

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO DE ASISTENCIA ROBÓTICA DE USO ACADÉMICO PARA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Castillo C. Oswaldo A.
Meriño V. Carlos E.
Para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre de 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO DE ASISTENCIA ROBÓTICA DE USO ACADÉMICO PARA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

Tutor Académico: Prof. Vannessa Duarte.

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Castillo C. Oswaldo A.
Meriño V. Carlos E.
Para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, Noviembre 2015



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA



Caracas, 03 de Noviembre 2015

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el (los) bachiller (es):

OSWALDO CASTILLO
CARLOS MERIÑO

Titulado:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN BRAZO DE ASISTENCIA
ROBOTICA DE USO ACADEMICO PARA CIRUGIA LAPAROSCOPICA”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Prof. Arturo Gil
Jurado



Prof. José Barriola
Jurado

Prof. Vanessa Duarte
Tutor

“50 años de la creación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica y del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales”

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecerle a mi Universidad Central de Venezuela, por forjar mi desarrollo como futuro profesional y darme las herramientas para la elaboración de este tomo.

A mi tutora por apoyarme en el desarrollo de este proyecto.

A mi familia y a mis amigos que sin ser de la misma sangre los considero de igual forma.

Y a todos los que han participado y ayudado de manera directa e indirecta en mi formación en esta experiencia llamada tesis.

Oswaldo Castillo

A la Universidad Central de Venezuela por formar en mi un profesional de calidad.

A mi tutora, Vannessa Duarte, por el apoyo brindado en el desarrollo de la presente tesis.

A mi familia, que siempre ha velado por mí.

A mis amigos, que algunos, más que amigos o amigas, son hermanos y hermanas.

Y a todos los que apoyaron este proyecto.

Gracias.

Carlos Meriño

**Castillo C. Oswaldo A.
Meriño V. Carlos E.**

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO DE ASISTENCIA ROBÓTICA DE USO ACADÉMICO PARA CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

**Tutor académico: Prof. Vannessa Duarte. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad
de Ingeniería. Escuela de Mecánica. 2015, 156 Pág.**

Palabras Clave: Robótica, Cirugía, Laparoscopia, Cinemática.

RESUMEN

En el presente trabajo se construyó un prototipo de asistente robótico para manejo de la cámara en cirugía laparoscópica. Partiendo de la investigación realizada, se definieron las directrices que el robot debía cumplir respecto a la cinemática, entre otros aspectos. Uno de los alcances era reducir el costo con respecto a otros dispositivos en el mercado, y para tal fin se implementaron tácticas de diseño que incluyeron la aplicación de contrapesos y resortes, disminuyendo los requerimientos de torque por parte de los accionamientos y aminorando los costos. Se realizó una selección de materiales y un análisis de esfuerzos sobre las piezas propuestas con ayuda del método de elementos finitos. Se desarrolló e implementó la cinemática directa y la cinemática inversa sobre el robot que además posee articulaciones no accionadas, desarrollando un programa que permite que el operador del robot pueda controlar la cámara del laparoscopio mediante seis órdenes establecidas, insertándolas en un ordenador portátil conectado al robot. El robot fue sometido a pruebas para verificar su funcionalidad satisfaciendo los objetivos propuestos e identificando al mismo tiempo aspectos deficientes o mejorables. Finalmente, con la culminación de este trabajo se desarrolla un método repetible, que permitirá el mejoramiento continuo del prototipo construido.

**Castillo C. Oswaldo A.
Meriño V. Carlos E.**

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF A ROBOTIC ARM
OF ASSISTANCE FOR ACADEMIC USE IN
LAPAROSCOPIC SURGERY**

**Advisor: Prof. Vanessa Duarte. Undergraduate Thesis. Caracas, U.C.V.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Mecánica. 2015, 156 Pg.**

Keywords: Robotics, Surgery, Laparoscopic, Kinematics.

ABSTRACT

In this project, a robotic assistant prototype was built for manipulation of the laparoscope's camera. Resulting from a research, parameters for the robot's kinematics and others aspects were defined. One of the goals was to reduce the costs compared to other devices in the market, to accomplish this some tactics of design were implemented, such as the inclusion of counterweights and springs, decreasing the requirements of torque of the motors and therefore decreasing their cost. A material selection was implemented and stress analysis was done on the parts proposed using the finite element analysis. Direct and Inverse kinematics were developed for the robot, noting that it possesses passive joints, then developing a program that allows the robot user the control of the camera with six basic orders; inserting them in a laptop. The robot was subject to tests, verifying its functionality and accomplishing the objectives, then identifying deficient and improvable aspects. Finally, with the accomplishment of this project, a repeatable method is developed, which will allow the continuous improvement of the built prototype.

TABLA DE CONTENIDOS

ACTA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE TABLAS.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xii
TABLA DE APÉNDICE.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I.....	2
1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
CAPITULO II.....	5
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. ANTECEDENTES.....	5
2.2. CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA.....	10
2.3. LA ROBÓTICA EN MANIPULACIÓN DE LA CÁMARA EN CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA.....	16
2.3.1 Grados de Libertad.....	16
2.3.2 Accionamientos.....	17
2.3.3 Tarjeta de Control.....	19
2.3.4 Cinemática del robot.....	20
2.3.5 Dinámica del robot.....	22

2.3.6 Materiales para el robot	23
2.3.7 Esfuerzos, deformaciones y estados de carga del robot.....	26
2.3.8 Criterios de falla para los materiales.....	28
2.3.9 El método de los elementos finitos	29
CAPITULO III	31
3. MARCO METODOLÓGICO	31
3.1. LA METODOLOGÍA DE FRENCH	31
3.1.1 Primera Etapa: Clasificación de la Tarea.....	33
3.1.2 Segunda Etapa: Diseño Conceptual	33
3.1.3 Tercera Etapa: Diseño de Materialización	34
3.1.4 Cuarta Etapa: Diseño de Detalle	34
3.2. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN.....	35
CAPITULO IV	36
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	36
4.1. DISEÑO MECÁNICO DEL ROBOT	36
4.2. CUERPO DEL ROBOT	37
4.2.1 Modelos propuestos	37
4.2.2 Modelo 1	37
4.2.3 Modelo 2.....	39
4.2.4 Modelo 3	42
4.2.5 Dimensiones fundamentales y funciones particulares de las piezas.....	44
4.2.6 La Base	47
4.2.7 El conjunto de la columna-base giratoria	48
4.2.8 El conjunto del eslabón 1	50
4.2.9 Conjunto del eslabón 2	51
4.2.10 Sujetador	52
4.2.11 Material.....	54

4.2.12	Análisis de esfuerzos	54
4.2.13	Simulaciones en el Conjunto Columna-Base (Acero Inoxidable 316L)	56
4.2.14	Simulaciones en el Conjunto del eslabón 1 (Acero Inoxidable 316L)	58
4.2.15	Simulaciones en el Conjunto del eslabón 2 (Acero Inoxidable 316L)	60
4.2.16	Simulaciones en el Conjunto Columna-Base (Acrílico)...	63
4.2.17	Simulaciones en el Conjunto del eslabón 1 (Acrílico)	65
4.2.18	Simulaciones en el Conjunto del eslabón 2 (Acrílico)	66
4.2.19	Comparación numérica-analítica	67
4.2.20	Discusión general de resultados del análisis de esfuerzos	68
4.3.	ACCIONAMIENTOS	69
4.4.	CONTRAPESOS	73
4.4.1	Efectos de un contrapeso	73
4.4.2	Resortes como contrapesos	75
4.4.3	Cálculo para la instalación de contrapesos y resortes	77
4.4.4	Primer cálculo: eslabón 2	80
4.4.5	Segundo cálculo: eslabón 1	82
4.5.	CONTROL	84
4.5.1	Selección de componentes electrónicos del robot	84
4.5.2	Selección de software de control	85
4.5.3	Cinemática Directa del robot	85
4.5.4	Cinemática Directa para los ángulos no controlados	90
4.5.5	Cinemática Inversa	92
4.5.6	Conexiones Computadora-Arduino-Robot	97
4.5.7	Programación Arduino-Matlab®	97
4.6.	FABRICACIÓN	99
4.7.	ENSAMBLE DEL PROTOTIPO	100

4.8. PRUEBAS EN EL PROTOTIPO	103
4.9. COSTOS	106
CAPITULO V	109
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	109
5.1. CONCLUSIONES	109
5.2. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	111
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
APÉNDICE	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1.1. Costo de asistentes robóticos en el mercado (Velazco, 2012).....	6
Tabla 2.1.2. Costos del Brazo Robótico propuesto por Velazco (2012).....	6
Tabla 2.3.1. Propiedades de materiales en general (Budynas, 2008).....	24
Tabla 2.3.2. Propiedades de plásticos en general (Budynas, 2008).....	24
Tabla 2.3.3. Propiedades del Polimetilmetacrilato (Budynas, 2008).....	25
Tabla 2.3.4. Propiedades del acero inoxidable 316L (Budynas, 2008).....	25
Tabla 4.2.1. Comparación numérica-analítica de resultados	68
Tabla 4.4.1. Resultados para la instalación de resortes y contrapesos.....	84
Tabla 4.5.1. Parámetros D-H del robot	85
Tabla 4.8.1. Pruebas del robot en un simulador de laparoscopia.....	105
Tabla 4.9.1. Tabla de costos de adquisición de componentes a nivel internacional (PMMA).....	107
Tabla 4.9.2. Tabla de costos de adquisición, ingeniería y manufactura de componentes a nivel nacional (PMMA)	107
Tabla 4.9.3. Tabla de costos de adquisición de componentes a nivel internacional (AA)	108
Tabla 4.9.4. Tabla de costos de adquisición, ingeniería y manufactura de componentes a nivel nacional (AA).....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1. Modelo propuesto por Velazco (2012).....	6
Figura 2.1.2. Matrices definidas en la Cinemática del Robot de Minor (2002)	7
Figura 2.1.3. Conexión Matlab-Roboworks (Contreras, 2013)	8
Figura 2.1.4. Brazo robótico construido por Fernandez (2002).....	9
Figura 2.2.1. Incisiones abdominales y posicionamiento del personal quirúrgico según el tipo de operación (Fernández, 2002)	10
Figura 2.2.2. Trócares y su uso en operaciones laparoscópicas.....	11
Figura 2.2.3. Óptica del Laparoscopio	12
Figura 2.2.4. La cámara del Laparoscopio y su ensamble con la óptica.....	12
Figura 2.2.5. Visión del cirujano del interior del paciente gracias a la cámara del laparoscopio	13
Figura 2.2.6. Ángulos de la Óptica	14
Figura 2.2.7. Variedad de Ópticas de un Catálogo de la marca AESCULAP ..	14
Figura 2.2.8. Espacio de trabajo de la óptica (Fernández, 2002)	15
Figura 2.2.9. Grados de libertad de un instrumento que interactúa con un trócar en laparoscopia (Fernández, 2002)	16
Figura 2.3.1. Un servomotor y sus partes	17
Figura 2.3.2. Un motor paso a paso y sus partes.....	18
Figura 2.3.3. Gráfica de la curva característica Par-Velocidad de un servomotor (PTdesign, 1999).....	18
Figura 2.3.4. Esquema de partes de una tarjeta ARDUINO UNO.....	19
Figura 2.3.5. Ejemplo del procedimiento de D-H en un robot PUMA 560 (Fu, Gonzalez, & Lee, 1988).....	21
Figura 2.3.6. Modelo representativo de un eslabón precedido por un accionamiento.....	23
Figura 2.3.7. Estado de esfuerzos en un punto de un sólido cualquiera sometido a una carga arbitraria.....	26

distribución de esfuerzos de Von Mises en donde el esfuerzo es máximo (inferior izquierdo y derecho).....	56
Figura 4.2.20. Caso: columna-base en acero inoxidable. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha).....	57
Figura 4.2.21. Esquema de fuerzas aplicadas al eslabón 1	58
Figura 4.2.22. Caso: eslabón 1 en acero inoxidable. Distribución de esfuerzos de Von Mises (izquierda superior), distribución del factor de seguridad (derecha superior) y detalle de la distribución de esfuerzos de Von Mises en donde el esfuerzo es máximo (inferior izquierdo y derecho).....	59
Figura 4.2.23. Caso: eslabón 1 en acero inoxidable. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha).....	59
Figura 4.2.24. Simulación para el caso del eslabón 1 en acero inoxidable de grosor de 6 mm, distribución de esfuerzos de Von Mises (izquierda) y distribución de factores de seguridad (derecha)...	60
Figura 4.2.25. Esquema de fuerzas aplicadas al eslabón 2	60
Figura 4.2.26. Caso: eslabón 2 en acero inoxidable. Distribución de esfuerzos de Von Mises (izquierda), distribución del factor de seguridad (derecha) y detalle de la distribución de esfuerzos de Von Mises en donde el esfuerzo es máximo (Inferior izquierda y derecha).....	61
Figura 4.2.27. Caso: eslabón 2 en acero inoxidable. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha).....	62
Figura 4.2.28. Caso: columna-base en polimetilmetacrilato. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha)	64

Figura 4.2.29. Caso: columna-base en PMMA. Distribución de esfuerzos normales máximos (superior izquierda), distribución del factor de seguridad (superior derecha) y detalle de distribución de esfuerzos normales máximos donde el esfuerzo es mayor (inferior izquierda y derecha)	63
Figura 4.2.30. Caso: eslabón 1 en PMMA. Distribución de esfuerzos normales máximos (superior izquierda), distribución del factor de seguridad (superior derecha) y detalle de la distribución de esfuerzos normales máximos en donde el esfuerzo es mayor (inferior izquierda y derecha)	65
Figura 4.2.31. Caso: eslabón 1 en polimetilmetacrilato. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha).....	65
Figura 4.2.32. Caso: eslabón 2 en PMMA. Distribución de esfuerzos normales máximos (superior izquierda), distribución del factor de seguridad (superior derecha) y detalle de la distribución de esfuerzos normales máximos en donde el esfuerzo es mayor (Inferior izquierda y derecha).....	66
Figura 4.2.33. Caso: eslabón 2 en polimetilmetacrilato. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha).....	67
Figura 4.2.34. Punto de estudio para la comparación numérica-analítica en el eslabón 1	67
Figura 4.2.35. Punto de estudio para la comparación numérica-analítica en el eslabón 2	68
Figura 4.3.1. Esquema general para el cálculo del torque “T” requerido para mantener una carga “P” estable en un sistema rotativo.....	70
Figura 4.3.2. Gráfico par-velocidad del servomotor seleccionado	72

Figura 4.4.1 Diagrama de cuerpo libre de un eslabón con carga “P” aplicada en su extremo y con carga “C” aplicada en su extremo opuesto.....	74
Figura 4.4.2. Diagrama de cuerpo libre de un eslabón incluyendo las cargas “P” y “C” más un torque variable “T”	74
Figura 4.4.3. Diagrama para un caso de ángulo arbitrario	75
Figura 4.4.4. Relación elongación-fuerza de reacción del resorte 1	76
Figura 4.4.5 Relación elongación-fuerza de reacción del resorte 2	76
Figura 4.4.6. Consideraciones de espacio para la instalación de contrapesos y resortes en el eslabón 1	77
Figura 4.4.7. Consideraciones de espacio para la instalación de contrapesos y resortes en el eslabón 2.....	77
Figura 4.4.8.Variación del peso necesario del contrapeso respecto a su distancia de instalación.....	78
Figura 4.4.9. Esquema de instalación de los resortes.....	78
Figura 4.4.10. Esquema para calcular la reacción del resorte 1 en función del ángulo del eslabón 1	79
Figura 4.4.11 Esquema para calcular la reacción del resorte 2 en función del ángulo del eslabón 2	80
Figura 4.5.1. Ejes de coordenadas del robot definidos con los parámetros D-H.....	87
Figura 4.5.2. Área de trabajo en el plano YZ del robot (con $\Theta_1=0$)	89
Figura 4.5.3 Área de trabajo proyectada en el plano X-Z del robot.....	89
Figura 4.5.4. Área de trabajo proyectada en el plano X-Y del robot	89
Figura 4.5.5. Diagrama para hallar el ángulo Θ_4	90
Figura 4.5.6. Diagrama para hallar el ángulo α_5	91
Figura 4.5.7. Brazo Robot antropomórfico (Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo, 2009)	92
Figura 4.5.8. Esquema para la definición del ángulo Θ_1 en la cinemática inversa.....	93

Figura 4.5.9. Esquema para hallar el punto “o3” y los ángulos Θ_2 y Θ_3	95
Figura 4.5.10. Tres Pruebas de las funciones de cinemática creadas en Matlab.....	96
Figura 4.5.11. Diagrama de conexiones para el robot.....	97
Figura 4.5.12. Modos de control del robot.....	98
Figura 4.5.13. Órdenes para el movimiento del laparoscopio.....	99
Figura 4.7.1. Ensamble del servomotor en la base.....	100
Figura 4.7.2. Servomotor conectado a la columna-base	100
Figura 4.7.3. Ensamble Columna-base y eslabón 1	101
Figura 4.7.4. Instalación del contrapeso y el resorte en el eslabón 1	101
Figura 4.7.5. Ensamble Eslabón 1 y Eslabón 2.....	102
Figura 4.7.6. Ensamble del sujetador	102
Figura 4.8.1. Suspensión fabricada para el giro de la base (en madera)	103
Figura 4.8.2. Acople entre el Robot construido y un simulador de Laparoscopia.....	106

TABLA DE APÉNDICE

1.1. Tabla de datos del servomotor seleccionado.....	116
1.2. Especificaciones de la tarjeta Arduino.....	118
1.3. Planos de la base.....	119
1.4. Planos de la Columna.....	120
1.5. Planos Eslabón 1.....	121
1.6. Planos Eslabón 1B.....	122
1.7. Planos Eslabón 2.....	123
1.8. Planos Eslabón 2B.....	124
1.9. Planos de Piezas del Sujetador.....	125
1.10. Función Matlab para establecer una matriz de transformación D-H.....	126
1.11. Función Matlab para la cinemática directa del robot.....	127
1.12. Función Matlab para la cinemática inversa del robot.....	128
1.13. Rutina Matlab para graficar el área de trabajo del robot.....	130
1.14. Rutina Matlab para el control del robot.....	132

INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos, la robótica ha evolucionado en la ejecución de todo tipo de labores debido al beneficio de la automatización de actividades hechas anteriormente de manera manual, extendiéndose así a campos más diversos y específicos, como la medicina, que ha presentado grandes avances en cuanto a la realización de distintos procedimientos quirúrgicos gracias a la implementación de la misma. Tal es el caso de la cirugía laparoscópica, donde la precisión que brindan los asistentes robóticos ayuda a cirujanos y operadores a realizar funciones repetitivas, aumentando la calidad de las operaciones y disminuyendo el desgaste humano.

La cirugía de laparoscopia se caracteriza por ser mínimamente invasiva y es un procedimiento bastante común. Se realiza a través de pequeñas incisiones en la cavidad pélvico-abdominal del paciente, donde se utiliza un laparoscopio como instrumento de observación, éste tiene en su extremo una cámara que se encargará de captar las imágenes del área de trabajo, y luego las transmite a una pantalla visible para el cirujano. La tarea de manipular la cámara es entonces tediosa, debido a que la misma requiere frecuentemente de posiciones estáticas de larga duración, además de movimientos suaves, cortos y de alta precisión.

Es por esto que, en la presente investigación, se propone el diseño y la construcción de un asistente robótico para la manipulación de la cámara del laparoscopio, controlado por comandos básicos y que cumpla con los movimientos necesarios para una cirugía sencilla o un ejercicio de índole académico.

Esta investigación está dividida en cinco capítulos. En el primero se expondrán los fundamentos de la investigación, en donde será planteado el problema, los alcances y los objetivos. En el segundo se establece un marco teórico, presentando los antecedentes y los conceptos mínimos necesarios para el desarrollo de este trabajo. En el tercero se define la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto. En el cuarto capítulo se encuentran los resultados obtenidos para finalmente presentar en el quinto capítulo las conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO I

1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante una operación de laparoscopia, la manipulación de la cámara debe ser cuidadosa y precisa, evitando movimientos indebidos, ya que de otra forma ocurrirían choques con órganos internos u otros tejidos. Durante la cirugía surgen inconvenientes como, por ejemplo, que el operador considere las órdenes dadas por el cirujano de manera subjetiva, llevando a que el movimiento que éste realiza no siempre sea el que el cirujano necesita, o que el operador sea muy brusco en el manejo de la cámara, generando lesiones en el paciente que complican su proceso de recuperación, además, una operación de laparoscopia se prolonga hasta cuatro horas o más, por lo que la actividad hecha por el operador del laparoscopio resulta fatigante, causando temblores o espasmos por las prolongadas posiciones estacionarias (Allaf, y otros, 1998). Todos estos factores arriesgan el éxito, eficiencia y calidad de la operación, ya que el desempeño del cirujano dependerá directamente de la calidad de las imágenes transmitidas por la cámara, las cuales deben captar todas las zonas implicadas en el área de trabajo del cirujano, con la menor cantidad de vibraciones y distorsiones posibles.

Es por ello que un asistente robótico representa una mejora parcial o total de todos estos problemas, ya que un robot no experimenta fatiga ante trabajos prolongados y la calidad de sus movimientos puede ser igual o mayor que la de un brazo humano.

El diseño de un prototipo de asistente robótico con un fin académico proporciona principalmente tres ventajas; la primera ventaja radica en el planteamiento de una metodología verificada para el diseño y construcción de un asistente robótico con capacidades adecuadas, que en un futuro pueda ser empleado en situaciones reales de cirugía. La segunda ventaja recae en que gracias a la

existencia de un modelo real y manejable, se podrá implementar un plan de funcionamiento dirigido a especialistas en el área, con el fin de posibilitar la capacitación de los mismos en el manejo del asistente robótico y usarlo además para asistir en el entrenamiento de maniobras de cirugía laparoscópica, ya sea en casos reales o simulados. La tercera ventaja consiste en el impacto económico que traerá este asistente, ya que, los costos de adquisición y mantenimiento de los desarrollados fuera del país son altos, y uno fabricado con recursos nacionales contribuye a un descenso importante en los costos.

1.2. ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances y limitaciones planteados en este trabajo fueron los siguientes:

- Se realizará un análisis estático del sistema mecánico apoyado con el modelado y simulación del mismo en un programa de Diseño Asistido por Computadora (CAD), aplicando métodos de análisis de esfuerzos en el diseño a plantear.
- Este proyecto estará limitado por la disponibilidad de los recursos durante su desarrollo, condicionando factores como su complejidad, su peso, su tamaño, resistencia a cargas estáticas, la fabricación de sus piezas (mano de obra y maquinaria), tiempo de ejecución, entre otros.
- Los componentes mecánicos y electrónicos a adquirir estarán ajustados a la disponibilidad de inventario de proveedores a nivel nacional y a la disposición económica brindada por el Instituto Nacional de Bioingeniería (INABIO), institución promotora de este proyecto.
- Se propondrá un prototipo de asistente robótico con fines académicos, que permita el movimiento de la cámara de laparoscopia, adaptándose a las limitaciones mencionadas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Desarrollar un asistente robótico de uso académico para la manipulación de la cámara de un laparoscopio durante cirugías mínimamente invasivas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las funciones y movimientos específicos del asistente robótico.
- Determinar el número de grados de libertad necesarios para el diseño.
- Proponer una matriz de soluciones de diseño que satisfagan las condiciones de manipulación de un laparoscopio.
- Identificar y evaluar parámetros para el desarrollo de los modelos planteados.
- Diseñar un prototipo de robot que cumpla con las necesidades planteadas.
- Analizar el sistema considerando elasticidad lineal, en régimen estático.
- Evaluar la cinemática del sistema.
- Construir un prototipo del modelo seleccionado.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

Existen cuatro modelos de asistentes robóticos para laparoscopia que han causado un gran impacto en los últimos años, estos son: AESOP, Endoassist, Da Vinci y Zeus sistemas usados por los cirujanos para mejorar la eficiencia de sus operaciones (Córdova & Ballantyne, 2003). AESOP y Endoassist reemplazan al camarógrafo y proveen una plataforma estable para la cámara de video. El robot Da Vinci provee a los cirujanos de una plataforma de simulación ubicada a distancia del paciente, que permite un movimiento preciso de las herramientas que usan, de tal manera que los movimientos son imitados por otra plataforma que los ejecuta, este sistema perfecciona los movimientos del cirujano, de tal manera que no imita las vibraciones y otros movimientos indeseados (Villavicencio, 2006). Por otra parte, el robot Zeus consta de tres brazos, de los cuales uno es el encargado de controlar la cámara mediante ordenes dictadas con la voz o mediante una estación remota, de manera manual (Valero, y otros, 2011).

Se han desarrollado estudios respecto a la posibilidad de la robótica en materia de laporoscopia, concluyendo que existe un gran potencial para el mejoramiento de la calidad y tiempo de ejecucion de estos procedimientos, evaluando aspectos como el posicionamiento de los instrumentos durante una laparoscopia (trócares, pinzas, y otros), y la posible posición de los asistentes robóticos en el quirófano (Cadière, et al., 2001).

En el informe de pasantias en el Instituto Nacional de Bioingeniería, Velazco (2012) propone el diseño de un asistente para el control y posicionamiento de la cámara en cirugía laparoscópica, el cual posee 2 grados de libertad (Figura 2.1.1), siendo tomados en cuenta diversos factores, como la selección de los accionamientos y el factor económico. En este informe se realiza un estudio de mercado,

especificando el costo de adquisición de diversos modelos de robots aplicados en medicina (Tabla 2.1.1). Además realizó una investigación en el mercado nacional, con el fin de definir el costo de su propuesta de modelo, cuyos precios para el año 2012 se exponen en la

Tabla 2.1.2.

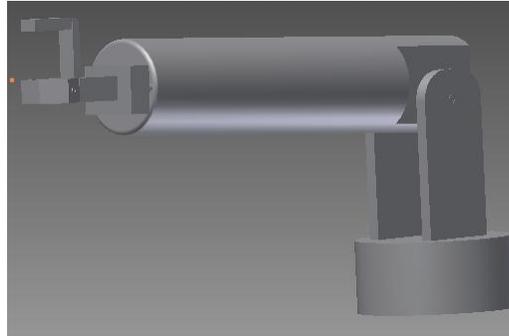


Figura 2.1.1. Modelo propuesto por Velazco (2012)

Tabla 2.1.1. Costo de asistentes robóticos en el mercado (Velazco, 2012)

Asistente robótico	Costo
AESOP	80.000\$
Endoassist	95.000\$
Da Vinci	1.500.000\$
Zeus	975.000\$

Tabla 2.1.2. Costos del Brazo Robótico propuesto por Velazco (2012)

Descripción	Cantidad	Costo (Bs)
Resina epóxica	500 ml	550
Mecanismo piñón- cremallera	1	2500
Perno	1	6
Molde de yeso	3	3000
Servomotor Hitec H-311	1	210
Microservo Hitec HS-55	1	280
Yeso odontológico rosado	1kg	80
Cinta transportadora	1	10
Montaje para servo	1	14

Tornillos Allen	2	16
Total		6596

Minor (2002) y un equipo de investigadores diseñaron, construyeron y probaron un robot de cinco grados de libertad para cirugía laparoscópica, tomando en cuenta las necesidades de espacio, movimiento y control requeridos por los cirujanos. El mismo es controlado a 10 metros del cirujano por un operador que recibe instrucciones verbales del mismo, y está hecho en su mayoría de aluminio con un peso de 20 Kg. En el trabajo se desarrollan los diversos criterios de diseño, tomando en cuenta electrónica, movilidad, selección de materiales y transmisiones. Además, se desarrolla la cinemática del robot, definiendo matrices de posición y desplazamiento (Figura 2.1.2) que describen la posición en el espacio de cada articulación.

Articulación 1

$$M1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Gira respecto a } Z_0$$

Articulación 3

$$M3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & l2 \\ 0 & \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Gira respecto a } X_2 \text{ y está desplazada } l2 \text{ sobre } Y_1$$

Articulación 2

$$M2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & l1 \\ 0 & \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Gira respecto a } X_1 \text{ y está desplazada } l1 \text{ sobre } Z_0$$

Articulación 4

$$M4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & \sin\theta_4 & 0 & 0 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Sólo gira respecto a } Z_3$$

Articulación 5

$$M5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Existe sólo un desplazamiento lineal } d1 \text{ sobre el eje } Y_3$$

Figura 2.1.2. Matrices definidas en la Cinemática del Robot de Minor (2002)

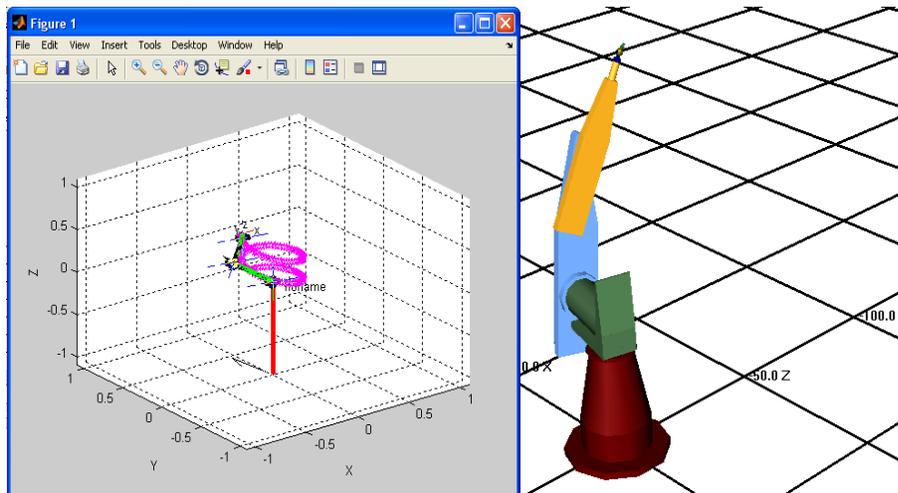


Figura 2.1.3. Conexión Matlab-Roboworks (Contreras, 2013)

En el informe de pasantías realizadas en el Instituto Nacional de Bioingeniería Contreras (2013), realiza el estudio de cinemática directa e inversa partiendo de un modelo de robot en serie PUMA, y aplicando la metodología de Denavit-Hartenberg. Contreras (2013) hace uso de programas como RoboWorks®, Labview® y Matlab® incluyendo enlaces entre ellos (Figura 2.1.3). Los primeros dos programas fueron utilizados con fines de animación y visualización gráfica de movimientos mecánicos simples y el último para cálculo de trayectorias. La cinemática inversa fue calculada a partir de los resultados de la cinemática directa, usando el programa Matlab®.

Muñoz (2001), junto con un equipo de investigadores, desarrolló un robot basado en un manipulador industrial y fue probado utilizando perros y tejidos in vitro, siendo controlado por voz o tele operación. Fueron tomados en cuenta los criterios de selección de componentes electrónicos, la interfaz de comunicación y control, entre otros. El modelo diseñado fue sometido a pruebas que comparaban la posición deseada con la posición real del efector final, concluyendo que no se produjeron errores significativos.

Pérez (2011) en su trabajo de maestría expone en detalle todas las fases de diseño, construcción y análisis cinemático de una mano robótica, en su trabajo están incluidos criterios de desarrollo y selección de ideas, metodología, cálculos, programas, métodos de fabricación, entre otros.

Fernández (2002) en su tesis doctoral detalla el diseño, procedimiento y construcción de un brazo robótico de cinco grados de libertad, de los cuales dos forman parte de una muñeca con articulaciones pasivas (Figura 2.1.4). Dicho robot fue diseñado con el único propósito de manipular y controlar la cámara del laparoscopio, tomando en cuenta el problema de la orientación y el movimiento de la cámara al pivotar con el trócar, además, el diseño contempla el posicionamiento del robot en los distintos tipos de cirugía analizados en el trabajo, tomando en cuenta la posibilidad de obstáculos y el espacio que el mismo necesita para funcionar, sin dejar de cumplir con los requerimientos de la cámara del laparoscopio.



Figura 2.1.4. Brazo robótico construido por Fernandez (2002)

2.2. CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

La cirugía laparoscópica es un procedimiento mínimamente invasivo que permite observar y operar el interior de la cavidad pélvico-abdominal mediante la inserción de una serie de instrumentos a través de pequeñas incisiones (no mayores a 20 mm) que varían en posición y cantidad según el tipo de operación que se ejecute (Fernández, 2002) (Figura 2.2.1), estas incisiones se realizan utilizando dispositivos denominados trócar, a través de los cuales se insertan los instrumentos a usar durante la operación (Figura 2.2.2).

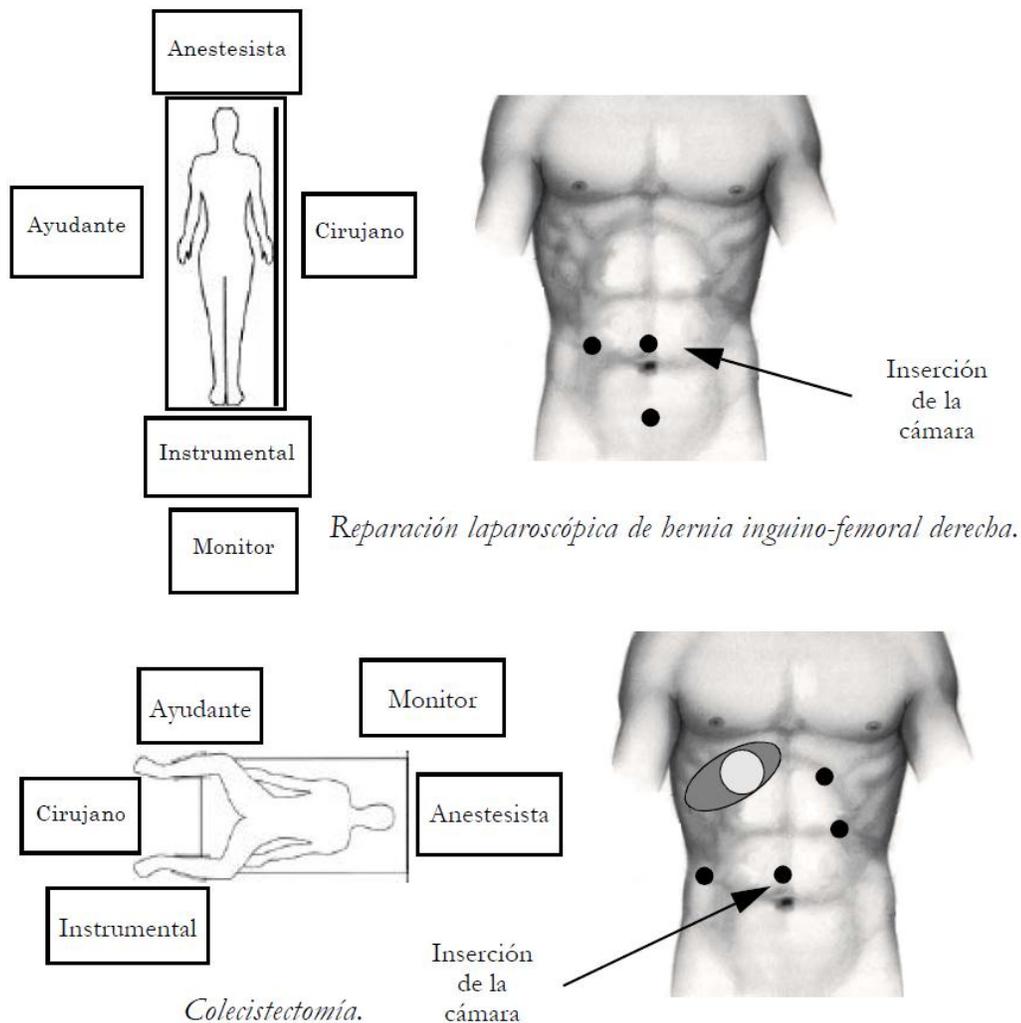


Figura 2.2.1. Incisiones abdominales y posicionamiento del personal quirúrgico según el tipo de operación (Fernández, 2002)



(a) Trócares



*(b) Operación laparoscópica
(Villavicencio, 2006)*

Figura 2.2.2. Trócares y su uso en operaciones laparoscópicas

La primera incisión generalmente se realiza en la cicatriz umbilical, y es a través de ella por donde se introduce el instrumento más importante de todos: la óptica de la cámara del laparoscopio (Figura 2.2.3), también conocida como visor, la cual permite al cirujano observar todo lo que ocurrirá en el interior de la cavidad abdominal durante la operación. A través de la óptica se transmite luz por medio de fibra óptica, con el fin de iluminar el interior de la zona que se está operando, además, se transmite la imagen captada desde un extremo de la óptica hasta el otro a través de lentes, en donde la cámara del laparoscopio allí conectada la recibe y transmite hacia una pantalla, visible al cirujano (Figura 2.2.4. a y b) (Figura 2.2.5). Todos los elementos del visor están conectados a la torre del laparoscopio, en donde se agrupa todo el instrumental necesario para energizar y regular los componentes del laparoscopio (Zambrano & Piñango, 2003).

