto que las

conexiones que presenta van prácticamente directas al Arduino, por esta razón se decidió implementar dicho circuito en una Protoboard al sistema.

### **Montaje final del mecanismo con el sistema de control integrado**

En las figuras 161 y 162 expuestas a continuación se puede observar el mecanismo total del prototipo laparoscópico *Snake cable robot*, con sus respectivos componentes electrónicos integrados.



*Figura 161 Vista isométrica de la estructura final de prototipo laparoscópico Snake cable robot*



*Figura 162 Vista frontal de la estructura final de prototipo laparoscópico Snake cable robot*

De acuerdo con los resultados obtenidos de cada una de las estructuras realizadas para los prototipos presentados en el presente trabajo de grado, se encontraron ciertas limitaciones que se fueron ajustando a lo largo de la construcción del robot con el fin de conseguir el mecanismo que más se adaptara con el

cumplimiento del objetivo general, en donde el prototipo No. 3 fue el que presentó mayores ventajas en cuanto a los movimientos que realizaba. Considerando que este prototipo fue más apropiado en cuanto a los movimientos que realizaba y por ende fue el que se utilizó para el montaje final del robot, se halló que a pesar de que se construyeron dos segmentos, estos son dependientes entre ellos debido a que comparten tres cables tensores entre sí, sin embargo, los dos pueden realizar curvaturas diferentes al momento de hacerlos llegar a una posición determinada.

Para determinar los ángulos de curvatura a los que podían llegar cada uno de los segmentos que integran la estructura móvil del robot, se realizaron varias pruebas de campo por medio de la utilización de las ecuaciones de planteamiento geométrico (Ecuaciones 34 y 35) implementadas en la metodología de control, gracias a estas, se determinó que el ángulo máximo al que podía llegar el segmento uno serían  $45^\circ$  y el ángulo máximo al que llegaría el segmento 2 serían  $90^\circ$ . Cabe mencionar que estas pruebas se realizaron variando los valores de theta y gamma presentes en las ecuaciones mencionadas anteriormente. Por otro lado, para el cálculo del eje z, este se realizó dependiendo de los puntos que se obtenían en los ejes x & y que tomaba el joystick con el fin de que se hiciera un manejo más intuitivo.

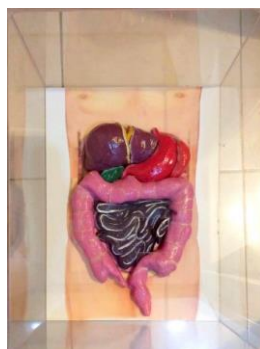
En cuanto a los actuadores utilizados para el control de posición de la estructura móvil del robot, se detectó que estos presentaban problemas de backlash, lo que quiere decir que cuando el mecanismo se le solicitaba que realizara movimientos cortos este no los hacía debido a que el motor no puede realizar giros tan pequeños.

## **Desarrollo del simulador de la cavidad pélvica abdominal.**

Seguidamente se exhibirá en las figuras 163, 164 y 165 el resultado final del entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal con cada uno de los órganos implicados en la apendicetomía laparoscópica, en dichas figuras se puede observar que gracias al uso de aceites y pigmentos (pinturas acrílicas) se logró obtener de la mejor manera posible la imitación en cuanto a textura y apariencia de los tejidos biológicos presentes allí por medio de cálculos que relacionan la cantidad adecuada de cada material.



*Figura 163 Órganos de la cavidad pélvica abdominal simulados en silicona de caucho*



*Figura 164 Vista superior del entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal*





Figura 165 Vista isométrica del entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal.

Al momento en que se realizaron las pruebas del funcionamiento del prototipo laparoscópico basado en el modelo robótico dentro del entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal, se determinó que todos los materiales que se usaron para la realización del mismo lograron el objetivo de parecerse a los órganos que estaban representado, debido a que cuando se introducía el sistema y se empezaban a obtener las imágenes por medio de la cámara, se lograba visualizar la textura con la que se realizaron los componentes del simulador y se notó que está se asemejaba estéticamente a los órganos reales.

## Pruebas del sistema

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos por medio de las pruebas que se le realizaron al prototipo de laparoscopio basado en el modelo continuo redundante *snake cable robot*. A continuación, se exponen cada una de las fases evaluadas con su respectivo análisis.

### 1. Plan de prueba de los subsistemas

#### a. *Sensores: Control de Posición por medio del joystick*

Prueba	Posición Joystick (cm)			Posición IMU (cm)			Posición Real (cm)		
1	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	4.2	0.02	14.19	7.02	2.08	12.08	9.5	3.5	13
2	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	0.42	4.0	13.62	4.01	3.3	14.50	5.25	4.7	15.04
3	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	4.03	2.04	13.60	3.83	0.30	14.04	6.5	4	14.8
4	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	4.09	4.03	11.62	4.94	3.28	12.40	6.3	5.2	13.6

Tabla 43 Resultados de la prueba de posición

En la tabla 43. se evidencian los resultados de la posición tomada por tres métodos diferentes: Joystick, IMU y posición real, donde esta última hace referencia a pruebas manuales.

A partir de lo anterior, se observa la divergencia entre los valores obtenidos principalmente en datos tomados por medio del joystick y los datos generales del eje y, en donde se evidencia un desfase entre las posiciones adquiridas, ya que estas al ser tomadas no cuentan con un punto o un valor de referencia.

Además de esto, se presentan fallas al momento de realizar la toma de datos por medio de la IMU, debido a que el prototipo es considerado como un robot de dos puntos de giro con el fin de simplificarlo (menos puntos de toma de datos de posición con las IMU, puesto que solo se hace uso de dos, en el medio y en efector final del prototipo) de modo que se presentan ciertas inclinaciones que no son tomadas en cuenta cuando se reciben los datos, afectando así directamente los resultados de la prueba de medición en los tres ejes (x,y,z), adicionalmente, esto también se puede explicar ya que la cinemática del sistema está pensada únicamente para un segmento, y debido a que el prototipo realizado tiene dos se genera más error.

Por otro lado, las pruebas reales al ser medidas manualmente por medio de una regla puede que no sean del todo exactas, lo que lo convierte a estas posiciones en valores aproximados.

#### ***b. Controlador: Porcentaje de error del control de las posiciones del robot***

Para determinar el porcentaje de error que presentaba el control de posición del robot, se estableció una posición final de referencia en los ejes (x,y,z) la cual fue: (6.5 , 2, 16). Esta posición fue utilizada para ser tomada como el valor real y de este modo calcular la diferencia con respecto a los valores estimados que se obtuvieron en las pruebas realizadas en la tabla 44.

El porcentaje de error se calculó de la siguiente manera:

$$\%Error = \frac{Valor\ verdadero - valor\ aproximado}{Valor\ verdadero} \times 100$$

*Ecuación 43 Cálculo del porcentaje de error*

Prueba	Posición Inicial (cm)			Posición Final (cm)			Porcentaje de error (%)		
1	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	8.8	11.1	7.8	5.5	2.6	14.25	15.38	30	10.93
2	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	5.1	2.5	17.3	6.3	2.4	15.6	3.08	20	2.50
3	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	3.5	6.3	14.5	7.1	1.4	15.8	9,23	30	1.25

4									
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
	5.6	6.7	14.2	4.7	3.2	16.2	27,69	60	1.25

Tabla 44 Resultados prueba para el controlador

En la tabla 44 se observan los porcentajes de error que se generan en el control de posición del robot, allí se puede visualizar que en el eje z es en donde menor rango de error se tiene, debido a que este que cuenta con menos puntos de desplazamiento. Mientras que por otro lado, eje y es el que cuenta con un mayor desplazamiento y por ende va acumulado en las posiciones tomadas mayor error.

Por ejemplo, analizando la prueba 1 se obtiene que:

Posición inicial		
x = 8.8 cm	y = 11.1 cm	z= 7.8 cm
Posición final		
x = 5.5 cm	y = 2.6 cm	z= 14.2 cm
Diferencia de distancia		
x = 2.3 cm	y = 8.5 cm	z = 6.4

Tabla 45 Distancia de la prueba uno a partir de la posición inicial y final

Siguiendo la anterior tabla, se evidencia que entre mayor es el desplazamiento en el espacio de trabajo, mayor será el porcentaje de error. En este caso en particular, el eje y cuenta con el error más alto.

## 2. Plan de pruebas del campo de visualización que permite el dispositivo

Para la elaboración de la prueba de comparación de visualización entre los dos laparoscopios, lo que se realizó fue colocar seis marcadores en diferentes zonas del simulador de entorno físico de la anatomía presente en la cavidad abdominal (Véase Figura 166) y se tomaron fotografías de la posición en la que se encontraba cada laparoscopio y la imagen que se obtenía con cada uno de ellos.

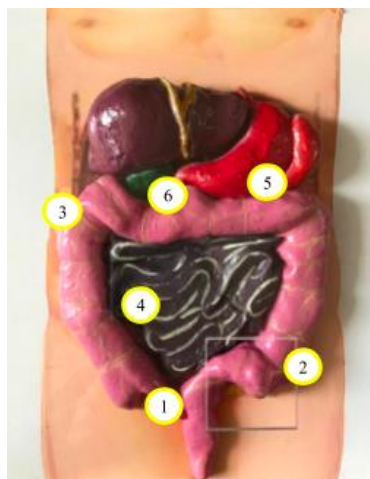
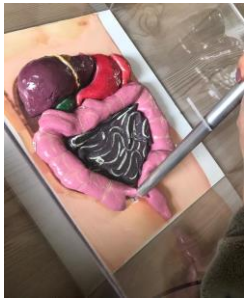













Figura 166 Ubicación de los marcadores en el entorno físico simulado

Nombre de la Prueba	Comparación del campo de visualización entre un laparoscopio convencional y el laparoscopio basado en el modelo robótico <i>snake cable robot</i>			
Laparoscopio	Convencional		<i>Snake Cable Robot</i>	
<b>Marcador 1</b> Ubicación: Apéndice	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>
				
<b>Marcador 2</b> Ubicación: Colon Sigmoide	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>
				
<b>Marcador 3</b> Ubicación: Colon Ascendente	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>
				

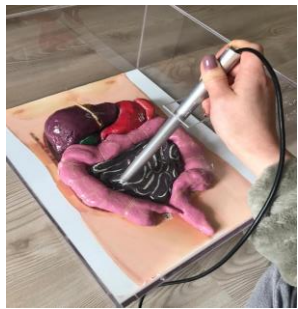











<b>Marcador 4</b> Ubicación: Yeyuno	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>
				
<b>Marcador 5</b> Ubicación: Estómago	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>
				
<b>Marcador 6</b> Ubicación: Colon transverso	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>	<b>Imagen de la posición del laparoscopio</b>	<b>Imagen obtenida por la cámara</b>
				

Tabla 46 Plan de prueba de visualización del Prototipo.

