



SEP

SES

TecNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

**“DISEÑO Y CONTRUCCIÓN DE UN SISTEMA
MECATRÓNICO PARA EL LLENADO Y TRASLADO DE
VIALES PARA LA ELABORACIÓN DE
RADIOFÁRMACOS”**

OPCIÓN: TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

PRESENTA:

LUIS ARTURO JASSO GONZÁLEZ

NO. CONTROL:11280944

ASESORES:

DRA. MAYRA PATRICIA GARDUÑO GAFFARE

DR. JOSÉ ARMANDO SEGOVIA DE LOS RÍOS



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Metepec, Edo. de México, 12/Abril/2019

ASUNTO: Liberación de Proyecto para Titulación Integral

C. ING. MIGUEL ÁNGEL TERRAZAS MAGAÑA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E.

Por este medio le informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la Titulación Integral:

Nombre del Egresado: LUIS ARTURO JASSO GONZÁLEZ
Carrera: INGENIERÍA MECATRÓNICA
No. de Control: 11280944
Nombre del Proyecto: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA EL LLENADO Y TRASLADO DE VIALES PARA LA ELABORACIÓN DE RADIOFÁRMACOS"
Producto: "TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL"

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE
‘Educación, integridad y ciencia’

ING. KARINA ESPERANZA ÁLVAREZ VÁZQUEZ
JEFA DEL DEPTO. DE INGENIERÍAS



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA MECATRÓNICA

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

RECIBIDO
30 ABR 2019

OFICINA DE APOYO A LA TITULACIÓN

DRA. MAYRA PATRICIA GARDUÑO CAFFARE ASESORA	DR. JOSÉ ARMANDO SEGOVIA DE LOS RÍOS ASESOR	DR. JOSÉ MANUEL GARCÍA HERNÁNDEZ REVISOR

c.c.p. Expediente



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Metepec, Edo. de México, 02/mayo / 2019

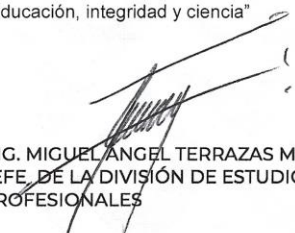
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO PROFESIONAL

C. LUIS ARTURO JASSO GONZÁLEZ
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA MECATRÓNICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica, dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó, con respecto a su trabajo profesional en la OPCIÓN TITULACIÓN INTEGRAL: TESIS PROFESIONAL, con el tema denominado: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA MECATRÓNICO PARA EL LLENADO Y TRASLADO DE VIALES PARA LA ELABORACIÓN DE RADIOFÁRMACOS". La División de Estudios Profesionales concede su autorización para que proceda la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

"Educación, integridad y ciencia"


ING. MIGUEL ÁNGEL TERRAZAS MAGAÑA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
PROFESIONALES



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE
ESTUDIOS PROFESIONALES

MATM*mppd*



Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149,
Metepec, Estado de México. Tels. Dirección (01722) 208 7205, Subd. Académica 208 7207,
Subd. de Planeación 208 7206, Subd. Administrativa 208 7208, Conmut. 208 72 00
e-mail: info@toluca.tecnm.mx, www.toluca.tecnm.mx



Dedicatorias

*A mi papá, que siempre tuvo las
palabras para darme fuerza.*

*A mi mamá, por su apoyo
incondicional.*

*A mis hermanas, por estar siempre
presentes.*

Agradecimientos

Quiero agradecer al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por el apoyo recibido para la elaboración de este proyecto, de igual manera agradezco al Instituto Tecnológico de Toluca por mi formación académica.

Agradezco al Dr. José Armando Segovia de los Ríos y la Dra. Mayra Patricia Garduño Gaffare los cuales me guiaron y apoyaron durante la elaboración de este proyecto.

Resumen

En la actualidad existe un gran avance tecnológico que beneficia al humano de diversas maneras, por ejemplo, máquinas que soportan cargas que un humano no podría o realizar trabajos que requieren precisión. Así como en estas tareas se hace uso de maquinarias, también son aplicadas en ambientes que podrían afectar la salud del trabajador, ya sea en altas temperaturas o en espacios con oxígeno limitado, en cada industria se tienen áreas o trabajos con ambientes hostiles para los trabajadores.

En el ININ (Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares) se trabaja con elementos a los cuales el cuerpo humano reacciona por radiación, con dosis o tiempo de exposición controlados pueden ser de beneficio, sin embargo, si no se controla esta exposición durante la manipulación de los mismos puede perjudicar severamente la salud.

Uno de los procedimientos realizados manualmente por investigadores en los laboratorios del ININ consiste en el llenado de viales ubicados en un rack, la sustancia con la cual son llenados es $^{177}\text{LuCl}_3$, una vez llenos estos viales son trasladados a un nuevo rack, en el cual reciben un tratamiento térmico para obtener la solución $^{177}\text{Lu-Tyr}^3\text{-octreotide}$, el enfriamiento de los viales se hace en temperatura ambiente, por lo cual se deben de retirar del rack del tratamiento térmico y regresarlos al primer rack, la solución obtenida es utilizada en quimioterapias como tratamiento contra el cáncer.

Para reducir o eliminar la exposición de los investigadores a estas sustancias durante su manipulación, se propone un sistema mecatrónico capaz de realizar el traslado de viales entre racks.

El sistema que se muestra en este documento abarca un manipulador tipo Scara (diseñado previamente), se realiza el diseño y construcción de los racks y de un sistema lineal para el llenado de los viales, se muestra el análisis y selección del sistema electrónico para dicho manipulador, también se muestran los métodos utilizados para el desarrollo de la trayectoria del manipulador, esta trayectoria es la que el manipulador seguirá para tomar y trasladar los viales.

Por último, se describen las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, estas pruebas consistieron en simular la tarea de trasladar viales entre racks, por lo cual se diseñaron dos racks en los cuales el manipulador debía tomar los viales del primer rack en el cual serían llenados y colocarlos en el segundo rack el cual sería de almacenamiento para su tratamiento térmico.

CONTENIDO

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos del proyecto	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Características y limitantes del sistema.....	3
1.4 Estructura del documento	4
Capítulo 2 Marco teórico	6
2.1 Historia de los robots manipuladores.....	6
2.2 Posición y orientación en el plano	7
2.3 Cinemática de los manipuladores.....	8
2.3.1 Cinemática directa del manipulador	8
2.3.2.1. Cinemática inversa método geométrico	9
2.4 Criterios de diseño.....	11
2.4.1 Articulaciones.....	11
2.4.2 Configuraciones básicas.....	12
2.4.2.1 Configuración cartesiana	12
2.4.2.2 Configuración polar	12
2.4.2.3 Configuración Scara	13
2.4.3 Efector final	13
2.4.4 Actuador	14
2.4.5 Mecanismos de transmisión	15
2.5 Diseño asistido por computadora.....	16
2.5.1 SolidWorks®.....	16
2.5.2 AutoCAD®.....	16
2.6 Definición de trayectoria	17
2.6.1 Curvas de Bézier	17
2.6.1.1 Curvas lineales de Bézier	17
2.6.1.2 Curvas cúbicas de Bézier	17
2.7 Modulación por ancho de pulso	18
2.7.1 Modulación por Ancho de Pulso en la Raspberry Pi B+	18
Capítulo 3 Desarrollo del Sistema Mecatrónico	20

3.1	Introducción.....	20
3.2	Análisis de requerimientos para el diseño del sistema.....	20
3.3	Desarrollo del manipulador tipo Scara	22
3.3.1	Mecanismos del manipulador	23
3.3.2	Diseño CAD y análisis de la resistencia y la flexibilidad.....	24
3.3.3	Construcción del manipulador	32
3.3.4	Características geométricas	35
3.3.5	Modelo eléctrico y electrónico del sistema.....	37
3.3.5.1	Controlador electrónico del sistema.....	37
3.3.5.2	Movimiento de Articulaciones	38
3.3.5.2.1	Movimiento de la articulación angular.....	38
3.3.5.2.2	Movimiento de la articulación prismática	40
3.4	Racks del sistema	42
3.4.1	Diseño del Rack	42
3.4.2	Sistema lineal para el rack de llenado.....	44
3.4.2.1	Driver.....	45
3.4.2.2	Conexión eléctrica.....	47
3.5	Máquina para el Llenado de Viales.....	47
Capítulo 4 Modelo de desplazamiento del manipulador		50
4.1	Curva de Bézier de la Trayectoria.....	50
4.2	Cinemática inversa del manipulador tipo Scara	51
4.3	Interpolación de los servos Herkulex	53
Capítulo 5 Resultados		54
5.1	Pruebas.....	54
5.1.1	Pruebas del sistema lineal	54
5.1.2	Pruebas sobre el Robot Manipulador.....	56
5.2	Rediseño del manipulador Tipo Scara	59
Capítulo 6 Conclusiones		61
Referencias		62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 a) Llenado del vial b) Sellado del vial	2
Figura 1.2. Propuesta del sistema mecatrónico.	3
Figura 1.3. Representacion grafica del sistema propuesto. a) Posición para el llenado del primer vial, b) Posicion para tomar el primer vial, c) Posición para depositar el primer vial.....	4
Figura 2.1. Posición y orientación del sistema {A} en el plano.	7
Figura 2.2. Posición y orientación del sistema {A}^{B} en el plano.	8
Figura 2.3. Representación de un manipulador de dos grados de libertad.....	9
Figura 2.4. Articulaciones simples.....	11
Figura 2.5. Robot cartesiano.....	12
Figura 2.6. Manipulador polar.	13
Figura 2.7. Manipulador Scara.....	13
Figura 2.8. Efecto final universal.....	14
Figura 2.9. Gripper (Pinza del robot).....	14
Figura 2.10. Tipos de transmisión: a) Engranés, b) Correa dentada, c) Tornillo sin fin.....	15
Figura 2.11. Señales cuadradas.	18
Figura 3.1 Manipulador tipo Scara	21
Figura 3.2 Representación gráfica del área de trabajo del manipulador	22
Figura 3.3 Esquema del robot manipulador a diseñar	23
Figura 3.4 Actuador lineal Actuonix.....	23
Figura 3.5 Servo motor Herkulex	24
Figura 3.6 Piezas del primer diseño del manipulador a) base, (b) vinculo 0, c) vinculo 1, d) vinculo 2.....	25
Figura 3.7 Ensamble del gripper	25
Figura 3.8 Ensamble del servo motor Herkulex.....	25
Figura 3.9 Ensamble del primer diseño.....	26
Figura 3.10 Resultado del estudio estático con el actuador lineal contraído	27
Figura 3.11 Resultado del estudio estático con el actuador lineal extendido.....	27
Figura 3.12 Piezas necesarias para el segundo diseño	28
Figura 3.13 Resultado del estudio estático con el actuador lineal en el extremo final	28
Figura 3.14 Piezas modificadas para el tercer diseño	29
Figura 3.15 Tercer prototipo.....	29
Figura 3.16 Estudio estático del tercer diseño.....	30