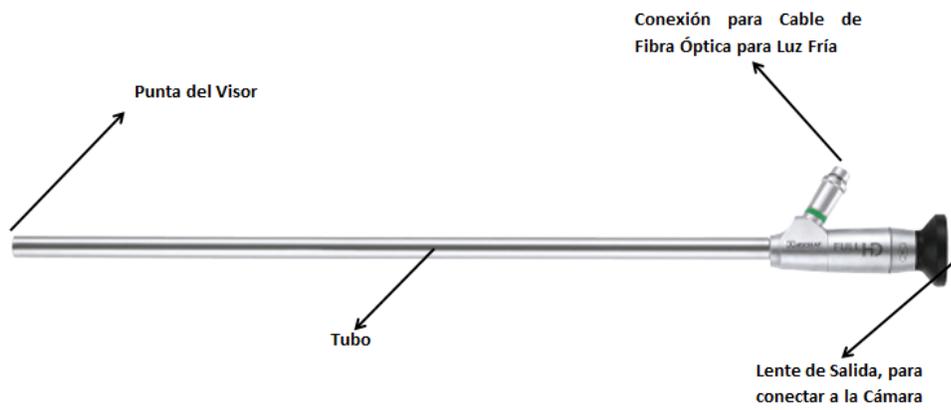
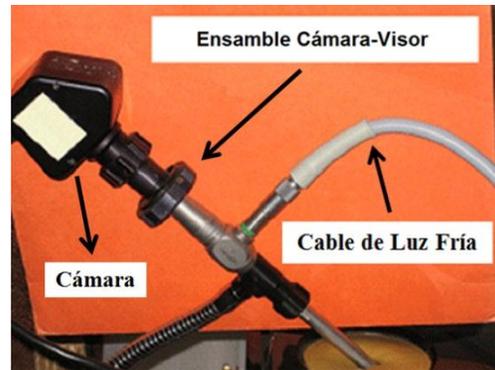


Figura 2.2.3. Óptica del Laparoscopio



(a) Cámara del Laparoscopio



(b) Conjunto Cámara-Óptica

Figura 2.2.4. La cámara del Laparoscopio y su ensamble con la óptica

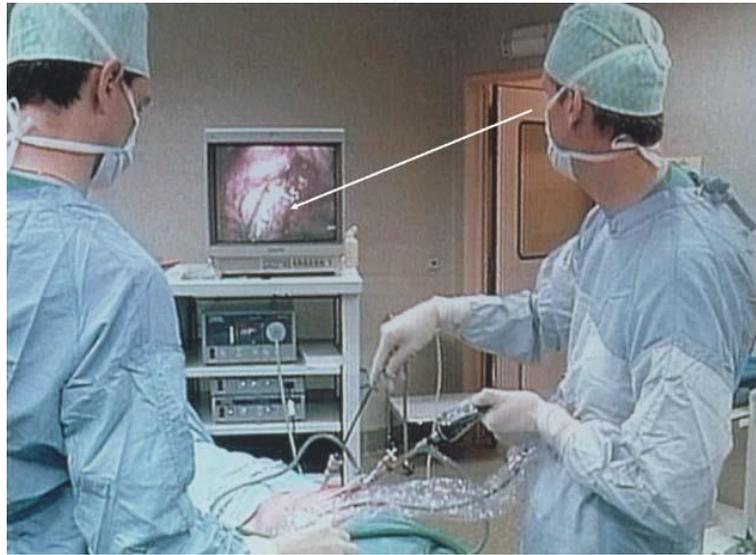


Figura 2.2.5. Visión del cirujano del interior del paciente gracias a la cámara del laparoscopia

Existen diferentes tipos de laparoscopia, tales como la colecistectomía, la funduplicatura gastroesofágica, la adrenalectomía, entre otros, y cada una impone diferentes requerimientos en cuanto a las dimensiones y especificaciones de todo el instrumental de laparoscopia, en particular de la óptica. La dimensión de la óptica varía según el fabricante, entre los 18 y 30 cm de longitud y 2 y 10 mm de diámetro. Otra característica notable de la óptica es el ángulo que forma la línea de visión con el eje del visor, existiendo ópticas de 0, 30, 45 o 90 grados (Figura 2.2.6), siendo las dos primeras las más usadas (García, Arias, & Valencia, 2011), dotando a los cirujanos de la posibilidad de emplear la óptica con el ángulo y dimensión que más se adapte a su necesidad (Miquilarena & Rodríguez, 2015). En la Figura 2.2.7 se puede apreciar parte de un catálogo de la marca AESCULAP que muestra los distintos tipos de óptica de los que disponen.

La calidad de la imagen transmitida por la óptica hasta la pantalla que observa el cirujano influye en el éxito de la operación, haciendo del tema de la manipulación de la cámara un punto crucial (Miquilarena & Rodríguez, 2015), ya que la óptica es maniobrada desde la cámara por un operador que recibe órdenes directas del cirujano,

y la misma requiere de movimientos muy precisos y de posiciones estáticas de larga duración, además de exigir suma precaución respecto al contacto con los órganos internos, haciendo que el operador sea propenso a cometer errores y sufrir de fatiga y temblores, afectando directamente la calidad y nitidez de la imagen (Fernández, 2002).

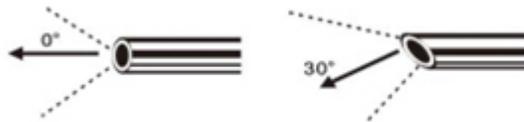


Figura 2.2.6. Ángulos de la Óptica

ITEM NO.	DESCRIPTION	DIAMETER	VIEWING DIRECTION	LENGTH	STEAM AUTOCLAVE	STERRAD®
PE030A	Needlescopic, Semi-rigid	2 mm	0°	30 cm	•	•
PE032A	Needlescopic, Semi-rigid	2.5 mm	0°	22 cm	•	•
PE485A	Full HD Endoscope	4 mm	0°	180 mm	•	•
PE505A	Full HD Endoscope	4 mm	30°	180 mm	•	•
PE522A	Full HD Endoscope	4 mm	0°	300 mm	•	•
PE508A	Full HD Endoscope	5 mm	30°	300 mm	•	•
PE590A	Full Screen Technology	5 mm	0°	30 cm	•	•
PE610A	Full Screen Technology	5 mm	30°	30 cm	•	•
PE889A	Full Screen Technology	10 mm	0°	33 cm	•	•
PE909A	Full Screen Technology	10 mm	30°	33 cm	•	•
PE969A	Full Screen Technology	10 mm	45°	33 cm	•	•
PE898A	Operative Laparoscope, with working channel for 5 mm instruments	10 mm	0°	27 cm	•	•

Figura 2.2.7. Variedad de Ópticas de un Catálogo de la marca AESCULAP

Durante una operación, la manipulación de la cámara implica que la óptica se mueva dentro de un espacio conocido como espacio de trabajo de la óptica (Muñoz, y otros, 2001), que se define como el espacio ocupado por el conjunto de posiciones que este instrumento cumple durante las operaciones laparoscópicas (Figura 2.2.8). Investigadores como Minor (2002), Muñoz (2001) y Fernandez (2002) concuerdan en que dicho espacio está contenido dentro de un cono recto invertido, de ángulo de entre 45 y 75 grados respecto a un eje perpendicular a la inserción a la cavidad

abdominal, teniendo como vértice a la entrada del trócar, cuya presencia limita los grados de libertad de la óptica, funcionando como un pivote o fulcro. Los grados de libertad de la óptica se limitan entonces a cuatro: dos de rotación respecto al fulcro, uno de rotación respecto a su propio eje y uno de desplazamiento a lo largo de su eje (Figura 2.2.9) (Fernández, 2002).

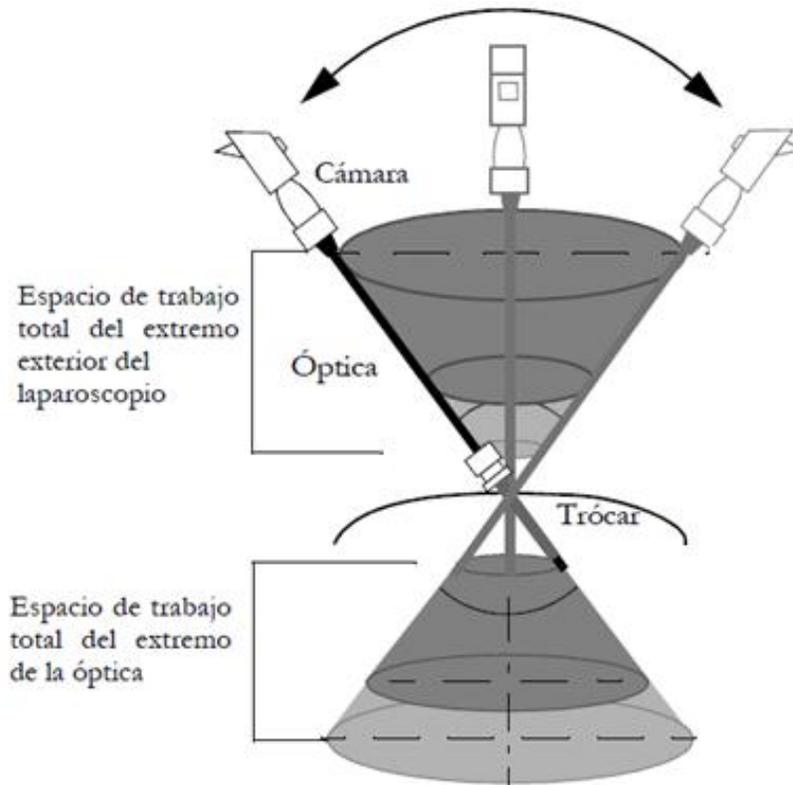


Figura 2.2.8. Espacio de trabajo de la óptica (Fernández, 2002)

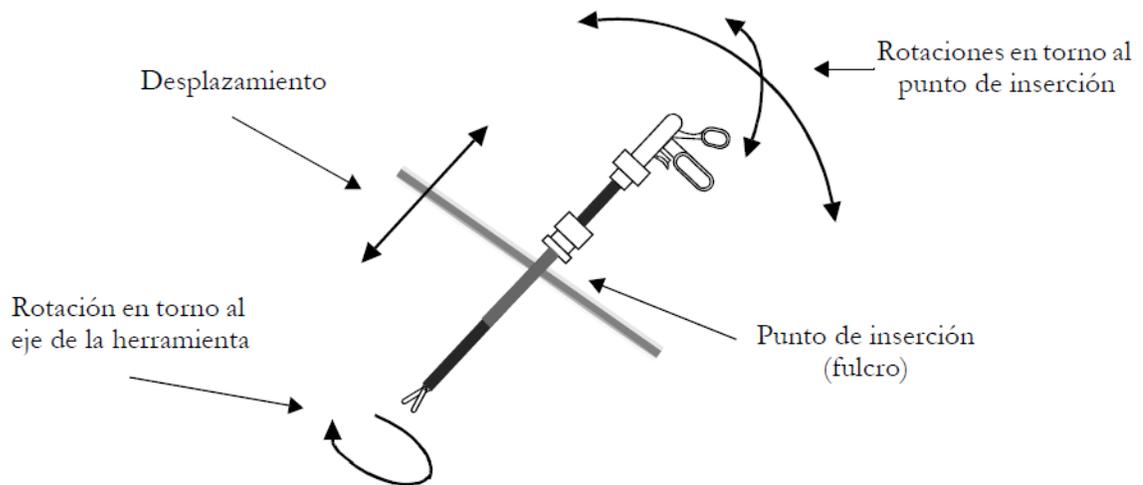


Figura 2.2.9. Grados de libertad de un instrumento que interactúa con un trócar en laparoscopia (Fernández, 2002)

2.3. LA ROBÓTICA EN MANIPULACIÓN DE LA CÁMARA EN CIRUGÍA LAPAROSCÓPICA

Para el diseño de un robot que manipule la cámara del laparoscopio, es necesario definir los siguientes aspectos.

2.3.1 Grados de Libertad

Lo que principalmente debe satisfacer el brazo robótico es el área de trabajo de la cámara (Minor y otros (2002)), por lo que debe definirse la cantidad de grados de libertad que dicho robot necesitaría. Un grado de libertad se refiere a uno de los seis movimientos posibles en el espacio, tres axiales y tres rotacionales, por otra parte, a un grado de libertad controlado se le denomina también grado de libertad accionado, debido a que en su línea de acción está instalado un accionamiento, mientras que un grado de libertad no controlado se denomina grado de libertad pasivo, ya que en su línea de acción sólo existen restricciones mecánicas de movimiento (Beer, 2010), por ejemplo, una articulación, restringe cinco grados de

libertad en el espacio, permitiendo únicamente rotación alrededor de un eje. Entre dos accionamientos, o dos articulaciones, o un accionamiento y una articulación, existe un eslabón, teniendo que una cadena de eslabones conforman el cuerpo del brazo robótico, con un sujetador al final del último eslabón, encargado de sostener la cámara del laparoscopio (Fernández, 2002).

2.3.2 Accionamientos

Los robots en cirugía laparoscópica utilizan principalmente accionamientos de naturaleza eléctrica, conocidos como motores eléctricos, por su gran potencia y pequeño tamaño (Fernández, 2002). Según su modo de alimentación, los accionamientos eléctricos se dividen en motores de corriente alterna (CA) o de corriente directa (CD), según el movimiento que generan se clasifican en axiales o rotativos, y según su modo de control se pueden dividir en servomotores o motores de paso a paso (Mott, 2006).

Un servomotor contiene un motor eléctrico (puede ser CD o CA) acoplado a una transmisión, que en su salida está alineado con un sensor, generalmente un potenciómetro. Tanto el potenciómetro como el motor están conectados a un circuito de control, que mediante la medición que recibe del potenciómetro, controla la posición angular del eje de salida (Figura 2.3.1) (Mott, 2006).

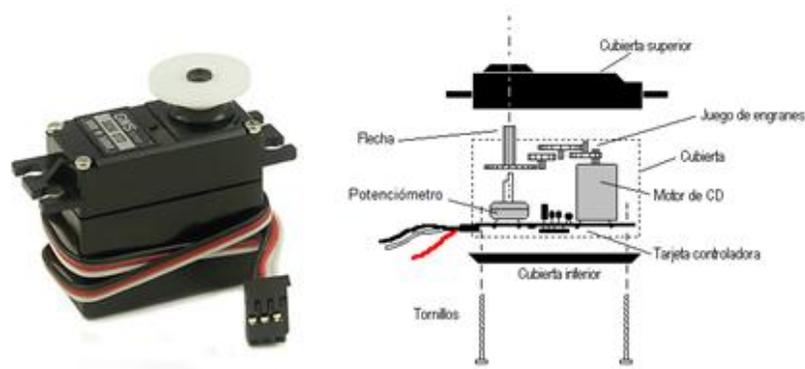


Figura 2.3.1. Un servomotor y sus partes

Un motor de paso a paso consiste de un rotor compuesto de imanes permanentes, y un estator conformado por una serie de bobinados, que según su alimentación generan un campo electromagnético. El rotor gira cuando se varía el campo electromagnético generado en el estator (Figura 2.3.2) (Mott, 2006).

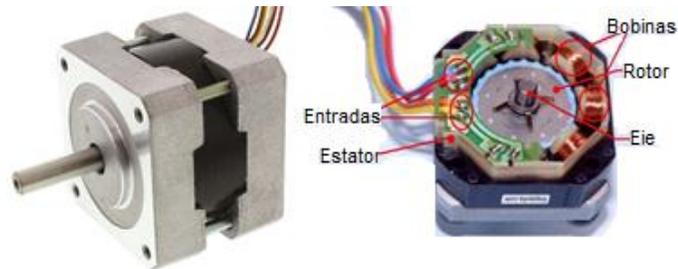


Figura 2.3.2. Un motor paso a paso y sus partes

Independientemente del tipo de accionamiento eléctrico, el fabricante generalmente desarrolla una tabla de datos y especificaciones, que incluyen parámetros importantes como torque, amperaje, tensión, velocidad angular, dimensiones, entre otros, incluyendo gráficas de curvas que relacionan estas magnitudes, denominadas curvas características del motor (Figura 2.3.3). El torque suele ser reportado en Kgf*cm, en donde 1 Kgf equivale a 9.8 N.

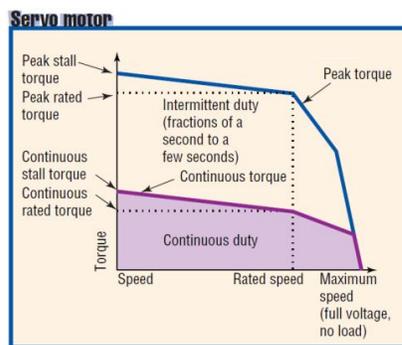


Figura 2.3.3. Gráfica de la curva característica Par-Velocidad de un servomotor (PTdesign, 2015)

El torque generado por los accionamientos eléctricos está relacionado con la corriente que circula a través de ellos. En particular, el torque pico de parada, conocido como “peak stall torque” en inglés, es el mayor torque que genera el motor ante una carga que no permita el movimiento de su eje, en estas condiciones, la cantidad de corriente que circula en el motor es máxima, por lo que el calentamiento del motor es considerable. Los fabricantes suelen recomendar que este torque no sea aplicado por más de un par de segundos, y recomiendan que para aplicaciones de trabajo continuo, el torque generado por el motor no exceda el valor de un tercio del torque de parada máximo (PTdesign, 2015) .

2.3.3 Tarjeta de Control

Lo accionamientos se controlan con tarjetas electrónicas programables, éstas se encargan de dictar las instrucciones que los mismos deben cumplir. Como se puede apreciar en la Figura 2.3.4, las tarjetas tienen incorporadas una serie de salidas (O) y entradas (I) digitales y/o analógicas para propósitos de control y/o de lectura de datos y variables (Perez, 2011) además, generalmente poseen un puerto USB, con el fin de establecer una conexión entre la tarjeta y una computadora y poder programarla y obtener información de la misma. Algunas casas que fabrican tarjetas de control son: BeagleBone, Raspberry Pi, Arduino, entre otros.

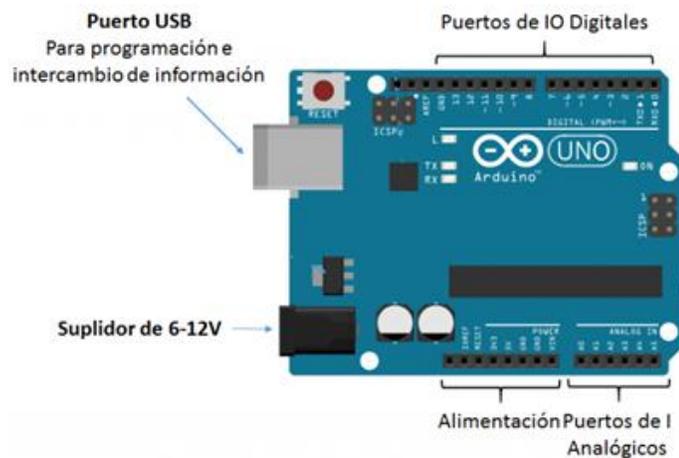


Figura 2.3.4. Esquema de partes de una tarjeta ARDUINO UNO

2.3.4 Cinemática del robot

En la programación de la tarjeta electrónica para el control de los accionamientos se toma en cuenta la cinemática del robot, la cual debe satisfacer el área de trabajo de la cámara del laparoscopio, siendo necesario entonces el cálculo de los ángulos y posiciones que los accionamientos deben cumplir. Primeramente se realiza un estudio de cinemática directa, con el fin de conocer la posición del extremo del robot para una cierta configuración de los accionamientos, y para ello se emplea la convención y parámetros de Denavit-Hartenberg (D-H) (Fu, Gonzalez, & Lee, 1988). Posteriormente, se realiza el estudio de cinemática inversa, donde se calcula el conjunto de posiciones y ángulos que los accionamientos deben adoptar para llevar a cabo una trayectoria, para ello existen métodos como el de transformación inversa, métodos geométricos, entre otros (Contreras, 2013).

La representación D-H de un cuerpo rígido utiliza una serie de transformaciones homogéneas entre varios sistemas de coordenadas para establecer la posición y orientación del último elemento del brazo robot (Figura 2.3.5). Primeramente se establecen los ejes de coordenadas (x_i , y_i , z_i) ortonormales, dextrógiros, en cada articulación, numerándolas de forma ascendente, iniciando desde la base hasta la última articulación, donde $i = 1, 2, \dots, n$; $i = 0$ será reservado para el sistema de coordenadas inercial, colocado en la base del robot, con el eje z_0 alineado con el eje de giro de la primera articulación (Fu, Gonzalez, & Lee, 1988). Cada sistema de coordenadas se establece según la siguiente convención:

- El eje z_{i-1} yace a lo largo del eje de la articulación.
- El eje x_i es normal al eje z_{i-1} y apunta hacia afuera de él.
- El eje y_i completa el sistema de coordenadas dextrógiro según se requiera.

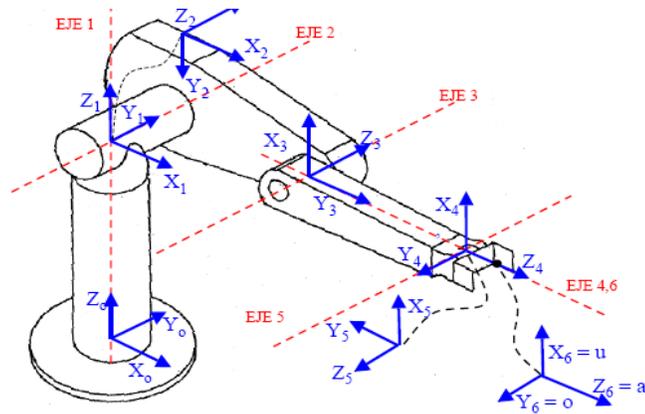


Figura 2.3.5. Ejemplo del procedimiento de D-H en un robot PUMA 560 (Fu, Gonzalez, & Lee, 1988)

Posteriormente se establecen los cuatro parámetros geométricos asociados a cada elemento, los cuales son:

- (a) θ_i : Es el ángulo de la articulación del eje x_{i-1} al eje x_i respecto del eje z_{i-1} (utilizando la regla de la mano derecha).
- (b) d_i : es la distancia desde el origen del sistema de coordenadas $(i-1)$ -ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i a lo largo del eje z_{i-1} .
- (c) a_i : es la distancia de separación desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i -ésimo a lo largo del eje x_i (o la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i).
- (d) α_i : es el ángulo de separación del eje z_{i-1} al eje z_i respecto del eje x_i (utilizando la regla de la mano derecha).

Para una articulación giratoria d_i , a_i y α_i son los parámetros de articulación y permanecen constantes para un robot, mientras que θ_i es la variable de articulación que cambia cuando el elemento i se mueve (o gira) con respecto al elemento $i-1$ (Fu, Gonzalez, & Lee, 1988). Con estos parámetros se puede entonces definir la matriz de transformación de cada articulación como indica la ecuación (1).

$${}^{i-1}A_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (1)}$$

La matriz de transformación (T) entre la base y el extremo del robot será la multiplicación de las diferentes matrices de transformación entre el sistema 0 y el sistema n, como en la ecuación Ec. (2).

$$T = {}^0A_1 * {}^0A_2 * \dots * {}^{n-1}A_n = {}^0A_n \quad \text{Ec. (2)}$$

La posición del extremo del robot con respecto al marco inercial, es decir la base, viene dada entonces por el vector de posición **P**, definido en la siguiente ecuación Ec. (3), en donde el valor “1” no es más que un valor representativo de un punto en el espacio.

$$\vec{P} = T * \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (3)}$$

2.3.5 Dinámica del robot

Aparte de cumplir con el área de trabajo y con la cinemática, los accionamientos del robot deben ser capaces de levantar y mantener el peso de la cámara y los componentes asociados a ella, además de la estructura de eslabones y otros elementos del robot. En el caso de un accionamiento rotativo, el torque generado por el motor debe ser igual a la sumatoria de los momentos del sistema, adicionalmente, dicho torque debe ser mayor que la sumatoria de los momentos si se quiere generar movimiento (Beer, 2010).

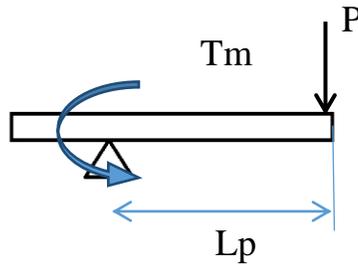


Figura 2.3.6. Modelo representativo de un eslabón precedido por un accionamiento

La Figura 2.3.6, es una representación simplificada de un eslabón accionado en uno de sus extremos. El efecto del accionamiento se representa mediante el torque “ T_m ”, y el peso de la cámara más otros elementos se representan con el peso concentrado “ P ”, aplicado a una distancia “ L_p ” del accionamiento. Si se quiere que el sistema esté en equilibrio se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$\sum M = 0 \rightarrow T_m = P * L_p \quad \text{Ec. (4)}$$

2.3.6 Materiales para el robot

En la ecuación (4) se puede apreciar que una alta carga demandará motores con alto torque y por ende, de alto costo, por lo que es necesario que los componentes del robot sean de un material ligero, pero funcional, con un diseño que no admita falla mecánica por ruptura de material (Perez, 2011). Materiales como el aluminio se caracterizan por una baja densidad, otros, como el acero inoxidable y el acero quirúrgico son preferidos por su resistencia a la corrosión, pero además existen los plásticos de ingeniería, que alcanzan resistencias muy altas siendo al mismo tiempo muy livianos y resistentes a la corrosión (Budynas, 2008).

Todos los materiales poseen propiedades que los caracterizan. Tanto plásticos como metales pueden tener un comportamiento dúctil o frágil. Un material es considerado dúctil cuando su deformación al sufrir fractura es mayor a 0.05, además de admitir deformaciones plásticas apreciables, mientras que un material frágil presenta una deformación menor a 0.05 al sufrir fractura, mostrando poca o ninguna

deformación plástica (Budynas, 2008). En la Tabla 2.3.1 se muestran algunas propiedades de materiales en general, mientras que en la Tabla 2.3.2 se muestran ciertas propiedades de algunos plásticos.

Tabla 2.3.1. Propiedades de materiales en general (Budynas, 2008)

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de rigidez G		Relación de Poisson ν	Peso específico w		
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa		lbf/pulg ³	lbf/ft ³	kN/m ³
Abeto Douglas	1.6	11.0	0.6	4.1	0.33	0.016	28	4.3
Acero al carbono	30.0	207.0	11.5	79.3	0.292	0.282	487	76.5
Acero al níquel	30.0	207.0	11.5	79.3	0.291	0.280	484	76.0
Acero inoxidable (18-8)	27.6	190.0	10.6	73.1	0.305	0.280	484	76.0
Aleaciones de titanio	16.5	114.0	6.2	42.4	0.340	0.160	276	43.4
Aluminio (todas las aleaciones)	10.4	71.7	3.9	26.9	0.333	0.098	169	26.6
Bronce fosforado	16.1	111.0	6.0	41.4	0.349	0.295	510	80.1
Cobre	17.2	119.0	6.49	44.7	0.326	0.322	556	87.3
Cobre al berilio	18.0	124.0	7.0	48.3	0.285	0.297	513	80.6
Hierro fundido (gris)	14.5	100.0	6.0	41.4	0.211	0.260	450	70.6
Inconel	31.0	214.0	11.0	75.8	0.290	0.307	530	83.3
Latón	15.4	106.0	5.82	40.1	0.324	0.309	534	83.8
Magnesio	6.5	44.8	2.4	16.5	0.350	0.065	112	17.6
Molibdeno	48.0	331.0	17.0	117.0	0.307	0.368	636	100.0
Monel metal	26.0	179.0	9.5	65.5	0.320	0.319	551	86.6
Plata niquelada	18.5	127.0	7.0	48.3	0.322	0.316	546	85.8
Plomo	5.3	36.5	1.9	13.1	0.425	0.411	710	111.5
Vidrio	6.7	46.2	2.7	18.6	0.245	0.094	162	25.4

Tabla 2.3.2. Propiedades de plásticos en general (Budynas, 2008)

Nombre	S_{yT} kpsi	E_f Mpsi	Dureza Rockwell	Elongación %	Estabilidad dimensional	Resistencia térmica	Resistencia química	Procesamiento
Grupo ABS	2-8	0.10-0.37	60-110R	3-50	Buena	*	Aceptable	EMST
Grupo acetal	8-10	0.41-0.52	80-94M	40-60	Excelente	Buena	Alta	M
Acrílico	5-10	0.20-0.47	92-110M	3-75	Alta	*	Aceptable	EMS
Grupo fluoroplástico	0.50-7	...	50-80D	100-300	Alta	Excelente	Excelente	MPR†
Nailon	8-14	0.18-0.45	112-120R	10-200	Pobre	Pobre	Buena	CEM
Óxido de fenileno	7-18	0.35-0.92	115R, 106L	5-60	Excelente	Buena	Aceptable	EFM
Policarbonato	8-16	0.34-0.86	62-91M	10-125	Excelente	Excelente	Aceptable	EMS
Poliéster	8-18	0.28-1.6	65-90M	1-300	Excelente	Pobre	Excelente	CLMR
Polimida	6-50	...	88-120M	Muy baja	Excelente	Excelente	Excelente†	CLMP
Sulfuro de polifenileno	14-19	0.11	122R	1.0	Buena	Excelente	Excelente	M
Grupo poliestireno	1.5-12	0.14-0.60	10-90M	0.5-60	...	Pobre	Pobre	EM
Polisulfone	10	0.36	120R	50-100	Excelente	Excelente	Excelente†	EFM
Cloruro de polivinilo	1.5-7.5	0.35-0.60	65-85D	40-450	...	Pobre	Pobre	EFM

En particular, el acero inoxidable es el material del que se componen la mayoría de los instrumentos quirúrgicos. Es un acero de bajo carbono, el cual tiene un mínimo de 10.5% de cromo en peso, lo que lo hace un material resistente a la corrosión (Budynas, 2008). Sus propiedades se exponen en la

Tabla 2.3.4.

En cuanto a los plásticos, el polimetilmetacrilato, mejor conocido por sus siglas PMMA o por su nombre comercial: Acrílico; resalta por su rigidez, por ser mecanizable y por su buen aspecto. Su diferencia más importante con el acero inoxidable es que es un material frágil cuando está a temperatura ambiente (Budynas, 2008). Sus propiedades se exponen en la Tabla 2.3.3.

Tabla 2.3.3. Propiedades del Polimetilmetacrilato (Budynas, 2008)

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo Elástico	2.7×10^9	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.33	Adimensional
Módulo Cortante	1.7×10^9	N/m ²
Densidad	1.19×10^3	Kg/m ³
Límite de Tracción	7×10^7	N/m ²

Tabla 2.3.4. Propiedades del acero inoxidable 316L (Budynas, 2008)

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo Elástico	2×10^{11}	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.265	Adimensional
Módulo Cortante	8.2×10^{10}	N/m ²
Densidad	8.02×10^3	Kg/m ³
Límite de Tracción	4.85×10^8	N/m ²
Límite Elástico	1.7×10^8	N/m ²

2.3.7 Esfuerzos, deformaciones y estados de carga del robot

La deformación de un sólido se define como el cambio en su longitud, área o volumen debido a una carga externa, respecto a su forma sin estar sometido a carga, por lo que su magnitud es adimensional. Su forma más básica, que considera sólo deformación longitudinal, se define como:

$$e = \frac{\Delta s}{s} = \frac{s' - s}{s} \quad \text{Ec. (5)}$$

Siendo “e” la deformación unidimensional, “s” la longitud del sólido sin deformarse y “s'” la longitud del sólido deformado.

El estado de deformación de los sólidos es consecuencia directa de las cargas a los que están sometidos, ya que la aplicación de una o varias cargas en un sólido implica un estado de esfuerzos. Un estado de esfuerzos se define mediante un tensor que representa a las tensiones a las que es sometido un cubo de dimensión infinitesimal, perteneciente a un sólido en estudio (Figura 2.3.7). Éste tensor contiene dos tipos de componentes, los normales (σ), que actúan en dirección perpendicular a una cara, y los cortantes (τ), que actúan en dirección paralela a una cara, y ambos tienen unidades de fuerza por unidad de área, por otra parte, dicho tensor de esfuerzos está relacionado mediante ecuaciones constitutivas con el estado de deformación del mismo sólido en estudio, representado con el tensor de deformación, por lo que un estado de esfuerzos siempre implica un estado de deformación y viceversa, tal y como lo expresa la ecuación Ec. (6) (Mott, 2006).

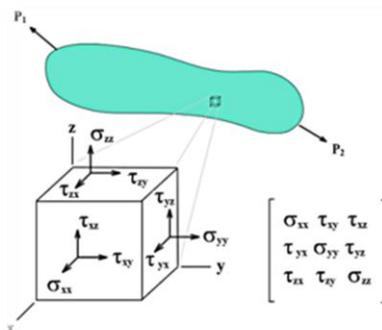


Figura 2.3.7. Estado de esfuerzos en un punto de un sólido cualquiera sometido a una carga arbitraria.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (6)}$$

En el caso del modelo que considera a un material elástico lineal (que obedece a la ley de Hooke) (Budynas, 2008), las ecuaciones constitutivas que relacionan las tensiones con las deformaciones son:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})) \quad \varepsilon_{xy} = \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{xy} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E}(\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})) \quad \varepsilon_{yz} = \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{yz} \quad \text{Ec. (8)}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E}(\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})) \quad \varepsilon_{xz} = \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{xz} \quad \text{Ec. (9)}$$

En los eslabones de un robot manipulador de la cámara de laparoscopia, las cargas están relacionadas a los pesos del sistema, además de las reacciones e interacciones que puedan ocurrir durante el movimiento, las cuales pueden inducir una o varias de las sollicitaciones mecánicas que existen, que son: axial, cortante, flexión y torsión (Figura 2.3.8) (Beer, 2010), y cada una de ellas induce un estado de esfuerzos (Mott, 2006).

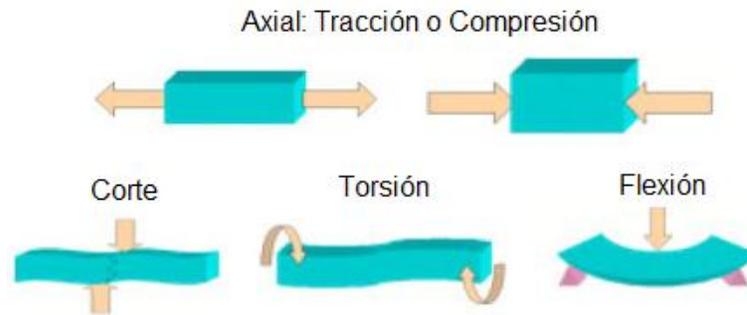


Figura 2.3.8. Los cuatro tipos de sollicitaciones mecánicas

2.3.8 Criterios de falla para los materiales

Al analizar los estados de esfuerzos, se puede prever la falla en un diseño empleando un criterio de falla. Para materiales dúctiles, existen por ejemplo el criterio de esfuerzo cortante máximo (Ecuación (10)) y el criterio de Von Mises (Ecuación Ec. (11)), mientras que para materiales frágiles, se encuentra el criterio de esfuerzo normal máximo (Ecuación Ec. (12)) y el de Mohr-Coulomb (Ecuación Ec. (13)), entre otros. En estos criterios, se parte de un estado de esfuerzos en un sólido sometido a una carga, para luego comparar ciertos parámetros y concluir si el material sufrirá falla o no. En particular, el criterio de Von Mises para materiales dúctiles utiliza una definición de esfuerzo llamada esfuerzo de Von Mises, y se define como en la ecuación Ec. (14).

$$\frac{\tau_{\max}}{0.5 * S_y} < \frac{1}{n} \quad \text{Ec. (10)}$$

$$\frac{\sigma_{\text{Von Mises}}}{S_y} < \frac{1}{n} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$\frac{\sigma_1}{S_u} < \frac{1}{n} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$\frac{\sigma_1}{S_{ut}} + \frac{\sigma_3}{S_{uc}} < \frac{1}{n} \quad \text{Ec. (13)}$$

$$\sigma_{\text{Von Mises}} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde:

- σ_1 y σ_3 son las componentes de la matriz de esfuerzos principales (Budynas, 2008).
- “n” es un factor de seguridad, y si es mayor a “1” garantiza que el diseño no falla.
- “Sy” es el esfuerzo de fluencia, y “Su” es el esfuerzo último.

2.3.9 El método de los elementos finitos

Todos los cálculos de esfuerzos y deformaciones pueden aproximarse de manera numérica utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF), lo cual facilita la tarea de analizar sólidos con geometrías en donde la solución analítica sería complicada o imposible. Su desarrollo consiste en discretizar el sólido en estudio, es decir, dividirlo en elementos no diferenciales, o elementos finitos, interconectados entre sí a través de un determinado número de puntos, llamados nodos, que en conjunto forman una malla (Vázquez & López, 2001). Estos nodos describen los desplazamiento de los elementos mediante una interpolación de funciones, y es por esto que al aumentar el número de nodos se consigue una mejor aproximación a la realidad, aunque también aumenta el número de variables y por ende, el tamaño del sistema a resolver (Gonzalez, 2004). Cada nodo tiene asociado un conjunto de variables incógnitas, denominadas grados de libertad, y las relaciones que tienen entre las otras variables de los otros nodos forman ecuaciones lineales. La matriz formada por estas ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema, y el número de ecuaciones que la conforman es proporcional al número de nodos (Vázquez & López, 2001). En el ejemplo de la Figura 2.3.9 (a) se encuentra un sólido a estudiar, éste sólido se discretiza (Figura 2.3.9 (b)) y luego de aplicar condiciones de carga y de contorno se obtienen los resultados, tal y como se puede ver en la Figura 2.3.9 (c). En la Figura 2.3.9 (d) se puede notar como se disminuye el tamaño de elemento para conseguir un resultado más exacto en la Figura 2.3.9 (e).

En un estudio de mecánica de sólidos deformables, el MEF inicialmente calcula el campo de desplazamientos, para luego determinar deformaciones y esfuerzos utilizando relaciones cinemáticas y constitutivas (Vázquez & López, 2001).