Como se puede observar en la tabla 46. de acuerdo con las fotografías obtenidas por medio de la cámara endoscópica en las diferentes pruebas de visualización que permitieron realizar la comparación entre un laparoscopio convencional y el mecanismo desarrollado en el presente trabajo de grado, se determinó que el prototipo robótico basado en el modelo *snake cable robot* permitió un mayor rango de visualización en cuanto a la inspección del entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal, puesto que de los seis marcadores que se colocaron en este, en cinco de ellos se lograron obtener mejores imágenes de las zonas registradas.

Para el caso del marcador No. 4 ubicado en el yeyuno del simulador, con ambos laparoscopios se obtuvieron fotografías muy similares, debido a que el laparoscopio convencional está diseñado para

obtener imágenes en un plano bidimensional, mientras que, con las otras pruebas también realizadas con el laparoscopia convencional, se dificultó mucho más observar los marcadores que se encontraban localizados en zonas más remotas del simulador. Por otro lado, con el prototipo robótico del laparoscopia si se obtuvieron imágenes con mayor calidad de los marcadores, ya que esto posibilita que el dispositivo visualice profundidad, es decir que permite una vista tridimensional.

### 3. Plan de pruebas del campo de visualización que permite el dispositivo

Marcador en la cavidad pélvica abdominal simulada	Velocidades de laparoscopios - Segundos (s)					
	Convencional (Actual)			Prototipo desarrollado		
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
1	0.48	0.45	0.49	1.50	0.98	1.05
2	0.26	0.36	0.34	1.94	1.56	1.45
3	0.72	1.10	0.93	2.06	2.90	2.34
4	0.43	0.38	0.41	0.48	0.35	0.29
5	0.71	1.03	0.88	3.78	4.44	4.98
6	0.69	0.63	0.58	3.59	3.90	4.05

*Tabla 47 Resultados de la comparación de velocidad entre un laparoscopia convencional y el desarrollo del prototipo laparoscópico con 3 pruebas.*

Marcador en la cavidad pélvica abdominal simulada	Velocidades de laparoscopios - Milisegundos (ms)	
	Convencional (Actual)	Prototipo desarrollado
1	0.47	1.17
2	0.32	1.65
3	0.91	2.43
4	0.40	0.37
5	0.87	4.4
6	0.63	3.84

*Tabla 48 Resultados de la comparación de la velocidad promedio entre un laparoscopia convencional y el desarrollo del prototipo laparoscópico*

Como se puede observar en la tabla 47, el laparoscopia convencional llegó en menor tiempo a una posición deseada, sin embargo, no se garantiza que este sea capaz de visualizar de manera clara el marcador como se puede observar en la tabla 46.



Por otro lado, cabe resaltar que el prototipo laparoscópico desarrollado si se más en llegar, pero esto depende directamente del marcador que se quiera observar, ya que el tiempo de llegada es de aproximadamente 1-2 segundos más que el laparoscopio convencional, puesto que se debe mover el joystick de manera puntual para que se consiga un buen resultado en la visualización del marcador, teniendo en cuenta que la imagen obtenida por la cámara es en tiempo real, es decir, de manera simultánea que se mueve el joystick; a diferencia de los laparoscopios utilizados comúnmente, pues estos además de que el usuario son los encargados de moverlos a su conveniencia, presentan cierto desfase en cuanto a la obtención de la imagen entre el instrumento quirúrgico y el monitor (Información obtenido por Egresado Profesional de la Universidad El Bosque como Médico Cirujano, con experiencia en prácticas laparoscópicas). De modo que, así esté tarde más tiempo en llegar a determinado punto, va ser más eficiente, ya que el usuario podrá llegar a puntos de difícil acceso en el paciente a lo largo de la intervención quirúrgica, teniendo presente la anatomía y estado de salud del mismo pueden ser procedimientos más rigurosos.

## Gastos totales del proyecto

Prototipo de laparoscopio basado en el modelo robótico <i>snake cable robot</i>		
<i>Componentes electrónicos</i>		
Componente	Referencia	Características
Motorreductor con Encoder	Actuador Lineal 12V Motor Eléctrico 500 ~ 1500N 50 ~ 300mm solar tracker puerta abierta  1/764	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Voltaje de operación: 12V</li> <li>● Velocidad: 72 RPM</li> <li>● Corriente de operación: 100 mA</li> <li>● Torque: 30 kg.cm</li> <li>● Potencia: 2.6 Watts</li> <li>● Dimensiones: 37D x 57L mm</li> <li>● Costo: \$52.605 COP Unidad = 526.050 COP</li> </ul>
Arduino	MEGA	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Voltaje de operación: 5V</li> <li>● Pines digitales de Entrada/Salida: 54 (15 proveen salida PWM)</li> <li>● Pines análogos de entrada: 16</li> <li>● Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida: 40 mA</li> <li>● Corriente DC entregada en el Pin 3.3V: 50 mA</li> <li>● Memoria Flash: 256 KB (8KB usados por el bootloader)</li> <li>● SRAM: 8KB</li> <li>● EEPROM: 4KB</li> <li>● Clock Speed: 16 MHz</li> <li>● Costo: \$45.000 COP</li> </ul>
Arduino	UNO	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Microcontrolador: ATmega328</li> <li>● Voltaje Operativo: 5v.</li> <li>● Voltaje de Entrada (Recomendado): 7 – 12 v.</li> <li>● Pines de Entradas/Salidas Digital: 14 (De las cuales 6 son salidas PWM)</li> <li>● Pines de Entradas Análogas: 6.</li> <li>● Memoria Flash: 32 KB (ATmega328) de los cuales 0,5 KB es usado por Bootloader.</li> <li>● Costo: \$27.900</li> </ul>

Puente H	L293D	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Alimentación: 45 a 36 VDC.</li> <li>● Corriente de salida: 600mA.</li> <li>● Corriente pico de salida: 1 A por canal (no repetitiva).</li> <li>● Encapsulado: DIP de 16 pines.</li> <li>● Alta inmunidad al ruido eléctrico.</li> <li>● Protección contra exceso de temperatura.</li> <li>● Costo: \$10.710 COP Unidad =100.000 COP</li> </ul>
Joystick	Módulo Joystick Palanca de Mando PS2	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Interfaz:Análogica</li> <li>● Voltaje: 5V</li> <li>● Tres ejes: (X, Y, Z (botón))</li> <li>● Tamaño: 3.7cm x 2.5cm x 3.2cm</li> <li>● Peso: 15 gramos</li> <li>● Función de posicionamiento o movimiento</li> <li>● Costo: \$5.000-8.000 COP Unidad</li> </ul>
MPU 6050	Módulo MPU6050 sensor giroscópico, acelerómetro para arduino	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Voltaje: 3V/ 3.3V~5V</li> <li>● Rango acelerómetro: 2g /4g/8g/16g</li> <li>● Rango del giroscopio 250 Grad/ seg // 500 Grad/seg</li> <li>● Sensibilidad del giroscopio 131 LSBs/dps</li> <li>● Grados de libertad: 6</li> <li>● Regulador: Integrado</li> <li>● Tamaño: 2.0 cm x 1.6 cm x0.3 cm</li> <li>● Costo: \$40.000 COP</li> </ul>
Jumpers	Macho - Macho / Macho - Hembra / Hembra- Hembra	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Longitud</li> <li>● Precisión</li> <li>● Conectividad</li> <li>● Costo: \$ 30.000 COP</li> </ul>
PCB	NA	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pistas en cobre</li> <li>● Resina en fibra de vidrio</li> <li>● Costo: \$35.000 COP</li> </ul>
<b>Componentes mecánicos</b>		
Componente	Referencia	Características
Nylon	12 Libras	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Presenta resistencia mecánica como lo son la dureza, rigidez, además presenta buena tenacidad.</li> <li>● Tiene una fuerte capacidad de amortiguación mecánica.</li> <li>● Resistente a la fatiga.</li> <li>● Altas propiedades de deslizamiento.</li> <li>● Tiene una elevada absorción de humedad.</li> <li>● Ventajas en su estabilidad dimensional reducida</li> <li>● Costo: \$15.750 COP</li> </ul>
MDF	3 mm de grosor	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Fibras de madera y resinas sintéticas.</li> <li>● Soporte.</li> <li>● Corte láser.</li> <li>● Costo: \$ 5.000 COP</li> </ul>



PLA (Ácido Poliláctico)	NA	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Material adaptable.</li> <li>● Material accesible.</li> <li>● Material de fácil uso.</li> <li>● Costo: \$500 COP x gramo = 25.000</li> </ul>
ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)	NA	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Resistente al impacto</li> <li>● Termoplástico Amorfo</li> <li>● Material accesible</li> <li>● Costo: \$500 COP x gramo = 150.000</li> </ul>
Barra de Aluminio	NA	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Material ligero, permite reducir el peso en el mecanismo de control.</li> <li>● Presenta alta resistencia a la corrosión</li> <li>● Costo: \$47.00 COP.</li> </ul>
Resorte de compresión	Tecniresortes	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Resistentes a compresiones aplicadas por la energía del movimiento.</li> <li>● Alambre redondo</li> <li>● Características de deflexión de cargas no lineales</li> <li>● Costo: \$12.000</li> </ul>
Resorte de tensión	Tecniresortes	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Espirales juntos</li> <li>● Proporcionar fuerza prolongada cuando el resorte es separado de su longitud original.</li> <li>● Costo \$35.000</li> </ul>
Guaya 1/8	NA	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 1/8</li> <li>● Firmeza</li> <li>● Costo \$5.000</li> </ul>
Tornillos sin fin	NA	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Firmeza</li> <li>● Longitud</li> <li>● Costo: 10.000 COP</li> </ul>

***Entorno físico simulado de la cavidad pélvica abdominal***

Componente	Referencia	Características
Caucho Silicona	Químicos Bernul	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Presenta múltiples tipos de texturas debido a que estas dependen de la cantidad de aceite y catalizador que se le agregue, por lo tanto permite que el mismo material se pueda usar para varios propósitos.</li> <li>● De fácil preparación.</li> <li>● Secado rápido.</li> <li>● Adaptabilidad a cualquier tipo de molde</li> <li>● Costo: \$67.500 COP 1 kg</li> </ul>
Plastilina	NA	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Gracias a sus características mecánicas, este material es fácil moldeamiento lo que permite que se puedan realizar diferentes figuras con él para así realizar los moldes requeridos para el simulador.</li> <li>● Costo: \$5.000 COP Unidad</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Secado rápido.</li> </ul>

Alginato	Dental para Moldes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su textura no porosa permite que los detalles del molde sean más precisos.</li> <li>• Fácil de usar y de desmoldar.</li> <li>• Los moldes son reutilizables si se requiere.</li> <li>• Compatible con la mayor parte de materiales positivos</li> <li>• Costo: \$25.000 COP 450 g</li> </ul>
Caja en acrílico	3 mm de grosor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Traslúcida</li> <li>• Resistencia</li> <li>• Dimensiones</li> <li>• Costos: \$ 90.000</li> </ul>
Taba MDF	5 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dureza</li> <li>• Firmeza</li> <li>• Estético</li> <li>• Costos: \$ 5.000</li> </ul>
Yeso	Tipo III	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secado rápido.</li> <li>• Su alto rendimiento permite que se puedan elaborar múltiples modos con el si que se gaste demasiado material.</li> <li>• Preparación sencilla</li> <li>• Costo: \$20.00 COP 1 kg</li> </ul>
<b><i>Presupuesto final</i></b>		<b>\$1'337.200</b>

*Tabla 49 Componentes seleccionados para la implementación y evaluación del prototipo robótico*

## 7. CONCLUSIONES

A partir de las pruebas realizadas con cada uno de los prototipos elaborados a lo largo del proyecto de grado titulado “Desarrollo de un Prototipo de Laparoscopio Basado en el Modelo Continuo Redundante *Snake Cable Robot* Para Ser Usado en un Entorno Físico Simulado.”, se logró identificar que para que se ejecutarán los movimientos de la manera más apta conforme a los requerimientos que se establecieron en el mecanismo móvil, era necesario utilizar un soporte en la cavidad interna del mismo (Columna vertebral), debido a que este le permite generar soporte al sistema y a su vez que este tuviese la suficiente ergonomía para ejecutar los movimientos deseados por el usuario, de modo que el prototipo No. 3 fue el único que cumplió con la posibilidad de regresar a su posición inicial (Home) y a los puntos establecidos por el usuario sin ningún tipo de interrupciones.