Figura 3.17 Piezas nuevas del cuarto y último diseño del manipulador	30
Figura 3.18 Estudio del ultimo diseño con el servo motor en el vínculo cero.....	31
Figura 3.19 Imagen del vínculo dos mostrando las circunferencias para sujetar el engrane del servomotor.....	31
Figura 3.20 Vista Lateral del Volumen de Trabajo	32
Figura 3.21 Vista Superior del Volumen de Trabajo.....	32
Figura 3.22 Deformación en las piezas.....	33
Figura 3.23 Parte del ensamble gripper, actuador lineal y el vínculo dos	33
Figura 3.24 Ensamble vínculo uno y vínculo dos	34
Figura 3.25 Ensamble vínculo cero y vínculo uno	34
Figura 3.26 Ensamble vínculo cero con la base.....	34
Figura 3.27 Ensamble final del manipulador	35
Figura 3.28 Dibujo en SolidWorks® del ensamble del manipulador final.....	35
Figura 3.29 GPIO de la Raspberry Pi B+.	37
Figura 3.30 Cadena de comando para servomotor Herkulex.	38
Figura 3.31. Diagrama de conexión entre Raspberry Pi B+ y el servo motor Herkulex.	40
Figura 3.32. Diagrama de conexión entre Raspberry y el actuador lineal.....	40
Figura 3.33. Gripper.....	41
Figura 3.34. Diagrama de conexión entre Raspberry y servomotor.....	42
Figura 3.35 Rack de llenado a) Diseño en Solidworks® b) Rack construido	43
Figura 3.36. Rack de almacenamiento a) Rack diseñado en Solidworks® b) Rack construido.....	43
Figura 3.37. Sistema lineal.....	44
Figura 3.38. Sistema lineal con el rack.	44
Figura 3.39. Diagrama de conexión del controlador con el driver.....	45
Figura 3.40. Configuración de resolución para el motor a pasos.....	46
Figura 3.41. Configuración de corriente para el motor.	46
Figura 3.42. Diagrama de la conexión eléctrica de la Raspberry Pi B+ con el driver.....	47
Figura 3.43. Diseño de la máquina para el llenado de viales. a) Vista frontal, b) Vista lateral.....	48
Figura 4.1. Área de trabajo del manipulador Scara y puntos que definen la trayectoria.	50
Figura 4.2. Representación de la evolución de las articulaciones para generar la curva de Bézier.....	52
Figura 4.3. Representación de la trayectoria cada vial.	52
Figura 4.4. Sistema de referencia del servomotor Herkulex.	53

Figura 5.1. Manipulador tipo Scara y sistema lineal.	54
Figura 5.2. Sistema lineal en la primera posición con marcas como siguiente posición.	55
Figura 5.3. Sistema lineal en la segunda posición.	55
Figura 5.4. Sistema de referencia del sistema.	56
Figura 5.5. Vista superior del manipulador para tomar el vial.	56
Figura 5.6. Vista superior del manipulador para dejar el vial.	57
Figura 5.7 Gráfico comportamiento de errores.	58
Figura 5.8. Rediseño del manipulador tipo Scara. a) Vista lateral, b) Vista isométrica, c) Vista superior.	60

Capítulo 1 Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La presencia de la tecnología dentro de los distintos campos de ocupación humana aumenta cada día más y se ve reflejada en el mundo moderno. Esto se debe a la gran variedad de ventajas que esta aporta, por ejemplo; reduciendo costos, elevando la eficiencia, mejorando la calidad, protegiendo el personal, entre muchos otros, lo que permite maximizar la explotación del entorno de inversión transformándolo así en ganancia.

Es indudable que la automatización de los procesos se ha ido robusteciendo a medida que la tecnología avanza, de manera que a nuestros días, tenemos procesos automáticos que pueden funcionar de forma independiente del control humano, lo que la hace enormemente atractiva en procesos que ponen en alto riesgo la integridad humana.

La industria nuclear alberga un sin número de tareas que reclaman ser automatizadas por su constante manejo de sustancias radiactivas. La manipulación de estas sustancias reviste un riesgo importante para la salud de quienes trabajan en procesos en donde la manipulación de estas es la actividad principal.

En el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares ubicado en Ocoyoacac, Estado de México, se realizan continuamente prácticas que involucran sustancias tóxicas por su alto contenido de radiación. Dentro de los diversos servicios que ofrece, se encuentra la producción y suministro de radiofármacos para el sector salud. Ejemplo de estos, es la producción de ^{177}Lu -Octreótido (^{177}Lu) y el de ^{131}I odo (^{131}I), los cuales son importantes para el tratamiento de algún tipo de tumores cancerosos (el primero) y tratamiento de problemas en la glándula tiroides (en el caso del segundo).

El ^{177}Lu -DOTA- NaI^3 -Octreótido, en particular, es una solución inyectable, usada como un radiofármaco de diagnóstico y control en el tratamiento de tumores de origen neuroendocrino. La preparación de este involucra la necesidad de manejar algunos 500 micro litros de Lutecio, sustancia que hasta en esta pequeña cantidad, llega a alcanzar niveles de radiactividad tan altos como los 1.3 Ci (Curies).

Actualmente, la preparación del radiofármaco se realiza manualmente. Este proceso de manera general consiste en distribuir dosis establecidas de lutecio en diferentes viales. A estos se agregan otras sustancias más, antes de ser sellados para continuar con el proceso.

Posterior al sellado, son calentados en un baño seco a 95 grados centígrados durante 20 minutos para posteriormente dejarse enfriar durante 5 minutos. La sustancia es filtrada y finalmente cargada en jeringas de 5ml.

Como puede visualizarse en las figuras 1.1a y 1.1b, el proceso se lleva a cabo con guantes a través de celdas con blindajes hechos de lingotes de plomo, lo que no deja de ser un riesgo para la integridad física de los trabajadores.



a)

b)

Figura 1.1 a) Llenado del vial b) Sellado del vial

Con el fin de proteger al personal involucrado en el proceso, se propuso desarrollar un sistema que permitiera reducir al máximo la intervención manual del personal, automatizando el proceso de producción del radiofármaco. Para ello, se desarrolló un sistema mecatrónico basado en un brazo robótico de tipo Scara.

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo fue desarrollar un sistema mecatrónico que automatice el llenado y traslado de viales durante la producción del radiofármaco ^{177}Lu -DOTA-NaI³-Octreótido.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto fueron:

- Diseñar e implementar los componentes mecánicos del sistema.

- Diseñar e implementar los componentes eléctricos y electrónicos del sistema.
- Modelar e implementar el desplazamiento del manipulador.

1.3 Características y limitantes del sistema

En la figura 1.2 se muestran los principales componentes del sistema mecatrónico desarrollado en el presente trabajo. El elemento principal es un manipulador tipo Scara el cual es el encargado del traslado de los viales. El sistema se diseñó con dos racks en los cuales se depositan los viales, uno para su llenado y otro de almacenamiento. El rack de llenado está montado en un sistema lineal el cual se encarga de su desplazamiento. Finalmente se consideró un sistema de llenado encargado de inyectar en los viales las sustancias requeridas en la preparación del radio fármaco.

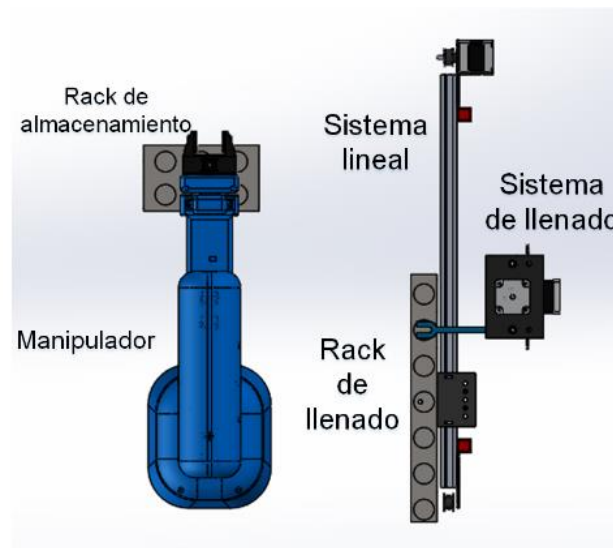


Figura 1.2. Propuesta del sistema mecatrónico.

La tarea por resolver se muestra en la secuencia de imágenes de la figura 1.3. Inicialmente los viales se encuentran en el rack de llenado. En la figura 1.3 a), se observa el manipulador en posición inicial mientras que el mecanismo inyector lleva a cabo el llenado de un vial. Una vez completada la carga de dicho vial, el sistema lineal se desplaza una posición, el manipulador entonces procede a ejecutar la trayectoria para tomar el vial que fue llenado (figura 1.3 b). Por último, el manipulador se desplaza al rack de almacenamiento para depositar el vial que fue llenado (figura 1.3 c).

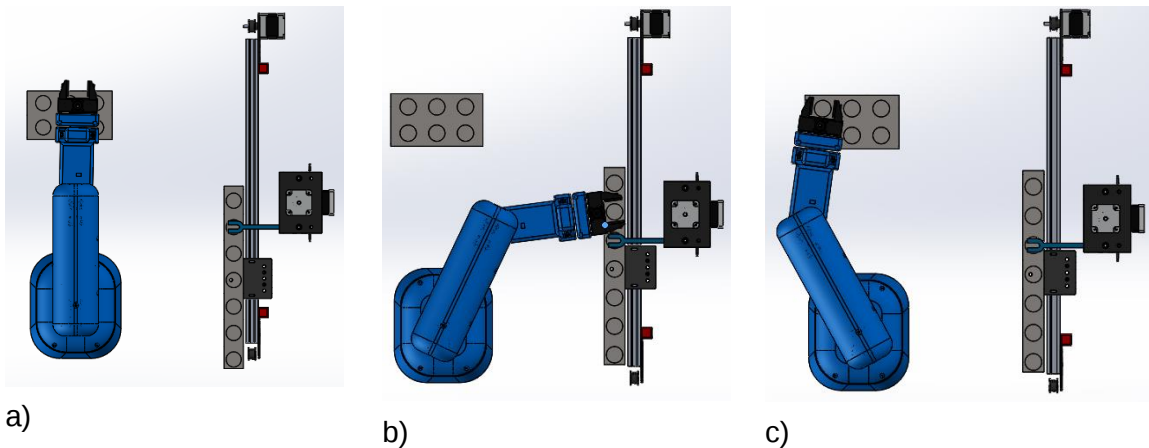


Figura 1.3. Representación gráfica del sistema propuesto. a) Posición para el llenado del primer vial, b) Posición para tomar el primer vial, c) Posición para depositar el primer vial.

Dentro de las consideraciones del proyecto, es importante remarcar que en la trayectoria que toma el manipulador para la extracción y colocación de cada vial, se debe evitar colisionar con otros objetos, lo que debe considerarse en el diseño del algoritmo de generación de la trayectoria del manipulador. Del mismo modo, el desplazamiento del sistema lineal debe ser preciso para el llenado de los viales, de no ser así, puede existir el riesgo de derramar algún tipo de sustancia contaminante. Por otro lado, el área de trabajo no tiene restricciones de espacio, por lo que la posición de los racks tanto para el llenado como para su carga se ubican a distancias adecuadas según el alcance del brazo utilizado.

1.4 Estructura del documento

El presente trabajo está dividido en 6 capítulos, los cuales describen detalladamente cada una de las etapas del proyecto.

El primer capítulo contiene los objetivos del documento, definiendo la problemática a solucionar y la solución propuesta.

En el capítulo 2 se presentan las bases teóricas utilizadas para el diseño y el control del sistema, enfatizando en métodos para la trayectoria del manipulador, así mismo se presentan los tipos de mecanismos desarrollados para el diseño del sistema y se describen también algunos conceptos utilizados para la electrónica.

En el capítulo 3 se analizan los elementos mecánicos como los actuadores que componen al manipulador tipo Scara y las conexiones eléctricas para el controlador. Se explica el sistema

lineal, desde el diseño del sistema y de los racks utilizados, hasta la electrónica para el control del sistema lineal, además del diseño para un sistema de llenado autónomo para viales.

El capítulo 4 describe los métodos utilizados para generar la trayectoria y la cinemática inversa del manipulador, esto para el desplazamiento de los viales de una posición inicial a una posición final.

El capítulo 5 muestra el sistema mecatrónico construido, mostrando los resultados de las pruebas realizadas, las cuales consistieron en ejecutar la tarea de trasladar viales con precisión. En este capítulo se anexa un diseño como mejora para el manipulador tipo Scara.

El capítulo 6 contiene las conclusiones de este trabajo y recomendaciones para mejorar el sistema.

Finalmente se muestran las referencias consultadas durante el desarrollo del proyecto.