El MEF se divide en tres etapas:

- Pre-proceso: se define la geometría, las condiciones de contorno y la asignación de propiedades, finaliza cuando es generada la malla.
- Cálculo: se definen y resuelven las incógnitas y ecuaciones.

- Post-proceso: se presentan los resultados y se calculan las magnitudes derivadas de ellos.

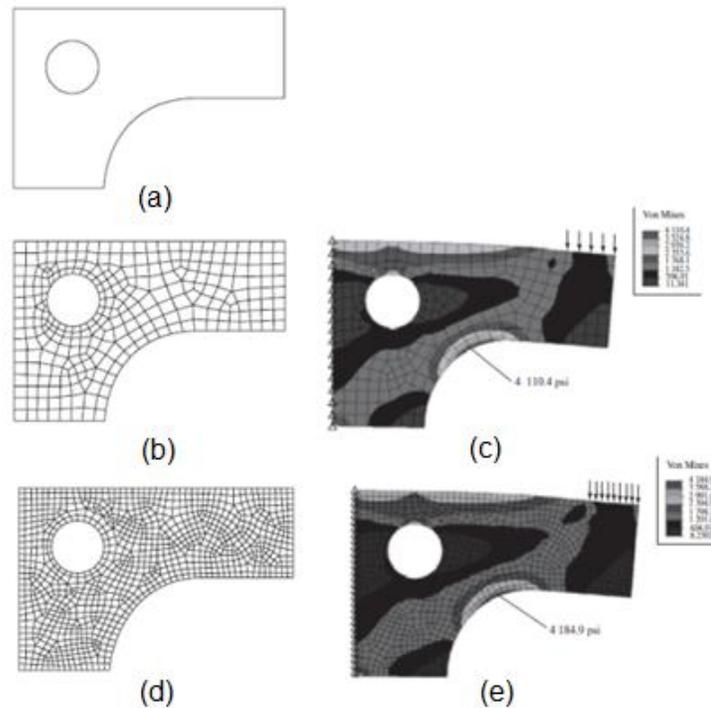


Figura 2.3.9. Ejemplo del Método de Elementos Finitos aplicado a un sólido (Budynas, 2008)

Para tener más confiabilidad en los resultados, se suele realizar un procedimiento denominado análisis de convergencia, en el cual se realizan varios estudios sucesivos disminuyendo el tamaño de elemento en zonas de concentración de esfuerzo, con el fin de verificar si el resultado converge a un valor (Cerroloza, 2007). Aunque un resultado converja, no necesariamente quiere decir que lo haga hacia el valor real.

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. LA METODOLOGÍA DE FRENCH

La metodología de diseño utilizada en la creación del brazo robótico asistencial para la cirugía de laparoscopia se basó en el planteamiento metodológico de Pérez (2011) empleada en la fase de diseño de una mano robótica. Esta metodología está basada en la metodología de French (Angeles, 2012), llevada a cabo mediante un proceso detallado y concreto del método descriptivo en cuatro etapas (Figura 3.1.1). La metodología descriptiva consiste en proponer una solución global a la necesidad requerida mediante experiencia previa, antecedentes y/o sugerencias, dividiendo el proceso en etapas evaluadas a través de matrices morfológicas, verificando el cumplimiento de los objetivos planteados y de ser necesario se replantean las actividades u objetivos con el fin de llegar a la solución final. Este proceso es iterativo, ya que cada etapa debe ser validada para poder avanzar a la siguiente y cada una debe ser consistente con las demás, esto implica que cada ciclo contiene una propuesta y su validación correspondiente para poder ser tomado en cuenta al momento de un ensamble final donde se integren todas las etapas (Chaur, 2004).

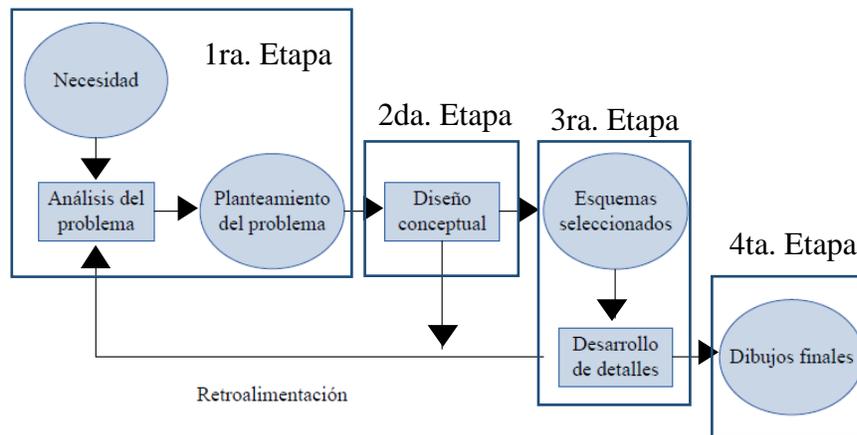


Figura 3.1.1 Esquemización de la metodología de French (Perez, 2011)

Las cuatro etapas planteadas para la ejecución de la parte de diseño del proyecto del brazo robótico son: clarificación de la tarea, diseño conceptual, diseño de materialización y diseño de detalle (Angeles, 2012), las cuales se describirán a continuación.

- Primera etapa: define la necesidad a investigar, consultando bibliografía y antecedentes que hayan trabajado este tema.
- Segunda etapa: se generan soluciones que ataquen la necesidad planteada mediante métodos de selección o filtro.
- Tercera etapa: una vez seleccionadas las ideas con más posibilidad de éxito de solucionar el problema se elaboran bocetos y/o maquetas para decidir cuál es más viable.
- Cuarta etapa: se llevan a cabo la elaboración de planos a detalle de la solución escogida, según los criterios utilizados.

3.1.1 Primera Etapa: Clasificación de la Tarea

Para esta etapa se define la necesidad de hacer un brazo robótico para asistencia de la cirugía laparoscópica debido a los problemas que surgen en la ejecución de la misma. Teniendo en cuenta el problema se proponen diversas soluciones (Angeles, 2012), y se enfoca de la manera más concreta posible para saber qué aspectos técnicos se deben dominar y que herramientas se utilizarían para el desarrollo de dicha investigación.

A lo largo de esta etapa se revisa la bibliografía respecto a diversas áreas relacionadas con la naturaleza del proyecto, como lo son teorías, antecedentes, métodos, manejo de software, costos, disponibilidad de elementos en el mercado y demás, considerando de manera global los siguientes aspectos:

- Rasgos generales de una cirugía de laparoscopia y del funcionamiento y manejo de un laparoscopio.
- Aspectos de la robótica, como grados de libertad y la teoría necesaria para definir la cinemática de un robot, partiendo del procedimiento de Denavit-Hartenberg (Craig, 2006), de una manera similar a la metodología utilizada por Pérez (2011) en su tesis de maestría.
- Clasificación y funcionamiento de los robots, tipos de accionamientos y mecanismos, selección de componentes electrónicos, incluidos elementos de control y accionamientos eléctricos.
- Estudio de disponibilidad y costos de materiales y componentes electrónicos, mecánicos y de control en el mercado nacional.

3.1.2 Segunda Etapa: Diseño Conceptual

En esta etapa se proponen soluciones concisas del problema de diseño, donde se divide el brazo robótico en distintos subsistemas o secciones, con el fin de trabajar con cada parte del equipo individualmente, y luego en el ensamblaje verificar que la integración de los módulos cumple con el fin estipulado.

Se valida constantemente la factibilidad de las propuestas de cada subsistema con los aspectos de la etapa 1, para poder hacer una selección de las ideas más adecuadas y acoplarlas de manera conjunta.

3.1.3 Tercera Etapa: Diseño de Materialización

Una vez que se definen los requisitos del brazo robótico y la elección de los componentes se realizan bocetos y dibujos preliminares del diseño, siempre adaptados a los objetivos del robot. Para el proceso de creación de ideas para el modelo se utilizan programas CAD que permitan el desarrollo de la geometría y análisis de material.

Para la creación de la geometría del brazo se define preliminarmente su cinemática, la cual establece el alcance del actuador final del robot para cumplir con el rango de movimientos necesarios para la manipulación de la cámara del laparoscopio. Al llegar al punto de tener un diseño que cumple con los requerimientos propuestos se verifica la viabilidad de construcción y fabricación de las partes del asistente robótico, consultando los planos con el técnico encargado del mecanizado de las piezas.

3.1.4 Cuarta Etapa: Diseño de Detalle

Cuando todos los detalles del prototipo se resuelven, se lleva a cabo la ejecución de los planos, incluyendo las piezas a fabricar y los componentes mecánicos y de control. El producto final es una Memoria de Diseño, que contiene un resumen de la necesidad que motivó al proyecto, planos de fabricación, lista de materiales, presupuesto estimado para la producción del objeto diseñado y toda la información necesaria para fabricar el prototipo de brazo robótico. Se debe contar con la asistencia de programas de diseño asistidos por computadora, ya que los mismos facilitan la tarea de definir los planos de las piezas.

3.2. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN

Concluida la fase de diseño, se procede a la compra del material escogido para la fabricación de los elementos que conforman el cuerpo del robot y de los componentes necesarios para el total funcionamiento del equipo. La elaboración de las piezas se debe realizar en un taller con máquinas orientadas a la manufactura de dichos elementos, ya que son varios los factores a tomar en cuenta para su fabricación, los más importantes son la geometría y el material con el cual se trabajó. Al tener en físico las piezas y los componentes mecánicos y de control, se ensamblan realizando un registro de los pasos necesarios para ello.

El movimiento del robot se programa con una serie de comandos que permiten el desenvolvimiento de la cinemática mediante el accionamiento particular de cada eslabón. Al prototipo se le realizan ensayos de índole académico para verificar la funcionalidad del robot y el cumplimiento de los alcances establecidos.

Al obtener los resultados, se redactan las conclusiones y recomendaciones a futuro, de manera que sirva de antecedente para alguna investigación posterior o como base para algún estudio más profundo.

CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. DISEÑO MECÁNICO DEL ROBOT

En base a la investigación realizada se estableció que los componentes del brazo deben ser ligeros para que los requerimientos mínimos de torque por parte de los accionamientos sean los menores posibles, además, la forma de los componentes debe aportar cierto grado de rigidez a la estructura, asegurando resistencia a cargas y a movimientos bruscos y garantizando que la manipulación de la cámara por parte del robot no sea inadecuada. En base a esto se propuso la conformación de los eslabones del robot con un material en forma de láminas, en lugar de una geometría basada en elementos gruesos y macizos, con la finalidad de minimizar el peso de las partes. Por otro lado, se estableció que un robot con accionamientos instalados en serie era apto para cumplir con la cinemática necesaria para cubrir el área de trabajo de la cámara. Otras configuraciones requerían de la instalación de una mayor cantidad de accionamientos, siendo menos económicas e imponiendo un análisis cinemático de mayor complejidad. Estas consideraciones convergieron en un planteamiento inicial, modelo 1, detallado en la siguiente sección.

Para alcanzar una solución satisfactoria al problema del diseño del robot, se procedió a dividirlo en subsistemas, identificando problemas puntuales y estableciendo soluciones a los mismos, comprobando de manera continua que ninguna de las soluciones de un subsistema en particular interfiriera con las soluciones de otro, y siempre tomando en cuenta el ámbito económico del proyecto. Los subsistemas definidos fueron: cuerpo del robot, accionamientos, contrapesos y control.

4.2. CUERPO DEL ROBOT

Tomando en cuenta los aspectos establecidos anteriormente, se comenzó a definir la solución final a la geometría del cuerpo del robot iniciando con el planteamiento de un modelo inicial, el cual evolucionó en diversos modelos durante el proceso. Cada modelo desarrollado fue analizado, y en base a los defectos y deficiencias que presentaran se estableció un modelo nuevo que fue sometido a un nuevo análisis en donde se identificarían defectos y deficiencias adicionales, repitiendo el proceso hasta que se alcanzó una solución final.

Al modelo más asertivo se le aplicó un análisis de esfuerzos usando el Método de Elementos Finitos (MEF), con el objetivo de verificar que la geometría con el material propuesto no admitiera fallas por ruptura. Las piezas fueron estudiadas bajo régimen estático, ya que se identificó que los eslabones del robot se moverían de manera gradual y lenta debido a las características del movimiento del laparoscopio (Fernández, 2002), minimizando los efectos de la dinámica y considerándolos despreciables.

Para el diseño de la geometría del robot se utilizó el programa Autodesk Inventor Professional 2014, que permitió la creación digital de piezas mediante una representación gráfica del diseño en 3D, facilitando el diseño de piezas de forma individual para luego realizar un ensamblaje y posteriormente, mediante el programa SolidWorks 2012 se analizó el modelo a través del Método de Elementos Finitos.

4.2.1 Modelos propuestos

Durante la evolución del diseño y de las múltiples consideraciones llevadas a cabo a lo largo del desarrollo del proyecto, se propusieron tres modelos, siendo los siguientes:

4.2.2 Modelo 1

El Modelo 1 (Figura 4.2.1) fue desarrollado como resultado de los aspectos definidos por la investigación teórica y entrevistas realizadas a especialistas en el área

(Miquilarena & Rodríguez, 2015). En su diseño se consideró que el número de grados de libertad (GDL) que el robot necesitaría para posicionar la cámara sería de 3 (Fernández, 2002), y se presentó un esquema general de la distribución de componentes y piezas para su funcionamiento. En la parte inferior de la Figura 4.2.1 se puede observar una caja negra que representa la base del brazo, donde va integrada la primera articulación, la cual es rotacional y permite el movimiento alrededor del eje Z del robot. Luego, el segundo vínculo une la primera articulación con la segunda, ambas de tipo rotacional, permitiendo a los eslabones subsecuentes el movimiento en el espacio definido por los ejes XYZ del robot.

Esta configuración, aunque básica, permitió tener una visión global de los requisitos del diseño, siendo algunos:

- El acople eslabón-accionamiento-eslabón.
- El tipo de efector final a utilizar y la necesidad de cumplir con los requerimientos de orientación de la cámara, requiriendo más grados de libertad.
- El diseño específico de piezas: vínculos, base, ejes.

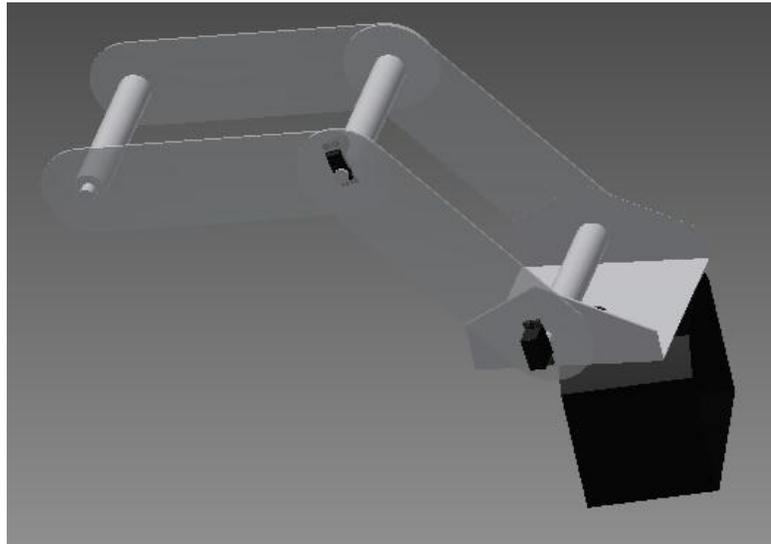


Figura 4.2.1. Modelo 1

4.2.3 Modelo 2

Tomando en cuenta el análisis realizado sobre modelo 1, se definió el modelo 2 (Figura 4.2.2). Más detallado que el anterior cumple con la cinemática del área de trabajo de la cámara, agregando dos grados de libertad adicionales en forma de articulaciones no accionadas con la finalidad de resolver el problema de la orientación de la cámara. El comportamiento de las articulaciones no accionadas no es independiente, ya que éstas reaccionarían en función a la configuración de los eslabones del robot y a la interacción de tipo pivote que tiene la cámara con el trocar. La sujeción robot-cámara se realiza en una pieza con tres tornillos que ejercen presión en la parte cilíndrica del laparoscopio. El laparoscopio es representado en la (Figura 4.2.2) como un cilindro rojo, insertado en un trocar representado como un cilindro hueco empotrado en una base, todo de color amarillo (Figura 4.2.2). Se suplieron las fallas presentadas en el modelo 1 y se incluyeron otros aspectos de importancia:

- La base incluye un apoyo, representado en la Figura 4.2.2 como un aro de color azul que rodea al accionamiento de la base, sobre el cual descansan las dos piezas del primer eslabón, de manera que el peso de todo el sistema no se concentre únicamente en el accionamiento de la base y se evite una deformación excesiva de la base rotativa del robot. Dicho apoyo interactúa con estas piezas mediante fricción, y por ende se requiere que esté compuesto de un material con bajo coeficiente de fricción, como por ejemplo el politetrafluoroetileno (Serway, 1999), mejor conocido como Teflon®, de manera que el sistema experimente menos pérdidas de energía durante el movimiento.
- Con el objetivo de requerir accionamientos de menor tamaño y torque, es decir, de menor costo, se propuso la idea de utilizar cargas fijas como contrapesos. En la Figura 4.2.2 estas cargas son representadas como cubos de color gris adheridos en los extremos contrarios de cada eslabón.

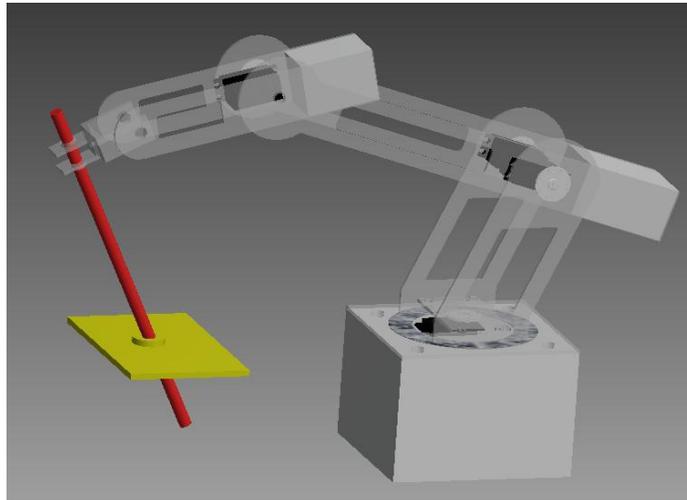


Figura 4.2.2. Modelo 2

Un problema identificado en el análisis del modelo consistía en que la presencia de los contrapesos, aunque permitía el uso de accionamientos de menor torque, agregaba masa al sistema, aumentando su inercia y por ende afectando la exactitud y velocidad de sus movimientos.

Para una evaluación más detallada del modelo 2, se realizó una entrevista al especialista en cirugía laparoscópica, Dr. Miquilarena, del Hospital Clínico Universitario de Caracas, y posteriormente se realizó un estudio con base en una observación realizada en vivo de una cirugía laparoscópica real, asistida por la Dra. Rodríguez, también especialista en el área. De estas experiencias se estableció que un robot empleado en una cirugía real debe tomar en cuenta lo siguiente:

- El robot debe poder ser movilizado y tener fácil instalación en la sala de cirugía, de manera de no entorpecer la labor de preparación de la cirugía ni de la cirugía misma.
- La sujeción del robot-cámara debe adaptarse a la geometría del extremo del laparoscopio, donde está la cámara. Ésta geometría usualmente es semejante a un paralelepípedo, y sus dimensiones pueden variar dependiendo de la marca y el modelo de la cámara. La Figura 4.2.3 (a) muestra la manera en que la asistente sostuvo la

cámara durante la operación. La Figura 4.2.3 (b) muestra con más detalle el tipo de cámara usada durante esa operación.

- La cámara debe poder ser instalada en el sujetador del robot de manera fácil y rápida, de tal manera que si en determinado momento el cirujano amerita manejar la cámara por sí mismo, o detener la operación para poder limpiar la punta del visor, no se pierda mucho tiempo.
- Se debe tomar en cuenta la necesidad del robot de ser forrado en tela estéril.
- El robot debe ser adaptable al movimiento de la camilla y a las preferencias del cirujano respecto a la distribución de los equipos en la sala.
- Se debe tomar en cuenta el peso de la óptica como un todo, incluyendo detalles tales como, la cámara, el tubo en el que este reside, los cables del instrumento que permanecen en voladizo en todo momento, entre otros.

Aunque se debe tener presente que el prototipo a plantear en este proyecto sólo contempla fines académicos, destacando que este modelo nunca entrará en una sala de cirugía real, estas observaciones permitieron identificar aspectos deficientes en el modelo 2 tales como:

- La sujeción del robot que se tenía contemplada para una geometría cilíndrica, debe ser para una geometría de paralelepípedo.
- Las limitaciones respecto a los motores y a las cargas con las que estos deben lidiar.

Se realizó además una medición del peso de un laparoscopio real, en donde la óptica, la cámara y cables de poder y de luz, totalizaban un peso de 0.7 Kgf (Figura 4.2.4 (a) y (b)).



(a) El operador sujetando la cámara



(b) La cámara del Laparoscopio

Figura 4.2.3. La cámara del laparoscopio y su uso durante la operación



(a) Peso del Laparoscopio



(b) Valor del peso del Laparoscopio

Figura 4.2.4. El peso de un laparoscopio con sus elementos

4.2.4 Modelo 3

El *modelo 3* (Figura 4.2.5), deriva de las mejoras en los aspectos deficientes observados en el modelo 2. Otros ajustes importantes incluyen lo siguiente:

- Instalación de resortes que proporcionen la fuerza que ejerce el contrapeso, de manera que el peso del sistema no incremente tanto como con una carga fija. El problema de la masa adicional se

minimiza evitando que afecte la exactitud de los movimientos debido a la inercia.

- Cambio en la geometría del cuerpo del brazo, como consecuencia de la inclusión de los resortes y a la consideración de una nueva sujeción brazo-cámara.
- Inclusión de refuerzos entre las láminas paralelas para aumentar la rigidez y evitar el pandeo debido a las cargas.

Finalmente el esquema de partes del robot propuesto en este proyecto se aprecia en la Figura 4.2.5. Las partes están representadas de la siguiente manera: la base en textura de madera (marco de referencia inercial), el conjunto columna-base giratoria conformada por las piezas de color amarillo, el eslabón 1 conformado por las piezas de color anaranjado, el eslabón 2 conformado por las piezas de color rojo y el efector final, conformado por dos piezas articuladas y sin accionar, sujetando al laparoscopio, en color gris.



(a) Modelo 3, vista lateral.



(b) Modelo 3, vista isométrica

Figura 4.2.5.Modelo 3

4.2.5 Dimensiones fundamentales y funciones particulares de las piezas

Las dimensiones de todo el conjunto se establecieron en función de las medidas más cruciales: las longitudes de los eslabones 1 y 2; ya que éstas son las que cumplen con las especificaciones del área de trabajo de la cámara. Para definir las longitudes se utilizó la información incluida en el trabajo de Minor (2002) concerniente a las dimensiones del espacio de trabajo de la cámara durante una cirugía. El mismo indica que las dimensiones del cono invertido que representa el espacio de trabajo de la cámara consisten de una base de 250 mm de radio con una altura de 300 mm.

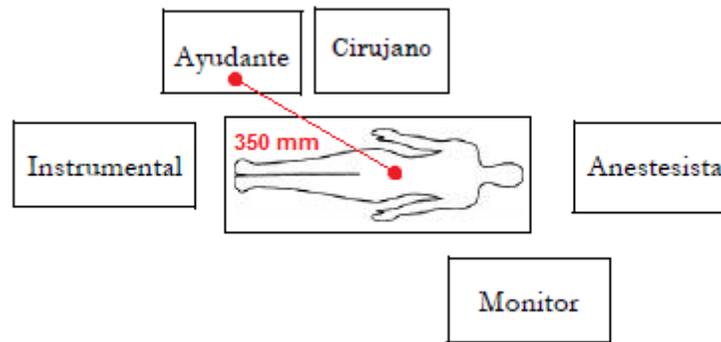


Figura 4.2.6. Distancia horizontal entre el operador de la cámara y el trócar (Fernández, 2002)

Durante la cirugía guiada por la Dra. Rodríguez (Miquilarena & Rodríguez, 2015), se pudo observar una distribución general del personal y de los instrumentos como en la Figura 4.2.6. La distancia entre el operador de la cámara y el punto de inserción en el paciente no superó los 350 mm, espacio en donde el operador de la cámara no representaba un obstáculo para el resto del personal presente.

Tomando en cuenta estos aspectos, se estableció el esquema de la Figura 4.2.7

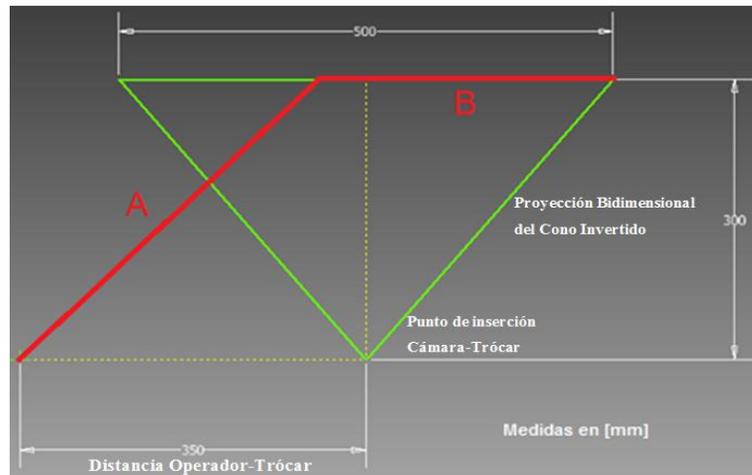


Figura 4.2.7. Esquema del sistema operador-espacio de trabajo-trócar para el brazo robot

Los segmentos A y B son de longitud desconocida y representan los eslabones 1 y 2 en la posición más lejana que la cámara requiere y el robot debe cumplir. Se establece que el segmento B alcance una posición horizontal en su posición más crítica para permitir el movimiento de la cámara a posiciones más cercanas a la base cuando el brazo se contraiga (Figura 4.2.8). El eje de rotación Z del robot debe estar a una distancia horizontal de 350 mm del trócar, y el eje de rotación perpendicular al eje Z, es decir, el accionamiento de la base del eslabón 1, debe estar a su mismo nivel. Para que el eslabón 2 soporte menores cargas debido a su propio peso y adicionalmente por razones estéticas, se establece que A y B guarden una relación de longitud de 2 a 3:

$$2A = 3B \quad \text{Ec. (15)}$$

En base al esquema presentado en la Figura 4.2.7, con la ecuación (15) y con trigonometría, se establece la siguiente formulación:

$$A^2 = 300^2 + \left(350 + 250 - \frac{2}{3}A\right)^2 \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde las soluciones para “A” y para “B” son:

$$A = 432.56 \text{ mm}$$

$$B = 288.37 \text{ mm}$$

Por razones de simplificación, y para incluir un margen de holgura, se redondean estos valores como sigue:

$$A = 450 \text{ mm}$$

$$B = 300 \text{ mm}$$

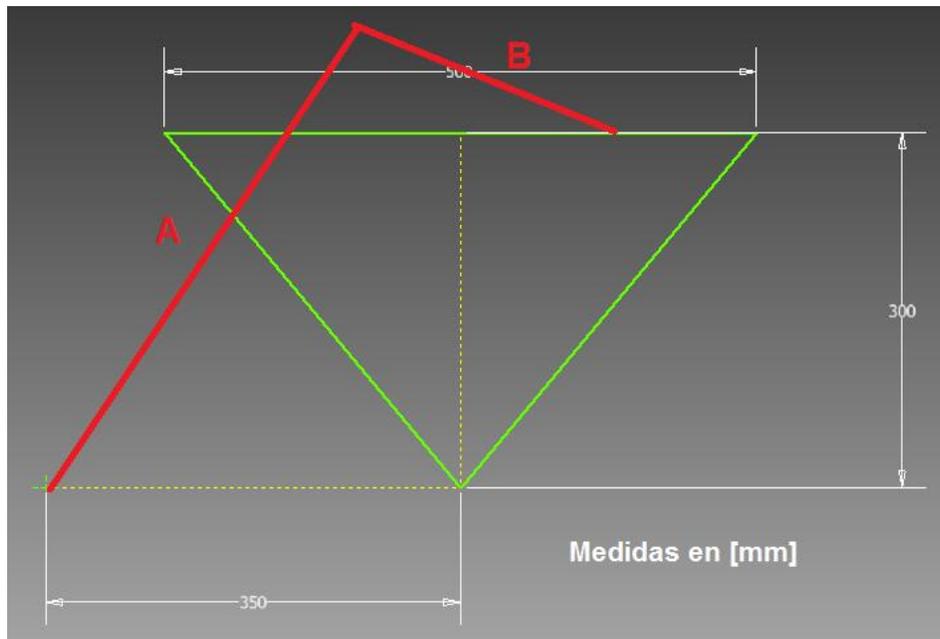


Figura 4.2.8 Esquema para el caso del brazo del robot contraído

Las dimensiones detalladas de cada una de las piezas se encuentran en el apéndice adjunto a este trabajo (Apéndice 1.3 al 1.9), y sólo se explicarán los detalles más importantes a continuación.

4.2.6 La Base

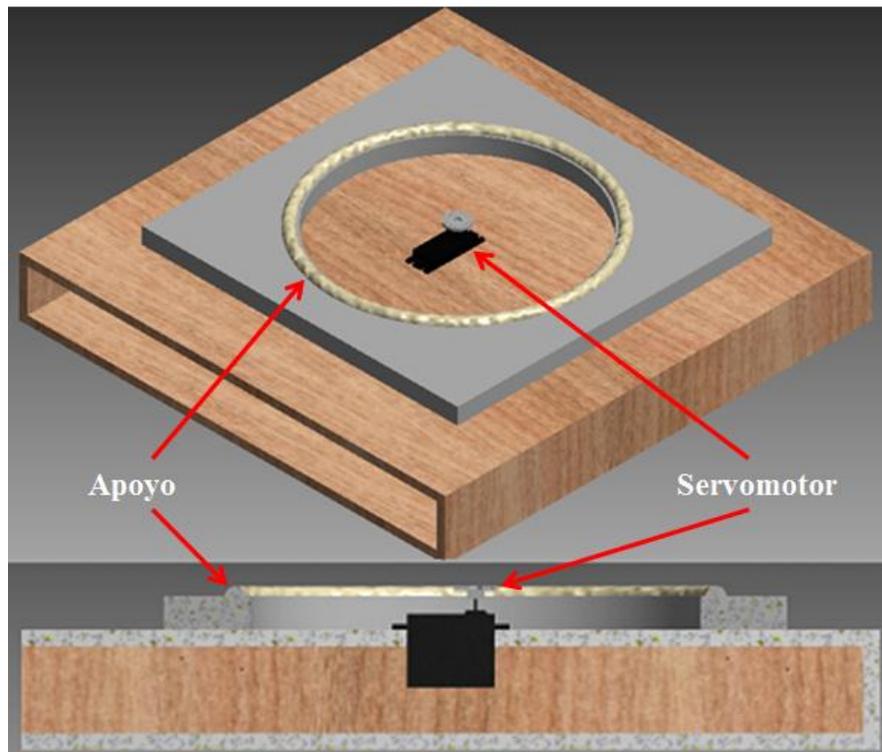


Figura 4.2.9. Base del robot

La base está fija a tierra y se encarga de soportar el peso del equipo en todo momento. Como se puede apreciar en la Figura 4.2.9, permite la instalación del motor que se encarga del movimiento rotatorio en el eje Z del brazo. La base incluye un nivel en donde se fijó un apoyo de Teflon®, esto con el fin de que la pieza llamada columna-base haga contacto con ella, evitando el peso excesivo sobre el motor, la deformación excesiva de la base y además minimiza la energía consumida por la fricción cuando la pieza esté en movimiento (Figura 4.2.10).

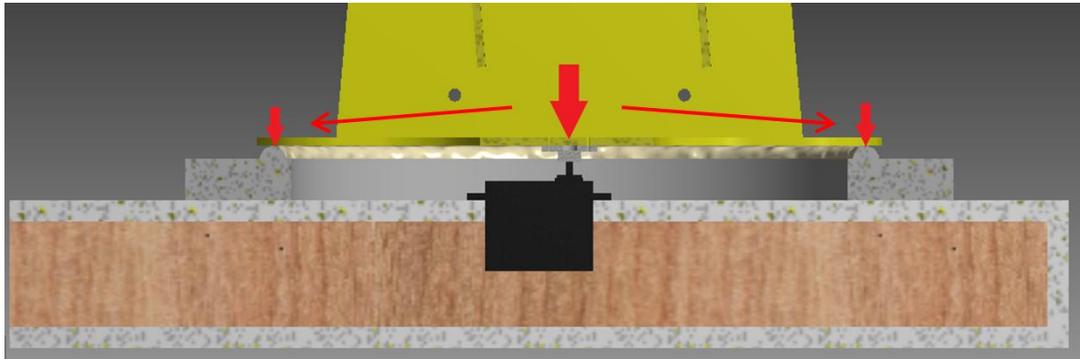


Figura 4.2.10. Distribución de fuerzas entre la base y la columna-base

4.2.7 El conjunto de la columna-base giratoria

Su función principal es conectarse al accionamiento instalado en la base, de manera que permita el giro controlado alrededor del eje Z del robot (Figura 4.2.11). Otra función de esta pieza es establecer una altura entre el eslabón 1 con respecto a su base, para evitar el choque del contrapeso con la misma.

La altura que le proporciona esta pieza al eje de rotación del eslabón 1, con respecto al accionamiento de la base, es de aproximadamente 330 mm.

En su parte superior, este conjunto cuenta con cavidades adaptadas a los accionamientos seleccionados (Figura 4.2.11) en las dos láminas que lo componen, la geometría de estas cavidades depende del accionamiento seleccionado, ya que este varía en tamaño de acuerdo a la marca, torque proporcionado, entre otros.

En la parte media de la pieza se encuentra un agujero que tiene como finalidad alojar al eje que sirve de apoyo para la instalación del resorte que se unirá con el eslabón 1.

En su parte inferior cuenta con una serie de agujeros que permiten la unión atornillada con el accionamiento, éstos agujeros dependen tanto en geometría como en distribución del accionamiento seleccionado.

Este conjunto se conecta al conjunto del eslabón 1 a través de los dos accionamientos que se encuentran atornillados entre ellos (Figura 4.2.12).

Dado que en los ensayos computacionales el material presentaba un pandeo desfavorable, se incluyeron refuerzos entre las láminas, perpendiculares a ellas.

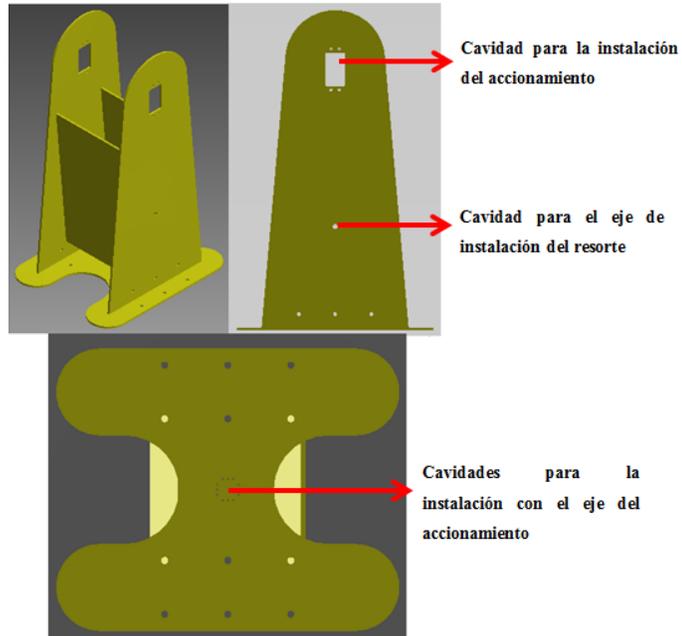


Figura 4.2.11. Detalles de la columna-base

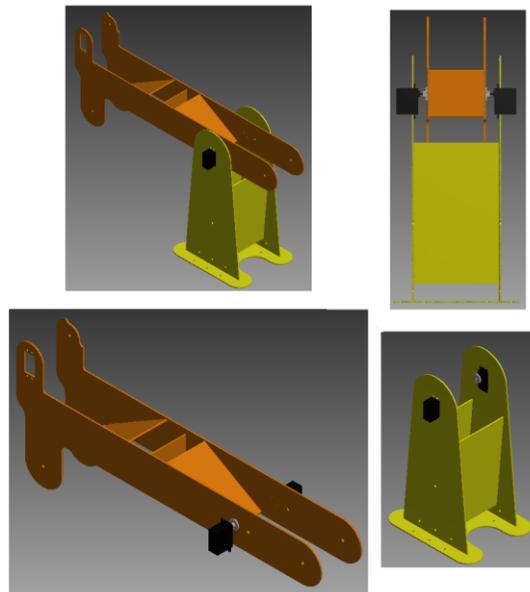


Figura 4.2.12. Detalles del ensamble columna-base, accionamientos, eslabón 1

4.2.8 El conjunto del eslabón 1

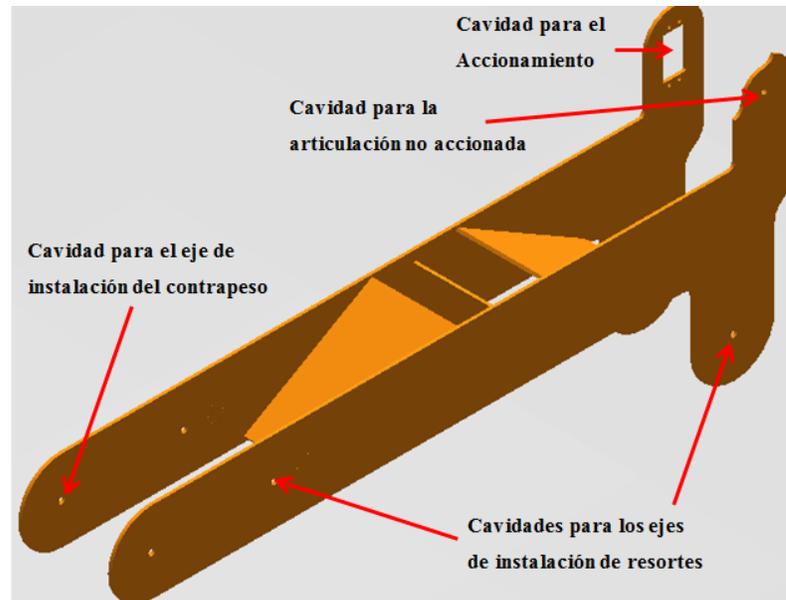


Figura 4.2.13. Detalles del eslabón 1

El conjunto del eslabón 1 está atornillado a dos accionamientos que a su vez están instalados en la columna base. Este conjunto está compuesto de dos láminas en paralelo, unidas por refuerzos perpendiculares a ellas para aportar rigidez al sistema (Figura 4.2.13). Sólo una de las láminas, la izquierda, tiene una cavidad para instalar un accionamiento, que a su vez se une al segundo eslabón (Figura 4.2.14). En la lámina derecha, el eslabón 1 se une al eslabón 2 con una articulación no accionada, compuesta por un tornillo que permita el libre giro de una pieza con respecto a la otra.