Por otro lado, en cuanto a los transmisores, estos más allá de cumplir con una calificación alta en cuanto a resistencia, también se determinó que estos deben contar con la posibilidad de adaptarse a espacios reducidos y con un rango de flexibilidad, ya que si no permiten la flexibilidad, impedirían que la estructura móvil del robot realice las curvaturas que puede llegar a realizar al momento de alcanzar una posición cualquiera, así mismo, también es importante que los cables tensores sean estructuras que no tiendan a enredarse, ya que de no ser así pueden ocasionar daños graves al sistema afectando totalmente su funcionamiento.

Al ser el prototipo de un robot asistido, posibilita que el usuario no se encuentre erguido sobre la cavidad abdominal al momento de su inspección, ya que como se controla de manera remota permite que el usuario se encuentre localizado en un lugar de trabajo que le ayude a mejorar su ergonomía y así no sufrir lesiones o daños en las extremidades por mantener una misma posición por largas horas, adicionalmente, gracias a las pruebas de visualización realizadas, se comprobó que por medio del prototipo laparoscópico se obtienen imágenes más claras y con mejor calidad de la cavidad pélvica abdominal, dando a entender, que al momento de realizar un examen real, no tome tanto tiempo, ya que la zona a inspeccionar se puede ver con mayor claridad.

Adicionalmente, también se encontró que la respuesta de las IMU en tiempo real varía dependiendo de la conexión del programa con el puerto serial, debido a que en ocasiones este se satura y ocasionado que la simulación en PROCESSING de la posición de los dos segmentos del robot se congele, causando que se el sistema se tenga que reiniciar. Por otra parte, se decidió usar un solo joystick para controlar los dos segmentos de la estructura móvil del robot, ya a que si se utilizaban dos (uno para cada segmento) se ocasionaría que el manejo del mismo por parte del usuario se hiciera más complejo.

## 8. RECOMENDACIONES

El proyecto “Desarrollo de un prototipo laparoscópico basado en el modelo continuo redundante *Snake Cable Robot* para ser usado en un entorno simulado”, cuenta con la posibilidad de ser retomado evidenciando la metodología y las pruebas ejecutadas a lo largo de este trabajo, con el fin de poder hacer uso de este prototipo en medio de un entorno real, sin embargo, previo a esto, se recomienda:

- Como se observó, tanto el prototipo No 1 como el No 2, estos presentan fallas principalmente en su estructura mecánica, ya que los segmentos realizaban fricción entre las articulaciones de los mismos, sin embargo, no se descarta que con un diseño proporcional entre segmento y segmento se disminuyan dichas fricciones, que sean físicamente en materiales torneados de modo que se disminuyan las imperfecciones (vetas) en las impresiones.
- Se recomienda hacer uso de una cámara que no exceda los 5 mm de diámetro o que sea una cámara inalámbrica, puesto que facilita las dimensiones del prototipo y el acceso a la cavidad pélvica abdominal.
- Con el fin de que el sistema sea más preciso, se recomienda hacer uso de servomotores, los cuales al contar con un potenciómetro interno aseguran que se determine la posición de manera angular permitiendo mayor exactitud en la medida. Además, proporcionaría el punto inicial del sistema de manera intrínseca.
- Se sugiere hacer uso de un joystick logitech Extreme, ya que por sus características físicas le facilitan al usuario su manipulación y a su vez el control del prototipo robótico.
- Se sugiere que los cables sensores queden en serie a la base de los segmentos.
- Se recomienda hacer uso de librerías libres para personas que quieran aportar y seguir con el proyecto de investigación.
- Se sugiere implementar un control de movimientos para la cámara interna del prototipo robótico, con la finalidad de obtener una mejor visualización de la zona a inspeccionar.
- Se recomienda a futuro tener en cuenta las dimensiones electrónicas en cuanto a conexiones de poder para comodidad anatómica del médico cirujano.

## BIBLIOGRAFÍA

- A000067 - Sigma Electrónica. (2020). Retrieved 27 April 2020, from <https://www.sigmaelectronica.net/producto/a000067/>
- A000073 - Sigma Electrónica. (2020). Retrieved 27 April 2020, from <https://www.sigmaelectronica.net/producto/a000067/>
- A000005 - Sigma Electrónica. (2020). Retrieved 27 April 2020, from <https://www.sigmaelectronica.net/producto/a000067/>
- Abdomen. (2020). Retrieved 1 March 2020, from <https://es.wikipedia.org/wiki/Abdomen>
- Abreu, R. (2005). Fuentes de alimentación conmutadas. El1313-Electrónica III 2005, 4,5. <http://www.el.bqto.unexpo.edu.ve/rabreu/Electronica3/Clase9.pdf>
- Adolfo Parra, D. Enfermedad diverticular del colon [Ebook] (pp. 581-590). Retrieved from [https://www.aegastro.es/sites/default/files/archivos/ayudas-practicas/38\\_Enfermedad\\_diverticular.pdf](https://www.aegastro.es/sites/default/files/archivos/ayudas-practicas/38_Enfermedad_diverticular.pdf)
- Aguirre,Elizabeth. Cabanillas, Cecilia. Vergara, Esteban. (2016) Prevalencia y evolución de la apendicitis aguda en pacientes del Hospital Belén de Trujillo Retrieved from Revista ECIPeru Volumen 13, número 1
- Al, L. J. (2002). El significado geométrico de la curvatura : superficies de curvatura media constante.
- Alcedo, J., & Mearin, F. La enfermedad por reflujo gastroesofágico y sus complicaciones [Ebook] (pp. 197-210). Barcelona. Retrieved from [https://www.aegastro.es/sites/default/files/archivos/ayudas-practicas/11\\_La\\_enfermedad\\_por\\_reflujo\\_gastroesofagico\\_y\\_sus\\_complicaciones.pdf](https://www.aegastro.es/sites/default/files/archivos/ayudas-practicas/11_La_enfermedad_por_reflujo_gastroesofagico_y_sus_complicaciones.pdf)
- Alginatos Dentales | Distribuidor - DentalCost. (2020). Retrieved 20 April 2020, from <https://www.dentalcost.es/112-alginatos>
- Alsina, C. (n.d.). Coordenadas cartesianas o cómo determinar la posición de un punto en el espacio. 5–10.
- American Cancer Society. (2019). Técnicas quirúrgicas especiales. Retrieved from <https://www.cancer.org/es/tratamiento/tratamientos-y-efectos-secundarios/tipos-de-tratamiento/cirugia/tecnicas-quirurgicas-especiales.html>
- American Society of Colon and Rectal Surgeons. (s.f.). Retrieved from <https://www.fascrs.org/cirugia-laparoscopica>
- Antonio Montero, J. (2011). La Anatomía Como Ciencia. <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1338/course/section/1649/Introduccion%2520a%2520la%2520Anatomia%25201.pdf>
- Arévalo Rodríguez, I., & Roqué Figuls, M. (2017). Eficacia de la cirugía ginecológica robótica comparada con cirugía laparoscópica [Ebook] (pp. 27-45). Catalunya.: Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad Agència de Qualitat i Avaluació Sanitàries de Catalunya. Departament de Salut. Generalitat de Catalunya. Retrieved from

[http://aquas.gencat.cat/web/.content/minisite/aquas/publicacions/2017/eficacia\\_cirugia\\_ginecologica\\_robotica\\_red\\_aquas2017.pdf](http://aquas.gencat.cat/web/.content/minisite/aquas/publicacions/2017/eficacia_cirugia_ginecologica_robotica_red_aquas2017.pdf)

Armas Ramos, H., & Ferrer González, J. Reflujo gastroesofágico. In Reflujo gastroesofágico (pp. 175-185).

Arosemena, A. (n.d.). III . Análisis de posición y desplazamiento III . Análisis de posición y desplazamiento.

Atenodoro R. Ruiz, Jr. (2017). Intestino delgado - Trastornos gastrointestinales - Manual MSD versión para público general. Retrieved 1 March 2020, from <https://www.msdmanuals.com/es-co/hogar/trastornos-gastrointestinales/biolog%C3%ADa-del-aparato-digestivo/intestino-delgado>

Autodesk. (2020). ¿Qué es la impresión 3D? | Tecnología de impresión 3D | Autodesk. Retrieved 20 April 2020, from <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>

Automantenimiento.net. (n.d.). ¿Cómo funciona un Reductor o Motorreductor ? Concepto de relación de reducción en un Motorreductor Concepto de par o torque en un Motorreductor. 1. <http://automantenimiento.net/mecanica/tipos-de-reductores-de-velocidad/>

Automatización, I. (2017). Dinámica de Robots. Parte II, 1–29.

Avidepo (2017). Colitis Ulcerosa y Enfermedad de Crohn. Retrieved from <http://www.avidepo.com/colitis-ulcerosa-y-enfermedad-de-crohn/> Balboa Rodríguez, A., Carrillo Muñoz, R., Mínguez Pérez, M., Valdepérez Torrubia, J., Tort Donada, S., Mearin Manrique, F., & Alonso-Coello, P. Asociación Española de Gastroenterología, Sociedad Española de Medicina de Familia y Comunitaria, & Centro Cochrane Iberoamericano (2005). SÍNDROME DEL INTESTINO IRRITABLE. [Ebook] Retrieved from <https://es.cochrane.org/sites/es.cochrane.org/files/public/uploads/sii.pdf>

Beltrán Pérez, I., Álvarez Lambert, K., Bandera Ramírez, M., Beltrán Hernández., H., Castañeda Fernández., B., & Chaviano Damers, M. et al. (2011). Consenso de Hemorroides Agudas. [Ebook]. Retrieved from <http://files.sld.cu/coloproctologia/files/2011/05/consenso-nacional-de-hemorroides-agudas-2011.pdf>

Barrera Álvarez, C., Salamanca Santos, J., González-Neira, E., Suárez, D., & Rúgeles., S. (2016). An Assessment of Psychomotor Skills in Laparoscopy. In Rev. Cienc. Salud (14th ed., pp. 57-67).