Capítulo 2 Marco teórico

2.1 Historia de los robots manipuladores

Desde la antigüedad los humanos se han interesado por mecanismo o máquinas que imiten los movimientos de los humanos, lo cual se remonta a los griegos. Ellos tenían una palabra específica para denominar a estas máquinas: autómatas. De esta palabra deriva el actual autómatas: máquina que imita la figura y movimientos de un ser animado.

Con el pasar de los años estas máquinas fueron esparciéndose a través del mundo y cada civilización fue agregando mejoras a cada una de ellas o desarrollando nuevas máquinas.

Los mecanismos animados de Herón de Alejandría (85 D.C.) se movían a través de dispositivos hidráulicos, poleas y palancas y tenían fines eminentemente lúdicos (Barrientos, 2007).

Del mismo modo que las máquinas fueron innovándose, se comenzaron a crear nuevas palabras y definiciones para ciertos dispositivos, por lo cual se requirió una definición para estas nuevas máquinas.

Existen varias definiciones para describir a un robot, entre ellas la que proporciona una mejor descripción es la adoptada por el Robot Institute of America (RIA) la cual establece:

“Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas” (Reyes, 2011).

En la actualidad existe una gran aplicación de robots en la industria, es un área que ha crecido con gran velocidad, pero no es algo nuevo, ya que desde los inicios del siglo XIX se comenzó a utilizar.

Aunque el término robot se acuña en los años veinte del pasado siglo, la robótica industrial nace en los cincuenta y solo en los setenta comienzan a impartirse cursos de robótica en un gran número de universidades (Ollero, 2001) y es durante la segunda guerra mundial que se comenzó a investigar y desarrollar esta tecnología; esto es de remarcar, ya que son las bases de lo que conocemos hoy en día.

La automatización industrial con utilización de sistemas de control automático comienza también en el siglo XIX, pero no es hasta el siglo XX y muy especialmente después de la

segunda Guerra Mundial, cuando empieza a extenderse de forma importante en todos los sectores industriales (Ollero, 2001).

Un ejemplo de esto lo menciona Kumar: “*Joseph H. Engelberger ... Junto con George C. Devol, fundó la empresa UNIMATION Robotics Company en 1958, ... el primer robot de esta compañía fue instalado hasta 1961, en la compañía automotriz de General Motors en Nueva Jersey, Estados Unidos*” (Kumar, 2010).

Durante este periodo se realizaron diversos robots manipuladores que se nombran por los movimientos que son capaces de hacer, por ejemplo, robots cartesianos o esféricos y no es hasta los años ochenta que se desarrolló el concepto del hoy usado como robot Scara.

En 1982, el profesor Makino de la Universidad Yamanashi de Japón, desarrolla el concepto de robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), que busca un robot con un número reducido de grados de libertad (3 o 4), un costo limitado y una configuración orientada al ensamblado de piezas (Barrientos, 2007).

2.2 Posición y orientación en el plano

El problema frecuente es el estudio de los desplazamientos de robots en un plano, en este caso se utilizan dos coordenadas y un ángulo de orientación.

Se supone un sistema de coordenadas fijo al que se le asigna el sistema {A} (figura 2.1). La posición con respecto a este sistema se representa por el vector de posición ${}^A P$.

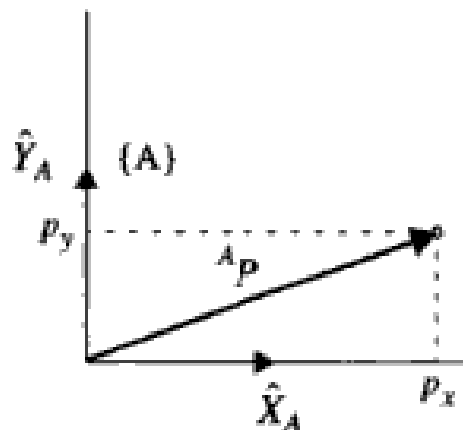


Figura 2.1. Posición y orientación del sistema {A} en el plano.

Se puede considerar también otro sistema de coordenadas con vectores unitarios $\hat{X}_B$ y $\hat{Y}_B$. La dirección del vector $\hat{Y}_B$ forma un ángulo θ con el vector $\hat{Y}_A$ (figura 2.2).

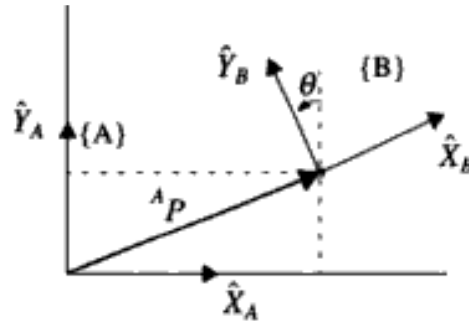


Figura 2.2. Posición y orientación del sistema $\{A\}^{\{B\}}$ en el plano.

2.3 Cinemática de los manipuladores

Es importante conocer las bases del movimiento de las articulaciones y cómo es que éstas se posicionan, con el fin de realizar una trayectoria que cumpla con los requerimientos.

La cinemática es la ciencia que trata el movimiento sin considerar las fuerzas que lo ocasionan (Craig, 2006). Dentro de la cinemática existen dos ramas para el posicionamiento del efector final del manipulador: cinemática directa y cinemática inversa.

2.3.1 Cinemática directa del manipulador

La cinemática directa es un método básico en los manipuladores, ya que permite calcular la posición del efector final en base a los ángulos dados por las articulaciones. Este es un problema muy básico en el estudio de la manipulación mecánica, que es el problema geométrico estático de calcular la posición y orientación del efector final del manipulador (Craig, 2006). Algunas de las aplicaciones de la cinemática directa es en robots, video juegos y animación.

2.3.2 Cinemática inversa del manipulador

El caso contrario a la cinemática directa, la cinemática inversa, trata el cálculo de los ángulos necesarios de las articulaciones del manipulador para que efector final se coloque en un punto específico. En este caso el problema se plantea de la siguiente manera: dada la posición y orientación del efector final del manipulador, se deben calcular todos los conjuntos posibles de

ángulos articulares que podrían utilizarse para obtener la posición y orientación deseadas (Craig, 2006).

Esta rama de la cinemática es utilizada en casi todos los robots manipuladores, por la aplicación que se le da, ya que las diversas tareas que son capaces de realizar se pueden ejecutar con el mismo algoritmo, ya que lo que se desea es que el efector final llegue a un punto específico.

2.3.2.1. Cinemática inversa método geométrico

Un método utilizado para la solución de la cinemática inversa es el geométrico, suele emplearse para las primeras articulaciones de un robot manipulador, ya que este método es sencillo por que se utilizan triángulos para su resolución. En la figura 2.3 se representa en un plano el manipulador de dos grados de libertad.

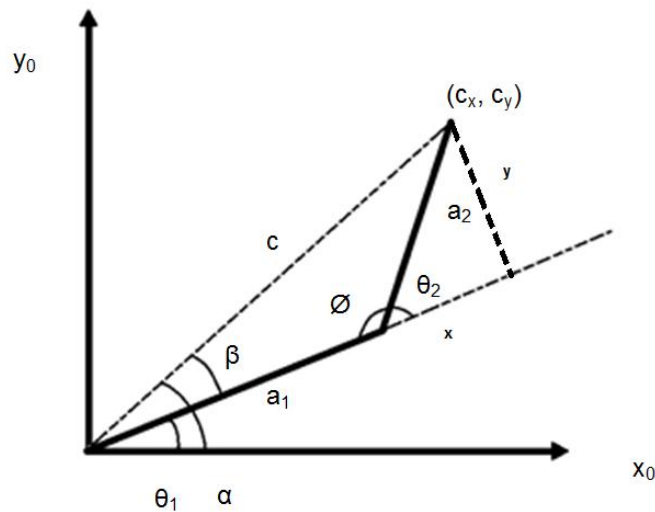


Figura 2.3. Representación de un manipulador de dos grados de libertad.

Se inicia con el teorema de coseno para obtener el valor de c .

$$c^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos \phi \quad 2.1$$

A partir del teorema de Pitágoras se obtiene:

$$c^2 = c_x^2 + c_y^2 \quad 2.2$$

Para obtener el valor del ángulo $\emptyset$ se dice:

$$\cos \emptyset = \cos(180^\circ - \theta) = \cos 180^\circ \cos \theta_2 + \sin 180^\circ \sin \theta_2 \quad 2.3$$

En donde el $\cos 180^\circ = -1$ y el $\sin 180^\circ = 0$ por lo cual se reduce a:

$$\cos \emptyset = -\cos \theta_2 \quad 2.4$$

Se sustituye la ecuación 2.2 y 2.4 en la ecuación 2.1:

$$c_x^2 + c_y^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2(-\cos \theta_2) \quad 2.5$$

Despejando $\cos \theta_2$, se obtiene:

$$\cos \theta_2 = \frac{c_x^2 + c_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \quad 2.6$$

Se obtiene el valor de $\sin \theta_2$ a partir de la identidad trigonométrica de seno:

$$\sin^2 \theta_2 + \cos^2 \theta_2 = 1 \quad 2.7$$

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2} \quad 2.8$$

Se obtiene el valor de θ_2 con la tangente del ángulo:

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}}{\cos \theta_2} \quad 2.9$$

Para obtener el valor del ángulo θ_1 , se basa de conocer α y β :

$$\tan \alpha = \frac{c_y}{c_x}; \quad \tan \beta = \frac{y}{a_1 + x} = \frac{a_2 \sin \theta_2}{a_1 + a_2 \cos \theta_2} \quad 2.10$$

Se obtiene la relación entre los ángulos:

$$\alpha = \theta_1 + \beta \quad 2.11$$

Se despeja θ_1 y se obtiene su valor:

$$\theta_1 = \alpha - \beta = \tan^{-1} \frac{c_y}{c_x} - \tan^{-1} \frac{a_2 \sin \theta_2}{a_1 + a_2 \cos \theta_2} \quad 2.12$$

2.4 Criterios de diseño

Para el diseño de robots manipuladores existen puntos importantes para tomar en cuenta, algunos de ellos son el tipo de tarea que realizará, la configuración del manipulador, el tipo de articulación, el tipo de transmisión, así como los actuadores a utilizar.

Cada uno de estos puntos están relacionados entre sí, ya que para saber qué tipo de actuador utilizar, primero se debe conocer qué tipo de articulación se aplicará y antes de esto, se requiere conocer la configuración del manipulador. Es por eso la importancia de realizar un buen análisis de lo que se va a diseñar para ahorrar tiempos y realizar un buen diseño.

2.4.1 Articulaciones

Una articulación es la unión de dos vínculos y será ésta la que defina el tipo de movimiento de dichos vínculos. Un manipulador puede considerarse como un conjunto de cuerpos conectados en una cadena mediante articulaciones. Estos cuerpos se llaman vínculos o segmentos (Craig, 2006). Existen seis articulaciones simples (figura 2.4) las cuales son: angular, prismática, cilíndrica, planar, de tornillo y esférica.

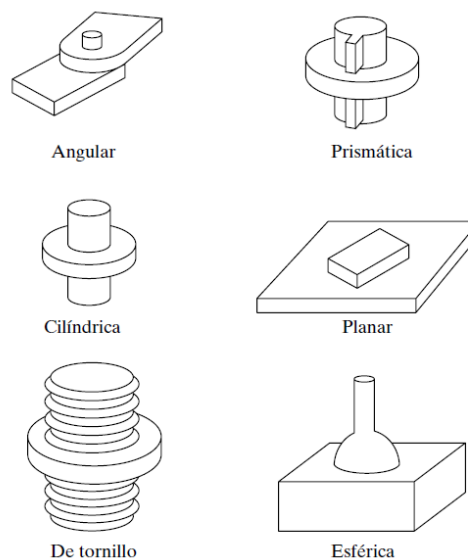


Figura 2.4. Articulaciones simples.

La mayoría de los manipuladores están integrados por articulaciones prismáticas y angulares, ya que se recomienda en el diseño mecánico articulaciones de un solo grado de libertad.