En la parte trasera de cada lámina se encuentran dos agujeros, para instalar dos pasadores que funcionan como ejes. Uno con el fin de acoplar el resorte proveniente del conjunto de la columna base, y el otro con el fin de sostener el primer contrapeso. De igual manera, en la parte delantera inferior, existen agujeros para un pasador adicional, que permite el acoplamiento de un resorte entre el eslabón 1 y el eslabón 2.

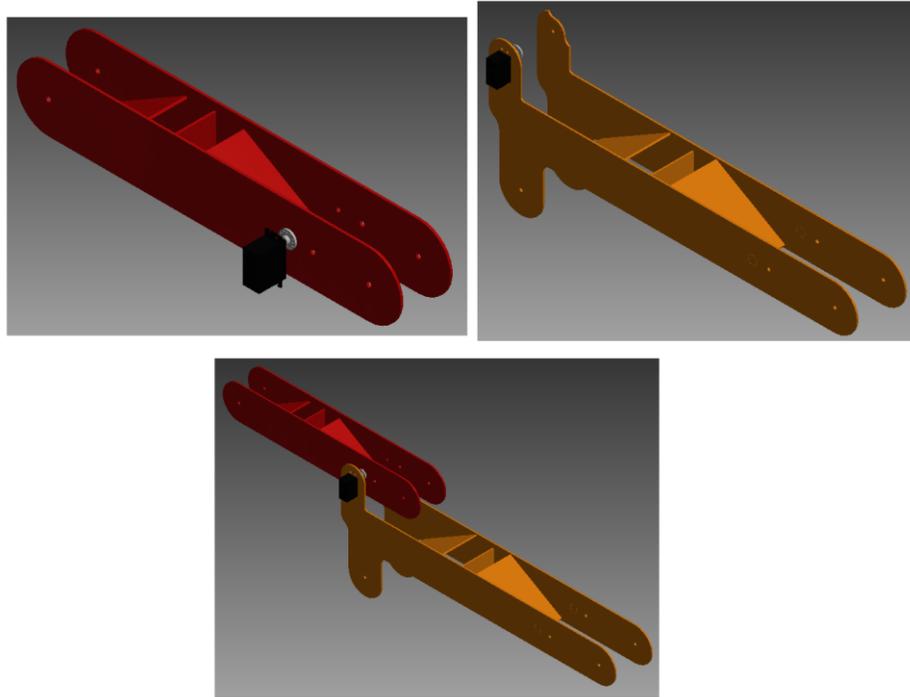


Figura 4.2.14. Detalles del ensamble eslabón 1, accionamiento, eslabón 2

4.2.9 Conjunto del eslabón 2

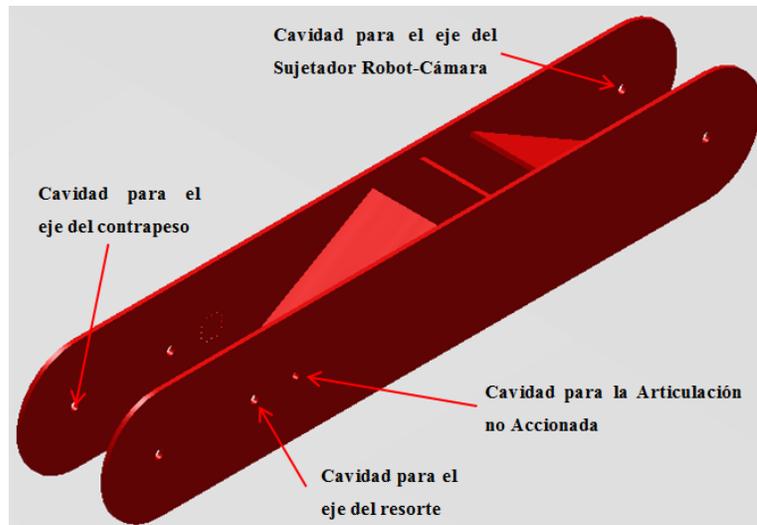


Figura 4.2.15. Detalles del eslabón 2

Exceptuando el hecho de que el eslabón 2 sólo está controlado por un accionamiento, éste tiene características similares al eslabón 1 (Figura 4.2.15). Hay dos agujeros en la parte trasera para la instalación de pasadores que funcionan como ejes para sostener un contrapeso y para la instalación de un resorte. Se incluyen refuerzos perpendiculares entre las dos láminas para aumentar la rigidez de la pieza.

En la parte delantera se encuentran un par de agujeros para la instalación del pasador que funciona como eje para la articulación del sujetador (Figura 4.2.16).

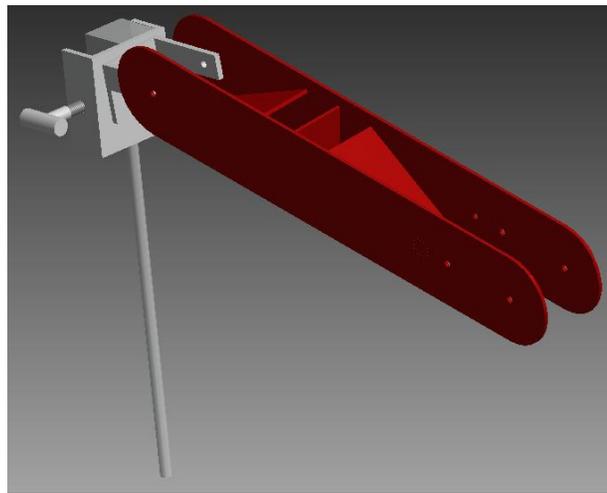
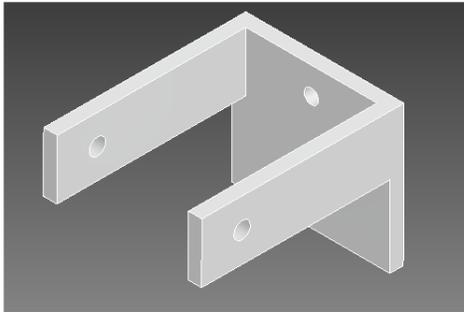


Figura 4.2.16. Detalles del ensamble eslabón 2, sujetador

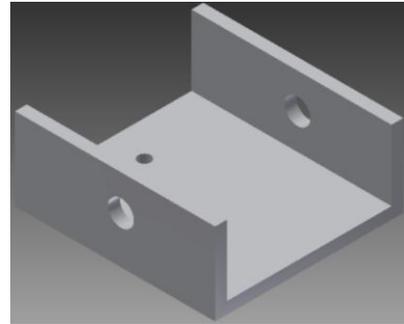
4.2.10 Sujetador

Como se indicó durante la concepción de los modelos dos y tres, con las dos articulaciones no accionadas que posee el sujetador se resuelve el problema de la orientación de la cámara. La orientación de estas articulaciones está gobernada por la interacción entre la configuración de posición de los eslabones del robot, y el comportamiento de pivote que ejerce el trócar sobre la cámara. Esta pieza se subdivide en cuatro piezas, dos para conformar dos articulaciones y otras dos con la finalidad de actuar como prensa, para sujetar la cámara. La pieza A (Figura 4.2.17 (a)) vincula las dos articulaciones no accionadas, una con el eslabón 2, y otra con la

pieza B, permitiendo libre giro. La pieza B (Figura 4.2.17 (b)) alojara la cámara, y está adaptada para sostener un objeto de forma de paralelepípedo cuyo ancho sea de 70 mm máximo, permitiendo sostener cámaras de varios tamaños. La pieza C, compuesta por dos tornillos, actua como prensa, de manera que sujete la cámara en la pieza B de manera centrada (Figura 4.2.18).



(a) Sujetador, parte A



(b) Sujetador, parte B

Figura 4.2.17. Sujetador

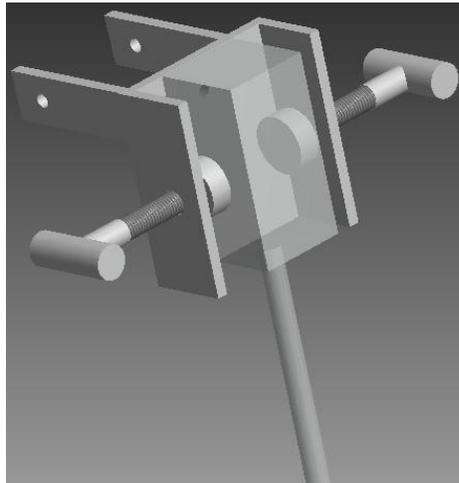


Figura 4.2.18. Detalles del ensamble del sujetador partes A, B y C y un modelo de laparoscopio

4.2.11 Material

Se requiere un material que provea resistencia mecánica, rigidez y al mismo tiempo cumpla con los estándares dentro de una sala de cirugía, se seleccionó el acero inoxidable 316L, material utilizado en la fabricación de instrumental de cirugía.

4.2.12 Análisis de esfuerzos

Gran parte de los análisis de esfuerzos se realizaron mediante el método de los elementos finitos (MEF). Para una comprobación de los resultados, se realizó una comparación entre valores obtenidos por el MEF y valores obtenidos analíticamente en puntos donde el cálculo de los esfuerzos fuese trivial.

Se realizaron estudios en los tres conjuntos que sostienen al robot: columna-base, eslabón 1 y eslabón 2, ya que son los elementos más relacionados a su movimiento, excluyendo un análisis en conjunto debido a la falta de información respecto a los materiales de los accionamientos. Las fuerzas incluidas en los estudios son de resultados obtenidos de otros subsistemas, como por ejemplo las fuerzas debido a la masa de los contrapesos y las reacciones de los resortes seleccionados.

El objetivo principal de este estudio fue encontrar el mínimo grosor posible de lámina de acero inoxidable para fabricar las piezas, esto con el fin de minimizar los costos. En el estudio de mercado realizado se encontró que la presentación más delgada de acero inoxidable disponible era de 3 mm, por lo que las simulaciones fueron realizadas con esa consideración.

Por otra parte, para la realización de pruebas se procedió a construir un prototipo utilizando la misma metodología, pero con un material más económico que el Acero Inoxidable. Para tal fin, se eligió el polimetilmetacrilato. Éste material fue elegido por: ser mecanizable, su alta resistencia mecánica, ser ligero y por su apariencia, además, en el mercado también se consigue en láminas de distinto grosor, incluyendo el de 3 mm.

Para las simulaciones se tomó en consideración lo siguiente:

- En el estudio realizado sobre las piezas en acero inoxidable se realizó un análisis considerando material dúctil, utilizando la teoría de falla de Von mises (Ecuación Ec. (11)).
- A las piezas en acrílico se les realizó un estudio considerando material frágil, utilizando la teoría de falla del esfuerzo normal máximo (Ecuación Ec. (12)).
- Los estudios realizados sobre los eslabones 1 y 2 consideran su posición más crítica en lo que a solicitaciones mecánicas se refiere, que es cuando los mismos se encuentran en posición horizontal (Figura 4.2.21 y Figura 4.2.25).
- Las cargas aplicadas a las piezas en acero inoxidable difieren a las cargas aplicadas a las piezas en acrílico, ya que debido a la diferencia entre sus pesos los contrapesos calculados cambian para cada caso, sin embargo, el punto de aplicación de cada carga no varía (Figura 4.2.21 y Figura 4.2.25).
- En todas las simulaciones se aplica una sujeción de tipo empotramiento en los cuatro hoyos donde van instalados los ejes de los servomotores. Ejemplos de esto se pueden apreciar en la Figura 4.2.22 y Figura 4.2.24.

4.2.13 Simulaciones en el Conjunto Columna-Base (Acero Inoxidable 316L)

Condiciones de contorno particulares:

- Carga aplicada verticalmente hacia abajo en los orificios de los servomotores en la parte superior del conjunto, equivalente al peso del eslabon 1, eslabon 2, sujetador y laparoscopio, resultando un total de 45.84 Kgf.

Resultados:

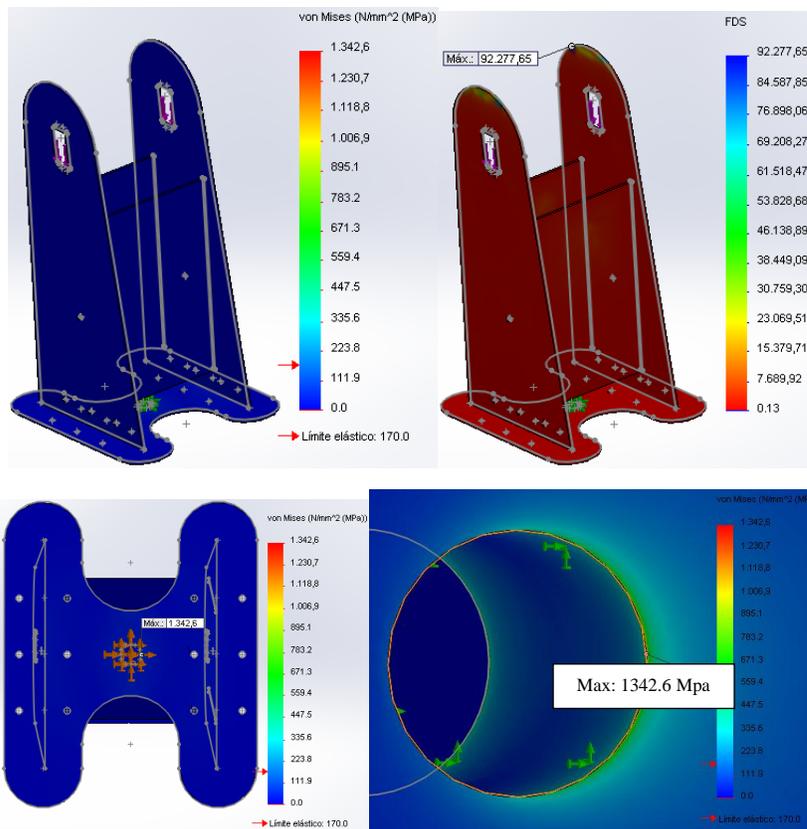


Figura 4.2.19. Caso: columna-base en acero inoxidable. Distribución de esfuerzos de Von Mises (izquierda superior), distribución del factor de seguridad (derecha superior), detalle de la distribución de esfuerzos de Von Mises en donde el esfuerzo es máximo (inferior izquierdo y derecho)

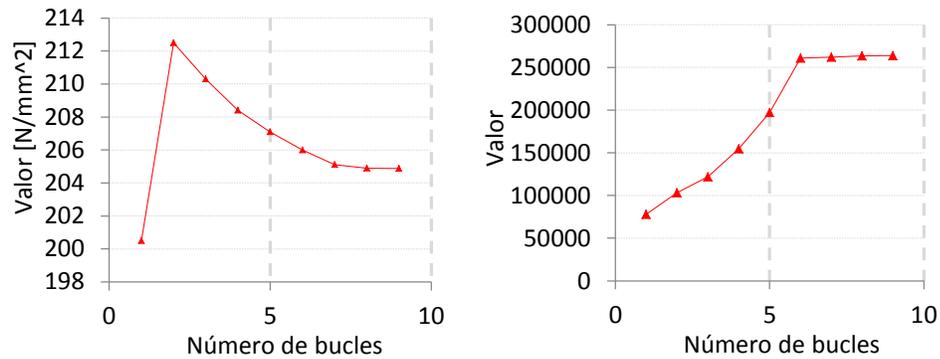


Figura 4.2.20. Caso: columna-base en acero inoxidable. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha)

- Convergencia para una cantidad de nodos de 253000 (Figura 4.2.20).
- El factor de seguridad mínimo registrado en la última iteración fue de 0.13 (Figura 4.2.19), donde el esfuerzo es máximo y su valor es 1342 Mpa (Figura 4.2.19).
- El factor de seguridad máximo registrado (Figura 4.2.19) se localiza en el tope de la pieza en donde la influencia del esfuerzo es poca, ya que la carga aplicada está por debajo de esta zona y apunta en dirección opuesta a ella, haciendo que los esfuerzos en esa zona tiendan a cero y resultando en factores de seguridad altos (Ecuaciones Ec. (11) y Ec. (12)). Casos similares ocurrieron en las otras simulaciones.
- Según la simulación, esta pieza supera al valor del esfuerzo de fluencia del material sólo en una pequeña área de la arista inferior de dos de los cuatro hoyos de la sujeción entre la pieza y el servomotor de la base (Figura 4.2.19), sin reportar fallas en el resto de la geometría.
- La región donde se reporta un factor de seguridad menor a la unidad presenta las siguientes peculiaridades: primeramente es un concentrador de esfuerzo debido a que es una discontinuidad en el material en forma de hoyo pasante, reportando además que la pieza falla justo en la arista de dicho hoyo; segundo, es justamente el área donde se está aplicando la sujeción de empotramiento para el análisis,

pudiendo generarse esfuerzos durante la simulación que no se presentarían en la realidad; tercero, por ser un concentrador de esfuerzo, la comparación del esfuerzo resultante no debe realizarse con el esfuerzo de fluencia, sino con el esfuerzo de ruptura, ya que al ser un material dúctil y superarse el esfuerzo de fluencia, esta zona sufrirá un endurecimiento por deformación, resultando en un endurecimiento local de la pieza que en realidad favorecería su resistencia (Mott, 2006).

- Se concluye que el análisis de esfuerzos de esta zona en particular ameritaría de una prueba experimental.
- El patrón de cuatro hoyos donde se realiza la sujeción y donde se concentran los esfuerzos se presenta en todas las piezas simuladas, por lo que todas las conclusiones aquí desarrolladas serán válidas para las simulaciones en las otras piezas.

4.2.14 Simulaciones en el Conjunto del eslabón 1 (Acero Inoxidable 316L)



Figura 4.2.21. Esquema de fuerzas aplicadas al eslabón 1

Condiciones de contorno particulares (Figura 4.2.21):

- $F_c = 34.4$ Kgf.
- $F_r = 17.05$ Kgf.
- $F_p = 7.665$ Kgf.

Resultados:

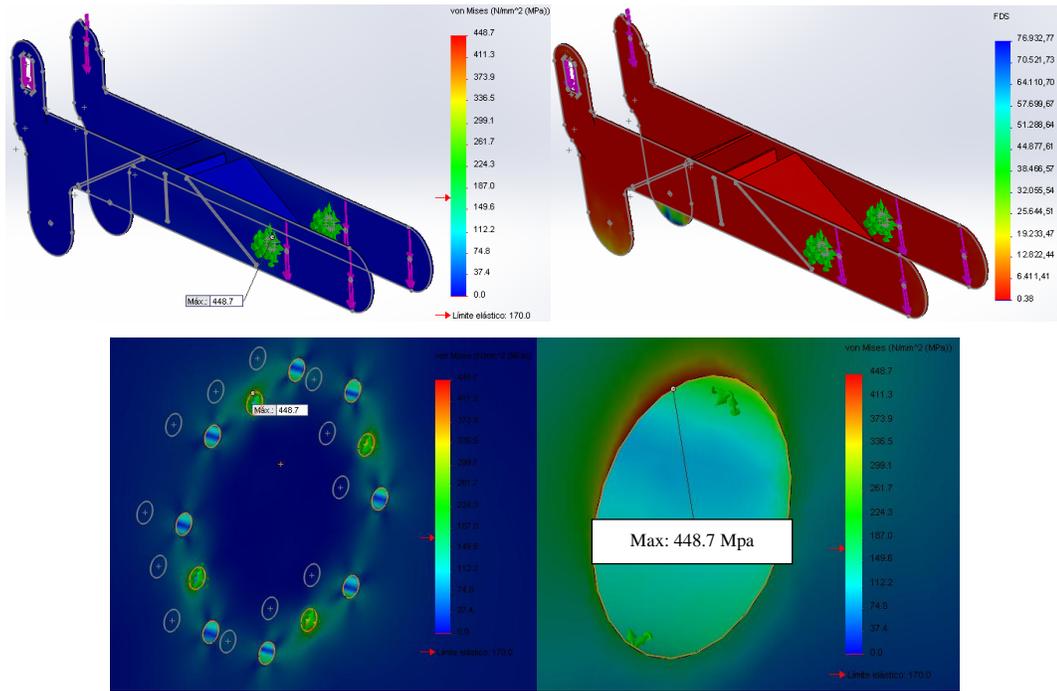


Figura 4.2.22. Caso: eslabón 1 en acero inoxidable. Distribución de esfuerzos de Von Mises (izquierda superior), distribución del factor de seguridad (derecha superior) y detalle de la distribución de esfuerzos de Von Mises en donde el esfuerzo es máximo (inferior izquierdo y derecho)

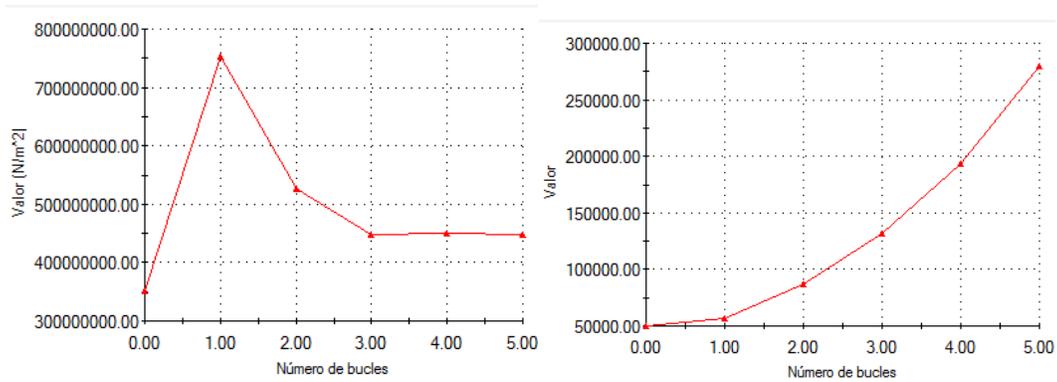


Figura 4.2.23. Caso: eslabón 1 en acero inoxidable. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha)

- Factor de seguridad mínimo de 0.38 (Figura 4.2.22), pero la falla ocurre en el patrón de cuatro hoyos donde se instala el servomotor, por lo que las conclusiones obtenidas en el análisis de la columna base en

acero inoxidable son aplicables para este caso también, siendo necesario entonces verificar si la pieza falla o no de manera experimental. De fallar en un análisis experimental, debe considerarse usar láminas de acero inoxidable de mayor grosor, como de 6 mm por ejemplo, en donde la simulación arroja valores de factor de seguridad mayores a 1 (Figura 4.2.24).

- Convergencia con un número de nodos de alrededor de 140000 (Figura 4.2.23).

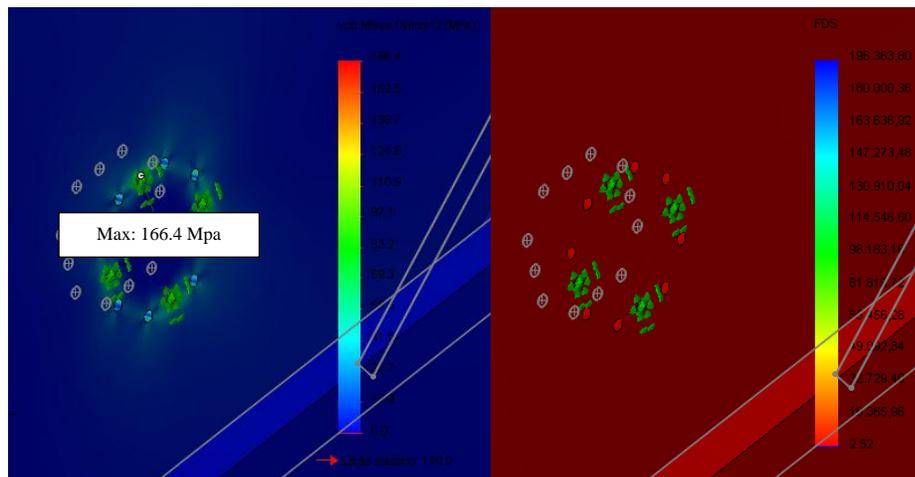


Figura 4.2.24. Simulación para el caso del eslabón 1 en acero inoxidable de grosor de 6 mm, distribución de esfuerzos de Von Mises (izquierda) y distribución de factores de seguridad (derecha)

4.2.15 Simulaciones en el Conjunto del eslabón 2 (Acero Inoxidable 316L)

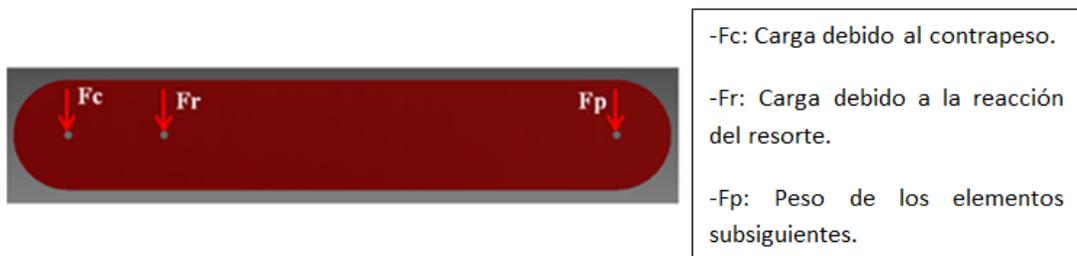


Figura 4.2.25. Esquema de fuerzas aplicadas al eslabón 2

Condiciones de contorno particulares (Figura 4.2.25):

- $F_c = 4.6 \text{ Kgf}$
- $F_r = 2.09 \text{ Kgf}$
- $F_p = 0.7 \text{ Kgf}$

Resultados:

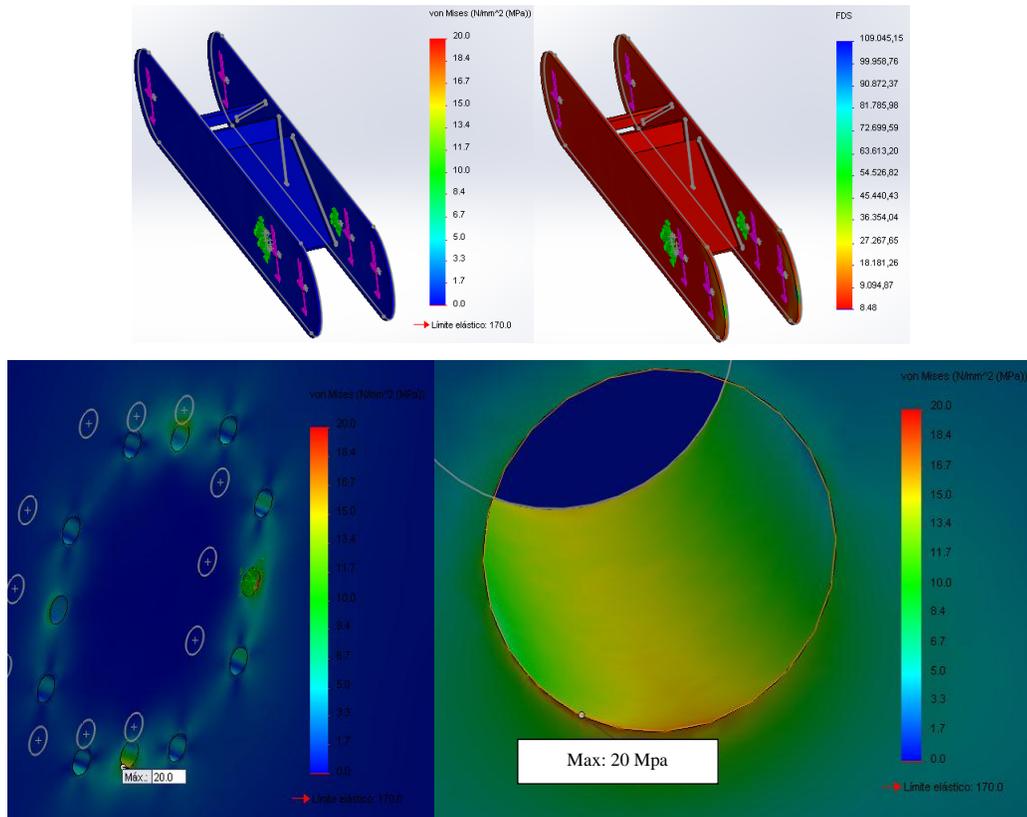


Figura 4.2.26. Caso: eslabón 2 en acero inoxidable. Distribución de esfuerzos de Von Mises (izquierda), distribución del factor de seguridad (derecha) y detalle de la distribución de esfuerzos de Von Mises en donde el esfuerzo es máximo (Inferior izquierda y derecha)

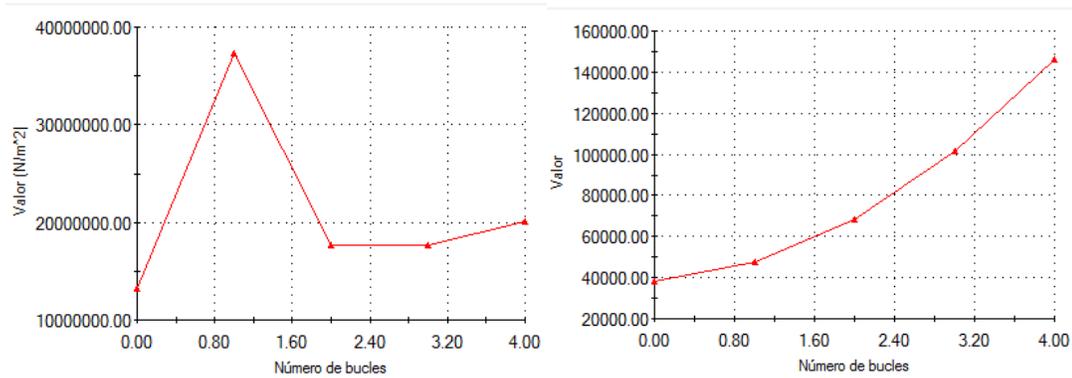


Figura 4.2.27. Caso: eslabón 2 en acero inoxidable. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha)

- Factor de seguridad mínimo de 8.48 (Figura 4.2.26), no hay falla por ruptura para esta pieza, aunque por otra parte, los esfuerzos se concentran de manera similar a las simulaciones anteriores, por lo que se concluye de igual manera que los resultados en la vecindad de los hoyos no son confiables.
- Convergencia con un número de nodos de alrededor de 70000 (Figura 4.2.27).

4.2.16 Simulaciones en el Conjunto Columna-Base (Acrílico)

Condiciones de contorno particulares:

- Carga aplicada verticalmente en los orificios de los servomotores en la parte superior del conjunto, equivalente al peso del eslabon 1, eslabon 2, sujetador y laparoscopio, resultando un total de 13.38 Kgf.

Resultados:

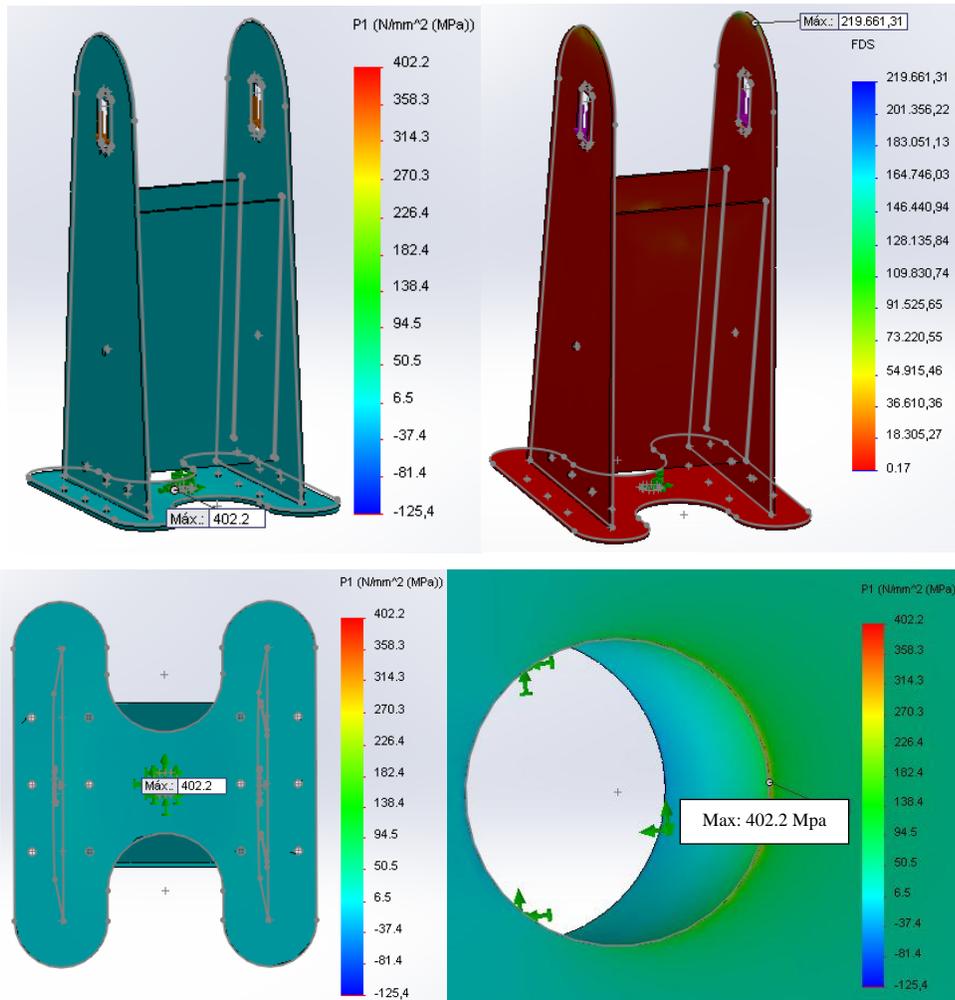


Figura 4.2.28. Caso: columna-base en PMMA. Distribución de esfuerzos normales máximos (superior izquierda), distribución del factor de seguridad (superior derecha) y detalle de distribución de esfuerzos normales máximos donde el esfuerzo es mayor (inferior izquierda y derecha)

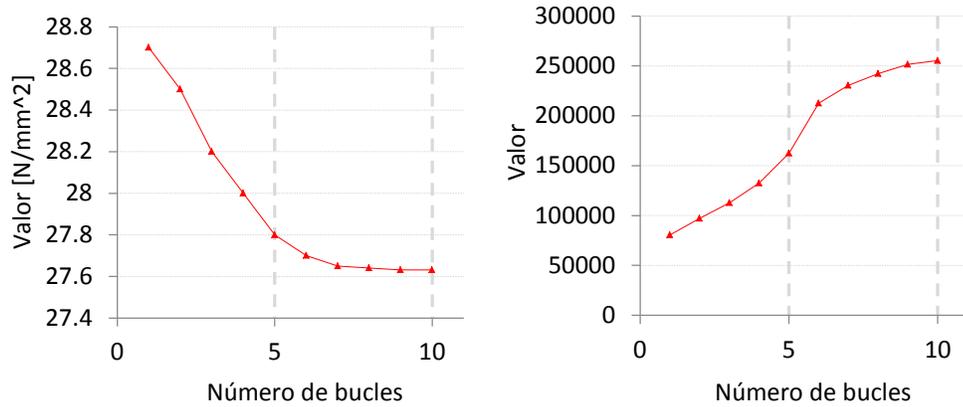


Figura 4.2.29. Caso: columna-base en polimetilmetacrilato. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha)

- Factor de seguridad mínimo de 0.17 (Figura 4.2.28) en los cuatro hoyos de instalación del servomotor, por lo que se aplican las mismas conclusiones desarrolladas de las simulaciones de la columna-base en acero inoxidable.
- Convergencia con una cantidad de 250000 nodos (Figura 4.2.29).