Bauzano., E. (2019). Proyecto MARCUS. Retrieved from <http://www.roboticamedica.uma.es/marcus/INDEX.PHP/>

Beltrán Pérez, I., Álvarez Lambert, K., Bandera Ramírez, M., Beltrán Hernández., H., Castañeda Fernández., B., & Chaviano Damers, M. et al. (2011). Consenso de Hemorroides Agudas. [Ebook]. Retrieved from <http://files.sld.cu/coloproctologia/files/2011/05/consenso-nacional-de-hemorroides-agudas-2011.pdf>

Ber Nieto, Y., & Ibáñez Lazo, P. (s.f). INFOGASTRUM. [Ebook]. Retrieved from [https://www.aegastro.es/sites/default/files/archivos/documento-grupo/04\\_infogastrum\\_enfermedad\\_crohn\\_web.pdf](https://www.aegastro.es/sites/default/files/archivos/documento-grupo/04_infogastrum_enfermedad_crohn_web.pdf)

Berthet-Rayne, P., Leibrandt, K., Kim, K., Seneci, C., Shang, J., & Yang, G. (2018). Rolling-Joint Design Optimization for Tendon Driven Snake-like Surgical Robots. In ResearchGate (pp. 1-5).

Bertone, P., & Lujan, O. (2017). Técnica Quirúrgica (3089). Entorno Virtual De Enseñanza Y Aprendizaje De La Universidad Nacional De Río Cuarto, 3089.

[http://www.siat.unrc.edu.ar/siat2/historial/idAula5110309441/materiales//PRESENTACION\\_DE\\_TECNICA\\_QUIRURGICA.BERTONE.pdf](http://www.siat.unrc.edu.ar/siat2/historial/idAula5110309441/materiales//PRESENTACION_DE_TECNICA_QUIRURGICA.BERTONE.pdf)

Burgner Kahrs, J., Rucker, D., & Choset, H. (2015). Continuum Robots for Medical Applications: A Survey. In *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS* (p. 2). Jones, B., & Walker, I. (2006). Kinematics for Multisection Continuum Robots. In *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS*, (22nd ed., p. 44).

Campero, José M. Guzmán, Sergio. Kerkebe, Marcelo. Mercado, Alejandro (2018). Cirugía laparoscópica en urología: breve reseña histórica y estado actual del arte. Retrieved from Revista Médica Clínica Las Condes

Carbajo Ferreira, Á. Litiasis biliar [Ebook] (pp. 263-268). Retrieved from [https://www.aeped.es/sites/default/files/documentos/8-litiasis\\_biliar.pdf](https://www.aeped.es/sites/default/files/documentos/8-litiasis_biliar.pdf)

Carmen, F., & Elena, U. (2009). Los modelos de simulacion una herramienta multidisciplinar en investigacion. *Journal of Chemical Information and Modeling*, n°32, 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Castrellón (s.f). Laparoscopia Ginecológica Retrieved from <http://ginecologalorenacastrellon.com/index.php/procedimientos/laparoscopia> Castro-Torres, I., & Bermúdez-Camps, I. (2015). Fisiopatología de cálculos biliares de colesterol: la búsqueda de una diana terapéutica. In *Rev Biomed* (26th ed., pp. 88-95). México.

Cecmed. (2005). Definicion de Equipo Medico. 2005.[http://www.cecmed.cu/sites/default/files/adjuntos/DocsLicencias/definicion\\_equipo\\_medico.pdf](http://www.cecmed.cu/sites/default/files/adjuntos/DocsLicencias/definicion_equipo_medico.pdf)

Cirugía Laparoscópica | ASCRS. Retrieved from <https://www.fascrs.org/cirugia-laparoscopica>

CGDES - Coordinación General de Desarrollo Estratégico en Salud (2015). Sistema Quirúrgico Da Vinci. Retrieved from Dirección de Inteligencia de la Salud de Quito

Chousleb K, A., Shuchleib C, A., & Shuchleib Ch, S. (2010). Apendicectomía abierta versus laparoscópica. In *medigraphic* (32nd ed., pp. 91-94). México. López, E., & Quijano Collazo, Y. Cirugía Laparoscópica [Ebook]. Retrieved from [http://www.cirugiasanchinarro.com/sites/default/files/cirugia\\_laparoscopica.pdf](http://www.cirugiasanchinarro.com/sites/default/files/cirugia_laparoscopica.pdf)

Cir, R. C., & Original, C. (2014). Apendicectomía laparoscópica por incisión única con instrumental recto, experiencia inicial. *Revista Colombiana de Cirugía*, 29(1), 25–31.

Cisneros, M. Grados de Libertad de Un Robot. In *SCRIBD*.

Computacionales, S. (2007). TRABAJO DE DIPLOMA Modelo Cinemático y Dinámico para Plataforma de dos grados de libertad Universidad Central “ Marta Abreu ” de Las Villas TRABAJO DE DIPLOMA Modelo Cinemático y Dinámico para Plataforma de dos grados de libertad.

Conejero, A., Martínez, M., Ayala, P., & Fernández, M. (2012). El diseño del modelo y prototipo. Herramientas para la comunicación y evaluación. *DEFORMA Cultura Online*, January.

Concepto de molde - Definición en DeConceptos.com. (2020). Retrieved 20 April 2020, from <https://deconceptos.com/arte/molde>

Concepto de dimensión. (2020). Concepto de dimensión - Definición en DeConceptos.com. Retrieved 25 April 2020, from <https://deconceptos.com/matematica/dimension>

Corona Ramírez, L., Abarca Jiménez, G., & Mares Carreño, J. Sensores y actuadores. Aplicaciones con Arduino (p. 31). Instituto Politécnico Nacional

Createc 3D. (2012). Altura de capa. Retrieved 20 April 2020, from <https://createc3d.com/altura-de-cap/>

Cuervo, J. (2014). Apendicitis aguda. In Rev. Hospital de Niños (pp. 15-31). Buenos Aires.

Determinación, G. Y. (n.d.). Manejabilidad Del Concreto. 83–103.

Definición de inspección — Definicion.de. (2020). Retrieved 19 April 2020, from <https://definicion.de/inspeccion/>

Definición de módulo — Definicion.de. (2020). Retrieved 20 April 2020, from <https://definicion.de/modulo/>

Definición de versátil — Definicion.de. (2020). Retrieved 20 April 2020, from <https://definicion.de/versatil/>

Definición de longitud — Definicion.de. (2020). Retrieved 20 April 2020, from <https://definicion.de/longitud/>

Definición de entorno — Definicion.de. (2020). Retrieved 20 April 2020, from <https://definicion.de/entorno/>

Díaz, Gonzalo (2016), Archivo Histórico de Colecistectomía laparoscópica., Pontificia Universidad católica de Chile. Retrieved from ARS MÉDICA, Revista de Ciencias Médicas.

Díez Bru, N. (1992). Principios básicos de la ecografía. In CLINICA VETERINARIA DE PEQUEÑOS ANIMALES (12th ed., pp. 139-146). Madrid.

Dispositivos médicos, Invima. (2012). Invima - Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos - Invima - Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos. Retrieved from <https://www.invima.gov.co/component/content/article.html?id=767>

Dong, X., Raffles, M., Guzman, S. C., Axinte, D., & Kell, J. (2014). Design and analysis of a family of snake arm robots connected by compliant joints. Mechanism and Machine Theory, 77(January 2018), 73–91. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.01.017>

Dr. Zama. (2014). Incisiones quirúrgicas Dr. Zama. Presentation, SlideShare.

Ecured. (2020). Giroscopio - EcuRed. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.ecured.cu/Giroscopio>

Ecured. (2020). Giroscopio - EcuRed. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.ecured.cu/Giroscopio>

EDUBASICA. (2015). EDUBASICA- ARDUINO EDUCATIONAL SHIELD. Retrieved 25 April 2020, from [http://www.practicasonarduino.com/manualrapido/informacin\\_bsica\\_sobre\\_arduino.html](http://www.practicasonarduino.com/manualrapido/informacin_bsica_sobre_arduino.html).

Educalingo. (2020). MAGNETÓMETRO - Definición y sinónimos de magnetómetro en el diccionario español. Retrieved 27 April 2020, from <https://educalingo.com/es/dic-es/magnetometro>

Educalingo. (2020). MAGNETÓMETRO - Definición y sinónimos de magnetómetro en el diccionario español. Retrieved 27 April 2020, from <https://educalingo.com/es/dic-es/magnetometro>



Enfermedad intestinal inflamatoria - Síntomas y causas - Mayo Clinic. (2019). Retrieved from <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/inflammatory-bowel-disease/symptoms-causes/syc-20353315>

Esquiche, w., & Mamani, M. (2019). ENFISEMA SUBCUTÁNEO EN CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA. Retrieved from <http://revista.hospitaltacna.gob.pe/index.php/revista2018/article/view/62>

FERRERO HERRERO, E. (2015). Manual de cirugía laparoscópica avanzada experimental en cirugía colorrectal (pp. 16-20). [S.l.]: DYKINSON.

Fibra, G. (2020). ¿Cómo funciona el corte láser? | Trotec Laser FAQ. Retrieved 20 April 2020, from <https://www.troteclaser.com/es-co/tutoriales-ejemplos/faqs/como-cortar-con-laser/>

Filamento Tpu Flexible Premium Impresión 3d, 1/2lb, 250gr - \$ 47.000. (2019). Retrieved from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-462726102-filamento-tpu-flexible-premium-impresion-3d-12lb-250gr-\\_JM?quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-462726102-filamento-tpu-flexible-premium-impresion-3d-12lb-250gr-_JM?quantity=1)

Foundation for Medical Education and Research (MFMER). (2019). Cirugía mínimamente invasiva - Mayo Clinic. Retrieved from <https://www.mayoclinic.org/es-es/tests-procedures/minimally-invasive-surgery/about/pac-20384771>

Fraden, J., Norton, H. N., Middelhoek, S., Audet, S. A., & Sensors, S. (2002). Sensores. Sensores, IV, 33 Pag

García Hernández, G., & Gómez Latorre, J. (2010). Laparotomía y/o laparoscópica diagnóstica en abdomen agudo no traumático en adulto. In Guía de Practica Clínica (pp. 11-26). México: Secretaría de salud.

Gallardo-Valencia, L., Gallardo-Fuentes, J., & Ruz-Barros, R. (2014). Histerectomía laparoscópica asistida con robot. Reporte del primer caso en México. In Ginecol Obstet Mex (82nd ed., pp. 705-710). Mexico.