2.4.2 Configuraciones básicas

Las estructuras o configuraciones de los robots manipuladores son definidas por el número y el tipo de articulación. Cada una de las estructuras tienen diferentes características con respecto al movimiento, el volumen de trabajo, además del tipo de trabajo.

La estructura típica de un manipulador consiste en un brazo compuesto por elementos con articulaciones entre ellos. En el último enlace se coloca un órgano terminal o efector final tal como una pinza o un dispositivo especial para realizar operaciones (Ollero, 2001).

2.4.2.1 Configuración cartesiana

La configuración cartesiana es un robot el cual tiene tres articulaciones prismáticas, lo cual le permite mover su efector final en el espacio. El tipo de aplicación de esta configuración es para el transporte de cargas voluminosas (figura 2.5).

“La configuración tiene tres articulaciones prismáticas (3D o estructura PPP)” (Ollero, 2001).



Figura 2.5. Robot cartesiano.

2.4.2.2 Configuración polar

Esta configuración es definida por sus dos primeras articulaciones angulares y una articulación prismática final (RRP). El tipo de uso para este manipulador es soldadura por puntos, por gas, vaciado de metales, entre otros. (figura 2.6)

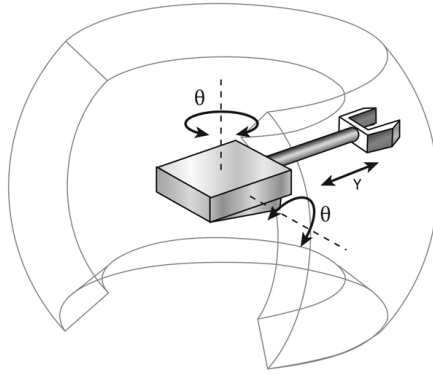


Figura 2.6. Manipulador polar.

2.4.2.3 Configuración Scara

La configuración Scara es similar a la polar, ya que ambas tienen dos articulaciones angulares y una prismática (RRP), la diferencia entre éstas configuraciones es el eje en el cual rota y se desplaza. El eje de la primera articulación angular del Scara es ortogonal al plano del origen, el eje de la segunda articulación es paralelo al anterior y la articulación prismática se desplaza verticalmente.

Ésta configuración está especialmente diseñada para realizar tareas de montaje en un plano. Está constituida por dos articulaciones de rotaciones con respecto a dos ejes paralelos, y una de desplazamiento en un sentido perpendicular al plano (Ollero, 2001) (figura 2.7).

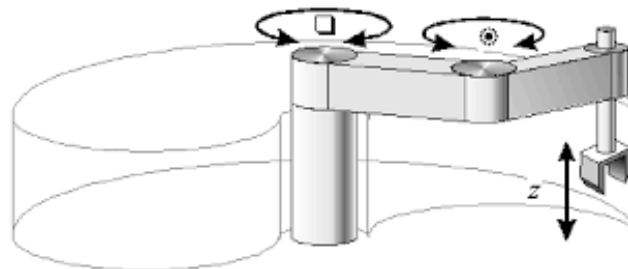


Figura 2.7. Manipulador Scara.

2.4.3 Efecto final

El efecto final es un mecanismo que es parte del manipulador y está colocado en el extremo final de éste. En la actualidad el efecto final puede ser alguna herramienta que el manipulador utiliza para realizar una tarea específica, por ejemplo, soldadura, pintura, corte. (figura 2.8)



Figura 2.8. Efecto final universal.

Ésta es la parte instalada en el extremo del manipulador. Es equivalente a la mano humana. Un efecto final podría ser una mano mecánica que manipula un objeto o que lo sostiene antes de que sea movido por el brazo del robot (Kumar, 2010).

El más común de efecto final es un gripper o pinza (figura 2.9), que es el que sostendrá un determinado objeto para poder transportarlo o colocarlo en una nueva posición.



Figura 2.9. Gripper (Pinza del robot).

2.4.4 Actuador

Un actuador es un dispositivo que transforma algún tipo de energía en movimiento, por ejemplo, un motor eléctrico es un actuador, ya que transforma la energía eléctrica en un movimiento rotacional. Los actuadores de un robot proporcionan el movimiento para el manipulador y para el efecto final. Pueden ser principalmente neumáticos, hidráulicos o eléctricos (Kumar, 2010).

Para el diseño de un robot manipulador se requiere considerar el tipo de articulación, el trabajo que realizará y el peso, entre otros, para decidir que tipo de actuador a utilizar. Hoy en día los

actuadores eléctricos son los más utilizados para robots manipuladores por la precisión y el control que se puede ejercer en ellos.

2.4.5 Mecanismos de transmisión

Los mecanismos de transmisión son elementos mecánicos que ayudan con la transmisión del movimiento, ya sea para mover alguna carga, transmitir el movimiento a otro punto o reducir las revoluciones de un motor. Como lo sugiere el término, estos elementos transmiten el movimiento de motores y de actuadores a los eslabones del manipulador (Kumar, 2010).

Entre los más comunes mecanismos de transmisión de movimiento se encuentra los engranes (figura 2.10a), correas dentadas (figura 2.10b) y tornillos sin fin (figura 2.10c). Este tipo de elementos son los más comunes y usados ya que son capaces de transmitir poder de transmisión eficientemente.

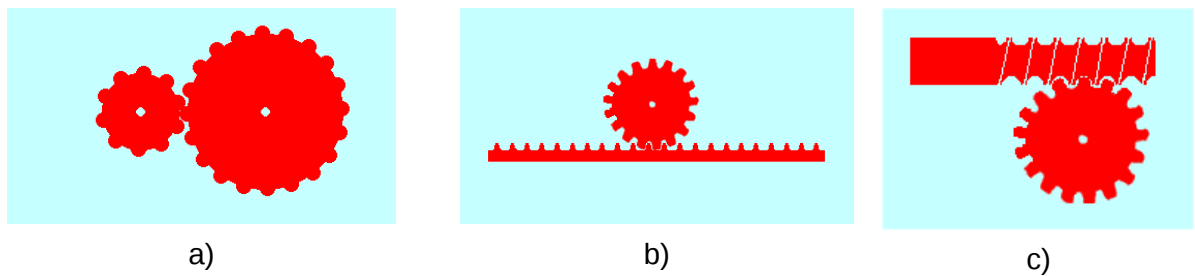


Figura 2.10. Tipos de transmisión: a) Engranes, b) Correa dentada, c) Tornillo sin fin.

Para poder transformar un movimiento rotacional a un movimiento lineal se puede utilizar una correa dentada, la relación de transmisión quedaría de la siguiente manera:

$$Dl = rev * \pi * d \quad 2.13$$

Donde:

DI: Desplazamiento lineal

rev: número de revoluciones

d: Diámetro del engrane

En el caso de querer conocer el número de revoluciones para cierto desplazamiento la ecuación quedaría de esta manera:

$$rev = \frac{Dl}{\pi * d}$$

2.14

2.5 Diseño asistido por computadora

El diseño asistido por computadora también es conocido por sus siglas en inglés CAD (computer-aided design), el cual es una herramienta de un amplio rango, ya que asiste a arquitectos, diseñadores e ingenieros. El CAD fue principalmente inventado por Pierre Bézier, el cual desarrolló las bases de CAD con su programa UNISURF en 1966.

Esta herramienta de diseño es capaz de permitirle al usuario manejar cierta información como el color, la definición geométrica y el material. En general la herramienta CAD está dividida en dos partes: dibujos en 2D y modelado en 3D. El dibujo en 2D está basado en crear figuras en un solo plano, con puntos, líneas y polígonos, mientras que en el modelado en 3D se añade la creación de sólidos, superficies y materiales.

2.5.1 SolidWorks®

Un software de CAD muy utilizado para la investigación y la industria es SolidWorks®, ya que es una herramienta de diseño completa y fácil de manejar.

SolidWorks® es un programa de diseño mecánico en 3D que utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft® Windows®, intuitivo y fácil de manejar. Su filosofía de trabajo permite plasmar sus ideas de forma rápida sin necesidad de realizar operaciones complejas y lentas (Gómez, 2008, pág.17).

Con este software de CAD se pueden realizar dibujos y planos en 2D, piezas en 3D y ensambles, además cuenta con otras herramientas con las cuales se pueden realizar estudios estáticos, dinámicos, de caudal, entre muchos otros, con lo cual se puede simular una pieza o ensamble en las condiciones en las cuales trabajará y con esto saber cómo será su comportamiento.

2.5.2 AutoCAD®

Es un software de diseño utilizado para dibujos 2D y modelado 3D, este software es desarrollado por la empresa Autodesk. Hace su primera aparición en 1982, veinte años después que Solidworks®. Este software se enfoca en dibujos 2D, ya que tiene diversas herramientas sin embargo para el modelado en 3D no cuenta con ciertas opciones que ofrecen otros paquetes de diseño.

2.6 Definición de trayectoria

La razón por la cual se construyen robots manipuladores es para realizar una tarea o una rutina repetitiva o de alta precisión como para ser realizada por un humano. El tipo de tarea puede ser seleccionar, separar, transportar, acomodar, entre muchas otras, por lo cual es una gran responsabilidad para el programador, ya que depende de él, el buen trabajo del manipulador.

En la actualidad los robots manipuladores cuentan con su propia CPU, con diversas opciones de movimiento y posicionamiento, es capaz de guardar posiciones numéricamente para facilitar la tarea de programación de rutina, así como también, cuenta con el algoritmo para crear curvas dentro de la trayectoria para evitar algún objeto fijo.

2.6.1 Curvas de Bézier

Se denominan curvas de Bézier a un sistema que se desarrolló hacia los años 60's para el trazado de dibujos técnicos, en el diseño aeronáutico y en el de automóviles. Su denominación es en honor a Pierre Bézier, quien ideó un método de descripción matemática de las curvas que se comenzó a utilizar con éxito en los programas de CAD.

La idea de definir geométricamente las formas no es demasiado compleja: un punto del plano puede definirse por coordenadas. Por ejemplo, un punto A tiene unas coordenadas (x_1, y_1) y a un punto B le corresponde (x_2, y_2) . Para trazar una recta entre ambos basta con conocer su posición. Si en lugar de unir dos puntos con una recta se unen con una curva, surgen los elementos esenciales de una curva Bézier; los puntos se denominan puntos de anclaje o nodos. La forma de la curva se define por unos puntos invisibles en el dibujo denominados puntos de control, manejadores o manecillas.

2.6.1.1 Curvas lineales de Bézier

Dados los puntos P_0 y P_1 , una curva lineal de Bézier es una línea entre los dos puntos. La curva viene dada por la expresión:

$$B(t) = P_0 + (P_1 - P_0)t = (1 - t)P_0 + tP_1, \quad t \in [0,1] \quad 2.15$$

2.6.1.2 Curvas cúbicas de Bézier

Los cuatro puntos del plano P_0 , P_1 , P_2 y P_3 , definen una curva cúbica de Bézier. La curva comienza en el punto P_0 y se dirige hacia P_1 y llega P_3 viniendo de la dirección del punto P_2 . Usualmente no pasa ni por P_1 ni por P_2 . Estos puntos solo están ahí para proporcionar

información direccional. La distancia entre P_0 y P_1 determina “que longitud” tiene la curva cuando se mueve hacia la dirección de P_2 antes de dirigirse hacia P_3 .

$$B(t) = P_0(1 - t)^3 + 3P_1t(1 - t)^2 + 3P_2t^2(1 - t) + P_3t^3, \quad t \in [0,1] \quad 2.16$$

2.7 Modulación por ancho de pulso

Modulación por ancho de pulso o PWM (pulse-width modulation) de una señal es una técnica utilizada para modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica cuadrada. En la figura 2.11 se puede apreciar en la primera señal lo que es el periodo, en la segunda señal se observa que el ciclo de trabajo es de 25%, en la tercera señal se observa que el tiempo positivo es igual al periodo, ya que el ciclo de trabajo es del 100%. Para el estudio de una señal como ésta se pueden definir varios parámetros:

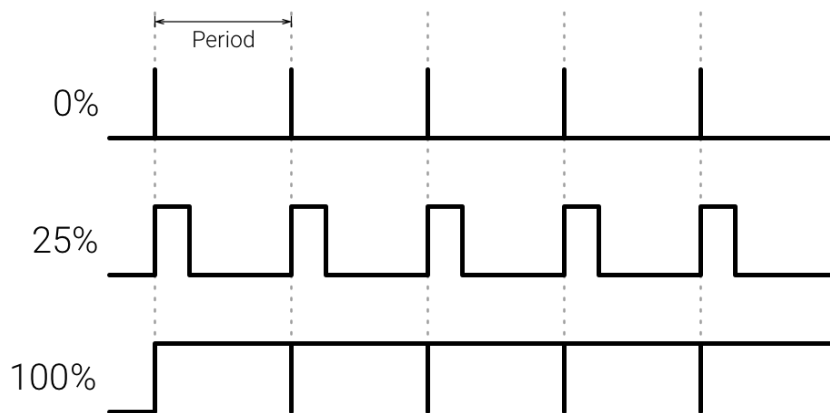


Figura 2.11. Señales cuadradas.