4.2.17 Simulaciones en el Conjunto del eslabón 1 (Acrílico)

Condiciones de contorno particulares (Figura 4.2.21):

- $F_c = 9.4 \text{ Kgf}$
- $F_r = 22 \text{ Kgf}$
- $F_p = 3.35 \text{ Kgf}$

Resultados:

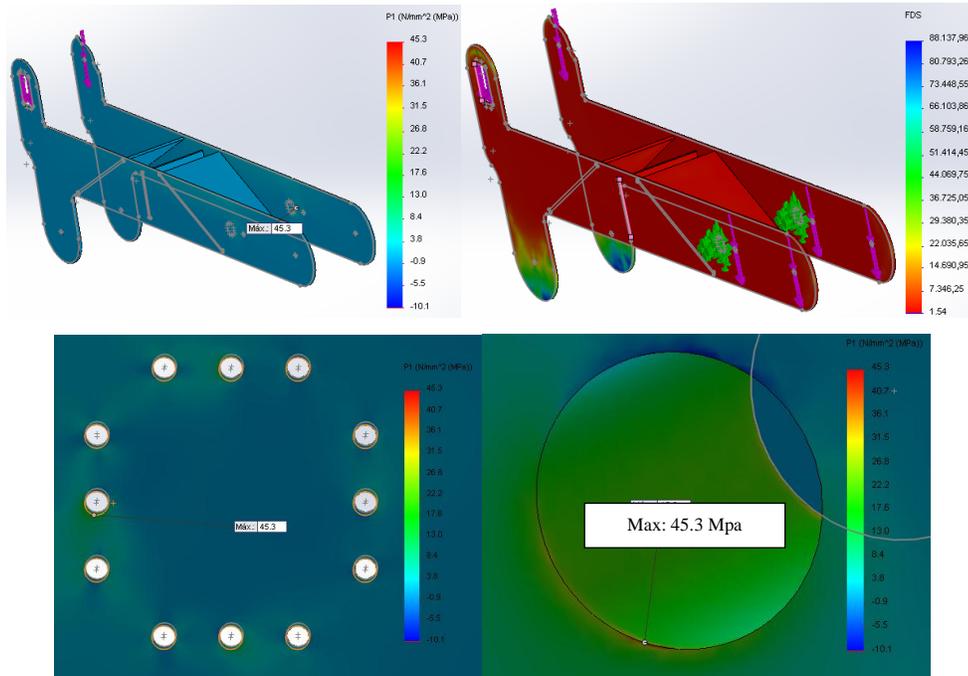


Figura 4.2.30. Caso: eslabón 1 en PMMA. Distribución de esfuerzos normales máximos (superior izquierda), distribución del factor de seguridad (superior derecha) y detalle de la distribución de esfuerzos normales máximos en donde el esfuerzo es mayor (inferior izquierda y derecha)

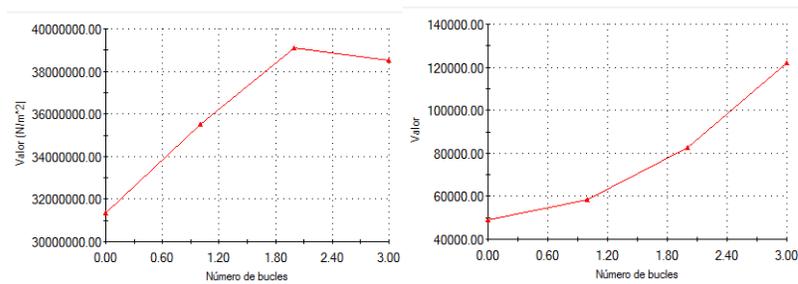


Figura 4.2.31. Caso: eslabón 1 en polimetilmetacrilato. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha)

- Factor de seguridad mínimo de 1.54 (Figura 4.2.30), no hay falla.
- Convergencia con un número de nodos de alrededor de 82000 (Figura 4.2.31).

4.2.18 Simulaciones en el Conjunto del eslabón 2 (Acrílico)

Condiciones de contorno particulares (Figura 4.2.25):

- $F_c = 2.15 \text{ Kgf.}$
- $F_r = 2.09 \text{ Kgf.}$
- $F_p = 0.7 \text{ Kgf.}$

Resultados:

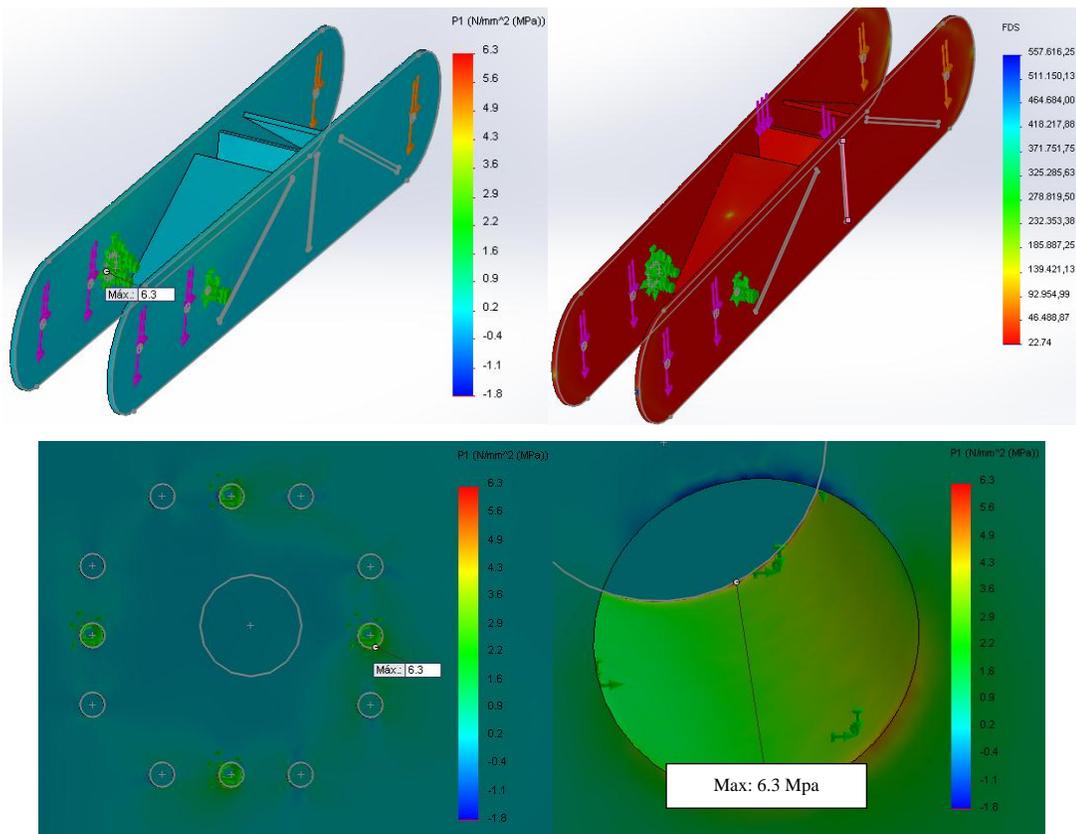


Figura 4.2.32. Caso: eslabón 2 en PMMA. Distribución de esfuerzos normales máximos (superior izquierda), distribución del factor de seguridad (superior derecha) y detalle de la distribución de esfuerzos normales máximos en donde el esfuerzo es mayor (Inferior izquierda y derecha)

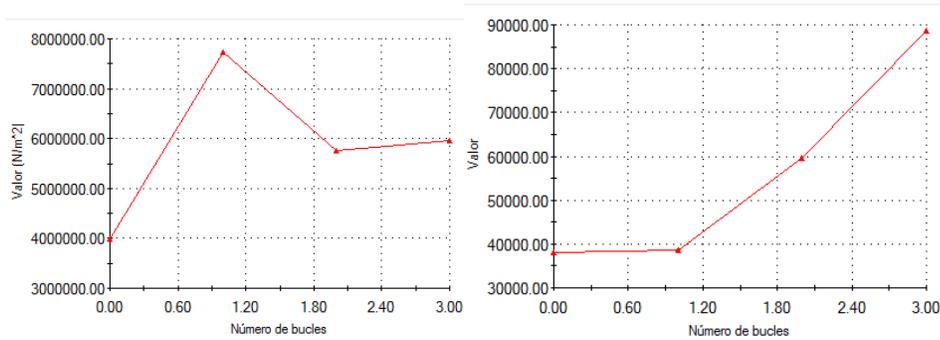


Figura 4.2.33. Caso: eslabón 2 en polimetilmetacrilato. Número de bucles vs esfuerzo máximo (izquierda) y Número de bucles vs Número de nodos (derecha)

- Convergencia con un número de nodos de alrededor de 60000 (Figura 4.2.33).
- Factor de seguridad mínimo de 22.74 (Figura 4.2.32), indicando que no hay falla, sin embargo se aplican las mismas conclusiones respecto a los cuatro hoyos que en las simulaciones anteriores.

4.2.19 Comparación numérica-analítica

Para el eslabón 1, se hizo una comparación numérico-analítica entre los valores obtenidos numéricamente en los alrededores del punto A de la Figura 4.2.34 y su respectivo resultado analítico, al igual que para el eslabón 2 (Figura 4.2.35).

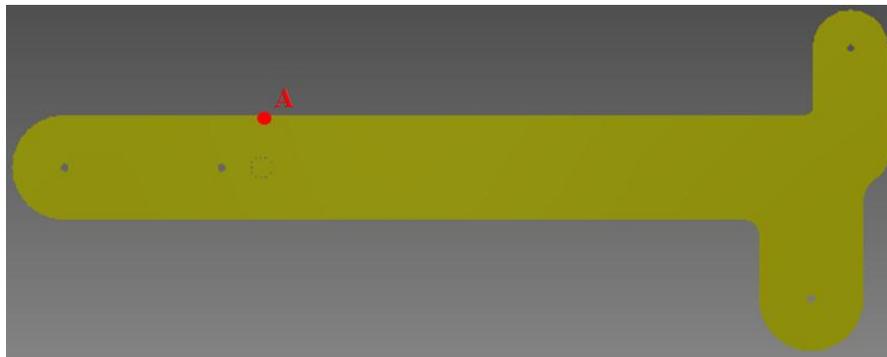


Figura 4.2.34. Punto de estudio para la comparación numérica-analítica en el eslabón 1



Figura 4.2.35. Punto de estudio para la comparación numérica-analítica en el eslabón 2

Estos puntos fueron seleccionados debido a que son los que según la teoría de esfuerzo por flexión sufren la mayor tensión (Mott, 2006).

Un esfuerzo de tensión en un punto solicitado a flexión se define según la fórmula (Mott, 2006):

$$\sigma = \frac{M * C}{I} \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde “M” es el momento en el punto, “C” es la distancia desde la fibra neutra hasta el punto de estudio e “I” es el momento de inercia de la sección transversal en donde se encuentra el punto (Mott, 2006).

Los valores calculados y comparados se agrupan en la siguiente tabla:

Tabla 4.2.1. Comparación numérica-analítica de resultados

Pieza en estudio	Caso	Esfuerzo según MEF (Mpa)	Esfuerzo Analítico (Mpa)	Error relativo
Eslabón 1	Acero Inoxidable	8.9	8.7	2.36 %
Eslabón 1	Acrílico	3.16	3.24	2.56 %
Eslabón 2	Acero Inoxidable	0.8	0.8	0.12 %
Eslabón 2	Acrílico	0.45	0.44	1.42 %

Esto demuestra que para ninguno de los casos los resultados numéricos se alejan del resultado analítico en la vecindad del punto “A”.

4.2.20 Discusión general de resultados del análisis de esfuerzos

Como se mencionó anteriormente, a excepción de la región cercana a los cuatro hoyos de sujeción de las piezas, los resultados de las simulaciones son confiables, además, estos resultados indican que la pieza no falla en zonas ajenas a

dichas regiones. Respecto a las regiones cercanas a los cuatro hoyos se identifican varias causas para la no confiabilidad de los resultados:

- Los resultados numéricos pueden diferir de los analíticos debido a las condiciones de contorno impuestas en la simulación que difieren del modelo real. Debido a la imposibilidad de realizar una simulación en el modelo como un todo por la falta de información respecto a la naturaleza del material de los accionamientos, se decidió simular cada pieza por separado colocando una sujeción de tipo empotramiento en los cuatro hoyos de instalación del eje del accionamiento. Sin embargo esta sujeción no representa a la realidad, que no es un empotramiento sino una unión atornillada, haciendo que los resultados que arroja la simulación sean poco confiables en la proximidad de la sujeción.
- Estas regiones son regiones de concentración de esfuerzos debido a la discontinuidad del material por la presencia de los hoyos, además se presenta un concentrador de esfuerzos adicional por la naturaleza de la arista del hoyo, que es una arista viva, incrementando la dificultad de realizar un cálculo analítico para comparar resultados.
- Por existir una sujeción en los cuatro hoyos, se impone un problema de tipo hiperestático, incrementando la dificultad de calcular un resultado analítico con el que comparar los resultados numéricos.
- Existen otros aspectos que influyen en la concentración de esfuerzos y que no se tomaron en cuenta en las simulaciones, como la presencia de tensiones internas debido al proceso de fabricación con el que se formó el material, o la posibilidad de un mal acabado superficial debido al proceso con el que se fabriquen los hoyos, existiendo la posibilidad de que se causen microgrietas (Mott, 2006).

4.3. ACCIONAMIENTOS

Se seleccionaron servomotores para el accionamiento, debido a la capacidad que tienen de modificar la posición angular de su eje con exactitud al recibir una

única señal eléctrica de control, manteniendo dicha posición aun cuando el eje del motor esté sometido a perturbaciones externas, como por ejemplo el torque debido al peso de los eslabones del robot. En contraste, se decidió no utilizar un motor de pasos debido a que, en general, poseen inferior relación torque-tamaño, mayor complejidad de control y menor velocidad de operación.

Las especificaciones de los servomotores indican un torque máximo y un torque de operación, el torque máximo o stall torque es una magnitud que sólo debe ser alcanzada durante no más de algunos segundos, por ejemplo durante el arranque. Para que el motor pueda operar en un rango seguro sin sufrir daños, los fabricantes recomiendan que para operaciones continuas el torque de operación no supere un tercio del valor del torque máximo.

$$\tau_{operación} = \frac{\tau_{stall}}{3} \quad \text{Ec. (18)}$$

En un cálculo inicial, el torque de operación mínimo “T” requerido por los servomotores a instalar en el eslabón 1 y el eslabón 2 se puede calcular según el siguiente esquema general:

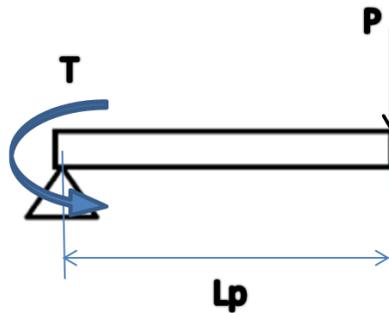


Figura 4.3.1. Esquema general para el cálculo del torque “T” requerido para mantener una carga “P” estable en un sistema rotativo.

Donde “P” representa la sumatoria de fuerzas relacionadas con los pesos del sistema y “Lp” representa la distancia desde el eje de giro del sistema hasta el centro de masa del mismo, donde hace efecto la fuerza “P”. La sumatoria de momentos en este sistema se define según la siguiente fórmula (Serway, 1999):

$$\sum M = I * \alpha \quad \text{Ec. (19)}$$

Donde “M” representa a cada uno de los momentos asociados al sistema, “I” representa el momento de inercia del sistema y “ α ” corresponde a la aceleración angular del sistema.

En el caso de estudio, la sumatoria de momentos corresponde a:

$$\sum M = T - (P * Lp) \quad \text{Ec. (20)}$$

Y para la condición de equilibrio, en donde “ α ” es cero y la condición inicial de velocidad angular “ ω ” es cero también, se debe cumplir que:

$$T = (P * Lp) \quad \text{Ec. (21)}$$

Utilizando la ecuación (18), y sustituyendo en la ecuación Ec. (21), si $T = \tau_{operación}$ entonces:

$$\tau_{stall} = 3 * (T) \quad \text{Ec. (22)}$$

Para el caso del eslabón 1, tanto para el caso del eslabón hecho con acero inoxidable “AA” como para el caso del eslabón hecho con acrílico “PMMA”, la ecuación Ec. (22) dio como resultado:

$$3 * T_{1AA} = 570.85 \text{ Kgf} * \text{cm}$$

$$3 * T_{1PMMA} = 190.77 \text{ Kgf} * \text{cm}$$

Y para el caso del eslabón 2:

$$3 * T_{2AA} = 159.49 \text{ Kgf} * \text{cm}$$

$$3 * T_{2PMMA} = 83.4 \text{ Kgf} * \text{cm}$$

Sin embargo, al realizar una investigación de mercado, se pudo constatar que motores de tales requerimientos eran de un costo considerable, además de necesitar de controladores con hardware más robusto, como por ejemplo, PLC’s, cuyo costo es considerable también.

Como alternativa a este problema, se desarrolló una metodología que permite disminuir el requerimiento de torque de los servomotores valiéndose del uso de

contrapesos y resortes, permitiendo libertad en la selección de los servomotores y disminuyendo de manera considerable el costo asociado a su adquisición.

Tanto para el caso del acero inoxidable, como el del prototipo en acrílico, dicha metodología permitió diseñar un sistema en donde el eslabón 1 es controlado por dos servomotores de $\tau_{stall} = 6 \text{ Kgf} * \text{cm}$, y el eslabón 2 es controlado por un servomotor de $\tau_{stall} = 6 \text{ Kgf} * \text{cm}$, demostrando así la libertad proporcionada por esta metodología con respecto a la selección de los servomotores. Los tres motores son del modelo No. FS5106B, de la casa FEETECH.

Según la ecuación (18), el valor de operación de estos servomotores es entonces:

$$\tau_{operación} = \frac{\tau}{3} = 2 \text{ Kgf} * \text{cm}.$$

Permitiendo establecer un límite en el rango del momento total máximo del sistema del eslabón 1 de $[-4;4] \text{ Kgf}*cm$ y un límite en el rango para el momento total del sistema del eslabón 2 de $[-2;2] \text{ Kgf}*cm$, de manera tal que los servomotores no sufrieran daño alguno.

La hoja que contiene los datos y especificaciones del servomotor por parte del fabricante se encuentra en el apéndice (Apéndice 1.1), y con los datos obtenidos se definió por aproximación la siguiente gráfica y su correspondiente función matemática:

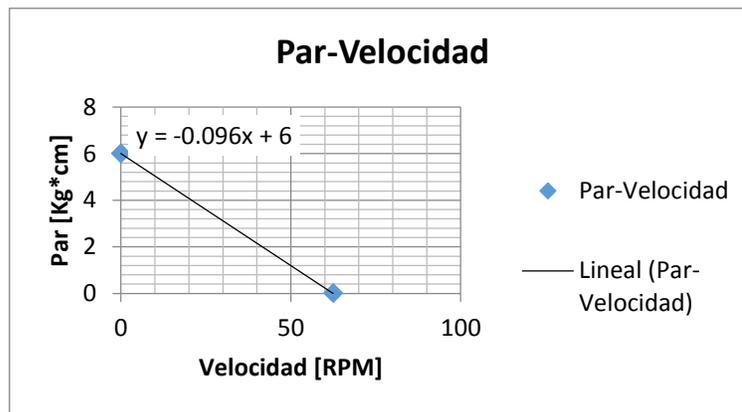


Figura 4.3.2. Gráfico par-velocidad del servomotor seleccionado

Dicha función no es más que la recta definida entre los dos puntos correspondientes al torque en parada (stall torque) y a la velocidad sin carga (no load speed). La razón para esta aproximación es que el servomotor contiene un motor DC, y los motores DC se comportan de manera lineal entre estos dos puntos (Budynas, 2008). Por seguridad, se ha establecido que el torque suministrado por los motores en ninguno de los casos superará el valor de 2 Kgf*cm. Se puede entonces aproximar la velocidad angular máxima de los eslabones del robot en alrededor de los 40 RPM, según la Figura 4.3.2, velocidad aceptable para esta aplicación, ya que los movimientos que el robot debe ejecutar son cortos.

4.4. CONTRAPESOS

Como se determinó durante la concepción del modelo 2 y el modelo 3, la presencia de contrapesos reduciría el requerimiento de torque por parte de los servomotores disminuyendo su costo, adicionalmente, en la concepción del modelo 3 se determinó que un resorte podría desarrollar la misma fuerza que un contrapeso sin adicionar masa al sistema. Para determinar las características de estos elementos y su disposición de instalación, se desarrolló el análisis y formulación expuestos a continuación.

4.4.1 Efectos de un contrapeso

El sistema de la Figura 4.4.1 muestra de manera simplificada el efecto del contrapeso para un sistema de viga articulada arbitraria. Consiste en el diagrama de cuerpo libre de una barra con una carga “P” en un extremo y un contrapeso “C” en el otro extremo, con distancias del punto de apoyo a cada una de las fuerzas aplicadas “Lp” y “Lc” respectivamente.

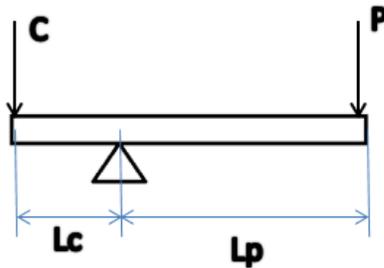


Figura 4.4.1 Diagrama de cuerpo libre de un eslabón con carga “P” aplicada en su extremo y con carga “C” aplicada en su extremo opuesto

Suponiendo la magnitud de “P” como un valor predeterminado, al igual que las distancias “Lc” y “Lp”, e imponiendo que el sistema esté en equilibrio, es decir, que la suma de los momentos sea igual a cero, entonces el cálculo de “C” resulta en la siguiente fórmula:

$$C = \frac{P * L_p}{L_c} \quad (23)$$

Debido al equilibrio impuesto en el sistema por la interacción entre las fuerzas C y P, el sistema no experimenta aceleración angular. La gran ventaja de este hecho es que en teoría, sin importar cuales sean las magnitudes de C y P, si en condiciones de equilibrio se aplica aunque sea un mínimo torque T adicional (en este caso el de un servomotor), se puede lograr movimiento (Figura 4.4.2).

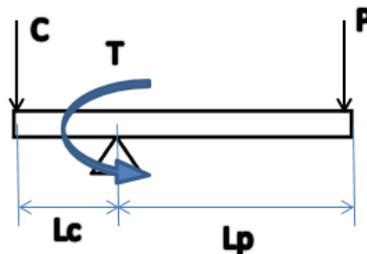


Figura 4.4.2. Diagrama de cuerpo libre de un eslabón incluyendo las cargas “P” y “C” más un torque variable “T”

El estudio anterior se realizó para el caso del vínculo dispuesto en sentido horizontal, ahora para el caso de que esté inclinado un ángulo Θ arbitrario, se tiene el siguiente esquema:

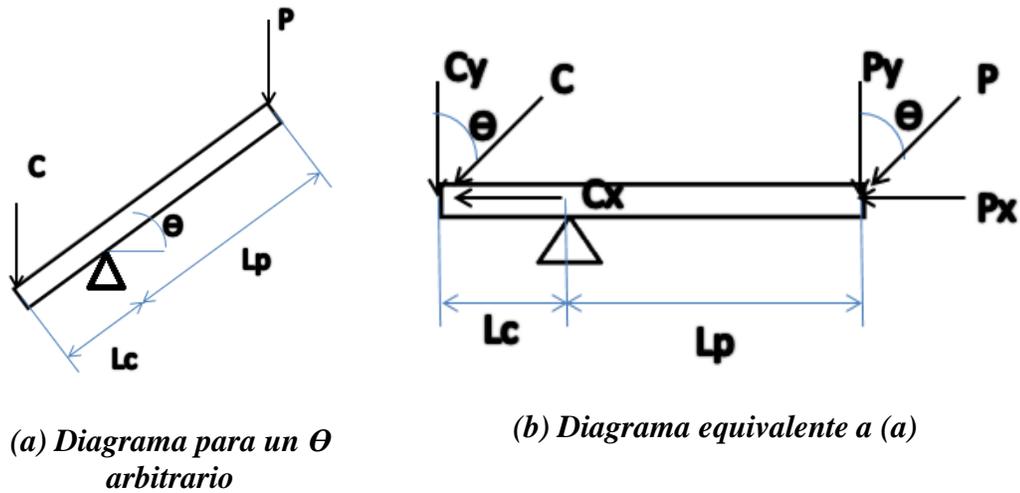


Figura 4.4.3. Diagrama para un caso de ángulo arbitrario

Ya que las componentes “Cx” y “Px” no intervienen en la dinámica/cinemática rotacional, sólo se toman en cuenta las componentes “Cy” y “Py”. Cada una de estas componentes obedece a las siguientes ecuaciones:

$$C_y = C * \cos \theta \quad \text{Ec. (24)}$$

$$P_y = P * \cos \theta \quad \text{Ec. (25)}$$

Mediante la suposición de equilibrio rotacional, se formula también al resultado mostrado en la ecuación (23). Se verifica entonces que la presencia de un contrapeso adecuado hace que la sumatoria de momentos sea cero para cualquier ángulo.

4.4.2 Resortes como contrapesos

En contraposición al contrapeso, un resorte aporta menos masa, y al mismo tiempo tiene la posibilidad de aportar la misma fuerza que un contrapeso para el mismo objetivo. Por tal razón se decidió su inclusión en el diseño, instalándolos de manera similar a los contrapesos, pero con la particularidad de que éstos están conectados al eslabón anterior al eslabón en donde son instalados (Figura 4.4.9). Sin embargo, el problema en su uso para este fin es la variación de la fuerza respecto a la deformación del resorte, agregando complejidad al cálculo para establecer una

configuración apropiada que garantice que el momento total del sistema se mantenga en los rangos establecidos en la selección de los accionamientos.

Los resortes utilizados en el robot son resortes de tracción, que generan una fuerza reactiva en dirección opuesta a la deformación del mismo cuando este se encuentra en tracción (Mott, 2006).

Sólo dos tipos de resorte fueron utilizados y las funciones que los describen fueron determinadas de manera experimental, y se encuentran en las siguientes gráficas:

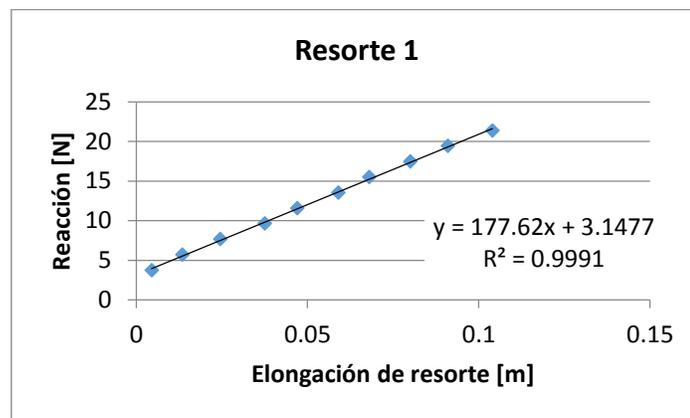


Figura 4.4.4. Relación elongación-fuerza de reacción del resorte 1

Longitud del resorte 1 sin carga “LiR1”: 98.5 mm

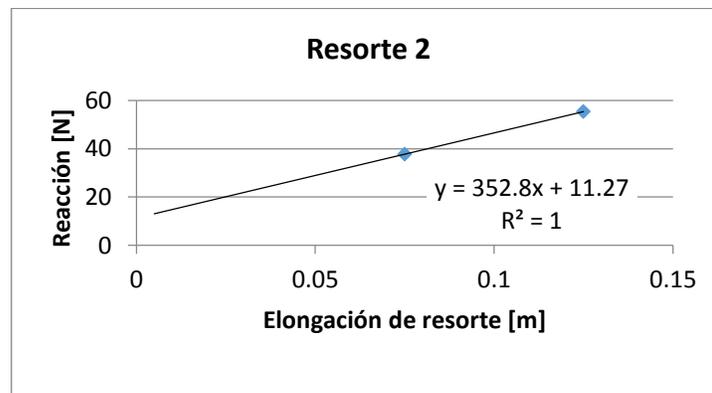


Figura 4.4.5 Relación elongación-fuerza de reacción del resorte 2

Longitud del resorte 2 sin carga “LiR2”: 80 mm

4.4.3 Cálculo para la instalación de contrapesos y resortes

Primeramente se estableció que por razones estéticas y de espacio la longitud correspondiente al lado opuesto del eslabón en donde se instalarían los contrapesos debía guardar una relación 1:3 respecto a la longitud del eslabón. Para el eslabón 1 esto representa una longitud de 150 mm (Figura 4.4.6) y para el eslabón 2 una longitud de 100 mm (Figura 4.4.7).

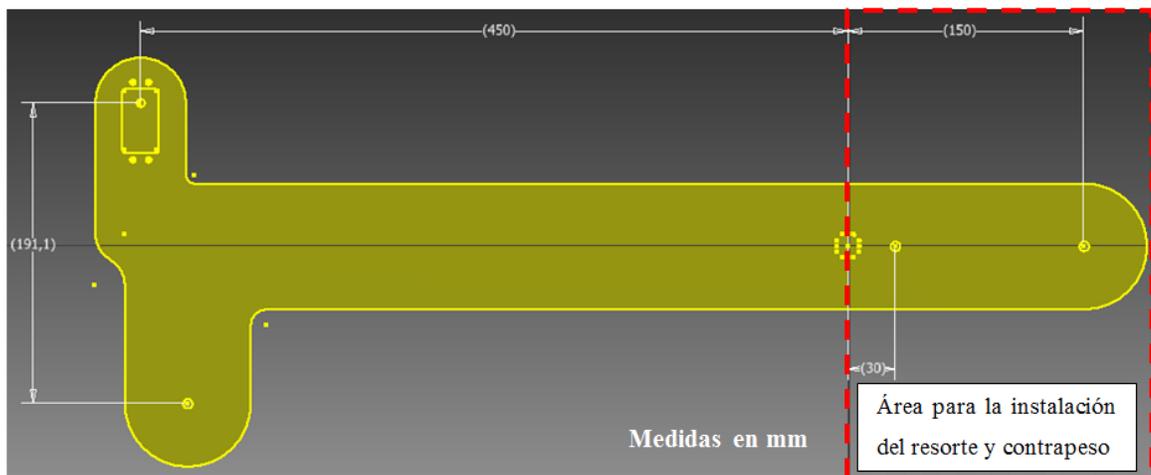


Figura 4.4.6. Consideraciones de espacio para la instalación de contrapesos y resortes en el eslabón 1

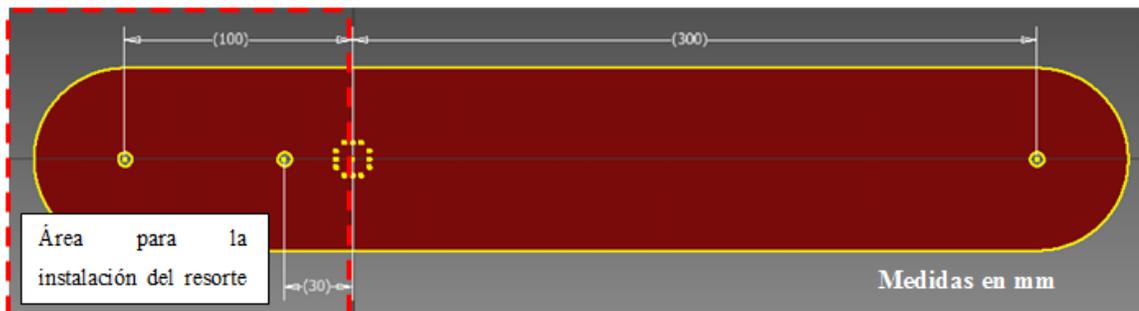


Figura 4.4.7. Consideraciones de espacio para la instalación de contrapesos y resortes en el eslabón 2

El espacio incluido en la parte inferior del eslabón 1 fue ajustado para la instalación del resorte.

Para ayudar a decidir cuál era la configuración más adecuada se analizó la ecuación (23) tomando la distancia “Lc” como variable, obteniendo la siguiente gráfica:

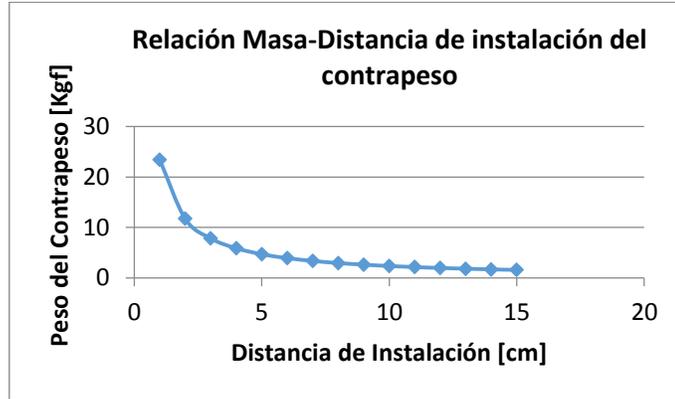


Figura 4.4.8. Variación del peso necesario del contrapeso respecto a su distancia de instalación

En donde se puede apreciar que a mayor distancia de instalación, menor es la masa requerida del contrapeso para que el sistema esté en equilibrio, por lo que se decidió que la instalación del contrapeso debe ser más externa que la del resorte respecto al eje de rotación del eslabón.

La disposición de los resortes con los eslabones en posición horizontal queda entonces como indica la Figura 4.4.9.

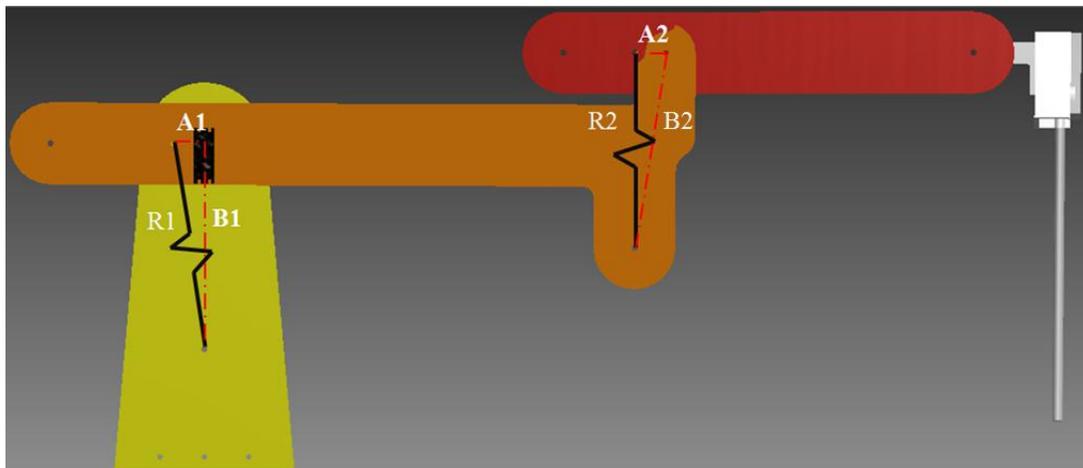


Figura 4.4.9. Esquema de instalación de los resortes

Donde $R1$ y $R2$ representan la longitud de los resortes $R1$ y $R2$ respectivamente. $A1$ y $A2$ representan las distancias existentes entre el punto de instalación del resorte en el eslabón correspondiente y el eje de giro del eslabón respectivo. $B1$ y $B2$ representan la distancia entre el eje de giro del eslabón correspondiente y el punto de instalación del resorte en el conjunto anterior. Esta configuración es consecuencia de la necesidad del eslabón 1 de movilizarse entre los 0 y 90 grados respecto a tierra y la del eslabón 2 de movilizarse entre los 0 y -90 grados respecto al eslabón 1, permitiendo a la fuerza de reacción de los resortes ser efectiva dentro de estos rangos.

Bajo las diferentes configuraciones de ángulo de los eslabones, los resortes generaran una fuerza resultante F en el eslabón, como en la Figura 4.4.10 y Figura 4.4.11.

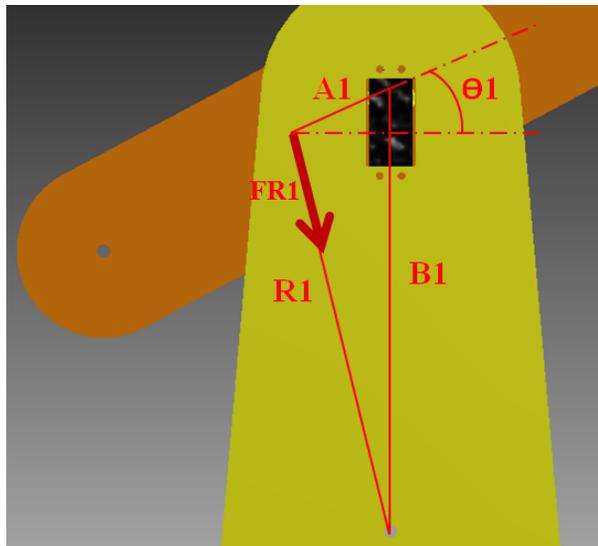


Figura 4.4.10. Esquema para calcular la reacción del resorte 1 en función del ángulo del eslabón 1

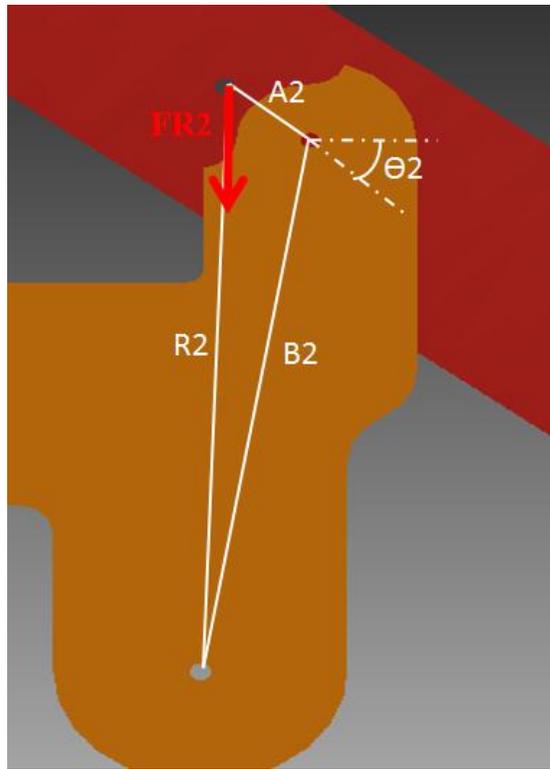


Figura 4.4.11 Esquema para calcular la reacción del resorte 2 en función del ángulo del eslabón 2

Tanto la fuerza de reacción del resorte 1, “FR1” como la del resorte 2, “FR2” son dependientes de la elongación que éstos puedan experimentar, que al mismo tiempo es dependiente entonces de los ángulos de sus respectivos eslabones “Θ1” y “Θ2”. Además, sólo las componentes de dichas fuerzas que sean perpendiculares a los eslabones contribuirán a ser una fuerza que se comporte como un contrapeso. El cálculo de dichas componentes depende también de los ángulos de los eslabones.