García-Galisteo, E., Tejero, E., Vílchez, P., García-Galisteo, J., & González, V. (2011). Comparación del tiempo operatorio y complicaciones entre la pieloplastia laparoscópica convencional y robótica. In ELSEVIER DOYMA (35th ed., pp. 523-528). España.

García Camacho, Laura. Hidalgo Ramos, Francisco Javier. Lara Fernández, Montes Duran, Cristina. Porcuna Cazalla, Gloria. Silvana Maria. Sanchez Romero, Inmaculada (2018). Evaluación mediante TCMD de la anatomía renal y vascular normal y variantes anatómicas con relevancia en la cirugía renal laparoscópica. Retrieved from Sociedad Española de Radiología Médica.

García-Porrero, J. A., & Hurlé, J. M. (2013). Anatomía humana. Retrieved from <http://ebookcentral.proquest.com>

Gómez Ramos, Á. (2015). Diseño de una Plataforma Software Interactiva para la Simulación Cinemática de Robots Manipuladores en entorno MATLAB. 1-221. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/50043/fichero/Memoria+Final.pdf>

González, A. M., & Espina, M. (n.d.). Robotica.

González, A. (2016). Bazo - Fundación Sonría. Retrieved 1 March 2020, from <https://sonria.com/glossary/bazo/>

González, J., Turiel, J., Fraile, J., de la Fuente, D., Alonso, R., & Gayubo, F. (2014). MODELADO CINEMÁTICO DE UN MANIPULADOR BINARIO HIPER REDUNDANTE PARA APLICACIONES EN CIRUGÍA MINIMAMENTE INVASIVA (MIS). In Comité Español de Automática de la IFAC. Valencia.

Grupo SIRP. (2020). Tipos de movimientos y grados de libertad. Presentation, SlideShare.

Guillén Rodríguez\*, M. (2012). ENFERMEDAD DE CROHN. REVISTA MEDICA DE COSTA RICA Y CENTROAMERICA LXIX, 153-156.

Guerrero-Castellanos, J. F., Villarreal-Cervantes, M. G., Sánchez-Santana, J. P., & Ramírez-Martínez, S. (2014). Seguimiento de trayectorias de un robot móvil (3,0) mediante control acotado. RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial, 11(4), 426–434. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.09.005>

Herencia Genética y Enfermedad (2009). Asociación entre el reflujo gastroesofágico y la tos aguda y crónica. Retrieved from <https://herenciageneticayenfermedad.blogspot.com/2009/11/asociacion-e-ntre-el-reflujo.html>

Hernández-Rocha, C., Ibáñez, P., Molina, M., Klaassen, J., Valenzuela, A., & Candia, R. et al. (2017). Diagnóstico y manejo de colitis ulcerosa grave: Una mirada actualizada. Revista Médica De Chile, 145(1), 75-84. doi:10.4067/s0034-98872017000100013

Hernández, J. Soportes e impresión 3D: lo que nunca te cuentan. Retrieved 20 April 2020, from <https://impresiontresde.com/soportes-e-impresion-3d-lo-que-nunca-te-cuentan/>

Herrera, J., Balén, E., Miranda, C., Tarifa, A., Zazpe, C., & Lera, J. (2005). The role of laparoscopy in emergency abdominal surgery. In Research Gate (28th ed., pp. 81-90). Pamplona: Hospital de Navarra.

Homecenter. (2019). Discover Cable acero galvanizado 5/16 Pulg. Retrieved from <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/13963/Cable-acero-galvanizado-5-16-Pulg/13963>

Industrial, B., Automation, M., Motion, R., Actuators, L., & Open, D. (2019). UK Linear Actuator 12V Electric Motor 500~1500N 50~300mm Solar Tracker Door Open | eBay. Retrieved from <https://www.ebay.com/itm/UK-Linear-Actuator-12V-Electric-Motor-500-1500N-50-300mm-Solar-Tracker-Door-Open/323712650570?hash=item4b5ec70d4a:m:mMKSzmnjgZQXbWBPGW7w2SA>

Instituto Mexicano del Seguro Social. (n.d.). Guía de Referencia Rápida Laparotomía y / Laparoscopia Diagnóstica en Abdomen Agudo no Traumático en el Adulto Guía de Práctica Clínica GPC.

Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos - INVIMA (2013). ABC Dispositivos médicos. Cajigas de Acosta, [Ebook] (pp. 13-15). Bogotá. Retrieved from <https://www.invima.gov.co/images/pdf/tecnovigilancia/ABC%20Dispositivos%20Medicos%20INVI-MA.pdf>

Intermountain Healthcare. (2016). Laparoscopia diagnóstica [Ebook] (pp. 1-2). Retrieved from <https://intermountainhealthcare.org/ext/Dcmnt?ncid=521121007>

Ise, A. (2011). MASTER DEGREE : Industrial Systems Engineering Comunicaciones industriales y en Tiempo Real Contenido. 1–24.

Isla-Ortiz, D., Salcedo-Hernández, R., León-Takahashi, A., Estrada-Rivera, F., Barquet-Muñoz, S., & Reynoso-Noverón, N. (2019). Resultados quirúrgicos de histerectomía radical laparoscópica en pacientes con cáncer de cérvix en etapa temprana: experiencia inicial en Instituto de Cáncer. *Cirugía Y Cirujanos*, 86(3). doi: 10.24875/ciru.m18000035

Jaimes, F. (2007). Pruebas diagnósticas: uso e interpretación. *ACTA MED COLOMB*, 32(1), 29-33.

Jawan - Fuente (600W). (2020). JAWAN | Fuente de poder ATX (600W) - Colombia. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.jawan.co/fuentes-atx/fuente-de-poder-atx-600w-2>

Jones, B., & Walker, I. (2006). Kinematics for Multisection Continuum Robots. In *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS* (22nd ed., p. 43).

Jones, B., Walker, I., & McMahan, W. (2006). Practical Kinematics for Real-Time Implementation of Continuum Robots\*. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (p. 3). Orlando, Florida.

Klug, D. (2017). Series Gastrointestinales superiores con el intestino Delgado [Ebook] (pp. 1-2). Rady Childrens Hospital San Diego. Retrieved from <https://www.rchsd.org/documents/2017/06/upper-gastrointestinal-serieswith-small-bowel-spanish.pdf/>

L293D, D., Omeider, Fabio, Oscar, & sergio. (2020). Driver De Motor L293D - VISTRONICA SAS. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.vistronica.com/robotica/motores/drivers-de-motores/driver-de-motor-l293d-detail.html>

Laparoscopia: Información en MedlinePlus sobre pruebas de laboratorio. (2019). Retrieved from <https://medlineplus.gov/spanish/pruebas-de-laboratorio/laparoscopia/>

León Rodríguez, H., Murrugarra Q., C., Moncada Linares, Y., & Mosqueda Velásquez, S. (2018). SISTEMAS ROBÓTICOS CONTINUO REDUNDANTES. In *XXIV CONGRESO INSTITUCIONAL DE INVESTIGACIONES* (9th ed., p. 56). Bogotá.

León-Rodríguez, H. (2017). Macro & Micro Robotics System for Medical Applications. In *Journal of Technology* (16th ed., pp. 104-113). Bogotá D.C.

LLamas, L. (2016). Controla tus proyectos con Arduino y Joystick analógico. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.luisllamas.es/arduino-joystick/>

Li, L. (2002). IE – 431 Sistemas de Control (pp. 12-19). Costa Rica. Liderdoctor. Ecografía [Ebook]. Retrieved from <http://www.liderdoctor.es/wp-content/uploads/2011/07/ecografia.pdf>

López Bautista, E. (2016). Fraguado. Presentation, SlideShare

Luján, O., Bertone, P., Cocco, R., Aramayo, A., & Boatti, A. Técnica quirúrgica Presentation, <http://www.siat.unrc.edu.ar>.

MACTRONICA. (2020). ACELEROMETRO BRUJULA GIROSCOPIO PRESION MPU9250 BMP280 GY-91 \$ 26000.0. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.mactronica.com.co/acelerometro-brujula-giroscopio-presion-mpu9250-bmp280-gy91-967455850xJM>

Martín Barrio, A. (2014). Robot laparoscópico biomimético e híper-redundante: análisis preliminar de materiales magnéticos, guiado mediante visión artificial y primer estudio de su diseño. Uva Biblioteca Universitaria. Retrieved from <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/17716>

Martín, A., Terrile, S., Barrientos, A., & Cerro, J. (1992). Robots Hiper-Redundantes : Clasificación , Estado del Arte y Problemática. 15(Chirikjian), 351–362.

Matem, M. (2010). Tema 1 ´ MODELOS MATEMATICOS 1.1. Libro Modelos Matematicos En Biología, 1–12. [http://matema.ujaen.es/jnavas/web\\_modelos/pdf\\_mmb08\\_09/introduccion.pdf](http://matema.ujaen.es/jnavas/web_modelos/pdf_mmb08_09/introduccion.pdf)

Mecatronica, R. y. (n.d.). Acelerómetro. 6050.

MedlinePlus (2019). Apendicitis. Retrieved from <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/000256.htm>

MedlinePlus (2019). Cálculos Biliares. Retrieved from <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/000273.htm>

Medlineplus. (2020). Enfermedades de la vesícula biliar: MedlinePlus en español. Retrieved 1 March 2020, from <https://medlineplus.gov/spanish/gallbladderdiseases.html>

Medlineplus. (2020). Enfermedades del bazo: MedlinePlus en español. Retrieved 1 March 2020, from <https://medlineplus.gov/spanish/spleendiseases.html>

MedlinePlus (2019): Reflujo gastroesofágico - Laparoscopia Retrieved from [https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp\\_presentations/100181\\_4.htm](https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_presentations/100181_4.htm)

Mechatronics- driver 0.6A. (2020). Driver Puente H L293D 0.6A - Naylamp Mechatronics - Perú. Retrieved 27 April 2020, from <https://naylampmechatronics.com/drivers/223-driver-puente-h-l293d.html>

Mercado Libre. (2019). Mercado Libre Colombia - Donde comprar y vender de todo. Retrieved from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-459010708-a-prueba-de-agua-kit-de-laparoscopia-de-la-camara-endoscopio-\\_JM?quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-459010708-a-prueba-de-agua-kit-de-laparoscopia-de-la-camara-endoscopio-_JM?quantity=1)

Mercado Libre Joystick. (2019). Mercado Libre Colombia - Donde comprar y vender de todo. Retrieved from [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-449000662-control-joystick-logi\\_tech-extreme-3d-pro-simulador-de-vuelo-\\_JM?quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-449000662-control-joystick-logi_tech-extreme-3d-pro-simulador-de-vuelo-_JM?quantity=1)

Millán Casas, Laura (2016). Ergonomía en cirugía laparoscópica a través de una incisión única. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=203004>