Frecuencia: número de ciclos por unidad de tiempo.

Periodo: tiempo necesario para que una señal se repita.

Ciclo de trabajo: Relación entre la duración del pulso y el periodo de una señal cuadrada.

Tiempo positivo: Duración donde la función está en nivel alto.

2.7.1 Modulación por Ancho de Pulso en la Raspberry Pi B+

La tarjeta de desarrollo Raspberry es capaz de enviar pulsos, ya que se puede trabajar el PWM en ciertas terminales. La frecuencia máxima con la cual puede trabajar es de 2KHz, que son 2000 pulsos por segundo.

Para activar las terminales para pwm se declara una variable durante la programación. La sintaxis para el empleo de esta función en el lenguaje de programación Python es:

$$X = GPIO.PWM(pin, Hz)$$

donde:

X: Es el nombre de la variable que tendrá la terminal

GPIO.PWM: Indica que será una terminal de salida para ancho de pulso

Pin: Es el número de la terminal de la Raspberry Pi B+

Hz: La frecuencia con la cual se trabajará la señal de pwm.

Una vez declarada la variable, para utilizarla se deberá activar con el ciclo de trabajo deseado *dc*:

$$X.start(dc)$$

Capítulo 3 Desarrollo del Sistema Mecatrónico

3.1 Introducción

La primera etapa del proyecto, consistió en el diseño y construcción del sistema mecatrónico, el cual inició con el desarrollo del manipulador tipo Scara, que se encargaría de sujetar, trasladar y colocar los viales entre racks.

La segunda etapa consistió en la parte eléctrica y electrónica del sistema. Ya que cada actuador del sistema tiene diferentes características, se analizó el control de los componentes para así seleccionar un microcontrolador capaz de integrarlos. Posteriormente se seleccionaron las fuentes de alimentación para cada uno de los elementos.

Para el diseño de los racks se contempló que cada uno tendría un propósito específico, el primero sería para el llenado de viales, el cual requería un sistema mecánico que lo desplazara linealmente para que el manipulador tomará los viales consecutivamente y el segundo rack, sería solo de almacenamiento por lo cual se diseñó estático.

Por último, se realizó el diseño del sistema para el llenado de viales.

3.2 Análisis de requerimientos para el diseño del sistema

El trabajo inicial del proyecto consistió en el análisis de la problemática para determinar los requerimientos del sistema y así definir la configuración del manipulador a construir. Este análisis consistió en revisar factores como el área de trabajo (dimensiones de espacios, áreas libres de obstáculos, trayectoria), características del ambiente de trabajo (humedad, temperatura), tipo de tarea a realizar (tipos de desplazamientos, tiempos de ejecución, precisión), tipos de objetos (materiales, dimensiones, formas, peso), determinantes para definir el tipo de robot para la tarea en específico del presente proyecto.

Como primera característica, se observó que los movimientos del manipulador requerían ser en un área plana, ya que no se necesitaba ninguna acción de rotación o inclinación del brazo durante la ejecución de la tarea, los movimientos necesarios se dan en un solo plano; el objeto transportado es llevado a una cierta posición en la cual el actuador sube y baja para tomar o depositar los objetos transportados.

Considerando esto, se determinó que el manipulador no requería muchos grados de libertad, (Graig, 2006) menciona que: “El número de grados de libertad en un manipulador debe

concordar con el número requerido para la tarea. No todas las tareas requieren de seis grados de libertad.” (p. 231)

Analizando las diferentes configuraciones de manipuladores que existen (Anibal, 2001, p.18), se seleccionó el tipo Scara (figura 3.1), ya que, por sus dos primeras articulaciones angulares y su última articulación prismática para mover el actuador final, permite tener una manipulación de objetos con rapidez y con precisión.



Figura3.1 Manipulador tipo Scara

Por otro lado, este tipo de robot es recomendable para trabajos en el plano; “Por ejemplo, un manipulador SCARA puede moverse a una velocidad de hasta 30 pies por segundo, casi 10 veces más rápido que la mayoría de los robots industriales articulados. Esta configuración se adapta mejor a las tareas en entornos planos.” (Craig, 2006, p.235). Con esto se cubrió completamente las necesidades para realizar este tipo de tareas, ya que simplifica el diseño del manipulador reduciendo costos en cuanto a cantidad de materiales y componentes del sistema.

Otro aspecto importante de análisis es el espacio donde se realizan las tareas. El tamaño de áreas libres para el desplazamiento del robot debe tenerse en cuenta para determinar las dimensiones de este. Para ello, se realizó una representación gráfica del área de trabajo, simulando los espacios y las distancias a las cuales se requería tener alcance. Como se puede ver en la figura 3.2 el robot manipulador está ubicado en las coordenadas (0,0), el círculo interno y el círculo externo son los límites de alcance del robot, los dos objetos rectangulares son racks para depositar los objetos cilíndricos utilizados en la tarea. El robot ejecutará trayectorias de un rack a otro y viceversa, trasladando los objetos.

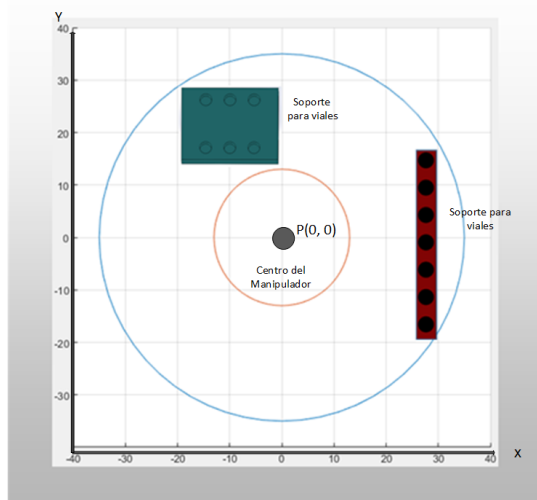


Figura 3.2 Representación gráfica del área de trabajo del manipulador

Observando el área, se determinó que el manipulador requería ser pequeño para entrar en los espacios donde se realizan las actividades.

Considerando el tipo de elementos a manipular, en este caso viales, se concluyó que el manipulador debería ser ligero, ya que no cargaría grandes masas, del mismo modo los actuadores no requerían gran potencia para ejecutar los movimientos de las articulaciones.

Para el agarre de los viales, se consideró que el material del gripper fuera capaz de sujetarlos, ya que estos están hechos de vidrio, lo que podría ocasionar que el objeto resbalara de la pinza con el riesgo de derramar la sustancia radiactiva.

Con el anterior análisis se cubrieron completamente los requerimientos del sistema para la realización de la tarea, ya que simplifica el diseño del manipulador reduciendo costos en cuanto a cantidad de materiales y componentes del sistema.

Finalmente, se consideró que la seguridad en un ambiente de este tipo de trabajo es muy importante y exige que el manipulador sea confiable para su operación, por lo tanto, debe ser preciso, con bajas vibraciones, con un buen sistema de control y resistente.

3.3 Desarrollo del manipulador tipo Scara

En este capítulo se presentan los pasos que se siguieron durante el diseño del manipulador tipo Scara, partiendo de las bases de articulaciones básicas (angulares, prismáticas), hasta análisis estáticos del manipulador. Se observa la construcción, así como planos del área de trabajo del manipulador.

3.3.1 Mecanismos del manipulador

Con el fin de tener una idea clara de lo que se trabajó, se presenta en la figura 3.3 un esquema del modelo del manipulador. En este esquema se define el marco de coordenadas cartesiano cuyo origen se establece en el punto de intersección del eje de rotación del hombro (vínculo 0 y vínculo 1) con el plano horizontal XY. Así mismo, se indica la ubicación de cada actuador que daría el movimiento a cada una de las articulaciones.

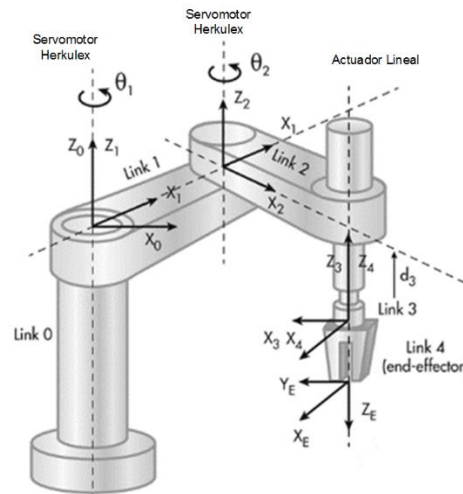


Figura 3.3 Esquema del robot manipulador a diseñar

Una vez teniendo en cuenta los tipos de articulaciones que se usarían, se comenzó con la investigación de mecanismos que cumplieran con las necesidades del manipulador.

Por lo anterior, para la articulación prismática se utilizó un actuador lineal Actuonix con un “stroke” de 50mm y una precisión de 0.3mm (ver figura 3.4), el cual cumple con los requerimientos del sistema y ofrece una mejor relación costo/precisión.



Figura 3.4 Actuador lineal Actuonix

Para las articulaciones angulares del manipulador inicialmente se consideró utilizar motores a pasos, ya que ciertos modelos cuentan con un ángulo de paso de 0.7° , sin embargo, estos aumentarían los costos, el peso del manipulador y los materiales de construcción, por lo que se descartaron.

Finalmente se determinó utilizar servo motores Smart llamados Herkulex, los cuales se pueden ver en la figura 3.5. Estos servos, tienen características específicas a diferencia de los servomotores comunes, algunas de estas son: la precisión de giro ya que son capaces de girar 0.3° , lo cual ofrece precisión además de repetitividad; control PID y comunicación a través del puerto serial.



Figura 3.5 Servo motor Herkulex

Una vez seleccionados los actuadores a utilizar para cada articulación, se continuó con el análisis de la transmisión del torque de los actuadores hacia cada vínculo.

“La elección más simple para la ubicación del actuador es en la articulación que controla o cerca de ella. Si el actuador puede producir suficiente momento de torsión o fuerza, su salida puede unirse directamente a la articulación. Este arreglo, conocido como configuración de control directo, ofrece las ventajas de simplicidad en el diseño y capacidad de control superior; esto es, sin elemento de transmisión o de reducción entre el actuador y la articulación, los movimientos de la articulación pueden controlarse con la misma fidelidad que el mismo actuador” (Craig, 2006, p.244).

Con esto se estableció que la transmisión del torque podía ser simple, ya que el sistema así lo permite, por el tipo de trabajo, por los actuadores a ocupar y el peso del manipulador.