Se procedió primeramente con el cálculo del resorte y contrapeso del eslabón 2 debido a que estos afectaban directamente a la instalación del contrapeso y del resorte del eslabón 1.

4.4.4 Primer cálculo: eslabón 2

Se tiene que para el resorte 2:

$$\Delta x_2 = R_2 - L_i R_2 \tag{Ec. (26)}$$

Donde

$$R2 = \sqrt{A2^2 + B2^2 - (2 * A2 * B2 * \cos(|\theta2| + \arccos(\frac{A2}{B2})))} \quad \text{Ec. (27)}$$

Con “ $\theta2$ ” restringido a $[-\frac{\pi}{2}; 0]$.

Con “ $\Delta x2$ ” se obtiene “FR2” con el uso de la función que describe al resorte 2, obtenida de la Figura 4.4.5, que se expresa como sigue.

$$FR2 = 352.8 * \Delta x + 11.27 \quad \text{Ec. (28)}$$

Con “ $\Delta x2$ ” en metros y “FR2” en newtons.

Pero la componente de “FR2” que interviene en la dinámica rotacional del sistema es sólo la perpendicular al eslabón 2, y su fórmula, deducida con trigonometría sobre la Figura 4.4.11 viene dada por:

$$FR2P = FR2 * \sqrt{A2^2 + B2^2} * \frac{\text{sen}(\theta2 + \arccos(\frac{A2}{B2}))}{R2} \quad \text{Ec. (29)}$$

Siendo entonces, que el momento producido debido al resorte viene dado por

$$MR2 = FR2P * A2 \quad \text{Ec. (30)}$$

Usando estas ecuaciones se verificó que para la posición con el eslabón 2 en horizontal ($\theta2 = 0$), los valores $A2 = 3 \text{ cm}$ y $B2 = 19.34 \text{ cm}$ (con una distancia perpendicular a “A2” de 19.11 cm) para la instalación del resorte permitían una reducción parcial del momento total en el sistema, en donde, sin la presencia del resorte 2, totalizaba una cantidad de -159.49 Kgf*cm y -83.4 Kgf*cm para los casos de acero inoxidable y acrílico respectivamente, y con la presencia del mismo, esta magnitud se reducía a -57 Kgf*cm y -27.8 Kgf*cm respectivamente.

El problema del resorte 2, era la variación de su fuerza de reacción en función del ángulo del eslabón. En este caso, la fuerza aumentaba a medida que el ángulo disminuía. Para garantizar que el momento total del sistema no superara el rango límite establecido para el bienestar de los servomotores, se adicionó un contrapeso.

Dado que el contrapeso sería instalado a una distancia “d2” de 100 mm del eje de rotación del eslabón 2, el momento debido al mismo vendría dado por:

$$MC2 = FC2 * \cos(\theta2) * d2 \quad \text{Ec. (31)}$$

Donde se aprecia que el aporte por parte del mismo al momento total del sistema varía con el ángulo del eslabón, pero a diferencia del resorte, garantiza que el momento total del sistema sea constante, teniendo que, para este caso, la variación en el momento total del sistema será únicamente debido a la presencia del resorte.

Tomando en cuenta la formulación realizada, el contrapeso adecuado para el eslabón 2, en esta configuración, fue de 4.6 Kgf. y de 2.15 Kgf. para el caso de acero inoxidable y acrílico respectivamente. La presencia del contrapeso garantiza que el momento total del sistema permanecerá dentro del rango permitido por los servomotores.

4.4.5 Segundo cálculo: eslabón 1

Se tiene que para el resorte 1:

$$\Delta x1 = R1 - LiR1 \quad \text{Ec. (32)}$$

Donde

$$R1 = \sqrt{A1^2 + B1^2 - (2 * A1 * B1 * \text{sen}(\theta1))} \quad \text{Ec. (33)}$$

Con “ $\theta1$ ” restringido a $[0; \frac{\pi}{2}]$.

Con “ $\Delta x1$ ” se obtiene “FR1” con el uso de la función que describe al resorte 1, obtenida de la Figura 4.4.4, que se expresa como sigue.

$$FR1 = 177.62 \Delta x1 + 3.1477 \quad \text{Ec. (34)}$$

Con “ $\Delta x1$ ” en metros y “FR1” en newtons.

Pero la componente de “FR1” que interviene en la dinámica rotacional del sistema es sólo la perpendicular al eslabón 1, y su fórmula, deducida trigonómicamente sobre la Figura 4.4.10 viene dada por:

$$FR1P = FR1 * B1 * \frac{\cos(\theta1)}{R1} \quad \text{Ec. (35)}$$

Siendo entonces, que el momento producido debido al resorte 1 venia dado por

$$MR1 = FR1P * A1 \quad \text{Ec. (36)}$$

Usando estas ecuaciones se verificó que para la posición con el eslabón 1 en horizontal ($\theta_1 = 0$), los valores $A1 = 3 \text{ cm}$ y $B1 = 20 \text{ cm}$ para la instalación de cuatro resortes de este tipo permiten una reducción parcial del momento total en el sistema, en donde, sin la presencia del resorte 1, totalizaba una cantidad de -570.85 Kgf*cm y -190.77 Kgf*cm para los casos de acero inoxidable y acrílico respectivamente, y con la presencia del mismo, esta magnitud se reducía a -279 Kgf*cm y -96 Kgf*cm respectivamente.

Al igual que el resorte 2, los resortes 1 también tiene el problema de la variación de la fuerza de reacción en función del ángulo del eslabón. En este caso, la fuerza disminuye a medida que el ángulo aumentaba, induciendo un momento total en el sistema de cero cuando el ángulo era de 90. Para garantizar que el momento total del sistema no superara el rango límite establecido para el bienestar de los servomotores, se adicionó un contrapeso.

Dado que el contrapeso se instala a una distancia “d1” de 150 mm del eje de rotación del eslabón 1, el momento debido al mismo vendría dado por:

$$MC1 = FC1 * \cos(\theta_1) * d1 \quad \text{Ec. (37)}$$

Donde se aprecia que ocurre el mismo efecto observado en la ecuación Ec. (31).

Tomando en cuenta la formulación realizada, se concluyó que el contrapeso adecuado para el eslabón 1, en esta configuración, fuera de 34.4 Kgf y 9.4 Kgf para los casos respectivos de acero inoxidable y acrílico.

En la tabla 4.4.1 se agrupan todos los resultados obtenidos respecto a resortes y contrapesos.

Tabla 4.4.1. Resultados para la instalación de resortes y contrapesos

	Constante de resorte [N/m]	Longitud de resorte sin carga [cm]	Contrapeso [Kgf]	Distancia punto de instalación-eje de rotación [mm]	Distancia punto de instalación-eje de rotación [mm]
Eslabón 1 de (Acero Inoxidable)	352.8x4*	8	34.4	30	150
Eslabón 1 de (Acrílico)	352.8x4*	8	9.4	30	150
Eslabón 2 (Acero Inoxidable)	177.6243	9.85	4.6	30	100
Eslabón 2 (Acrílico)	177.6243	9.85	2.15	30	100

*x4 resortes de este tipo

4.5. CONTROL

4.5.1 Selección de componentes electrónicos del robot

Los servomotores elegidos poseen tres cables: uno rojo para la conexión positiva, uno anaranjado para la señal de control y uno marrón para la conexión negativa. El control del servomotor se lleva a cabo mediante una serie de pulsos eléctricos, logrando que el eje del motor tome una posición angular específica, asociada al ancho de pulso recibido. El ancho de pulso manejado por los servomotores elegidos se encuentra entre 700 y 2300 μ s, donde el ancho de pulso de 700 μ s corresponde a una posición angular de 0° y el de 2300 μ s corresponde a una posición angular de 180°.

Para el control de los servomotores se decidió utilizar entonces la tarjeta Arduino UNO (Figura 2.3.4). Esta marca presenta la ventaja de ser tanto software como hardware libre, además de ser económico y de fácil adquisición. Dicha tarjeta posee catorce entradas-salidas digitales (de las cuales se utilizaron cuatro en este proyecto) y seis entradas analógicas. Para su alimentación se requiere de una alimentación recomendada de 9V. El resto de las especificaciones se encuentran en el apéndice (Apéndice 1.2).

4.5.2 Selección de software de control

Para el control de los servomotores, se desarrolló la cinemática directa e indirecta del robot utilizando el procedimiento de Denavit–Hartenberg y un cálculo basado en métodos geométricos planteados por Siciliano y otros (2009). Para facilitar el cálculo asociado al mismo se utilizó el programa Matlab® R2015a. El mismo se utilizó para establecer una conexión entre la computadora y la tarjeta Arduino, de tal forma que se logra el control del robot mediante órdenes insertadas en la computadora en tiempo real.

4.5.3 Cinemática Directa del robot

Los parámetros D-H del robot fueron definidos según la Figura 4.5.1, y se agrupan en la Tabla 4.5.1.

Tabla 4.5.1. Parámetros D-H del robot

Articulación i	Θ_i	α_i	a_i [mm]	d_i [mm]	Rango del ángulo variante
1	$90^\circ + \Theta_1$	-90°	0	344.734	$\Theta_1 \in [-90; +90]$
2	$-11.4^\circ + \Theta_2$	0	459.129	-10.1	$\Theta_2 \in [0; -90]$
3	$11.4^\circ + \Theta_3$	0	300	0	$\Theta_3 \in [0; 90]$
4	Θ_4	180°	0	D	$\Theta_4 \in [-90; 120]$
5	0	α_5	0	0	$\alpha_5 \in [0; 180]$

Las matrices que definen la cinemática del robot son entonces, según la ecuación Ec. (1):

$${}^0A_1 = \begin{pmatrix} \cos(90 + \theta_1) & 0 & -\sin(90 + \theta_1) & 0 \\ \sin(90 + \theta_1) & 0 & \cos(90 + \theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 344.734 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (38)}$$

$${}^1A_2 = \begin{pmatrix} \cos(-11.4 + \theta_2) & -\sin(-11.4 + \theta_2) & 0 & 459.129 * \cos(-11.4 + \theta_2) \\ \sin(-11.4 + \theta_2) & \cos(-11.4 + \theta_2) & 0 & 459.129 * \sin(-11.4 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & -10.1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (39)}$$

$${}^2A_3 = \begin{pmatrix} \cos(11.4 + \theta_3) & -\sin(11.4 + \theta_3) & 0 & 300 * \cos(11.4 + \theta_3) \\ \sin(11.4 + \theta_3) & \cos(11.4 + \theta_3) & 0 & 300 * \sin(11.4 + \theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (40)}$$

$${}^3A_4 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_4) & \sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_4) & -\cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (41)}$$

$${}^4A_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_5) & -\text{sen}(\alpha_5) & 0 \\ 0 & \text{sen}(\alpha_5) & \cos(\alpha_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (42)}$$

Y

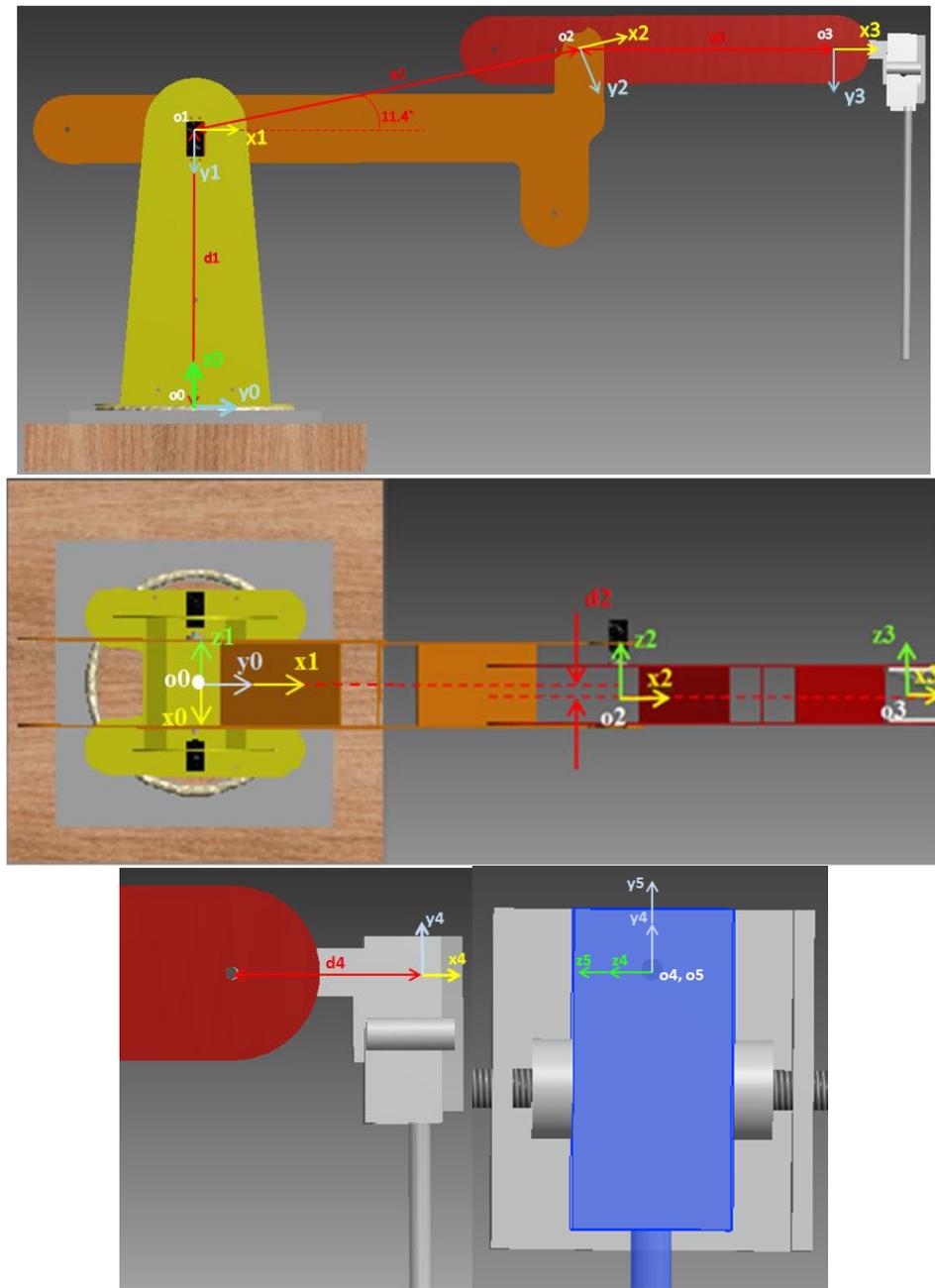


Figura 4.5.1. Ejes de coordenadas del robot definidos con los parámetros D-H.

El punto “ o_3 ” queda definido respecto al sistema de referencia inercial “ o_0 ” según la ecuación Ec. (3) como sigue:

$$\mathbf{P}_{o3} = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 * \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (43)}$$

Y el punto “o5”

$$\mathbf{P}_{o5} = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 * {}^3A_4 * {}^4A_5 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. (44)}$$

El punto “o5” depende solo de los ángulos Θ_1 , Θ_2 y Θ_3 de los servomotores, ya que los ángulos Θ_4 y α_5 no son controlados, sino que reaccionan de acuerdo a la configuración de los ángulos de cada servomotor y a la posición del trocar respecto al marco inercial “o0” debido a que el laparoscopio está insertado en el trocar, siendo que para cada combinación de Θ_1 , Θ_2 y Θ_3 ; existe una única combinación de Θ_4 y α_5 . Aunque la metodología descrita posteriormente permite tomar en cuenta una posición arbitraria del trócar, por razones experimentales se decidió establecer que el mismo estará ubicado a una distancia horizontal de 800 mm y una distancia vertical de 175 mm, medidos desde el marco de referencia cero, es decir en las coordenadas [0,800,175].

La magnitud “D” está relacionada a la cámara del laparoscopio y representa la distancia desde el eje “z3”, donde:

$$D = 66 + \text{altura de la cámara [mm]} \quad \text{Ec. (45)}$$

Para establecer el área de trabajo del robot hasta el punto “o3”, se realizó una rutina de Matlab® para este robot con las restricciones dadas. Posteriormente, dichas gráficas se compararon con diagramas desarrollados geoméricamente para estimar la forma del área de trabajo. Tanto las gráficas obtenidas de la rutina de Matlab (Apéndice 1.13), como los diagramas desarrollados geoméricamente se encuentran a continuación.

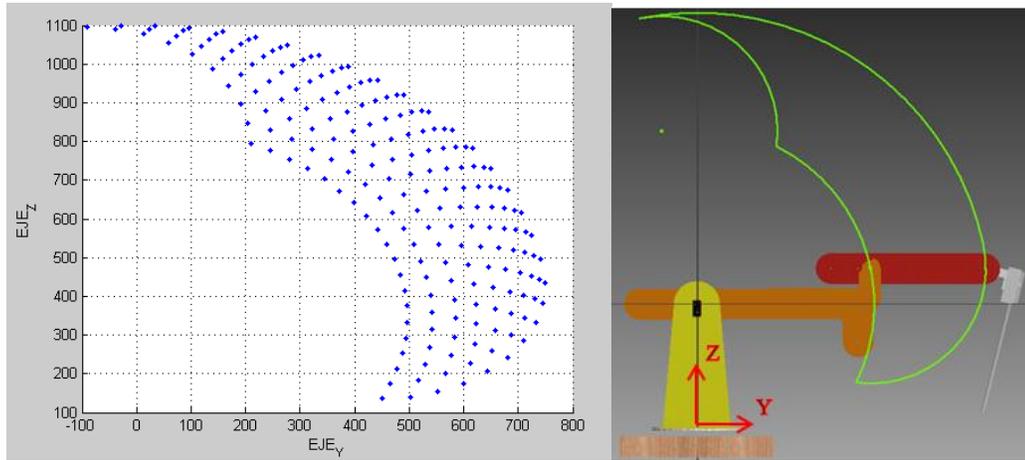


Figura 4.5.2. Área de trabajo en el plano YZ del robot (con $\theta_1=0$)

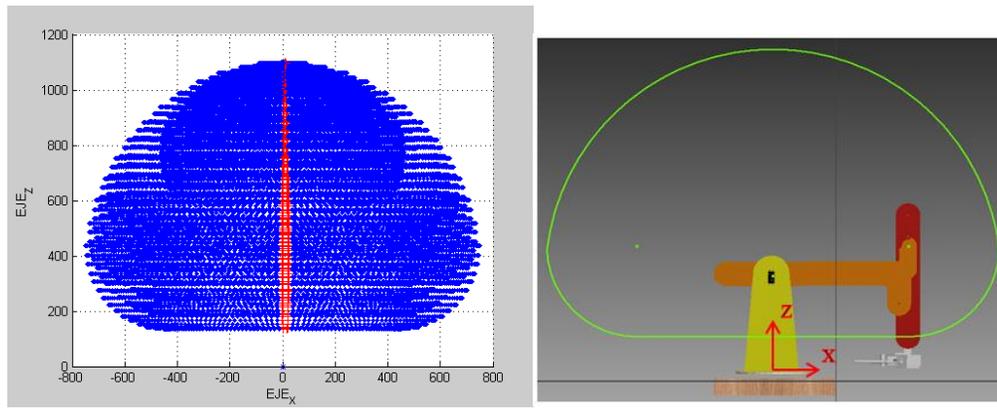


Figura 4.5.3 Área de trabajo proyectada en el plano X-Z del robot

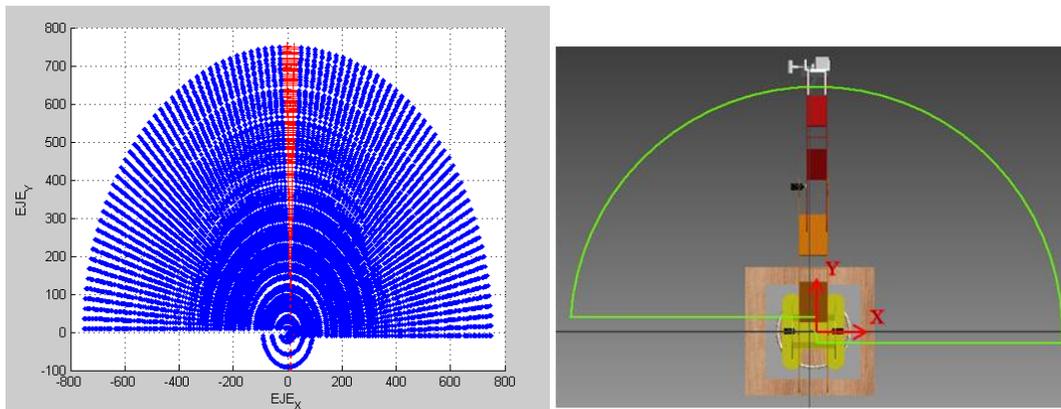


Figura 4.5.4. Área de trabajo proyectada en el plano X-Y del robot

4.5.4 Cinemática Directa para los ángulos no controlados

Para establecer la posición del punto “o5” es necesario el cálculo del ángulo no conocido Θ_4 con el que adicionalmente se puede calcular el ángulo α_5 .

Para hallar la relación entre el ángulo Θ_4 y los ángulos Θ_1 , Θ_2 y Θ_3 , se realizó una proyección del punto conocido del trocar con respecto al marco de referencia cero, sobre el plano “XY” del marco de referencia número tres. Esto se logra definiendo la transformada del marco de referencia tres, respecto al marco de referencia cero, como sigue:

$${}^0T_3 = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 \quad \text{Ec. (46)}$$

Luego, para obtener la matriz de transformación del marco de referencia cero, respecto al marco de referencia tres, se tiene la matriz inversa:

$${}^3T_0 = ({}^0T_3)^{-1} \quad \text{Ec. (47)}$$

Entonces, el vector conocido P, que define la posición del trócar respecto al marco de referencia cero, se multiplica por la matriz inversa, obteniendo las coordenadas de P_3 que define a P con respecto al marco de referencia 3:

$$P_3 = {}^3T_0 * P \quad \text{Ec. (48)}$$

Teniendo este vector, se procede con la ayuda del siguiente diagrama, que representa al plano “XY” del marco de referencia tres:

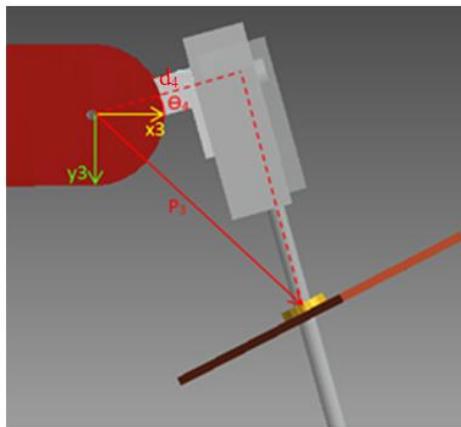


Figura 4.5.5. Diagrama para hallar el ángulo Θ_4

Donde, se establece que:

$$\theta_4 = \text{acos}\left(\frac{d_4}{|P_3|}\right) + \text{atan2}(P_{3y}, P_{3x}) \quad \text{Ec. (49)}$$

Para el ángulo α_5 , el proceso fue similar. La proyección del punto P del trocar se hizo con respecto al marco 4, definido por:

$${}^0T_4 = {}^0A_1 * {}^1A_2 * {}^2A_3 * {}^3A_4 \quad \text{Ec. (50)}$$

Y el punto P_4 se definió según la ecuación (51) y la ecuación Ec. (52).

$${}^4T_0 = ({}^0T_4)^{-1} \quad \text{Ec. (51)}$$

$$P_4 = {}^4T_0 * P \quad \text{Ec. (52)}$$

El siguiente diagrama representa al plano “YZ” del marco de referencia cuatro:

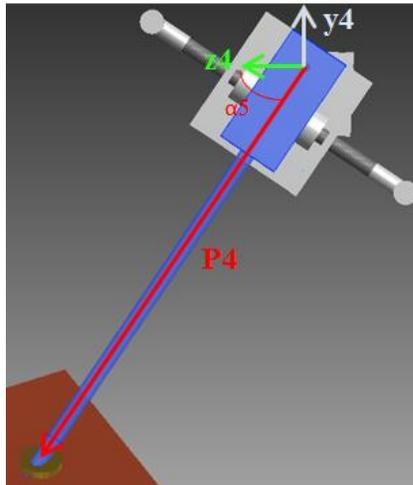


Figura 4.5.6. Diagrama para hallar el ángulo α_5

Donde, se tiene que:

$$\alpha_5 = \text{atan2}(P_{4y}, P_{4z}) \quad \text{Ec. (53)}$$

Con esto, la cinemática directa del robot queda completamente definida. Todos los cálculos relacionados se introdujeron en una rutina de Matlab en forma de

función, que al suministrar los ángulos Θ_1 , Θ_2 y Θ_3 ; devuelve los valores correspondientes a las coordenadas del punto “5” referidos al marco de referencia cero.

4.5.5 Cinemática Inversa

Para la solución de la cinemática inversa se emplearon las ecuaciones aplicadas para la solución de un brazo robot antropomorfo (Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo, 2009), desarrolladas con un enfoque geométrico. Estas ecuaciones fueron modificadas debido a que existen algunas diferencias en la geometría entre el robot antropomorfo (Figura 4.5.7) y el robot planteado (Figura 4.5.1).

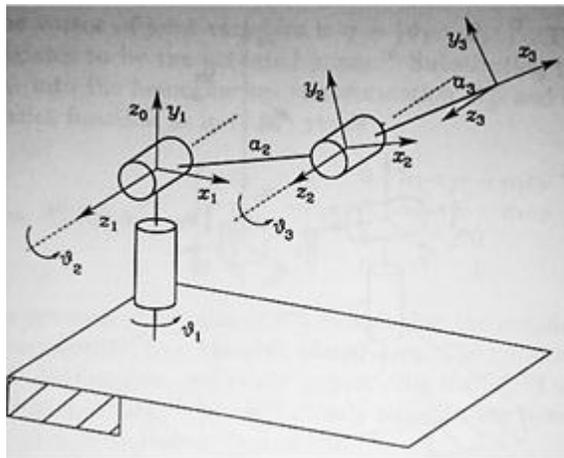


Figura 4.5.7. Brazo Robot antropomórfico (Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo, 2009)

Las diferencias cruciales entre el brazo robot antropomórfico y el brazo robot planteado en este proyecto son las siguientes:

- El origen del marco de referencia “0” y el del marco de referencia “1” no coinciden y se diferencian por una altura de 324.384 mm (Figura 4.5.1).
- El origen del marco de referencia “2” está a una distancia de “d” 10.1 mm a lo largo del eje z del dicho marco de referencia respecto al plano “xy” del marco de referencia “1” (Figura 4.5.1).

- El marco de referencia dos, tiene un desfase en el giro respecto al eje Z del marco de referencia uno de 11.44° (Figura 4.5.1).
- El marco de referencia tres, tiene un desfase en el giro respecto al eje Z del marco de referencia dos de -11.44° (Figura 4.5.1).
- Hay un par de articulaciones adicionales no contraladas, pero que son función de los ángulos de los tres primeros marcos de referencia y de la posición del trócar con respecto al marco de referencia “0”.

Cálculo del ángulo Θ_1

Conociendo las coordenadas del punto de destino “Pd” respecto al marco de referencia cero, se realiza una proyección sobre el plano “XY” de dicho marco (Figura 4.5.8).

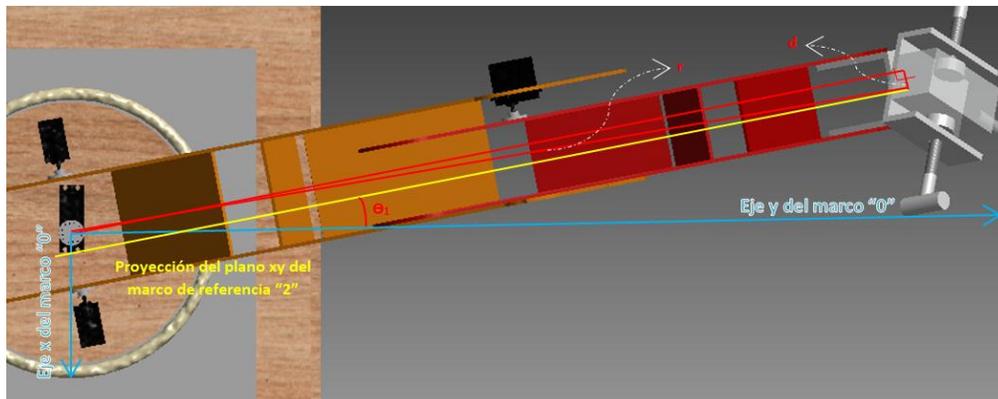


Figura 4.5.8. Esquema para la definición del ángulo Θ_1 en la cinemática inversa

De la Figura 4.5.8 se pueden deducir las siguientes expresiones:

$$r = |[Pd_x, Pd_y]| \quad \text{Ec. (54)}$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{d}{r}\right) - \text{atan2}(Pd_x, Pd_y) \quad \text{Ec. (55)}$$

Cálculo de los ángulos Θ_2 y Θ_3

Teniendo el ángulo Θ_1 , se puede utilizar la transformación D-H definida en la ecuación (46), para definir el plano “xy” del marco de referencia uno, que a su vez es paralelo a los marcos “xy” de los marcos de referencia dos y tres (Figura 4.5.8).

Sabiendo esto, se puede realizar una proyección del punto destino “Pd” sobre el plano “xy” del marco de referencia uno, usando la matriz inversa de la expresada en la ecuación (46), y multiplicando dicha matriz por el vector de posición “Pd” referido al marco de referencia cero, obteniendo un vector “Pd” referido al marco de referencia uno. De esta manera, apreciando que las variables articulares Θ_2 y Θ_3 están contenidas en este plano, se puede aplicar la formulación establecida por Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo (2009) para el cálculo de las mismas, teniendo las coordenadas del punto del origen “o3” referidas al marco de referencia cero. Sin embargo, dicho punto aún se desconoce, ya que es función del ángulo Θ_4 y de las coordenadas del trocar con respecto al marco de referencia cero, aunque también puede ser deducido con geometría aplicada en el plano descrito, tomando en cuenta que en la proyección en este plano, el punto “o3” pertenece a una recta perpendicular a la recta definida por los puntos “Pd” y el trocar, además, el punto “o3” se encuentra a una distancia conocida del punto “Pd”, inherente a la geometría del robot, es decir, uno de los parámetros D-H, el parámetro “d4” (Figura 4.5.9).

Es importante resaltar que, la solución propuesta por Siciliano, Sciavicco, Villani, & Oriolo (2009) contempla cuatro posibles soluciones para un robot antropomorfo, pero, para esta investigación, el robot está restringido de tal forma que solo una de las cuatro soluciones es posible.

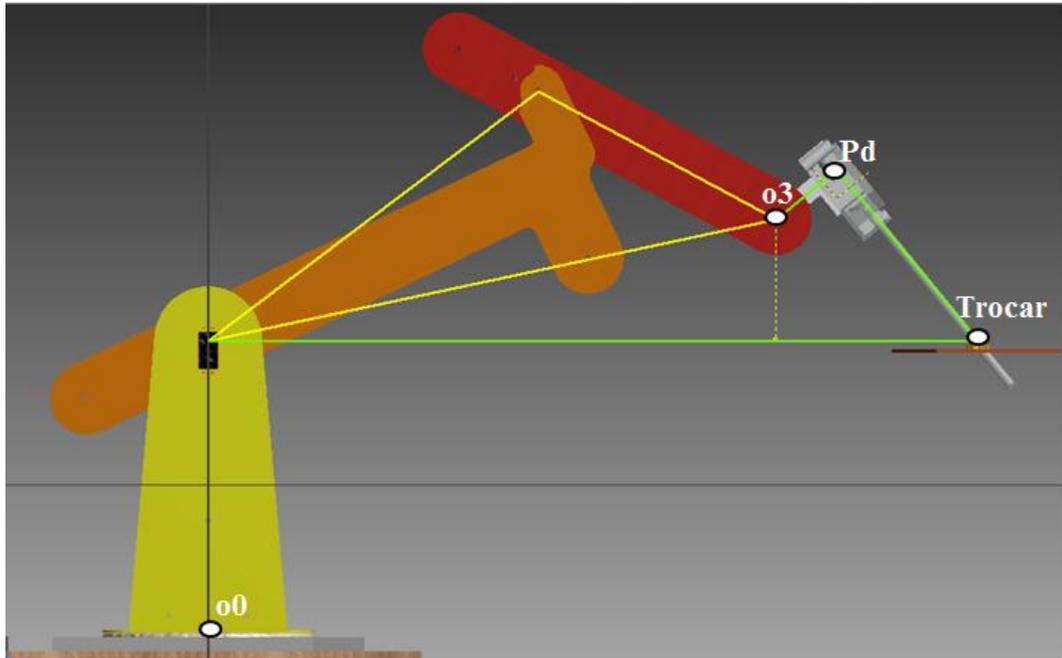


Figura 4.5.9. Esquema para hallar el punto “o3” y los ángulos Θ_2 y Θ_3

El procedimiento descrito fue incluido en una rutina de Matlab y los detalles de la definición del punto “o3” se pueden apreciar en el código incluido en el apéndice (Apéndice 1.12).

Teniendo definido el punto “o3”, referenciado al marco cero como un vector $[o3_x, o3_y, o3_z]$, los ángulos Θ_2 y Θ_3 se definen entonces según las siguientes expresiones:

$$\theta_3 = (\text{atan2}(-C, B) + 11.4^\circ) * -1 \quad \text{Ec. (56)}$$

$$\theta_2 = \left(\text{atan2} \left(o3_z, \sqrt{o3_x^2 + o3_y^2} \right) - \text{atan2} \left(a_3 * (-C), a_2 + (a_3 * B) \right) - 11.4^\circ \right) * -1 \quad \text{Ec. (57)}$$

Donde “a₂” y “a₃” son los parametros D-H definidos anteriormente, y donde:

$$B = \frac{o3_x^2 + o3_y^2 + o3_z^2 - a_2^2 - a_3^2}{2 * a_2 * a_3} \quad \text{Ec. (58)}$$

$$C = \sqrt{1 - B^2} \quad \text{Ec. (59)}$$

Todo el procedimiento descrito se programó en una rutina en Matlab® definida como función, que al suministrarle los valores de las coordenadas de la posición deseada en el espacio, devuelve los ángulos Θ_1 , Θ_2 y Θ_3 . La función además devuelve un segundo valor que indica si las coordenadas insertadas de posición tienen una solución real o no.

En Matlab®, se pudo constatar que la cinemática directa arrojaba resultados que al ser utilizados en la cinemática inversa, devolvían los parámetros introducidos en la cinemática directa con errores menores a 0.05%, verificando así la validez de las dos funciones creadas (Figura 4.5.10).