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. (2005). DECRETO NÚMERO 4725 DE 2005 [Ebook] (p. 4). Bogotá, Colombia. Retrieved from [https://www.who.int/medical\\_devices/survey\\_resources/health\\_technology\\_national\\_policy\\_colombia.pdf](https://www.who.int/medical_devices/survey_resources/health_technology_national_policy_colombia.pdf)

MINISTERIO DE SALUD. (2001). Resolucion 434 De 2001. Resolucion, 2001(44), 24. <https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R0434001.pdf>

Minsalud. (2005). Decreto 4725 de diciembre 26 de 2005 [Ebook] (p. 13). Retrieved from [https://www.invima.gov.co/images/stories/decretos\\_dispositivos/DECRETO-425-de-2005-24-08-17.pdf](https://www.invima.gov.co/images/stories/decretos_dispositivos/DECRETO-425-de-2005-24-08-17.pdf)

MODULO DIRECCIONES - mactronica. (2020). MODULO JOYSTICK 5 DIRECCIONES \$ 7000.0. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.mactronica.com.co/modulo-joystick-direcciones-992592859xJM>

Monsalve Diaz, J., & León Rivera, J. (2013). Robot Serpiente Modular Simulado Framework Integrado(SMSR-IF) [Ebook] (1st ed., pp. 11-26). Bogotá. Retrieved from <http://file:///C:/Users/vale/Downloads/LeonRiveraJuanSebastian2013.pdf>

Moreno-Portillo, M., Valenzuela-Salazar, C., Quiroz-Guadarrama, C. D., Pachecho-Gahbler, C., & Rojano-Rodríguez, M. (2014). Cirugía robótica. *Gaceta Medica de Mexico*, 150, 293–297. <https://doi.org/10.4067/s0718-40262012000100016>

Mosqueda, S., Moncada, Y., Murrugarra, C., & Leon-Rodriguez, H. (2018). Constant Curvature Kinematic Model Analysis and Experimental Validation for Tendon Driven Continuum Manipulators. In *ICINCO* (2nd ed., pp. 211-218). Oporto, Portugal: 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics.

Muñoz González, S. (2013). ANÁLISIS DE LA CINEMÁTICA INVERSA Y MINIMIZACIÓN DE ERRORES MEDIANTE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA UN ROBOT HÍPER-REDUNDANTE (MÁSTER). UNIVERSIDAD DE VALLADOLID - ESCUELA DE INGENIEROS INDUSTRIALES.

Muñoz González, Samuel; Herreros López, A. (2013). Análisis De La Cinemática Inversa Y Minimización De Errores Mediante Algoritmos De Optimización Para Un Robot Híper-Redundante. 80. <https://core.ac.uk/download/pdf/61526298.pdf>

Natura Sapiens (s.f). Síntomas quistes en los Ovarios. Retrieved from <https://www.naturasapiens.com/sintomas-quistes-en-los-ovarios/>

Noguera Aguilar, J., Moreno Sanz, C., Cuadrado García, A., Olea Martínez, J., Morales Sorian, R., & Vicens Arbona, J. *et al.* (2010). NOTES. Historia y situación actual de la cirugía endoscópica por orificios naturales en nuestro país. In Elsevier (4th ed., pp. 209-282). España.

Nucleus Medical Media (2011). Apendicectomía Laparoscópica. Retrieved from <http://hlp.nucleushealth.com/appendectomy/view-item?ItemID=32693>

Octavio, Drs. Castillo, A. Vidal, Ivar (2012). Cirugía robótica\* Robotic surgery CIRUGÍA AL DÍA. Retrieved from *Revista Chilena de Cirugía*, Vol 64, pág 88.91.

Otero, W., & Gómez, M. (2005). Síndrome de intestino irritable. In *SciELO* (20th ed., pp. 1-3). Bogotá, Colombia.

Organización Mundial de la Salud. (2019). Dispositivos médicos. Retrieved from [https://www.who.int/medical\\_devices/es/](https://www.who.int/medical_devices/es/)

OPENSURG (2013). Robótica médica. CYTED. Proyecto iberoamericano para la docencia e investigación en robótica medica utilizado recurso de código abierto.

OPTI, & FENIN. (2004). El futuro de la Cirugía Mínimamente Invasiva. *Tendencias tecnológicas a mediano y largo Plazo*. 53.

Ortega-Deballona, P., Delgado-Millána, M., & Jover-Navalónb, J. [Ebook] Retrieved from <http://www.imss.gob.mx/sites/all/statics/guiasclinicas/509GRR.pdf>

Osiniri Kippes, I., García Guzmán, P., Peix Sambola, M., & Fernández Merchán, J. (2016). Taller de iniciación en ecografía abdominal clínica para pediatras [Ebook] (13th ed., pp. 507-512). Retrieved

from [https://www.aepap.org/sites/default/files/4t4.8\\_taller\\_de\\_iniciacion\\_en\\_ecografia\\_abdominal.pdf](https://www.aepap.org/sites/default/files/4t4.8_taller_de_iniciacion_en_ecografia_abdominal.pdf)

Palomares Orihuela, R. (2016). Robot Da Vinci: El quirófano del futuro. *Perfiles De Ingeniería*, 2(11), 156-161. doi: 10.31381/perfiles\_ingenieria.v2i11.430

Pareja Muñoz, J. (2019). Rediseño, sensorización y teleoperación mediante realidad aumentada de Kyma, un robot manipulador blando - Archivo Digital UPM. Retrieved from <http://oa.upm.es/51938/>

Patricia, C., Osorio, O., Emilse, C., & Morales, R. (n.d.). El concepto de dimensión: errores y dificultades.

Pérez Duarte, F. J., Sánchez-Margallo, F. M., Idoia Diaz, G. M.-P., Sánchez Hurtado, M. Á., Hernandez, M. L., & Gargallo, J. U. (2012). Ergonomía en cirugía laparoscópica y su importancia en la formación quirúrgica.

Pozo Espín, David Fernando (2010). Diseño y Construcción de una Plataforma Didáctica para Medir Ángulos de Inclinación usando Sensores Inerciales. Escuela Politécnica Nacional de Quito. Facultad de Ingeniería eléctrica y electrónica. From: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1794/1/CD-2772.pdf?>

Prodanoff, F. (n.d.). Física.

Qué es la endoscopia. [Ebook] (pp. 1-9). Retrieved from <http://cuidados20.san.gva.es/documents/16605/37253/Endoscopiastiposymetodos.pdf>

¿Qué es el cáncer de vejiga?. (2019). Retrieved from <https://www.cancer.org/es/cancer/cancer-de-vejiga/acerca/que-es-cancerde-vejiga.html>

Qué es la vesícula y qué función cumple en el organismo. Retrieved 1 March 2020, from <https://www.infobae.com/salud/2019/07/30/que-es-la-vesicula-y-que-funcion-cumple-en-el-organismo/>

QUÉ ES UN PROTOTIPO Y PARA QUÉ SIRVE? - Sendekia. (2020). Retrieved 19 April 2020, from <https://sendekia.com/que-es-un-prototipo-y-para-que-sirve/>

Quistes de ovario - Síntomas y causas - Mayo Clinic. (2019). Retrieved from <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/ovarian-cysts/symptoms-causes/syc-20353405>

Radiological Society of North America (RSNA). (2018). Cálculos biliares (piedras en la vesícula) [Ebook] (pp. 1-3). Retrieved from <https://www.radiologyinfo.org/sp/pdf/gallstones.pdf>

Radiological Society of North America (RSNA). (2018). Diverticulitis [Ebook] (pp.1-3). Retrieved from <https://www.radiologyinfo.org/sp/pdf/diverticulitis.pdf>

Radiological Society of North America (RSNA). (2018). Rayos X (Radiografía) del tracto gastrointestinal (GI) superior [Ebook] (pp. 1-7). Retrieved from <https://www.radiologyinfo.org/sp/pdf/uppergi.pdf>

RadiologyInfo. (2019). En qué consiste la Certificación. 1-4. <http://www.juntadeandalucia.es/agenciadecalidadsanitaria/es/certificacion/centros-y-unidades-sanitarias/-en-que-consiste-la-certificacion/>

Ramírez, K. (2015). Cinemática del Robot. Universidad de Costa Rica, 1-24. <http://www.kramirez.net/Robotica/Material/Presentaciones/BrazoRobotico.pdf>

Rangel, R. (2014). Biomimética de la naturaleza a la creación humana Redalyc Rocha Rangel , Enrique. October.

RAYOS X DE VÍAS DIGESTIVAS ALTAS. (2016). Retrieved from <http://www.huhmp.gov.co/dotnetnuke/LinkClick.aspx?fileticket=Waes-UEnx64%3D&tabid=262&mid=716&language=es-CO>

Reyes Cortés, Fernando. (2011). Robótica- Control de Robots Manipuladores. México: Alfa Omega Grupo Editor, S.A de C.V.

Ricart, E. (s.f). Colitis ulcerosa. [Ebook] Retrieved from [https://www.aegastro.es/sites/default/files/archivos/ayudas-practicas/32\\_Colitis\\_ulcerosa.pdf](https://www.aegastro.es/sites/default/files/archivos/ayudas-practicas/32_Colitis_ulcerosa.pdf)

Rigidez. (2020). Presentation, SlideShare.

Robot manipulador - RIVAS ROBOTICS - HURTADORIVAS. (2020). Retrieved 19 April 2020, from <https://rivasrobotics.com/robot-manipulador/>

Robótica: Algoritmo de Denavit–Hartenberg. Caso de estudio SSRMS – Mafer's Tech Holdings industries. (2017). Retrieved 1 March 2020, from <https://maferstech.com/robotica-algoritmo-de-denavit-hartenberg-caso-de-estudio-ssrms/>

Robotshop. (2019). Actuador lineal actuonix. Retrieved from <https://www.robotshop.com/es/es/placa-control-actuador-lineal-actuonix.html>

Robotshop. (2015). Arduino Mega 2560 Datasheet. Power, 1–7. <http://www.robotshop.com/content/PDF/ArduinoMega2560Datasheet.pdf>

Salinas, S., & Vivas Albán, O. (2009). MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DEL ROBOT PARA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA 'LAPBOT'. Ingeniare. Revista Chilena De Ingeniería, 17(3). doi: 10.4067/s0718-33052009000300005

Samaniego, Drs Castor. Negri, Nelson. Marín, José. Saguier, Guillermo (2002). Lesión quirúrgica de la vía biliar principal durante la colecistectomía laparoscópica. Retrieved from Rev. Chilena de Cirugía. Vol 54 - N° 5, págs.479-484 .

SENATI. (n.d.). Modelado 3D.

Sensing. (2020). Encoders incrementales magnéticos - Sensing, Sensores de Medida. Retrieved 27 April 2020, from <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-angulo-y-rotacion/encoders-incrementales-magneticos/>

Serway, R. (2001). Movimiento de rotación.