3.3.2 Diseño CAD y análisis de la resistencia y la flexibilidad

Definidos los mecanismos a emplear se procedió a realizar el diseño del brazo. La definición de los mecanismos fue necesaria para esta etapa ya que sus características como peso y tamaño tenían que ser consideradas.

Como herramienta para el diseño se utilizó el software SolidWorks®, ya que la interfaz que maneja es amigable con el usuario, contiene diversas librerías de materiales y herramientas, y así mismo se pueden realizar diversos tipos de estudio en los diseños.

Se inició con un primer diseño modelando las piezas y realizando un montaje virtual de las mismas para hacer las correcciones y modificaciones necesarias hasta lograr el resultado satisfactorio.

En la figura 3.6, del inciso a) al d), se muestra la vista isométrica del modelado de cada una de las piezas del primer prototipo.

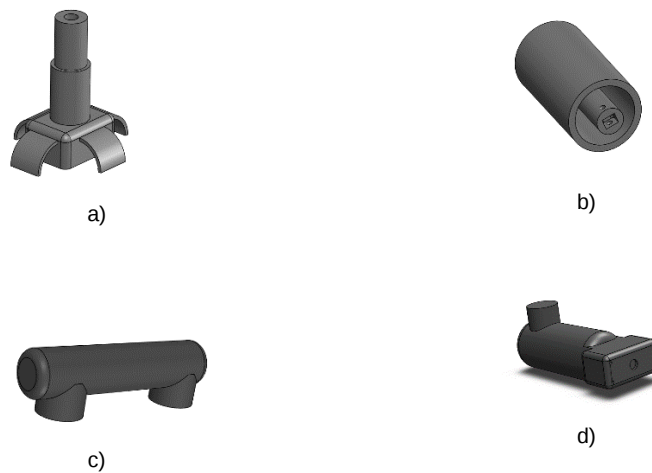


Figura 3.6 Piezas del primer diseño del manipulador a) base, (b) vínculo 0, c) vínculo 1, d) vínculo 2

El actuador final o gripper y el ensamble del servomotor utilizados fueron tomados de los modelos de CAD existentes (ver figuras 3.7 y 3.8).

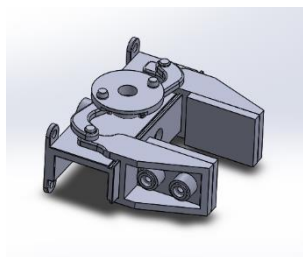


Figura 3.7 Ensamble del gripper

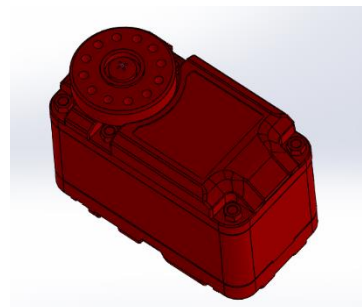


Figura 3.8 Ensamble del servo motor
Herkulex

El ensamble final de las piezas se muestra en la figura 3.9, el cual constituye el primer manipulador diseñado. Se realizaron pruebas con dos diferentes tipos de posición de las articulaciones, respetando las que son consideradas dentro del robot tipo Scara.

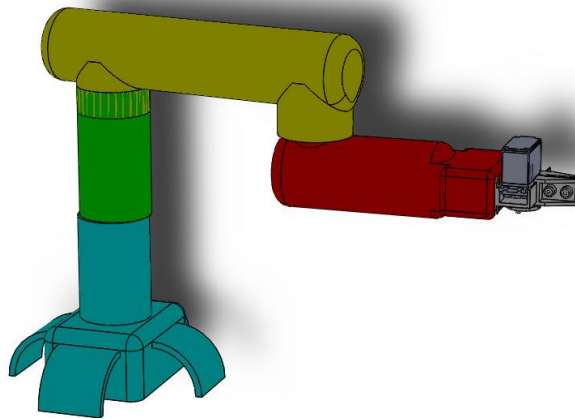


Figura 3.9 Ensamble del primer diseño

SolidWorks® contiene diversas herramientas para el diseño de piezas, ensambles y dibujos, una de estas herramientas es el estudio estático. Esta herramienta consiste en una simulación de las fuerzas que actúan sobre el diseño y como este se ve afectado, uno de los resultados de este tipo de simulación es la deformación de la pieza.

Dentro del estudio estático se puede seleccionar el material del diseño y simular alguna fuerza externa, para este diseño se realizó con PET (politereftalato de etileno) que es lo más parecido al material que se pretendía utilizar. Se simuló una masa que sería de los actuadores y del objeto que se pretendía manipular.

Durante la realización del estudio estático se concluyeron dos cosas importantes del diseño y la configuración, se observó en los resultados que el diseño no era adecuado ya que por el peso del material y de los componentes podría haber una deformación del manipulador, además por la configuración, se aumentaba la deformación.

En este primer diseño, al actuador lineal se le consideró dentro del vínculo cero y el gripper unido al vínculo dos. Se ubicaron de esta manera pensando en reducir la masa que cargaría el manipulador en su extremo.

En la figura 3.10 se muestra el estudio estático en el cual se simuló contraído el actuador lineal que se encuentra dentro del vínculo cero. En la figura 3.11 se aprecia el mismo estudio con el actuador lineal extendido.

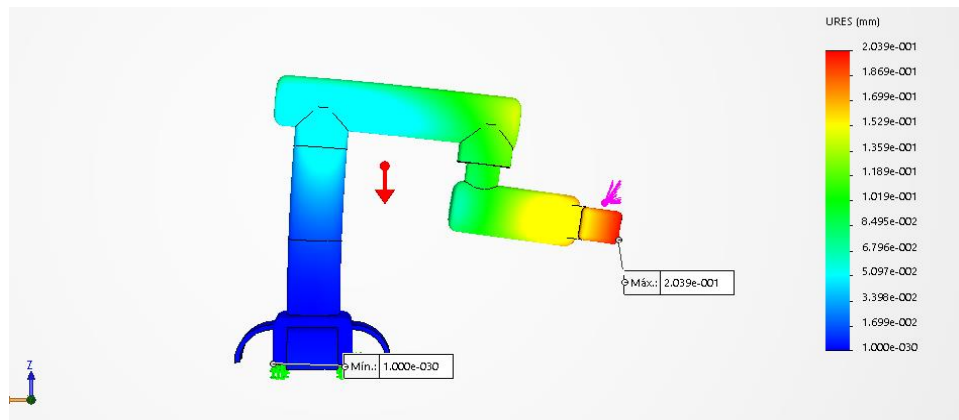


Figura 3.10 Resultado del estudio estático con el actuador lineal contraído

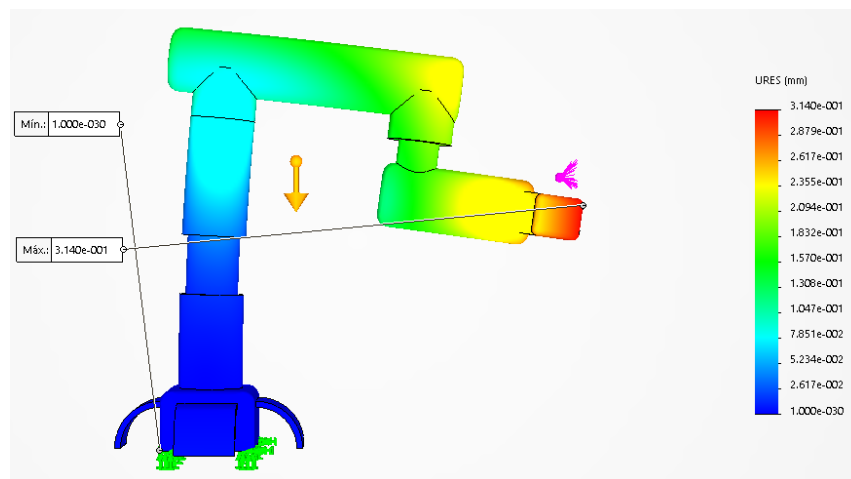


Figura 3.11 Resultado del estudio estático con el actuador lineal extendido

El estudio estático con el sistema lineal extendido muestra que existiría un desplazamiento de 0.314mm en el extremo del manipulador, por lo que se planteó un nuevo diseño.

En el segundo diseño, se realizaron modificaciones en el vínculo dos para ensamblar el soporte del gripper, así como también el soporte del actuador lineal.

Las vistas isométricas de las nuevas piezas se muestran en la figura 3.12.

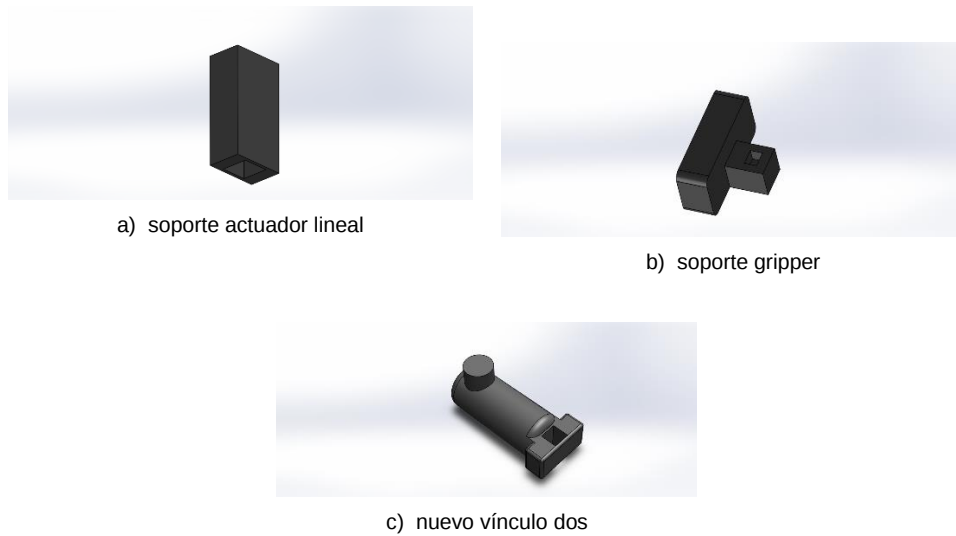


Figura 3.12 Piezas necesarias para el segundo diseño

En la figura 3.13 se muestra el estudio que se realizó con el actuador lineal en el extremo del manipulador (segundo diseño), en donde se aprecia que sigue existiendo un desplazamiento, sin embargo, es menor que con el actuador dentro del vínculo cero, por lo cual se optó por dejar el actuador lineal en el extremo y modificar el diseño para disminuir el desplazamiento por deformación del material.

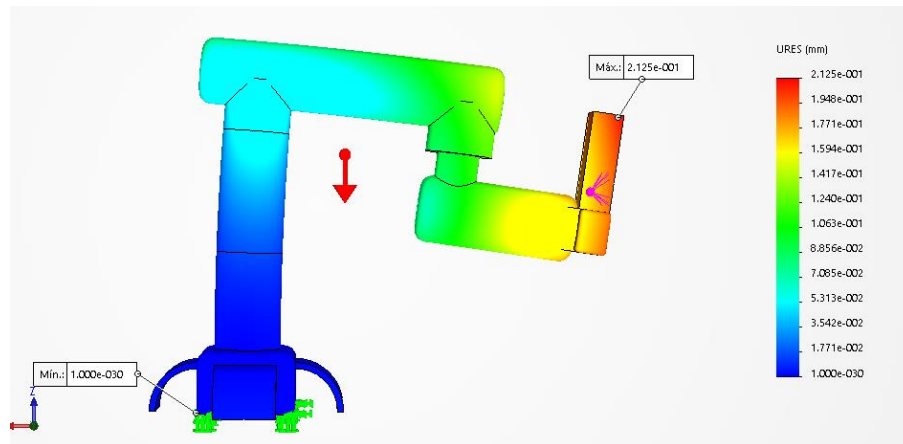


Figura 3.13 Resultado del estudio estático con el actuador lineal en el extremo final

Tomando en cuenta los resultados mostrados anteriormente se planteó un nuevo diseño para disminuir el desplazamiento por deformación del material.