Prueba I	Prueba II	Prueba III
<code>>> cdirect2([0,-33.4,65.82])</code>	<code>>> cdirect2([15,-30,45])</code>	<code>>> cdirect2([25,-45,2])</code>
ans = 10.1000 644.4434 542.8541	ans = -175.1366 692.6422 581.1157	ans = -225.2738 506.9998 939.0767
<code>>> cinvers(10.1,644.4434,542.8541)</code>	<code>>> cinvers(-175.1366,692.6422,581.1157)</code>	<code>>> cinvers(-225.2738,506.9998,939.0767)</code>
ans = 0 -33.4305 65.7983	ans = 15.0000 -30.0284 44.9745	ans = 25.0000 -44.9975 1.9084

Figura 4.5.10. Tres Pruebas de las funciones de cinemática creadas en Matlab

4.5.6 Conexiones Computadora-Arduino-Robot

Las conexiones fueron realizadas como en la siguiente figura:

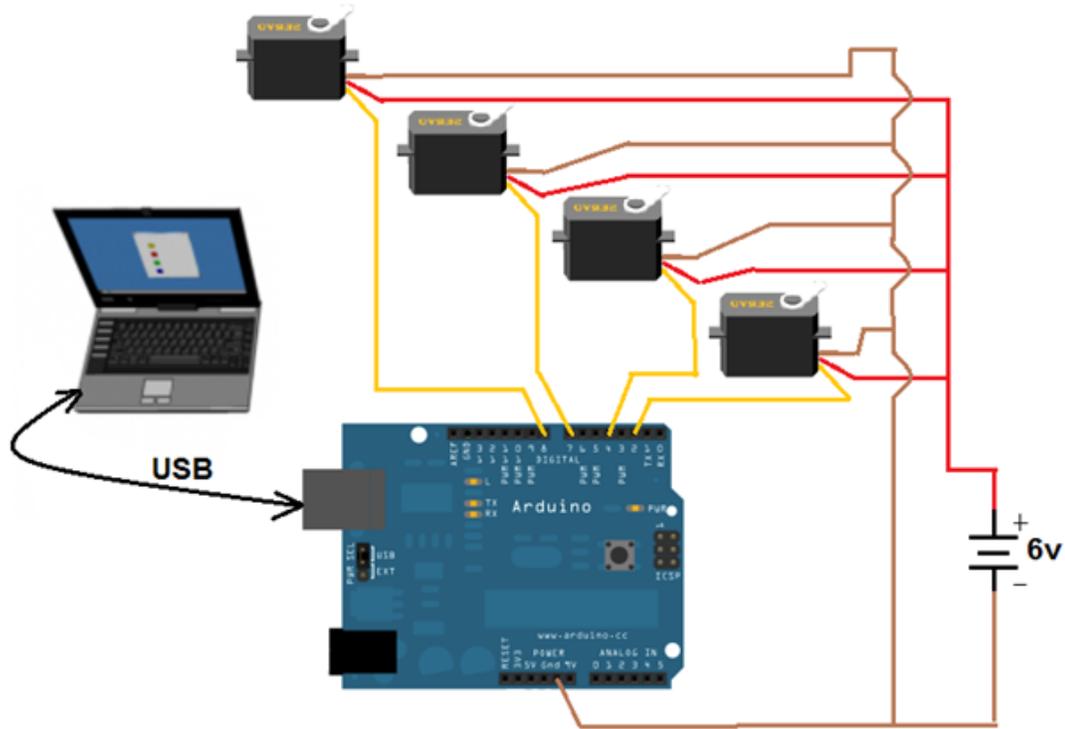


Figura 4.5.11. Diagrama de conexiones para el robot

Donde el puerto digital 2 corresponde al servomotor de la base (Θ_1), los puertos 4 y 7 a los servomotores que se encuentran entre la columna-base y el eslabón 1 (Θ_2 y Θ_3) y el puerto 8 al servomotor que se encuentra entre el eslabón 1 y el eslabón 2 (Θ_3).

4.5.7 Programación Arduino-Matlab®

Teniendo la cinemática directa e inversa, se procedió a la programación del sistema.

Primeramente se descargó el paquete de soporte de hardware de Arduino a través del programa Matlab, en la pestaña de “add-ons”.

Con el paquete instalado, se diseñaron dos maneras de controlar el robot (Figura 4.5.12 (a)). La primera, mediante la cinemática directa: el usuario inserta los ángulos que desea, y el robot adoptará la configuración que el usuario le haya indicado (Figura 4.5.12 (b)). La segunda, mediante la cinemática inversa: el usuario elegirá de entre seis posibles órdenes para controlar el laparoscopio sujeto al robot, dichas órdenes son: adentro, afuera, izquierda, derecha, arriba y abajo (Figura 4.5.12 (c)).

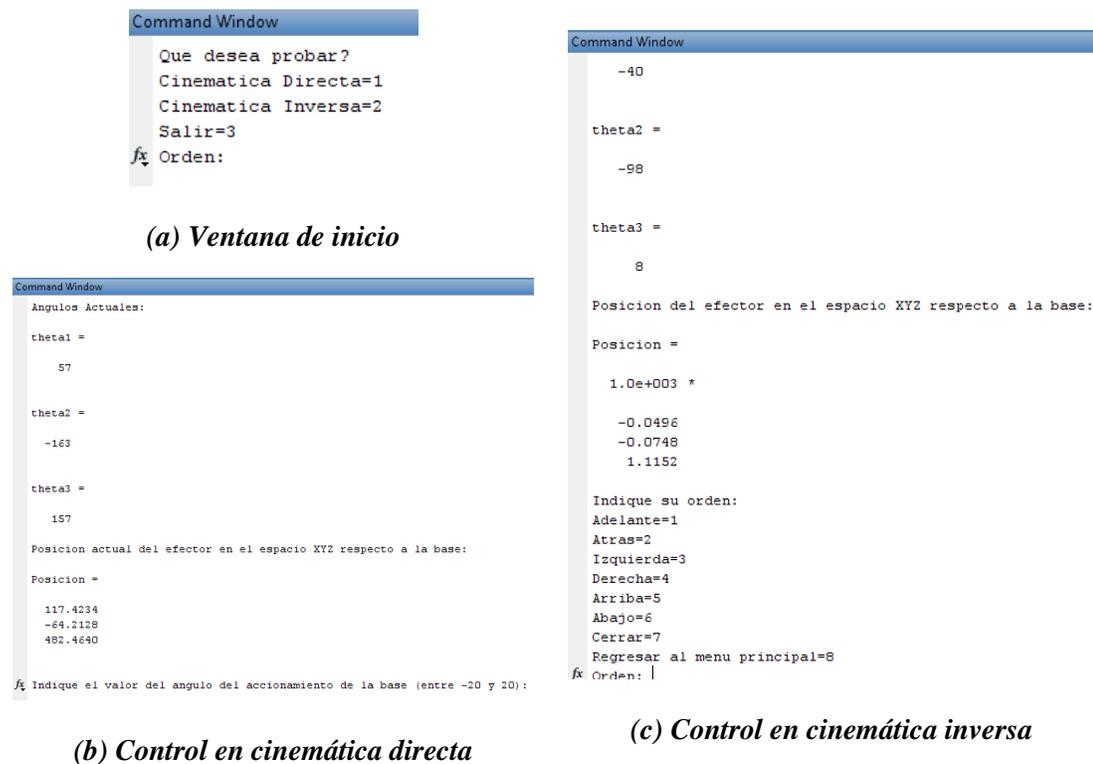


Figura 4.5.12. Modos de control del robot

Para definir los puntos de destino dictados por las órdenes, primeramente se leen los ángulos actuales, definiendo el punto actual del laparoscopio mediante la función creada para la cinemática directa. Luego, se define un marco de referencia no rotado (es decir, solo trasladado) respecto al marco de referencia cero, que contenga al trocar como origen. Seguidamente se define al punto actual con respecto

a este marco de referencia en coordenadas esféricas, donde la variación en la coordenada radial “ ρ ” representa una orden de atrás o adelante (si incrementa o disminuye respectivamente) y la variación en la coordenada angular “ ϕ ” representa una orden de arriba o abajo (si disminuye o incrementa respectivamente) (Figura 4.5.13. (a)). Las órdenes de izquierda y derecha crean un punto de destino con la ayuda de la definición de un marco de referencia igual que el anterior, pero donde el eje Z es el eje X, el eje Y es el eje $-Y$, y el eje X es el eje Z (Figura 4.5.13 (b)), por ende la variación en la coordenada angular “ ϕ ” representa una orden de izquierda o derecha (si disminuye o aumenta respectivamente). Por razones experimentales, se programó que cada orden implicara un movimiento de longitud de 20 mm, sea radial o longitudinal. Ésta magnitud puede ser modificada fácilmente en el código que agrupa todo este procedimiento, y se encuentra en el Apéndice (Apéndice 1.14).

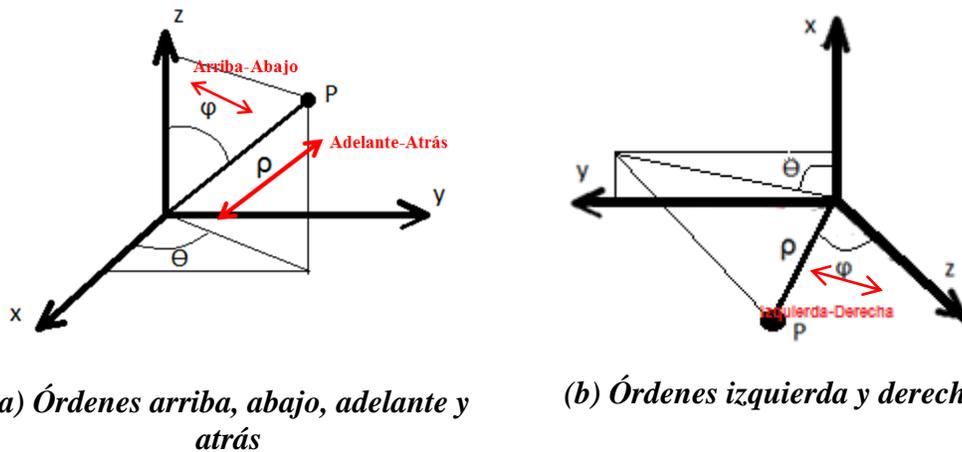


Figura 4.5.13. Órdenes para el movimiento del laparoscopio

4.6. FABRICACIÓN

Las piezas de acrílico fueron fabricadas en Soluciones CNC Ingenium C.A, el tiempo de maquinado fue de 40 min aproximadamente. Al fabricante se le entregaron los planos del diseño y el material.

Los componentes electrónicos como la tarjeta de control y los servomotores fueron adquiridos en Plus Electronics C.A.

La tornillería fue adquirida en Distorbera SRL y los resortes en Resudca C.A

El modelo en acero inoxidable puede ser maquinado en Oxicortes C.A.

4.7. ENSAMBLE DEL PROTOTIPO

Para ensamblar la base se atornilló la tapa a la caja con los tornillos correspondientes y se acopló un servo FITEC FS5106B en la base con sus respectivos tornillos y tuercas (Figura 4.7.1).

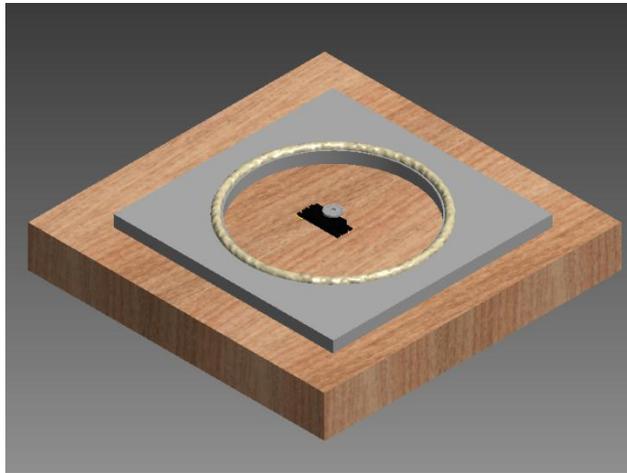


Figura 4.7.1. Ensamble del servomotor en la base

Se conectó un servomotor a la parte inferior de la columna-base (Figura 4.7.2).

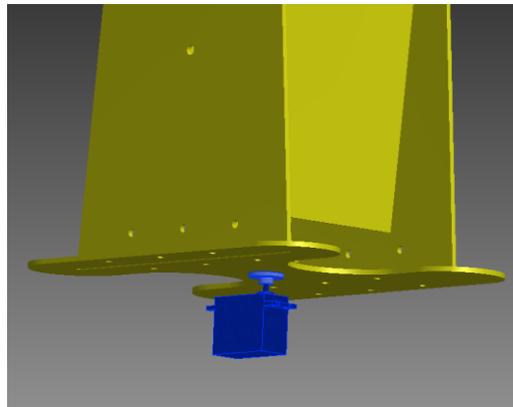


Figura 4.7.2. Servomotor conectado a la columna-base

En los agujeros rectangulares ubicados en el tope de la columna-base se conectaron 2 servomotores con los respectivos tornillos y tuercas, para luego acoplar la paleta de los motores en el eslabón 1, como se muestra en la Figura 4.7.3.

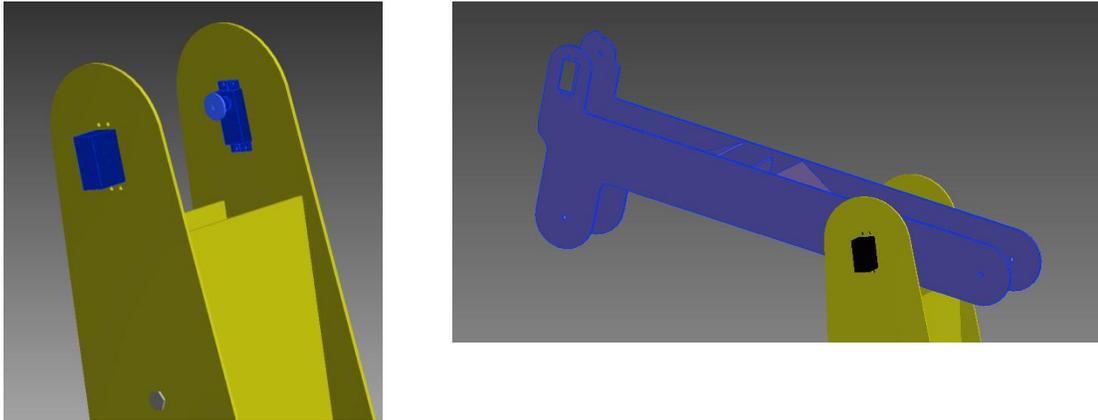


Figura 4.7.3. Ensamble Columna-base y eslabón 1

Una vez conectado el eslabón 1 a la columna base se procedió a colocar el contrapeso y el resorte correspondiente, se colocó un perno en la columna-base y otros 2 en el eslabón 1 de manera que el resorte quedó unido a un perno por cada extremo y el contrapeso acoplado en el último eje del eslabón 1, como se muestra en la Figura 4.7.4. Los pernos se fijaron con las tuercas y arandelas respectivas.

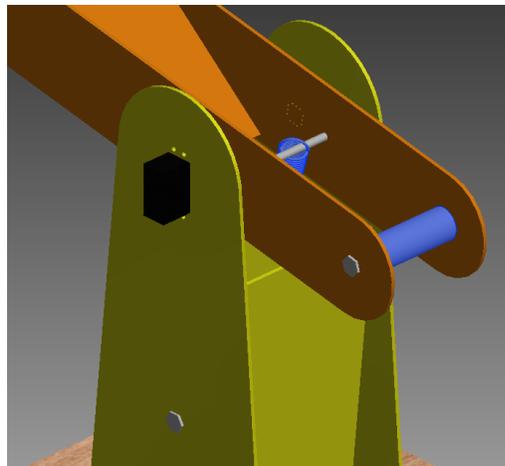


Figura 4.7.4. Instalación del contrapeso y el resorte en el eslabón 1

De manera similar al acople del eslabón 1 a la columna-base se conectó el eslabón 2 al eslabón 1, solo que en vez de 2 motores se conectó 1 del lado izquierdo, ya que en el otro lado se fijó un tornillo, como se observa en la Figura 4.7.5. Se instaló el contrapeso y el resorte correspondientes como en la Figura 4.7.5.

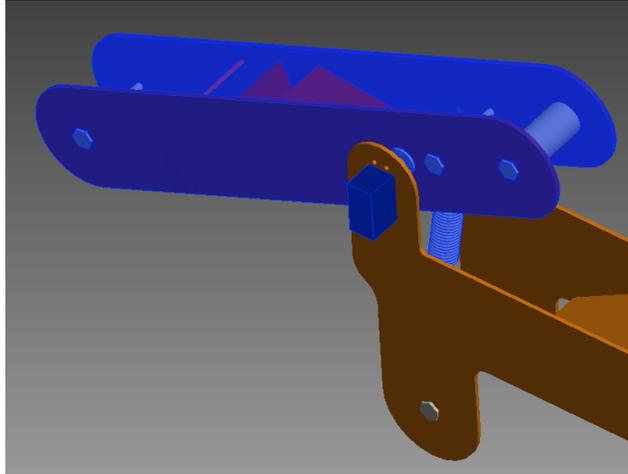


Figura 4.7.5. Ensamble Eslabón 1 y Eslabón 2

Por último se acopló el sujetador en el extremo del eslabón 2 por medio del perno correspondiente (Figura 4.7.6).

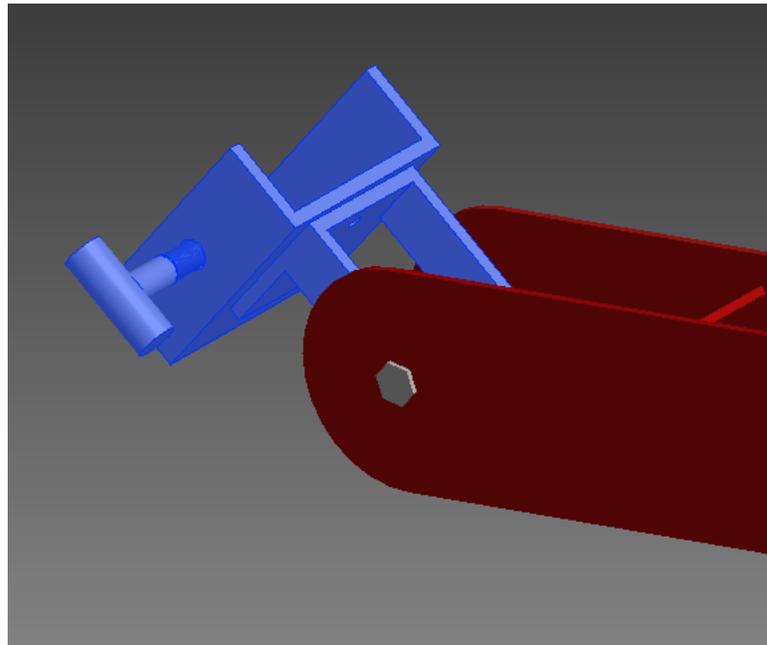


Figura 4.7.6. Ensamble del sujetador

4.8. PRUEBAS EN EL PROTOTIPO

Por motivos de presupuesto, no se pudieron fabricar los contrapesos necesarios para que el robot pudiese levantar un laparoscopio de 700 gramos. Por consiguiente, el prototipo construido, aunque tiene las dimensiones y cinemática acertadas, sólo se probará con un laparoscopio demostrativo de peso despreciable.

Durante las pruebas iniciales se verificó la movilidad de cada grado de libertad del robot. El único grado de libertad que presentó problemas fue el de la base, ya que aunque la fricción generada entre la columna-base y el anillo de politetrafluoroetileno se minimizó con lubricante, éste servomotor no podía generar el suficiente torque para comenzar el movimiento, por lo tanto se fabricó una suspensión que permitía minimizar aún más dicho roce mediante la instalación de un resorte que proporciona una fuerza vertical hacia arriba y dirigiera el peso del conjunto hacia una viga horizontal instalada sobre el mismo, como en la Figura 4.8.1, permitiendo que el servomotor de la base pudiese girar.



Figura 4.8.1. Suspensión fabricada para el giro de la base (en madera)

Posteriormente se acopló el robot a una geometría representativa de una cámara de laparoscopio, de peso despreciable, que a su vez se conectó con el

simulador de laparoscopia diseñado y fabricado por Zambrano y Piñango (2003) (Figura 4.8.2), para verificar los movimientos resultados de las órdenes dadas al robot desde el programa diseñado en Matlab®. En la Tabla 4.8.1 se puede apreciar la posición de antes y después de cada orden dada al robot, resultando las ordenes de izquierda y derecha las más difíciles de ejecutar debido a los problemas derivados de la capacidad del servomotor de la base.

Es de importante consideración la realización de mediciones para estimar el torque necesario para el giro de la base, de tal forma que se pueda realizar un cálculo para dimensionar el accionamiento de la base y detallar aún más la suspensión diseñada, posiblemente ameritando de un accionamiento de mayor torque y por ende de mayor costo. Una alternativa a esto sería el diseño y la construcción de un sistema de transmisión de engranajes, que amplifique el torque del accionamiento a costa de reducir su velocidad, pero para dicha alternativa sería necesario un servomotor de rotación continua, en donde el parámetro de control no sería su posición angular, sino su velocidad.

Durante las pruebas se presentaron problemas de vibración durante la finalización de cada movimiento. Los motores tenían problemas para lidiar con la inercia de sus respectivos sistemas y con las reacciones de los resortes al momento de desacelerar. Para solventar este problema es necesario entonces la instalación de servomotores de mayor calidad pero de mayor costo o el diseño de un sistema de control de velocidades en los servomotores que garantice que durante la desaceleración, el sistema se comporte de manera sobreamortiguada y no subamortiguada.

Tabla 4.8.1. Pruebas del robot en un simulador de laparoscopia

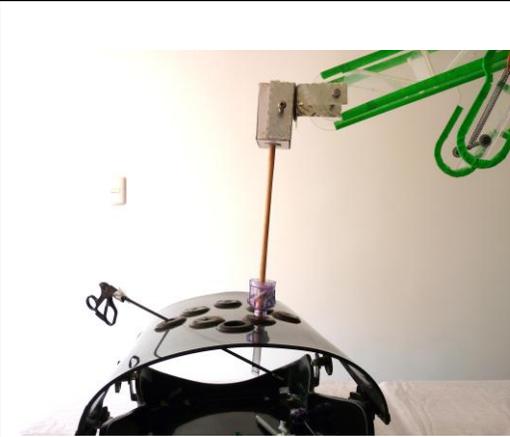
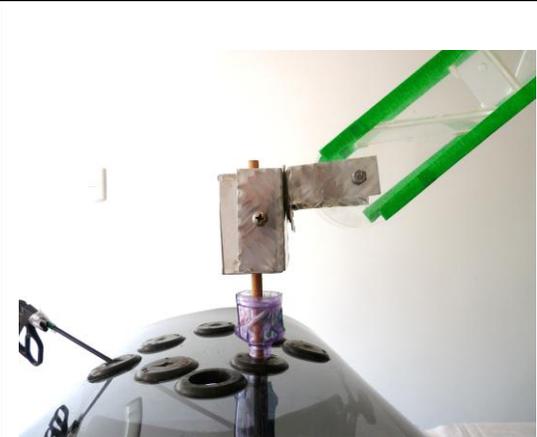
Orden dada: Arriba	
 <p>Antes</p>	 <p>Después</p>
Orden dada: Derecha	
 <p>Antes</p>	 <p>Después</p>
Orden dada: Adentro	
 <p>Antes</p>	 <p>Después</p>



Figura 4.8.2. Acople entre el Robot construido y un simulador de Laparoscopia

4.9. COSTOS

La siguiente información no incluye costos de adquisición o fabricación de los contrapesos propuestos, así como de la fabricación de la base ni de la suspensión, solo incluyendo el costo de los implementos necesarios para construir el prototipo planteado en este trabajo.

Los costos para la adquisición de componentes del modelo en acrílico en el mercado internacional se muestran en la tabla 4.9.1.

Tabla 4.9.1. Tabla de costos de adquisición de componentes a nivel internacional (PMMA)

Concepto	Monto (\$)
Tornillería	10
4 Fitec Standard 14.5kg.cm HV Digital metal gears servo	20
Arduino UNO	20.97
Lamina de Acrílico 0.18"x24"x48"	33.48
Circuitería	10
Total	94.45

Los costos para la adquisición, ingeniería y manufactura del robot en acrílico en el mercado nacional son los siguientes (Octubre 2015):

Tabla 4.9.2. Tabla de costos de adquisición, ingeniería y manufactura de componentes a nivel nacional (PMMA)

Unidad	Descripción	Valor unitario + 12%	Precio (Bs.)
2	resorte 029R	268.80	537.60
4	ángulo canto 1''	303.99	1215.96
4	torn. Autorr. c/pan PHS 6*	10.91	43.64
16	torn. Para metales zinc c/	14.69	235.11
16	Tuercas hex. MM. MA 3	3.49	55.91
10	torn. Estufa c/plana 3/16*	23.36	233.63
10	tcas. Hex. Galv. MM-NC 3/16	11.40	114.02
3	torn. Hex. Gdo. 2 unc. Pav	21.10	63.30
3	Arandelas planas pulg. Und	12.21	36.62
3	tcas. Hex. G2 unc? 1/4	17.00	51.00
5	torn. Para metales zinc c/	10.15	50.74
5	Tuercas hex. MM. MA 3	3.49	17.47
4	servo Fitec FS5106B	12197.00	48788.00
1	Arduino UNO	30329.64	30329.64
1	Acrílico	26320.00	26320.00
1	Maquinado Acrílico	6720.00	6720.00
6	Ingeniería	44000	264000
6	Mano de Obra	8000	48000
1	Circuitería	806.4	806.4
	Subtotal		427619.04
	12% IVA		51314.29
	Total		478933.33

El costo de adquisición de componentes del modelo en acero inoxidable en el mercado internacional se encuentra en la siguiente tabla (incluye servomotores con torques más altos que los utilizados en este prototipo):

Tabla 4.9.3. Tabla de costos de adquisición de componentes a nivel internacional (AA)

Concepto	Monto (\$)
Tornillería	10
4 Fitec Standard 14.5kg.cm HV Digital metal gears servo	160
Arduino UNO	20.97
Lamina de Acero Inoxidable 316L .118"x36"x36"	696
Circuitería	10
Total	896.97

Los costos para la adquisición, ingeniería y manufactura del robot en acero inoxidable en el mercado nacional son los siguientes (Octubre 2015):

Tabla 4.9.4 Tabla de costos de adquisición, ingeniería y manufactura de componentes a nivel nacional (AA)

Unidad	Descripción	Valor unitario + 12%	Precio
2	resorte 029R	268.80	537.60
4	ángulo canto 1''	303.99	1215.96
4	torn. Autorr. c/pan PHS 6*	10.91	43.64
16	torn. Para metales zinc c/	14.69	235.11
16	Tuercas hex. MM. MA 3	3.49	55.91
10	torn. Estufa c/plana 3/16*	23.36	233.63
10	tcas. Hex. Galv. MM-NC 3/16	11.40	114.02
3	torn. Hex. Gdo. 2 unc. Pav	21.10	63.30
3	Arandelas planas pulg. Und	12.21	36.62
3	tcas. Hex. G2 unc? 1/4	17.00	51.00
5	torn. Para metales zinc c/	10.15	50.74
5	Tuercas hex. MM. MA 3	3.49	17.47
4	servo Fitec FS5106B	12197.00	48788.00
1	Arduino UNO	30329.64	30329.64
1	Acero Inoxidable 316L	173944.00	173944.00
1	Maquinado Acero	17394.40	17394.40
6	Ingeniería	44000	264000
6	Mano de Obra	8000	48000
1	Circuitería	806.4	806.4
	Subtotal		585917.44
	12% IVA		70310.09
	Total		656227.54

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se propuso una matriz de soluciones de diseño y se seleccionó y desarrolló la opción que reúne las condiciones de manipulación de la cámara del laparoscopio, resultando en el diseño final propuesto.
- Se identificaron los parámetros para la selección y el desarrollo del modelo planteado, consistiendo en: grados de libertad, cumplimiento del área de trabajo, dimensiones, forma, resistencia ante los esfuerzos relacionados con la cámara, material, peso, accionamientos, control y costos, garantizando que el diseño final sea superior en estos aspectos al resto de las soluciones propuestas.
- Se determinó que un asistente robótico para la manipulación de la cámara durante una cirugía laparoscópica amerita de tres grados de libertad para posicionarla y de dos grados de libertad adicionales para orientarla.
- Se determinó que con la presencia de contrapesos apropiados el requerimiento de torque máximo de los accionamientos disminuye, disminuyendo el costo de adquisición del accionamiento necesario, a costa de aumentar la inercia en el sistema.
- Se determinó que un resorte puede comportarse como un contrapeso de peso variable, función de su elongación y su instalación, y que en combinación con un contrapeso convencional, puede lograr el mismo objetivo, reduciendo la cantidad de inercia que el sistema tendría si sólo se instalara un contrapeso convencional.
- Se determinó que según el material y geometría que tenga el robot, la masa e inercia del mismo variará influyendo directamente en lo más costoso del robot, los accionamientos. Esto fue tomado en cuenta como dato de entrada

para el cálculo de los contrapesos y así asegurar el equilibrio del sistema, disminuyendo su costo al mismo tiempo que se garantizó el funcionamiento de los accionamientos.

- El Método de los Elementos Finitos facilita el análisis de sólidos con geometrías complicadas en donde el análisis analítico se dificulta.
- El Método de los Elementos Finitos permite dar una buena aproximación del comportamiento de los elementos bajo unas condiciones de cargas definidas, siendo recomendable de ser posible la corroboración de sus resultados mediante un análisis analítico.
- Se analizó el sistema considerando elasticidad lineal, concluyendo que ninguna de las piezas falla por ruptura en zonas alejadas a los cuatro hoyos de instalación del eje del accionamiento correspondiente, cuyos resultados deben ser verificados experimentalmente.
- Se desarrolló la cinemática directa e inversa del robot, permitiendo diseñar una rutina de programación en Matlab® que posibilitara el control del mismo en tiempo real.
- Se desarrolló una metodología para el establecimiento de la cinemática directa e inversa que incluye las dos articulaciones no accionadas en el diseño planteado, del cual no se obtuvo mucha información en antecedentes.
- Se verificó el funcionamiento de la cinemática directa y de la cinemática inversa, obteniendo que los parámetros de entrada de una son los parámetros de salida de otra, y viceversa.
- Se evaluó la cinemática del diseño del robot, observando que el mismo cumple con las ordenes programadas, y que cumplirá con el área de trabajo de la cámara siempre y cuando se respeten las restricciones en los ángulos del mismo, debiendo variar la posición de su base si se quiere tener un rango diferente de posiciones.
- Se diseñó un prototipo que cumple con la cinemática necesaria en la manipulación de la cámara del laparoscopio.

- Se construyó un prototipo del modelo seleccionado, capaz de cumplir con la cinemática del robot propuesto pero con un laparoscopio demostrativo de peso despreciable, debido a la incapacidad para adquirir los contrapesos calculados.
- Se observó mediante la experimentación que el dimensionamiento de la base no fue el apropiado, ameritando de un accionamiento de mayor torque o de una transmisión acoplada a un servomotor de giro continuo que amplifique el torque a costa de reducir su velocidad.
- Se determinó que diseñar y construir un producto es una tarea inevitablemente iterativa, haciendo inescapable el hecho de que la primera construcción de un prototipo contenga fallas imprevistas en el diseño, imponiendo que el procedimiento incluya rediseños en todas las fases del proyecto.
- Se aplicó una metodología iterativa para el desarrollo de este proyecto, donde la selección de material, de motores, accesorios mecánicos, entre otros, no fueron aspectos aislados sino una parte del todo que debía cumplir con los requerimientos y necesidades mecánicas y eléctricas del brazo.
- Se estableció un método para el diseño y la construcción de un brazo asistente para cirugía de laparoscopia con materiales disponibles a nivel nacional.

5.2. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Desarrollar otros sistemas de mando, como un panel de pulsadores controlado por manos o pies, control de voz, o control por la mirada, para facilitar las instrucciones de entrada por parte del operador, sin que se necesite una computadora portátil.
- Adaptar al asistente diferentes sujetadores para manipular diversas herramientas, así el robot no se limitaría a solo manipular la cámara de laparoscopia sino herramientas de corte, cauterización e incluso instrumentos de otro tipo de cirugías.
- Implementar en el robot accionamientos de mayor calidad, de mayor torque y de mayor resolución angular para aumentar la precisión de los movimientos y disminuir las vibraciones.

- De seguir incluyendo contrapesos y resortes, o tener altos valores de inercia asociados al robot, desarrollar una estrategia de control de velocidades que garantice una desaceleración sobreamortiguada y no subamortiguada, utilizando controladores PID u otras opciones.
- Disponer de una mayor cantidad de recursos que permita más posibilidades de soluciones y propuestas y mejor calidad de componentes como por ejemplo mejores accionamientos.
- Incluir un grado de libertad adicional, que otorgue a la orientación de la cámara del laparoscopio una rotación con respecto al eje del tubo de inserción.
- Instalar sensores que midan la posición de los diversos eslabones en todo momento, de manera que el control sea más exacto.
- Realizar un estudio detallado en la base, para aproximar el torque necesario para su giro, y de esta forma tener parámetros confiables para la selección de un accionamiento de mayor torque o de una transmisión acoplada a un accionamiento de giro continuo que amplifique su torque a costa de reducir su velocidad angular.
- Realizar pruebas experimentales u otro tipo de análisis para verificar que las piezas no fallan en la región de los cuatro hoyos de instalación del eje del servomotor.
- Realizar un estudio de las fuerzas de reacción debido a la fricción entre el laparoscopio y el trócar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Allaf, M., Jackman, S., Schukam, P., Cadeddu, J., Lee, B., & Moore, R. (1998). Laparoscopic visual field. *Surgical Endoscopy*, 1415-1418.
2. Angeles, J. (2012). *El Concepto de Complejidad Como Criterio de Diseño en Ingeniería Mecánica*. Castellón de la Plana: Asociación Española de Ingeniería Mecánica.
3. Beer, F. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros Estática*. México D.F.: McGraw-Hill.
4. Budynas, R. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México D.F.: McGraw-Hill.
5. Cadière, G., Himpens, J., Germy, O., Izizaw, R., Degueldre, M., Vandromme, J., & al, e. (2001). Feasibility of Robotic Laparoscopic Surgery: 146 Cases. *World Journal of Surgery*, 1467-1477.
6. Cerrolaza, M. (2007). *El método de los elementos finitos para ingeniería y ciencias aplicadas: teoría y programas*. Caracas.
7. Chaur, J. (2004). *Diseño conceptual de productos asistido por ordenador: Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa*. Barcelona, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
8. Contreras, J. (2013). *Simulación de la cinemática inversa en 3D de un Asistente Robótico para Cirugía de Laparoscópica*. Falcón: Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.
9. Córdova, A., & Ballantyne, G. (2003). Sistemas quirúrgicos robóticos y telerobóticos para cirugía abdominal. *Revista de Gastroenterología del Perú*, 58-66.
10. Craig, J. (2006). *Robótica*. México D.F.: Pearson.
11. Fernández, J. (Febrero de 2002). Robots Para Movimiento de la Cámara en Cirugía Laparoscópica. Málaga, España: Universidad de Málaga.
12. Fu, K., Gonzalez, R., & Lee, C. (1988). *ROBOTICA: Control, detección, visión e inteligencia*. Madrid: McGraw-Hill.

13. García, J., Arias, M., & Valencia, É. (2011). Diseño de prototipo de simulador para entrenamiento en cirugía laparoscópica. *Revista Ingeniería Biomédica*, 13-19.
14. Gonzalez, J. (2004). *Influencia de los esfuerzos de contacto en el análisis por MEF del componente tibial de una prótesis de rodilla*. Tesis.
15. Minor, A., Mosso, J., Dominguez, A., Martinez, R., Munoz, R., & Lara, V. (2002). Robot para cirugía Laparoscópica. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 27-32.
16. Miquilarena, R., & Rodríguez, I. (26 de Marzo de 2015). Laparoscopia. (O. Castillo, Entrevistador)
17. Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. Pearson.
18. Muñoz, V., Gómez, J., Fernández, J., García, I., Pérez, C., & Azouaghe, M. (2001). *Diseño y Control de un Asistente Robótico para Cirugía Laparoscópica*. En Instituto de Automática y Robótica Avanzada de Andalucía. Barcelona: Universidad de Málaga, Jornadas de Automática XXII.
19. Perez, M. (2011). *Análisis cinemático e implementación de una mano robótica servo-articulada aplicable como prótesis*. México D.F.: Tesis de maestría.
20. PTdesign. (30 de Octubre de 2015). *FabCentral*. Obtenido de http://fab.cba.mit.edu/classes/961.04/topics/speed_torquecurve.pdf
21. Serway, R. (1999). *Física*. México D.F.: McGraw-Hill.
22. Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control*. London: Springer.
23. Valero, R., Ko, R., Chauhan, S., Schatloff, O., Sivaraman, A., & Coelho, R. (2011). Cirugía robótica: Historia e impacto en la enseñanza. *Actas Urológicas Españolas*, 540-545.
24. Vázquez, M., & López, E. (2001). *El método de elementos finitos aplicado al análisis estructural*. Madrid: Noela.

25. Velazco, M. (2012). *Informe de pasantías: Instituto Nacional de Bioingeniería Lapso 2012-2*. Falcón: Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda.
26. Villavicencio, H. (2006). Cirugía laparoscópica avanzada robótica Da Vinci: Origen, aplicación clínica actual en Urología y su comparación con la cirugía abierta y laparoscópica. *Actas Urológicas Españolas.*, 1-12.
27. Zambrano, A., & Piñango, A. (2003). *Diseño y Construcción de un Simulador para Cirugía Laparoscópica*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela.

APÉNDICE

1.1. Tabla de datos del servomotor seleccionado



FEETECH RC Model Co.,Ltd.