Serna, J., Patiño, S., Buriticá, M., Osorio, E., Morales, C., & Toro, J. (2019). Incidencia de lesión de vías biliares en un hospital universitario: análisis de más de 1.600 colecistectomías laparoscópicas. Revista Colombiana De Cirugía, 34(1), 45-51. doi: 10.30944/20117582.97

Scelza, A. Laparoscopia en el Abdomen Agudo. [Ebook]. Retrieved from <http://www.mednet.org.uy/cq3/emc/monografias/lap-aa-062003.pdf>

Simarro, Ii. L. (n.d.). Velocidad.

Síndrome, E. L., Cuidador, D. E. L., Zafra, A. M., López, S., Agudiez, M., & N, L. I. (2008). Rendimiento. 22(6), 30003. [www.fisterra.com](http://www.fisterra.com)

Stanford Children's Health. (2020). default - Stanford Children's Health. Retrieved 1 March 2020, from <https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=how-the-liver-works-90-P05112>

Sages (s.f). Apendicectomía Laparoscópica. Retrieved from <https://www.sages.org/publications/patient-information/informacion-parael-paciente-apendicectomias-laparoscopicas/>

Sages (s.f). Colectistomía Laparoscópica. Retrieved from <https://www.sages.org/publications/patient-information/informacion-parael-paciente-colectistomia-laparoscopia/>

Seguridad de los equipos médicos: MedlinePlus en español. (2020). Retrieved 19 April 2020, from <https://medlineplus.gov/spanish/medicaldevicesafety.html>

Skledapoulos, A., & Momno, A. (2008). En Los Cirujanos De Laparoscopia. 47.

Societat Catalana de digestologia (s.f). REFLUJO GASTROESOFÁGICO. [Ebook] Retrieved from [http://www.scdigestologia.org/docs/patologies/es/reflux\\_es.pdf](http://www.scdigestologia.org/docs/patologies/es/reflux_es.pdf)

Somaruga, Julio César Ph. (s.f). VESICULA BILIAR-COLECISTECTOMIA LAPAROSCOPICA Retrieved from <http://juliocesarsomaruga.blogspot.com/p/la-colecistitis-aguda-ca-es-unade-las.html>

Somaruga, Julio César Ph. (s.f). APENDICECTOMIA LAPAROSCOPICA Retrieved from [http://juliocesarsomaruga.blogspot.com/p/apendicectomia-laparoscopica.h tml](http://juliocesarsomaruga.blogspot.com/p/apendicectomia-laparoscopica.html)

Staywell. (2010). Tratamiento de las hemorroides. Retrieved from [http://www.veteranshealthlibrary.org/Spanish/Flipbooks/General/2211467\\_VA.pdf](http://www.veteranshealthlibrary.org/Spanish/Flipbooks/General/2211467_VA.pdf)

The StayWell Company (2010). [Ebook] Retrieved from [https://www.veteranshealthlibrary.org/Spanish/Flipbooks/General/225007 es\\_VA.pdf](https://www.veteranshealthlibrary.org/Spanish/Flipbooks/General/225007_es_VA.pdf)

Tomé, C. (2020). Estructura y motilidad del intestino delgado. Retrieved 1 March 2020, from <https://culturacientifica.com/2019/03/25/estructura-y-motilidad-del-intestino-delgado/>

Tonapi, M. (2014). Space-Capable Long and Thin Continuum Robotic Cable. All Theses, August. [http://tigerprints.clemson.edu/all\\_theses/2018](http://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2018)

UChicagoMedicine (2016). Cirugía Laparoscópica de Colon. Retrieved from <http://healthlibrary.uchospitals.edu/Spanish/video-library/Content/healthsheets-v1/laparoscopica-del-colon/>

UChicagoMedicine (2016). Operación Urológica por Laparoscopia. Retrieved from <http://healthlibrary.uchospitals.edu/spanish/video-library/Content/healthsheets-v1/si-su-hijo-necesita-una-operacion-urolologica-por-laparoscopia/>

Ullauri Solano, J. Apendicetomía Abierta vs Laparoscópica complicaciones Inmediatas y mediatas [Ebook]. Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/3945/1/10549.pdf>

Unitex. (2020). Glosario de términos. Retrieved 20 April 2020, from <http://www.tenso.es/utilidades/glosario.asp?termino=%C1ngulo%20de%20deflexi%F3n>



Universidad El Bosque (2019). Bioingeniería | Universidad El Bosque. Retrieved from <https://www.uelbosque.edu.co/ingenieria/carrera/bioingenieria>

Universidad Simón Bolívar. (n.d.). Movimiento De Oxígeno.

Valdés-Hernández, J., de la Herranz, P., Gómez-Rosado, J., Cintas-Catena, J., Pérez-Sánchez, A., & Capitán-Morales, L. (2018). Situación actual de la laparoscopia y robótica en la enfermedad inflamatoria intestinal. In ResearchGate (29th ed., pp. 476-479). Sevilla.: Unidad de Cirugía Colorrectal. Hospital Universitario Virgen Macarena.

Vanuno, D. (2005). Diagnostic Laparoscopy. State of the art. Cirugía Paraguaya, 28(1), 64-72. Retrieved from <http://sopaci.org.py/wp/wp-content/uploads/2016/03/Vanuno-Daniel-Jun05.pdf>

VATIA. (n.d.). Encoder incremental - Principio de funcionamiento. 2-4. [http://www.telegestionalumbrado.com/technology/principio-de-funcionamiento/%0Ahttp://opex-energy.com/eolica/principio\\_de\\_funcionamiento.html](http://www.telegestionalumbrado.com/technology/principio-de-funcionamiento/%0Ahttp://opex-energy.com/eolica/principio_de_funcionamiento.html)

Velasco, K. (2013). Ergonomía en instrumentación quirúrgica Introducción. Repertorio de Medicina y Cirugía, 22(3), 168-176. [https://www.fucsalud.edu.co/sites/default/files/2017-09/168-176\\_0.pdf](https://www.fucsalud.edu.co/sites/default/files/2017-09/168-176_0.pdf)

V. Mazzone, Controladores PID. Universidad Nacional de Quilmes, 2002, pp. 1-3

Vía Madrid (2017). Cáncer en la Vejiga Retrieved from <http://www.viamadridtv.es/21265/los-tumores-vejiga-serian-enfermedades-raras-no-se-fumara/>

Vistronica, Angela, & Adan. (2020). Módulo Joystick Palanca de Mando PS2 | VISTRONICA SAS. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.vistronica.com/modulos/modulo-joystick-palanca-de-mando-ps2-detail.html>

Vistronica - Controlador MultiPowerSO-30. (2020). Controlador Puente H VNH3SP30 SMD MultiPowerSO-30 - VISTRONICA SAS. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.vistronica.com/robotica/motores/drivers-de-motores/controlador-puente-h-vnh3sp30-smd-multipowerso-30-detail.html>

Vistronica. (2020). Kit Encoder Codificador Magnético Para Motorreductor - VISTRONICA SAS. Retrieved 27 April 2020, from <https://www.vistronica.com/sensores/kit-encoder-codificador-magnetico-para-motorreductor-detail.html>

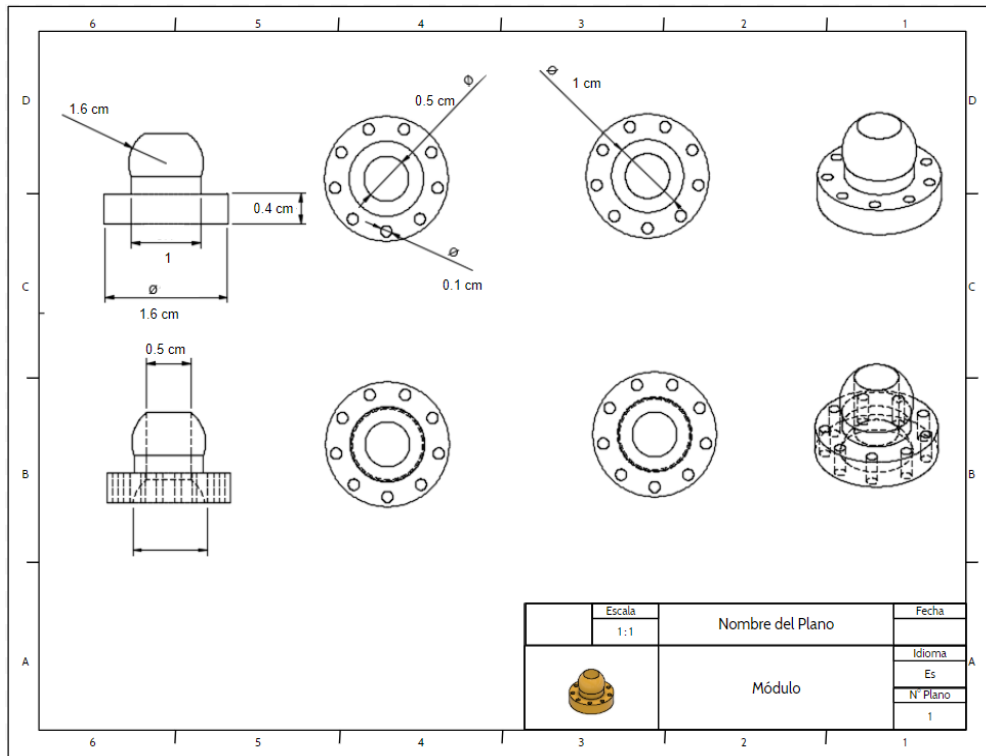
WEST Instruments de México, S. (2006). Manual de Aplicación de encoders. 21.

Wright, C., Johnson, A., Peck, A., McCord, Z., Naaktgeboren, A., & Gianfortoni, P. et al. (2007). Design of a Modular Snake Robot. In IEEE (pp. 9-14). San Diego, CA, USA.