Para este diseño se tomó como referencia el primer estudio estático donde se observó que existía una deformación entre el vínculo cero y el vínculo uno, por lo cual se diseñó más estrecho, además de extender la base para un mejor soporte y reducir vibraciones.

Las piezas del nuevo diseño se muestran en la figura 3.14 del inciso a) al f). El modelado de las piezas se muestra en el anexo C y el montaje del brazo se aprecia en la figura 3.15.



Figura 3.14 Piezas modificadas para el tercer diseño

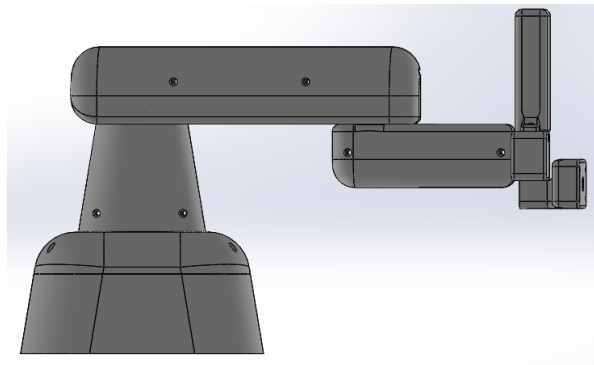


Figura 3.15 Tercer prototipo

Se llevó a cabo el estudio estático del tercer manipulador y se encontró que la colocación de un servomotor no fue adecuada, ya que la deformación que existía era mayor (ver figura 3.16).

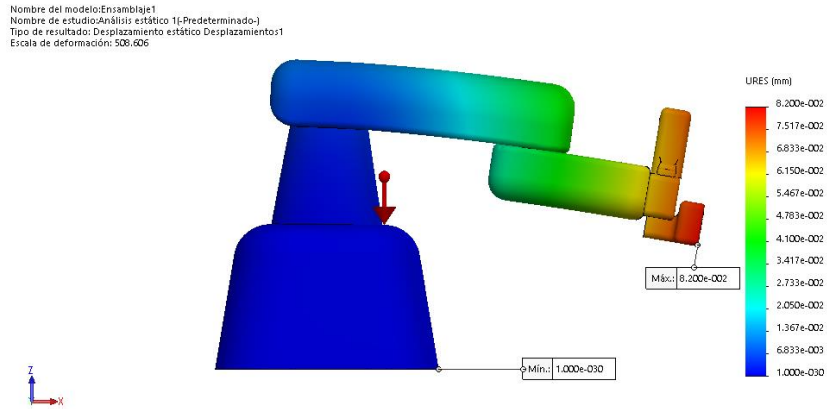
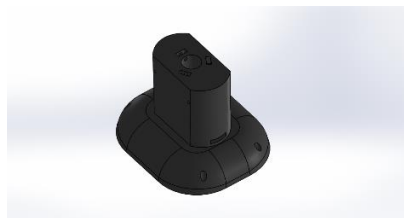
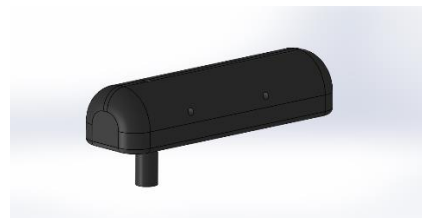


Figura 3.16 Estudio estático del tercer diseño

Para el cuarto diseño, se cambió la posición del servo motor del vínculo uno al vínculo cero. Para esto se realizaron cambios en el diseño de ambos vínculos. El vínculo cero se diseñó con mayor anchura para albergar el servomotor y a su vez reducir el desplazamiento en el extremo del manipulador. Por el contrario, en el vínculo uno se eliminó el espacio que albergaba al servomotor y se agregó un eje para transmitir el torque del servomotor que se ubicaría en el vínculo cero. La figura 3.17 muestra el modelado de las piezas modificadas.



a) Vínculo cero



b) Vínculo uno

Figura 3.17 Piezas nuevas del cuarto y último diseño del manipulador

En la figura 3.18 se aprecia el modelado final del manipulador del cuarto diseño. Este es el diseño a partir del cual se llevó a cabo la construcción física del mismo.

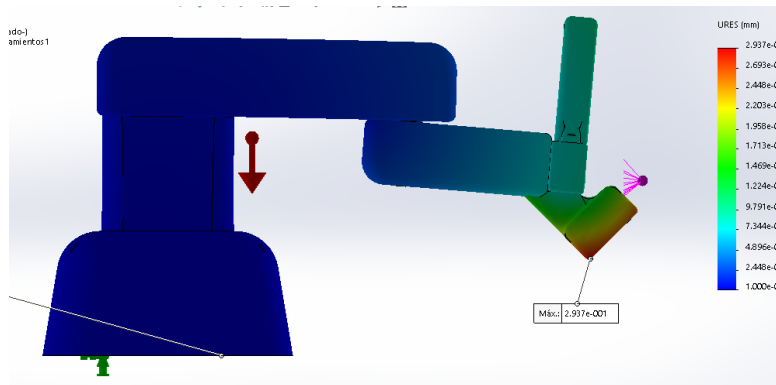


Figura 3.18 Estudio del ultimo diseño con el servo motor en el vínculo cero

Como se mencionó anteriormente, el tipo de transmisión preferente es la directa, por lo que los servomotores estarían directamente en la articulación. En la figura 3.19, se puede observar que el vínculo tiene una pieza circular en la cual se fija el engrane del servo motor con ayuda de unos opresores, esto permitió al servomotor realizar el movimiento de la articulación transmitiendo el movimiento al vínculo.

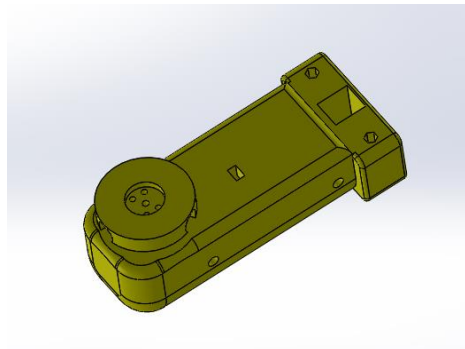


Figura 3.19 Imagen del vínculo dos mostrando las circunferencias para sujetar el engrane del servomotor

Una vez modificando el diseño, se procedió a determinar el volumen de trabajo del manipulador con ayuda de SolidWorks®. Se realizaron los respectivos dibujos para poder visualizar el volumen de trabajo, en la figura 3.20 se puede ver una vista lateral y en la figura 3.21 una vista superior.

Primero se establecieron relaciones de posiciones angulares para las articulaciones del manipulador, estableciendo como límites los ángulos que pueden dar los servomotores, lo recomendado son 300° de giro.

Durante la realización de este trabajo de diseño, se observó que el actuador prismático estando extendido tenía la posibilidad de colisionar con la base, por lo cual se ajustaron los límites de giro del segundo servomotor a un giro máximo de 272°.

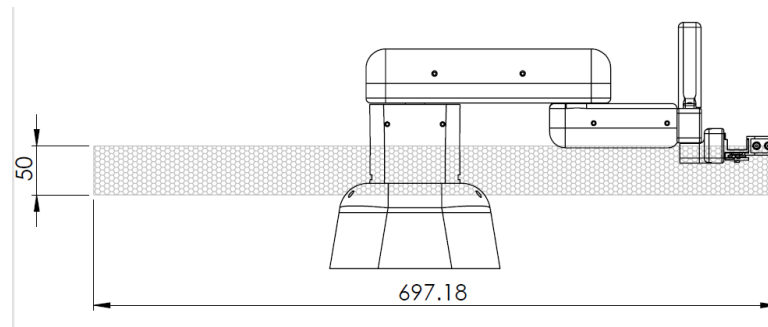


Figura 3.20 Vista Lateral del Volumen de Trabajo

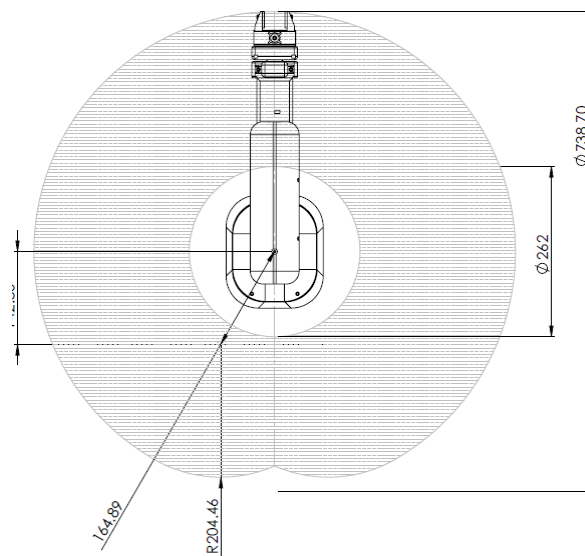


Figura 3.21 Vista Superior del Volumen de Trabajo

3.3.3 Construcción del manipulador

Para la construcción del robot se determinó que las piezas fueran hechas en una impresora 3D, este tipo de impresión ofrece diversos materiales, como por ejemplo, el PLA, PET, policarbonato, hibs.

Se revisaron las ventajas y desventajas de estos materiales y se eligió el policarbonato por su resistencia mecánica, ligereza y fácil manejo.

Una vez elaboradas las piezas y antes de su montaje, se procedió a rebajar con una lima los excesos de material que las piezas impresas presentaban con el fin de lograr un ensamblado adecuado.

Por ejemplo, en la figura 3.22 se observó que al unir las piezas para el ensamble existía una diferencia por el exceso del material, por lo cual se procedió a corregirlo, para así evitar alguna ruptura o imprecisión en el movimiento del manipulador.

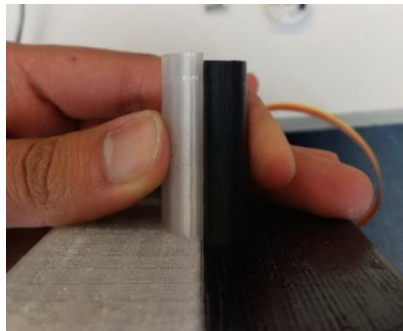


Figura 3.22 Deformación en las piezas

Las figuras de la 3.23 a la 3.26 muestran el proceso de ensamblaje del brazo robótico diseñado.

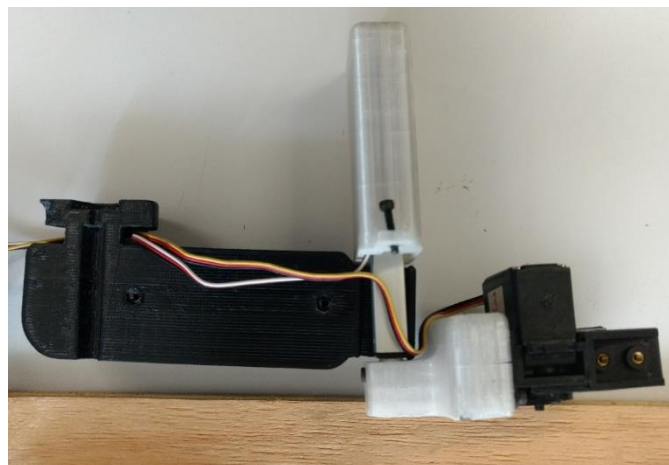


Figura 3.23 Parte del ensamble gripper, actuador lineal y el vínculo dos



Figura 3.24 Ensamble vínculo uno y vínculo dos

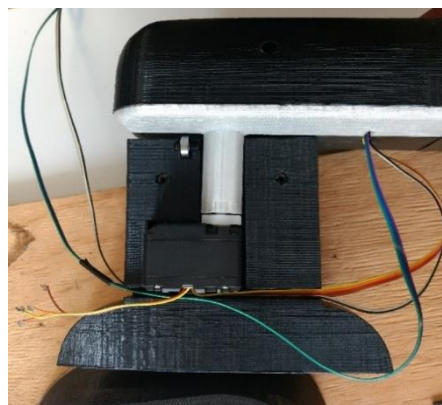
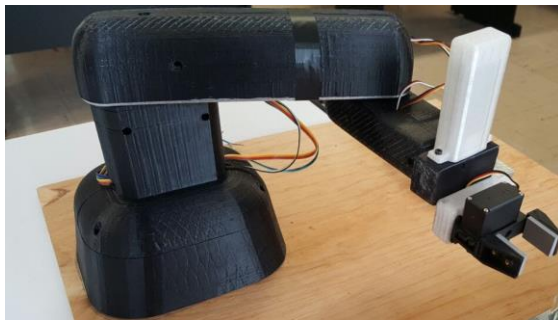


Figura 3.25 Ensamble vínculo cero y vínculo uno



Figura 3.26 Ensamble vínculo cero con la base

La figura 3.27 muestra el resultado final del manipulador real ensamblado completamente con los actuadores y el cableado, lo cual demuestra que el diseño virtual del robot fue el adecuado.



a) Vista frontal



b) Vista superior

Figura 3.27 Ensamble final del manipulador

3.3.4 Características geométricas

La figura 3.28 muestra el diseño final del manipulador virtual después de realizar los ajustes de cuatro propuestas en base a los estudios estáticos que arrojaban las herramientas de SolidWorks®.