产品规格书

Specification of Product V1.0 Page 1/2

产品名称: 6V 6公斤模拟舵机 Product Name: 6V 6kg.cm Analog Servo
产品型号 Model No. FS5106B

1. 使用环境条件 Apply Environmental Condition

No.	Item	Specification
1-1	存储温度 Storage Temperature Range	-30℃~80℃
1-2	运行温度 Operating Temperature Range	-15℃~70℃

2. 测试环境 Standard Test Environment

No.	Item	Specification
2-1	温度 Temperature range	25℃ ±5℃
2-2	湿度 Humidity range	65%±10%

3. 机械特性 Mechanical Specification

No.	Item	Specification
3-1	尺寸 Size	A: 40.8mm B: 20.1mm C: 38mm D: 49.5mm
3-2	重量 Weight	40g ±0.2 (1.41oz)
3-3	齿轮类型 Gear type	Plastic Gear(Nylon & POM)
3-6	机构极限角度 Limit angle	200° ±5°
3-7	轴承 Bearing	2 Ball bearings
3-8	出力轴 Horn gear spline	25T
3-9	摆臂 Horn type	Plastic, POM
3-10	外壳 Case	Nylon & Fiberglass
3-11	舵机线 Connector wire	300mm ±5 mm
3-12	马达 Motor	Metal brush motor
3-13	防水性能 Splash water resistance	NO

4. 电气特性 Electrical Specification (Function of the Performance)

No.	工作电压 Operating Voltage Range	4.8V	6V
4-1*	静态电流 Idle current(at stopped)	5mA	7mA
4-2*	空载速度 No load speed	0.18sec/60°	0.16 sec/60°
4-3*	空载电流 Runnig current(at no load)	160 mA	190 mA
4-4	堵转扭矩 Peak stall torque	5kg.cm	6kg.cm
		69.56oz.in	83.47oz.in
4-5	堵转电流 Stall current	980 mA	1100mA

Note: "*"definition is average value when the servo runing with no load



FEETECH RC Model Co.,Ltd.

产品规格书

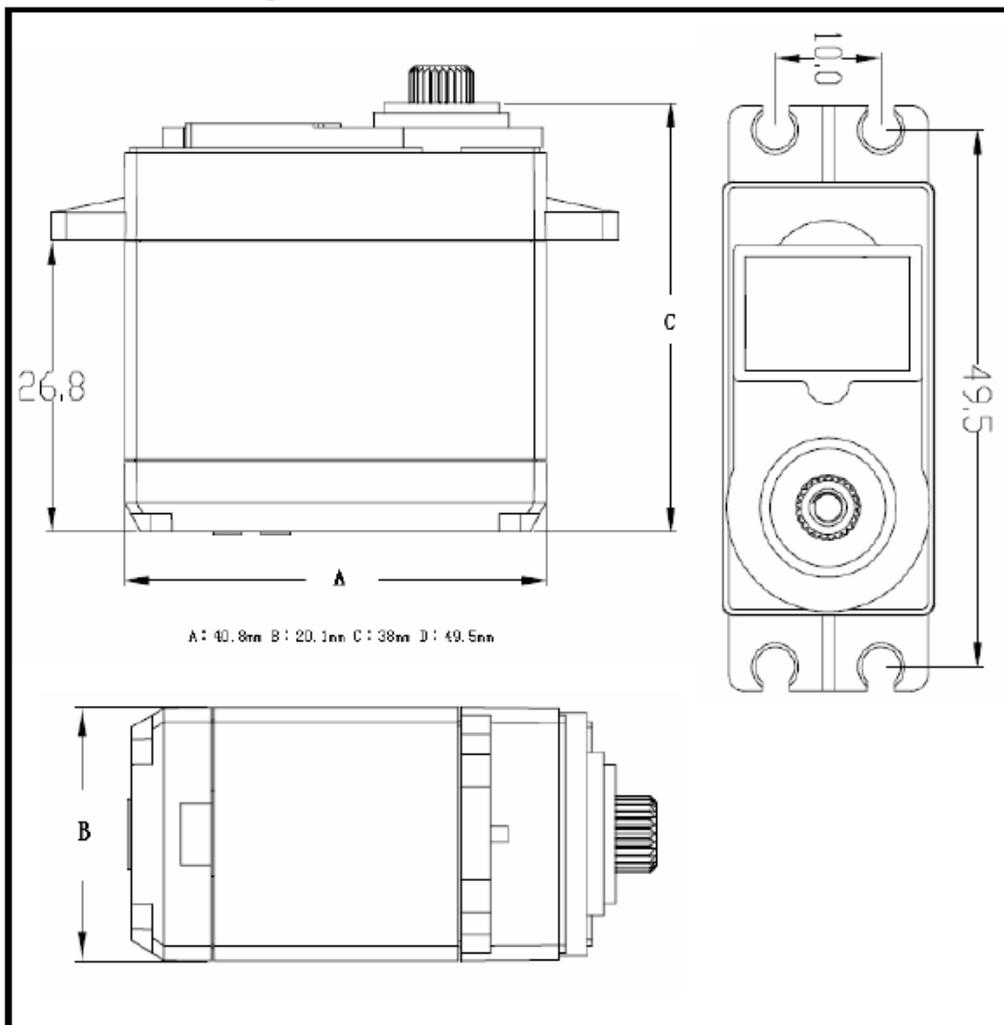
Specification of Product V1.0 Page 1/2

产品名称: 6V 6公斤模拟舵机	Product Name: 6V 6kg.cm Analog Servo
产品型号 Model No. FS5106B	

5. 控制特性 Control Specification:

No.	Item	Specification
5-1	控制信号 Command signal	Pulse width modification
5-2	放大器类型 Amplifier type	Analog comparator
5-3	脉冲宽度范围 Pulse width range	700~2300μsec
5-4	中立位置 Neutral position	1500 μsec
5-5	旋转角度 Running degree	180° (±5°) (when 700~2300 μsec)
5-6	死区宽度 Dead band width	5 μsec
5-7	旋转方向 Rotating direction	Counterclockwise (when 1000~2000 μsec)

6. 外形图 The Drawings



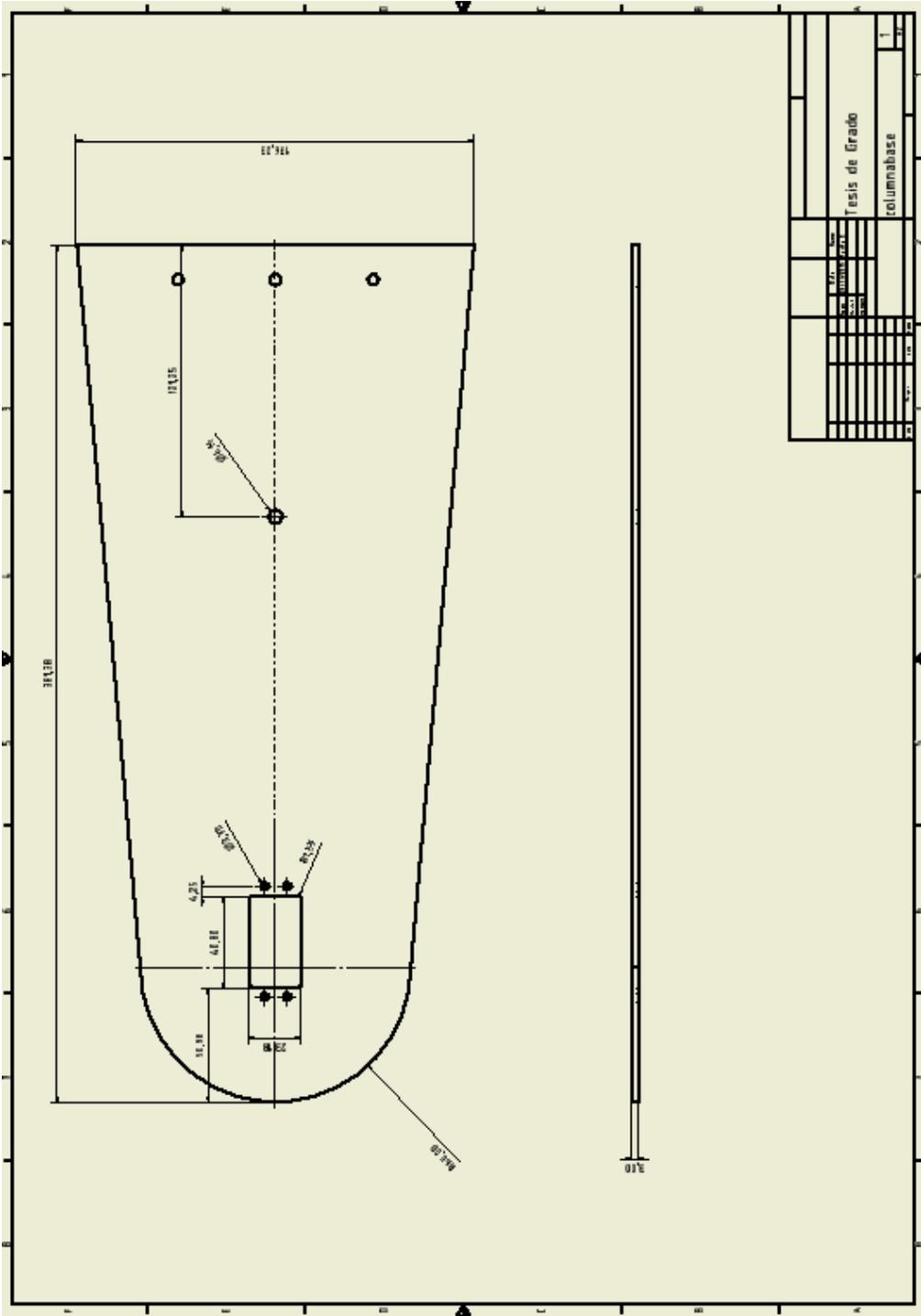
1.2. Especificaciones de la tarjeta Arduino

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

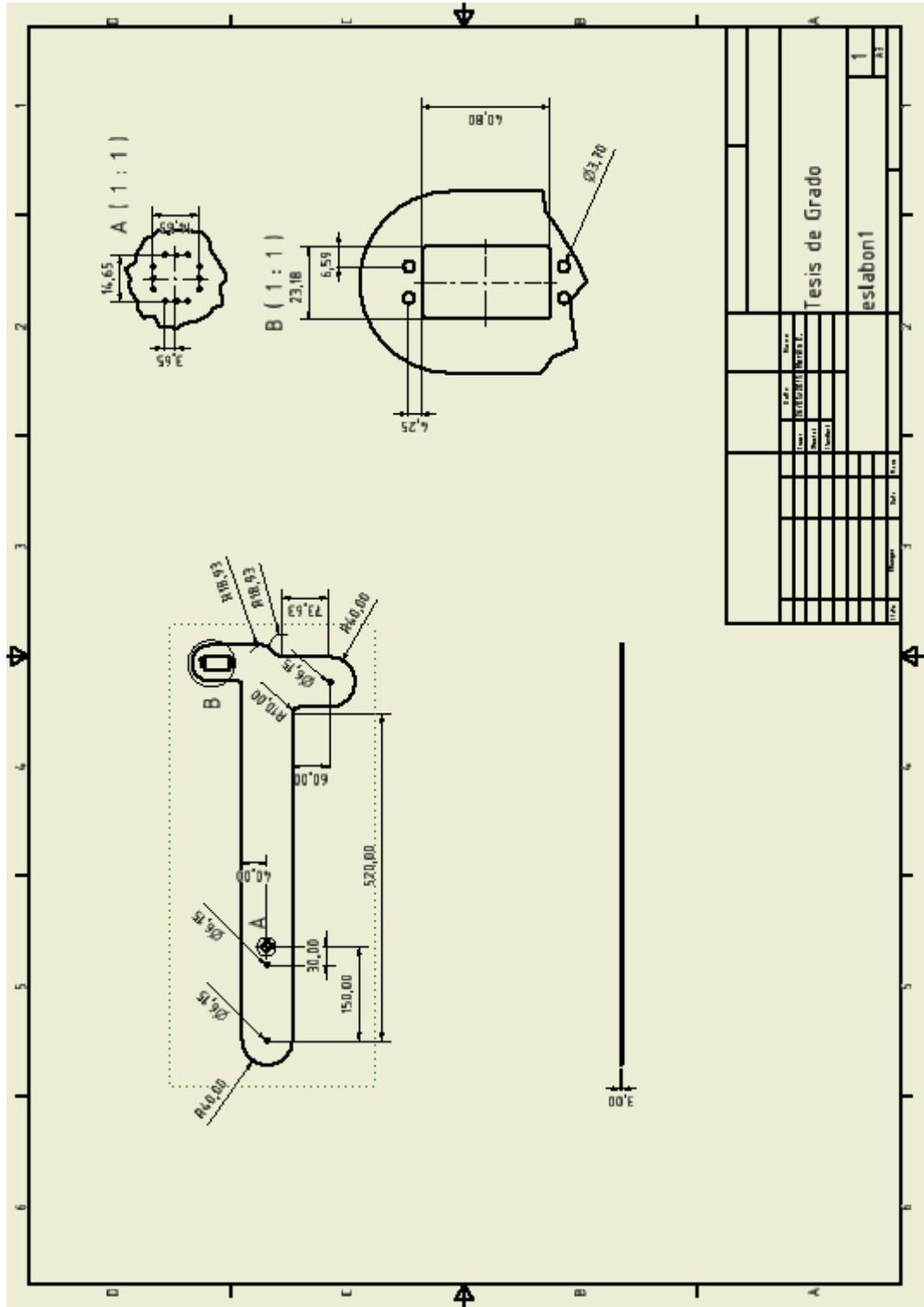
Más información en:

<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>

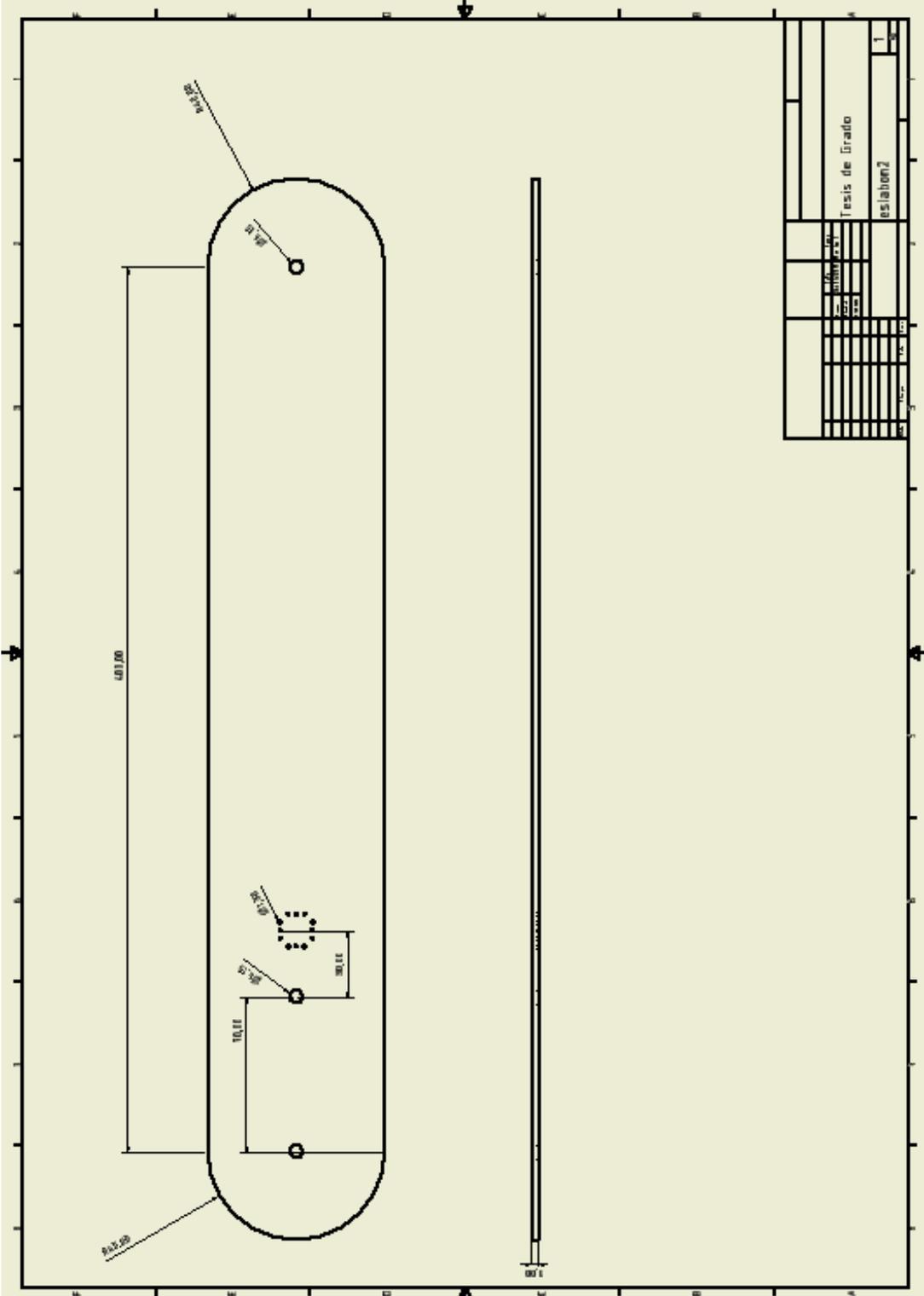
1.4. Planos de la Columna



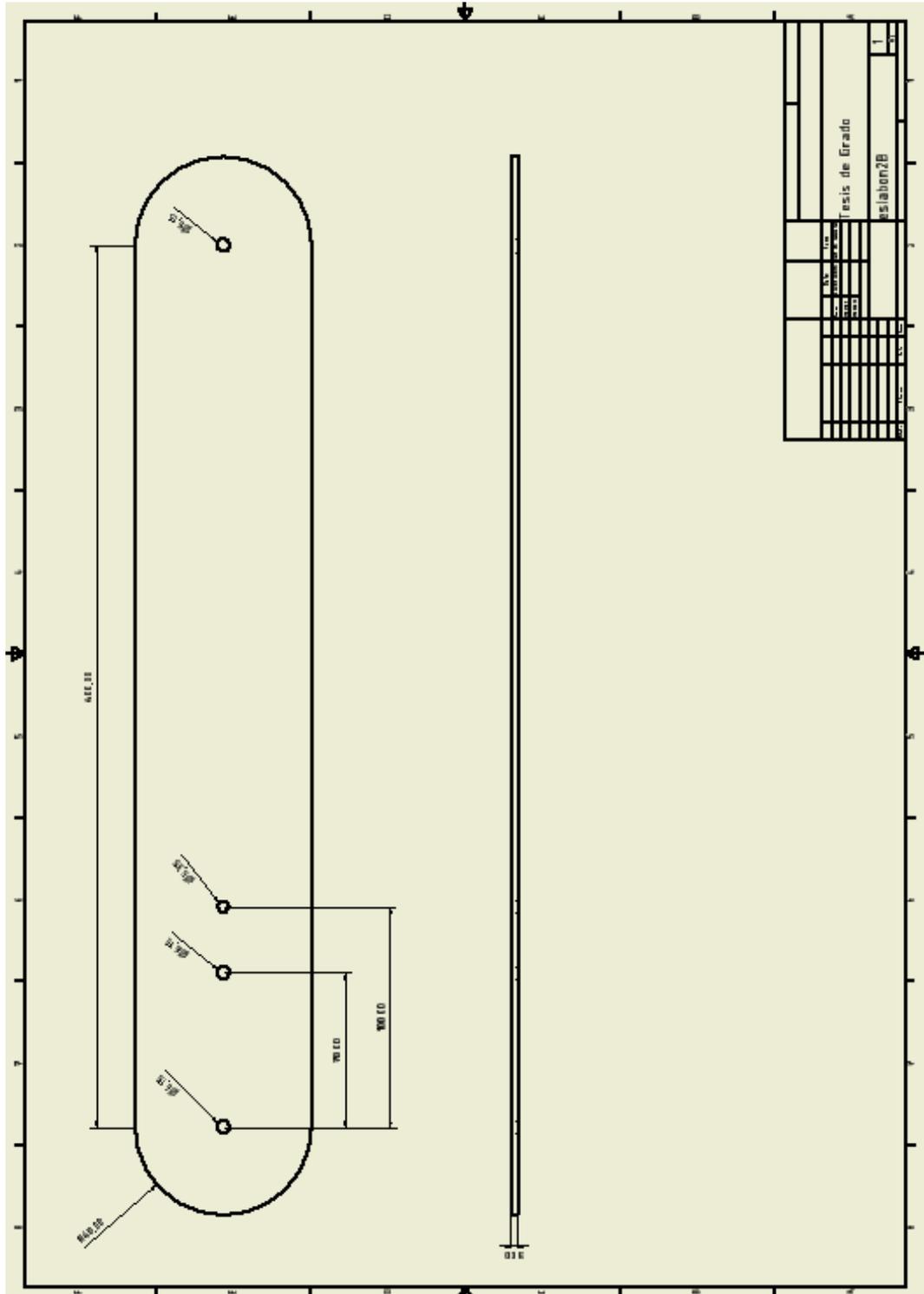
1.5. Planos Eslabón 1



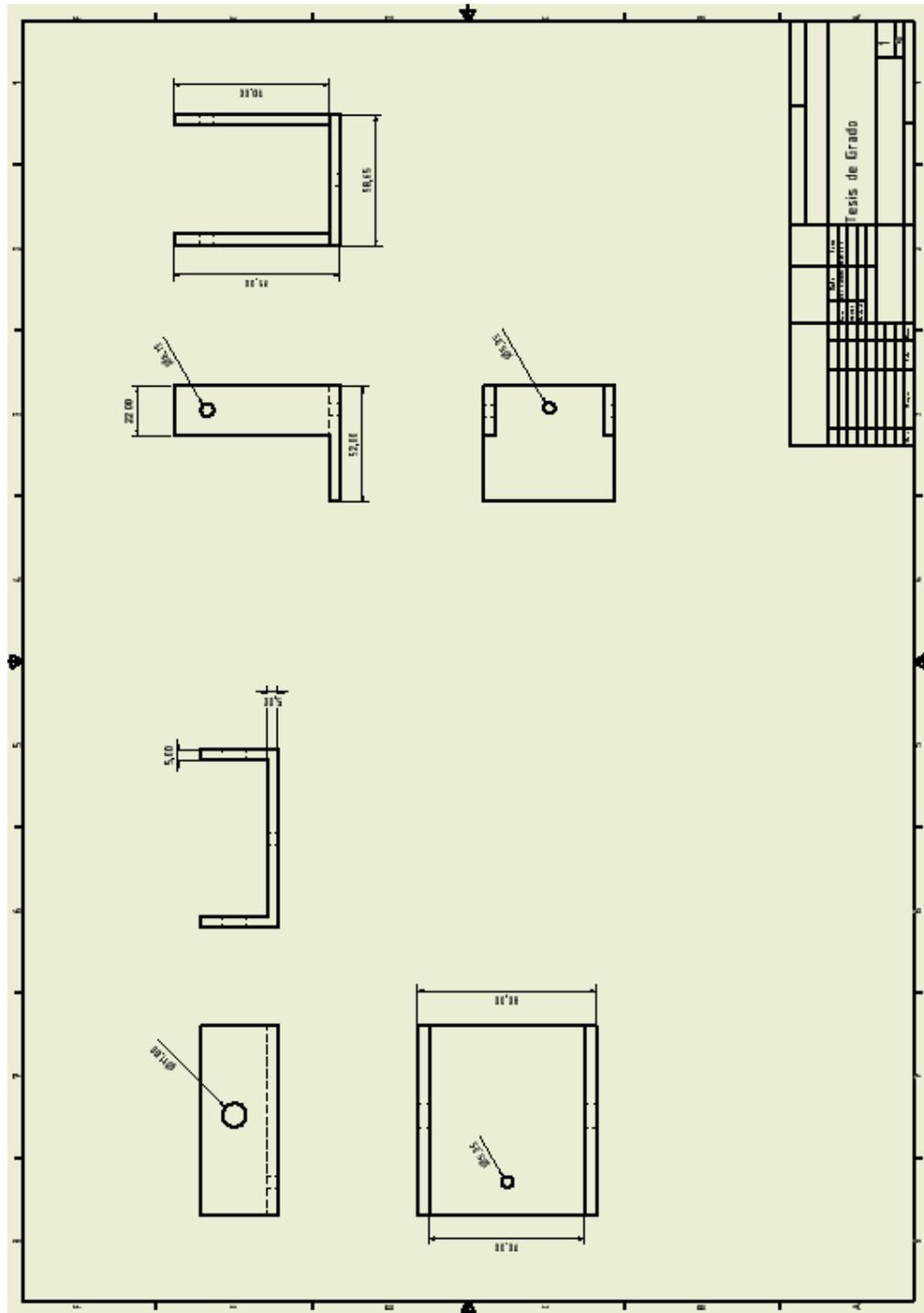
1.7. Planos Eslabón 2



1.8. Planos Eslabón 2B



1.9. Planos de Piezas del Sujetador



1.10. Función Matlab para establecer una matriz de transformación D-H

```
function T = transformadadh(theta1, alpha1, a, d )
```

```
theta=deg2rad(theta1);  
alpha=deg2rad(alpha1);
```

```
T=[ cos(theta)      -sin(theta)*cos(alpha)   sin(theta)*sin(alpha)  
a*cos(theta)      ;  
  sin(theta)      cos(theta)*cos(alpha)   -cos(theta)*sin(alpha)   a*sin(theta)  
;  
    0              sin(alpha)              cos(alpha)              d              ;  
    0              0                      0                      1              ];
```

```
end
```

1.11. Función Matlab para la cinemática directa del robot.

```
function [pos]=cdirect2(thet1,thet2,thet3)

base=[0;800;175;1];
d=66+20; %60 es la distancia desde el eje hasta donde termina la pieza y 20 es la
altura del laparosc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T10=transformadadh(90+thet1,-90,0,324.384);
T21=transformadadh(-11.44+thet2,0,459.129,-10.1);
T32=transformadadh(11.44+thet3,0,300,0);
T30=T10*T21*T32;
    %%transformadadh(theta,alpha,a,d)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T03=T30^-1;
PP=T03*base;
R=norm([PP(1);PP(2)]);
angR=atan2(PP(2),PP(1));
ang=acos(d/R);
thet4=rad2deg(angR-ang);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

T43=transformadadh(thet4,180,d,0); %recordar el 60
T40=T30*T43;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T04=T40^-1;
PP=T04*base;

angR=atan2(PP(2),PP(3));

alph5=rad2deg(angR);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

T54=transformadadh(0,alph5,0,0); %recuerda que 20 es la altura del laparosc
T50=T40*T54;
pos=[T50(1,4);T50(2,4);T50(3,4)];

end
```

1.12. Función Matlab para la cinemática inversa del robot.

```
function [angs,flag]=cinvers(x,y,z)

%%%si flag 1, procedimiento fallido, pero si flag 0 procedimiento exitoso
d=10.1; %parametro D-H correspondiente a d2
r=norm([x,y]);
base=[0;800;175;1];

alpha=asin(d/r);
beta=-atan2(x,y);
thet1=beta+alpha;
thet1g=rad2deg(thet1);

%transformadadh(theta,alpha,a,d)
T10=transformadadh(thet1g,0,0,0);
T21=transformadadh(0,0,10.1,0); %%%en este marco yz contiene al punto
[x,y,z]
T20=T10*T21;
T02=T20^-1;

P=[x;y;z;1];

P2=T02*P; %%%el punto q ve 0, visto desde 2
base2=T02*base; %%%el trocar q ve 0, visto desde 2

x32=P2(1); %este valor debiera ser cero

TP2=[1 0 0 0 ; %para trasladar el marco al punto
      0 1 0 P2(2);
      0 0 1 P2(3);
      0 0 0 1 ];

T2P=TP2^-1;

base22=T2P*base2; %trocar visto desde el punto dentro del plano yz de 2
phi=atan2(base22(3),base22(2));
[y3P,z3P]=pol2cart(phi-(pi/2),86); %%%distancia 66+20 entre punto 3 y 5

P3P=[0;y3P;z3P;1];
P32=TP2*P3P;
P32(1)=x32;
P32(4)=1;
P3=T20*P32;
```

```

px=P3(1);
py=P3(2);
pz=P3(3)-324.384; %%%%%%%%%% recordar este es el z del sist de ref
cero, osea el parametro D-H d1

B=((px^2)+(py^2)+(pz^2)-(459.129^2)-(300^2))/(2*(459.129)*(300));

if B>1
    flag=1; %1 quiere decir que es imposible
    angs=[0;0;0];
else
    C=sqrt(1-(B^2));

    thet3g=(rad2deg(atan2(-C,B))+11.44)*-1;

    thet2g=(rad2deg( atan2(pz,sqrt((px^2)+(py^2))) - atan2((300*(-
C)),(459.129+(300*B))) )-11.4)*-1;

    angs=[thet1g;thet2g;thet3g];
    flag=0; %0 cero quiere decir que se hizo con exito
end

end

```

1.13. Rutina Matlab para graficar el área de trabajo del robot

```
function [pos]=cdirect(thet1,thet2,thet3)

base=[0;870;324.384;1];
PF0=[0;0;0;1]; %dos puntos para definir una recta en el espacio respecto a la base
del robot
PF1=[0;0;1;1];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T10=transformadadh(90+thet1,-90,0,324.384);
T21=transformadadh(-11.4+thet2,0,459.129,-10.175);
T32=transformadadh(11.4+thet3,0,300,0);
T30=T10*T21*T32;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
thet4=-120;
thet5=-10;
g=51;
T43=transformadadh(thet4,180,60,0);

while g>0.09
    thet5=thet5+0.5;
    T54=transformadadh(0,thet5,25,20);
    if thet5>185
        thet4=thet4+0.5;
        T43=transformadadh(thet4,180,60,0);
        thet5=-119.5;
        if thet4>95
            KAB=1;
            fprintf('kaboom')
            break
        end
    end
end

%definicion de punto del actuador

T53=T43*T54;
T50=T30*T53;
pos=T50*PF0;
PB1=T50*PF1;

X=pos-PB1; %vector director laparosc.
Y=pos-base; %vector directos base-efector
x1=[X(1) X(2) X(3)];
```

```
y1=[Y(1) Y(2) Y(3)];  
g=(norm(cross(x1,y1)))/norm(y1);
```

```
end  
thet4
```

```
end
```

1.14. Rutina Matlab para el control del robot

```
function robotlaparoscopia
clear
clc

a=arduino;
C4=servo(a,'D2','MinPulseDuration',1.65e-3,'MaxPulseDuration',1.85e-03);
writePosition(C4,0.5); %%%inicializado en 0 grados asociado a theta 1
C3=servo(a,'D4','MinPulseDuration',1.375e-3,'MaxPulseDuration',1.825e-03);
writePosition(C3,1); %%%inicializado en 0 grados asociado a theta 2invertido
C2=servo(a,'D7','MinPulseDuration',1.175e-3,'MaxPulseDuration',1.625e-03);
writePosition(C2,0); %inicializado en 0 grados asociado a theta 2
C1=servo(a,'D8','MinPulseDuration',1.35e-3,'MaxPulseDuration',2.2e-03);
writePosition(C1,1); %inicializado en 0 grados theta 3

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

flag2=0;
text=0;
text2=0;
flag=0;
prompt='Indique su
orden:\nAdelante=1\nAtras=2\nIzquierda=3\nDerecha=4\nArriba=5\nAbajo=6\nCerrar=7\nRegresar al menu principal=8\nOrden: ';
prompt2='Que desea probar?\nCinematica Directa=1\nCinematica
Inversa=2\nSalir=3\nOrden: ';
prompt3='\nIndique el valor del angulo del accionamiento de la base (entre -10 y
10):';
prompt4='Indique el valor del angulo del accionamiento de la primera articulacion
(entre -45 y 0):';
prompt5='Indique el valor del angulo del accionamiento de la segunda articulacion
(entre 0 y 85):';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Para la cinematica inversa
trocar=[0;800;175;1];
TBR=
    [ 1    0    0   trocar(1);
      0    1    0   trocar(2);
      0    0    1   trocar(3);
      0    0    0    1   ];
TRB=TBR^-1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

while text~=7
    clc
    while flag~=1
        clc
        text2=input(prompt2);
        if text2==1 || text2==2 || text2==3
            flag=1;
            if text2==3
                text2=5;
                text=7;
            end
        end
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%555555555555
if text2==1
    clc
    fprintf('Angulos Actuales:\n');
    theta1= (readPosition(C4)*20)-10
    theta2= (readPosition(C2)*45)*-1
    theta3= (readPosition(C1)*-85)+85
    fprintf('Posicion actual del efector en el espacio XYZ respecto a la base:\n');
    Posicion=cdirect2(theta1,theta2,theta3)
    flag4=0;
    %%%%%%%%%%% establecer limites
    flag5=1;
    while flag5~=0
        while flag4==0
            theta1=input(prompt3);
            if theta1<-10 || theta1>10
                fprintf('Su peticion excede el rango establecido, volver a intentar\n');
            else
                flag4=1;
            end
        end
        flag4=0;
        while flag4==0
            theta2=input(prompt4);
            if theta2<-45 || theta2>0
                fprintf('Su peticion excede el rango establecido, volver a intentar\n');
            else
                flag4=1;
            end
        end
    end
end

```

```

end
end
flag4=0;
while flag4==0
theta3=input(prompt5);
if theta3<0 || theta3>85
    fprintf('Su peticion excede el rango establecido, volver a intentar\n');
else
    flag4=1;
end
end
Posicion2=cdirect2(theta1,theta2,theta3);
if sqrt(((Posicion2(1)-trocar(1))^2)+((Posicion2(2)-trocar(2))^2)+((Posicion2(3)-
trocar(3))^2))>150
    flag5=0;
else
    fprintf('Peligro, su peticion hace que la camara alcance su limite en posicion,
intente otra orden')
    pause(3);

end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%

```

```

theta1=(theta1+10)/20;
theta2=(theta2*-1)/45;
thetaux=1-theta2;
theta3=(-1/85)*(theta3-85);
writePosition(C4,theta1);
writePosition(C3,thetaux);
writePosition(C2,theta2);
writePosition(C1,theta3);
clc
fprintf('Angulos Nuevos:\n');
theta1= (readPosition(C4)*20)-10
theta2= (readPosition(C2)*45)*-1
theta3= (readPosition(C1)*-85)+85
fprintf('Posicion nueva del efector en el espacio XYZ respecto a la base:\n');
Posicion=cdirect2(theta1,theta2,theta3)

```

```

while flag2==0

```

```

text2=input('\nIntentar otra combinacion=1\nVolver al menu
principal=3\nCerrar=7\nOrden: ');

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if text2==1
    flag=1;
    flag2=1;
else
    if text2==3
        flag=0;
        flag2=1;
    else if text2==7
        text=text2;
        flag2=1;
    end
end
end
clc
end

```

```

flag2=0;

```

```

end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

if text2==2
    text=0;

```

```

while text~=8

```

```

    clc
    fprintf('Angulos actuales:\n');
    theta1= (readPosition(C4)*20)-10
    theta2= (readPosition(C2)*45)*-1
    theta3= (readPosition(C1)*-85)+85
    fprintf('Posicion del efector en el espacio XYZ respecto a la base:\n');
    Posicion=cdirect2(theta1,theta2,theta3)
    text=input(prompt);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%preparando para la cinematica inversa
%trocar

```

```

Posicion(4)=1;
POStrocar=TRB*Posicion;
[thit,phi,r]=cart2sph(POStrocar(1),POStrocar(2),POStrocar(3));

%%%%%para izq-der

[thit2,phi2,r2]=cart2sph(POStrocar(3),-POStrocar(2),POStrocar(1));

%   angID=ra'D2'deg(atan2(POStrocar(3),POStrocar(2)));
%   TIDT=transformadadh(0,angID,0,0);
%   TTID=TIDT^-1;
%   POSTID=TTID*POStrocar;
%   [alphab,rhob]=cart2pol(POSTID(2),POSTID(1));
%

%%%%%%%%%%%%

if text==1   %%%% adelante varia r disminuyendo
    r=r-20;

end

if text==2   %%%% atras varia r aumentando
    r=r+20;

end

if text==3   %%%% izquierda varia phi2 aumentando
    phi2=phi2+(20/r2);

end

if text==4   %%%% derecha varia phi2 disminuyendo
    phi2=phi2-(20/r2);
end

if text==5   %%%% arriba varia phi disminuyendo
    phi=phi-(20/r);
end

```

```

if text==6 %%%% abajo varia phi aumentando
    phi=phi+(20/r);
end
if text==7
    break;
end
if text==8
    flag=0;

end

if text==1 ||text==2 ||text==3 ||text==4 ||text==5 ||text==6
if text==1 ||text==2 ||text==5 ||text==6
    [xn,yn,zn]=sph2cart(thit,phi,r);
    posnuevtrocar=[xn;yn;zn;1];
    posnuevbase=TBR*posnuevtrocar;
end
if text==3 ||text==4

    [zn,yn,xn]=sph2cart(thit2,phi2,r2);
    yn=-yn;

    posnuevtrocar=[xn;yn;zn;1];

    posnuevbase=TBR*posnuevtrocar;
end

%%%%%%%%%%%%% inversa
[thetp,flag8]=cinvers(posnuevbase(1),posnuevbase(2),posnuevbase(3));
posprueb=cdirect2(thetp(1),thetp(2),thetp(3));
if flag8==1 || thetp(1)<-10 || thetp(2)<-45 || thetp(3)<0 || thetp(1)>10 || thetp(2)>0 ||
thetp(3)>85 || sqrt(((posprueb(1)-trocar(1))^2)+((posprueb(2)-
trocar(2))^2)+((posprueb(3)-
trocar(3))^2))<150 %%%% establecer limites de angulos
    fprintf('Su orden implica la salida del rango, orden cancelada\n');
    pause(3);
else
    thetp1=(thetp(1)+10)/20;
    thetp2=(thetp(2)*-1)/45;
    thetauxp=1-thetp2;
    thetp3=(-1/85)*(thetp(3)-85);

    writePosition(C4,thetp1);
    writePosition(C3,thetauxp);

```

```
writePosition(C2,thetp2);  
writePosition(C1,thetp3);  
clc
```

```
end
```

```
clear  
clc  
fprintf('Listo\n');  
end
```