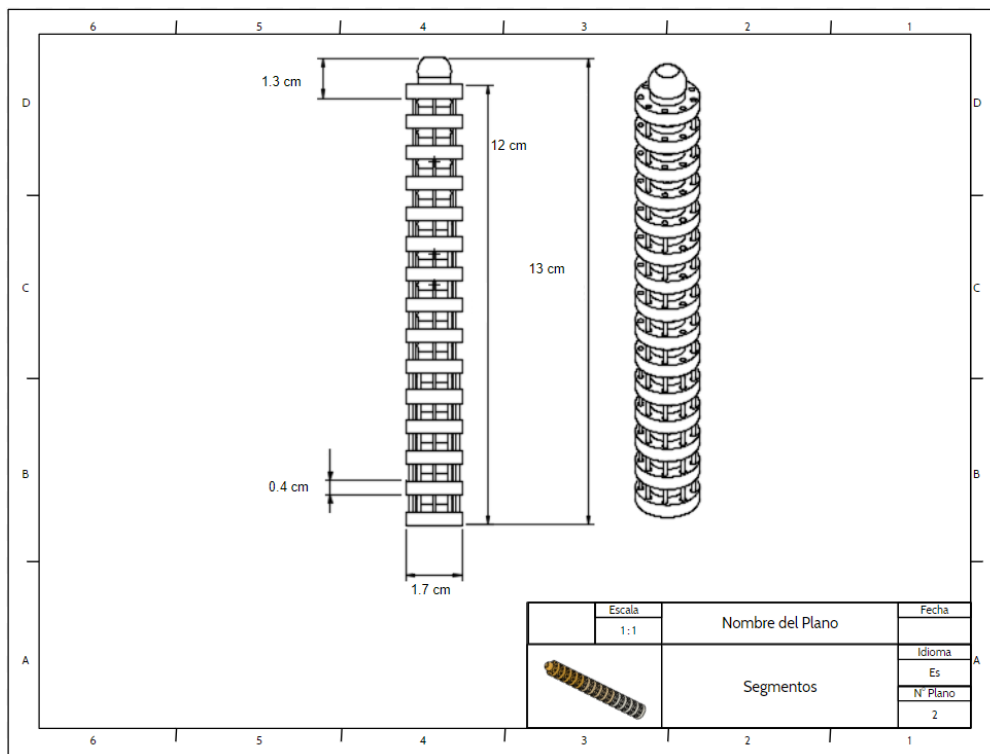
Zaplana, I., Claret, J. and Basanez, L. (2018). Análisis Cinemático de Robots Manipuladores Redundantes: Aplicación a los Robots Kuka LWR 4+ y ABB Yumi. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, [online] 15(2), p.192. Available at: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/116165/8822-356781-PB.pdf>.

Zarate, AJ., Garlaschi, V., & Raue, M. Apendicitis aguda [Ebook] (pp. 1-6). Santiago, Chile. Retrieved from <https://medfinis.cl/img/manuales/apendicitis.pdf>

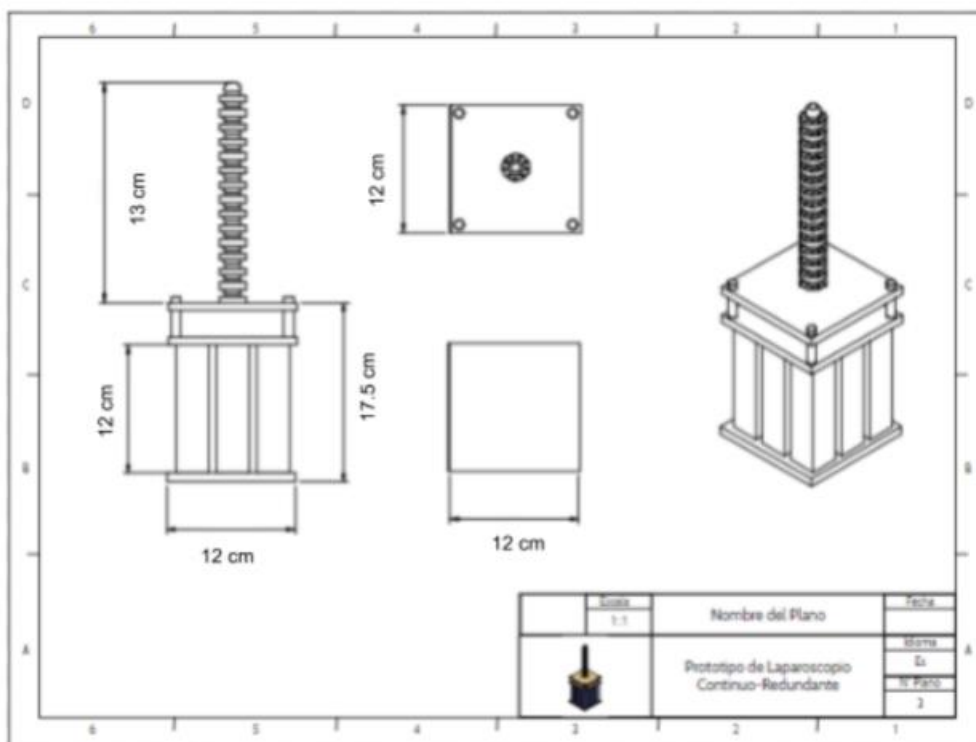
## ANEXOS



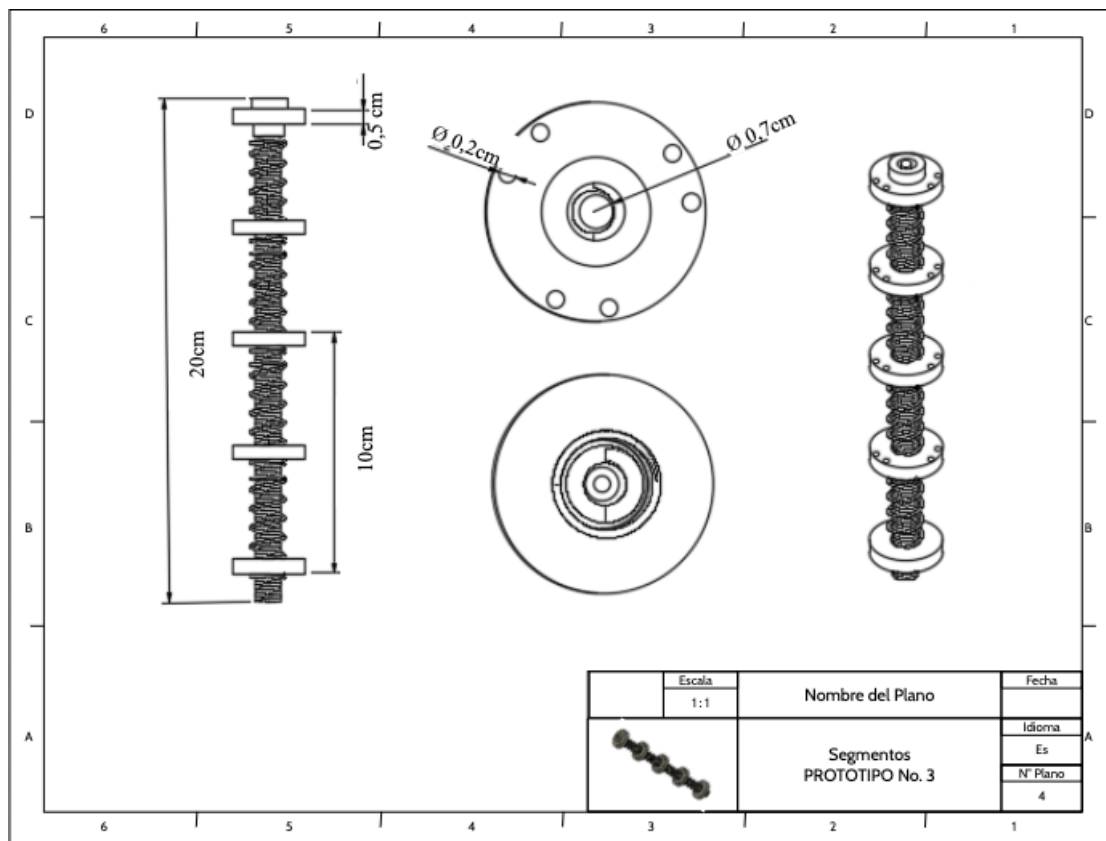
Anexo 1 Planos de los módulos que conforman la estructura móvil del prototipo No. 1



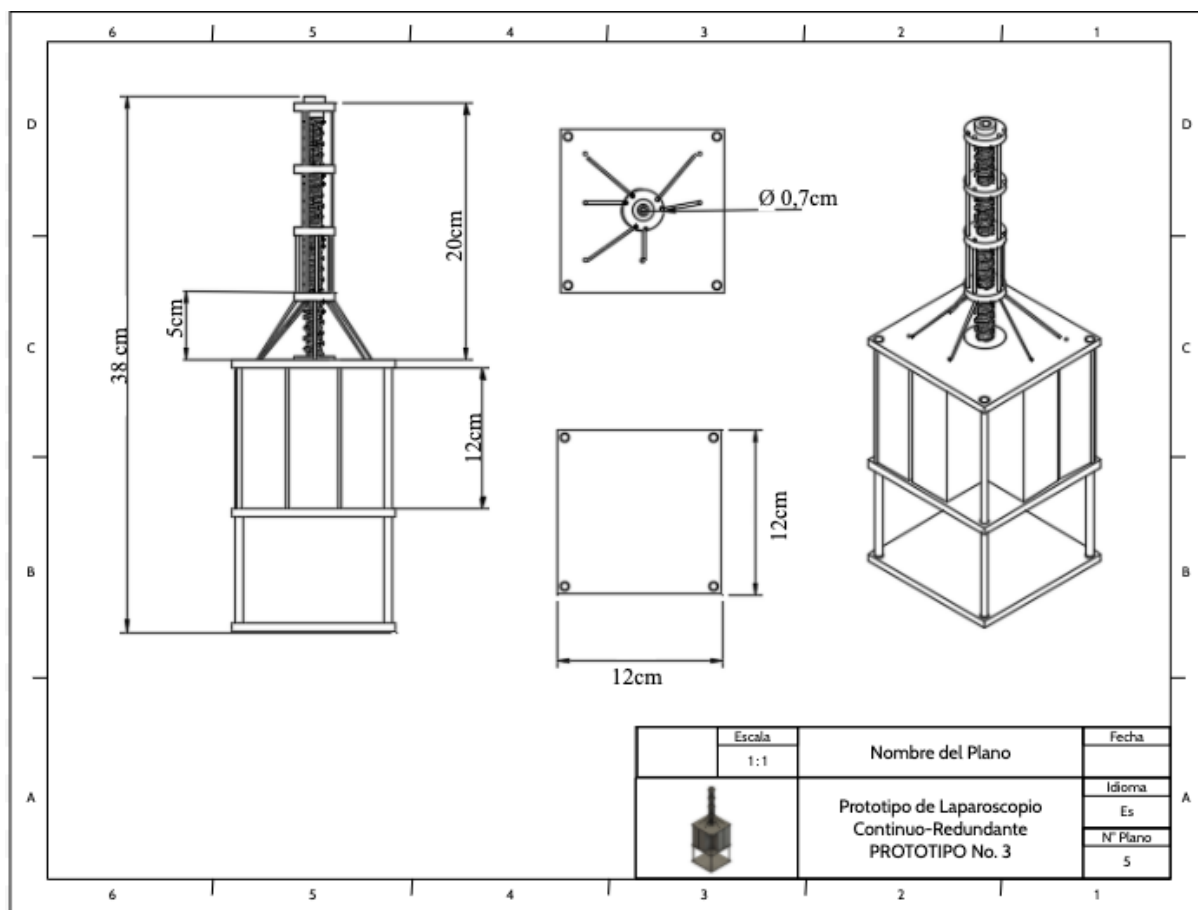
Anexo 2 Planos de la estructura móvil del prototipo No. 1



Anexo 3 Planos de la estructura mecánica del prototipo No. 1



Anexo 4 Planos de la estructura móvil del prototipo No. 3



Anexo 5 Planos de la estructura mecánica del prototipo No. 3