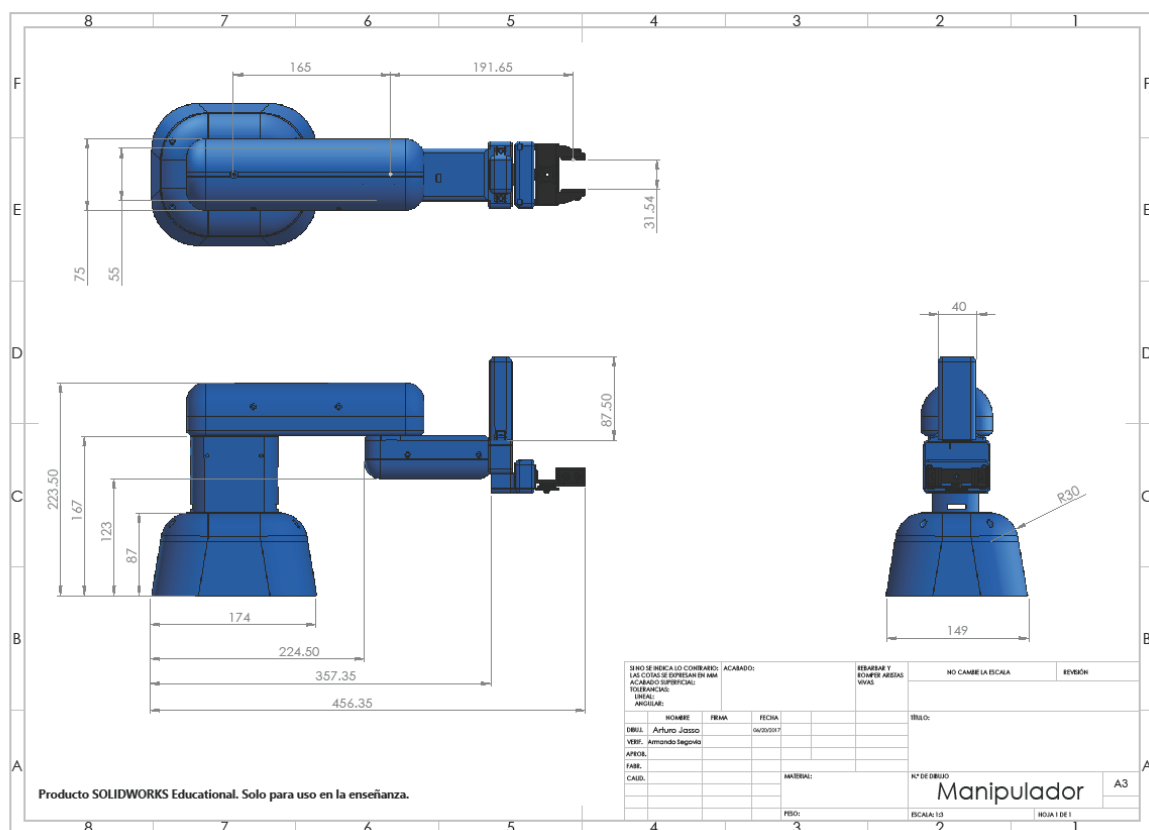


Figura 3.28 Dibujo en SolidWorks® del ensamblaje del manipulador final

Concluida la construcción del robot se realizó un análisis de las características del brazo, estas características se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Características básicas del robot

Articulación	1	2	3
Amplitud	300°	272°	50 mm
Rango de trabajo	±150°	±136°	0 a 50 mm
Velocidad nominal	60°/0.166s	60°/0.166s	32mm/s
Resolución	0.326°	0.326°	0.3mm

Así mismo, considerando las medidas de las articulaciones que se pueden ver en la figura 3.28 y la asignación de ejes, se procedió a llenar la tabla de parámetros Denavit-Hartenberg del robot, los cuales se presentan en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros de Denavit Hartenberg para manipulador Scara

Articulación	θ (°)	d (mm)	a (mm)	α (°)
1	q_1	167	0	0
2	q_2	-45	165	0
3	0	d_3	191.65	π

Los parámetros de Denavit-Hartenberg se pueden definir como: “... un procedimiento para obtener una mínima representación de la orientación y traslación de robots manipuladores. La convención Denavit-Hartenberg es una herramienta útil para deducir las ecuaciones de cinemática directa de robots manipuladores. Consiste en determinar una tabla de parámetros relacionados con los eslabones del robot.” (Reyes C. F., 2011, pág. 211)

3.3.5 Modelo eléctrico y electrónico del sistema

La razón por la que fue construido un manipulador tipo Scara fué que el desplazamiento de los viales es realizado en un plano, por lo que las dos articulaciones angulares del manipulador son suficientes para realizar dicha acción, la articulación prismática y el efector final en conjunto son los encargados de tomar y colocar los viales en sus posiciones.

Cada una de estas articulaciones requieren actuadores que generen el movimiento, por lo que cuentan con características específicas para su control, por lo cual fue necesario implementar un controlador electrónico capaz de integrarlos para otorgarle movimiento al manipulador.

3.3.5.1 Controlador electrónico del sistema

Como controlador del sistema mecatrónico se eligió una Raspberry Pi B+ (figura 3.29) por su capacidad de memoria y procesamiento. Este controlador cuenta con terminales de salida y entrada (GPIO) de señales digitales, analógicas y con un puerto para comunicación serial, lo cual es de gran beneficio para el control de los actuadores.

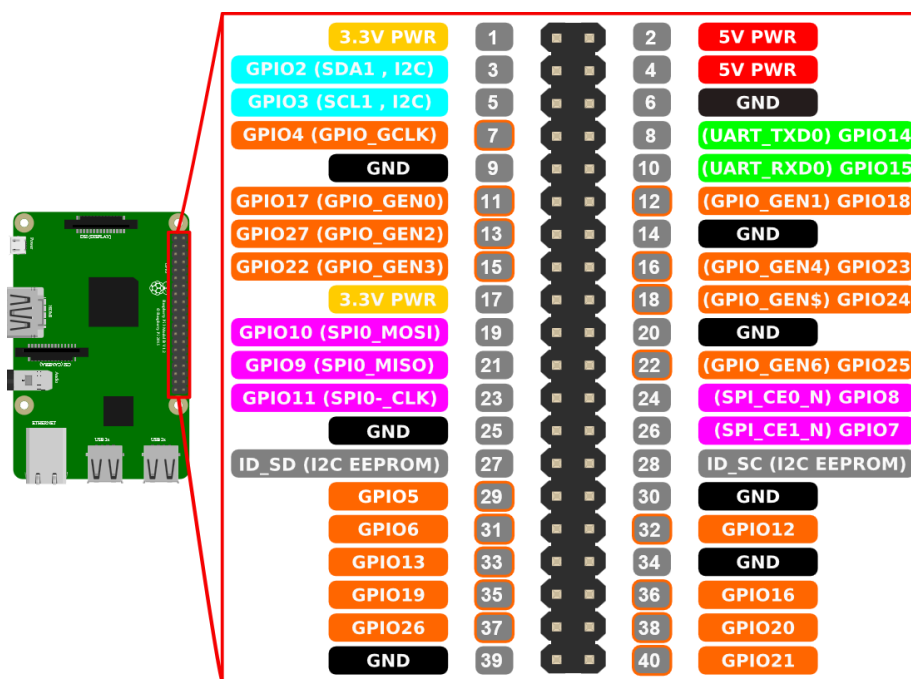


Figura 3.29 GPIO de la Raspberry Pi B+.

La Raspberry Pi B+ cuenta con su propio interfaz, para lo cual debe conectarse a un monitor a través de una conexión HDMI, la programación de los GPIO es en el lenguaje Python, para lo cual se instalan librerías específicas para su programación.

3.3.5.2 Movimiento de Articulaciones

Un robot manipulador puede estar compuesto por diversos tipos de articulaciones, como pueden ser angulares, prismáticas y esféricas. Para el caso del manipulador tipo Scara, sus dos primeras articulaciones son angulares y cuenta con una tercera articulación prismática, además de un efector final.

Por esa razón, el manipulador debe estar compuesto por algún mecanismo, o en este caso, por actuadores que ejecuten los movimientos para dichas articulaciones.

Los actuadores utilizados para las articulaciones angulares fueron servomotores Smart llamados Herkulex, para la articulación prismática un actuador lineal de la compañía Actuonix y el efector final es un gripper (pinza mecánica), el cual fue diseñado para que funcione con un servomotor de la marca Hi-Tec.

3.3.5.2.1 Movimiento de la articulación angular

Como se mencionó anteriormente, las dos primeras articulaciones angulares cuentan con servomotores Herkulex, los cuales son servomotores de precisión, la resolución por paso es de 0.3° . Estos servos se controlan mediante comandos enviados por medio de una comunicación serial. Los comandos están formados por una cadena de números hexadecimales (figura 3.30), los cuales proporcionan información al servomotor.

Packet								
Type	Header		Packet Size	pID	CMD	Check Sum1	Check Sum2	Data[n]
Value	0xFF	0xFF	7~223	0~0xFE	1~9	Refer to Detail	Refer to Detail	Refer to Detail
Byte	1	1	1	1	1	1	1	MAX 216

Figura 3.30 Cadena de comando para servomotor Herkulex.

Header

Indica el inicio de la cadena de comandos y está compuesto por dos números 0xFF, los cuales cada uno ocupa 1Byte de la cadena; dicha cadena requiere mínimo 7 bytes de longitud.

Packet Size

Es el número de bytes que ocupa toda la cadena.

pID

Es el número de identificación del servomotor, el fabricante le da un valor por default de 0xFD (253); en total se pueden controlar 254 servomotores conectados en paralelo, por lo cual es necesario cambiar el ID de cada servomotor que se quiere utilizar por un ID exclusivo.

CMD

En este espacio se indica el comando que se quiere ejecutar, un Request Packet o un ACK Packet. El Request Packet se utiliza para enviar alguna solicitud de operación, guardar alguna configuración en la memoria del servomotor, restablecer el servomotor, girar el servomotor o encender el led de algún color.

ACK Packet

Son comandos que le solicitan al servomotor información de su estado, en qué posición se encuentra, su estado de voltaje y temperatura.

Check Sum1

Se realiza una suma de los sub comandos packetSize, pID, CMD, Data [0], Data [1], Data [n]. Esta suma se hace en números binarios y es para verificar que la cadena de comandos es correcta.

Check Sum2

Es utilizado para corroborar que el Check Sum1 se haya realizado correctamente.

Data[n]

El valor de este varía dependiendo del CMD

Los GPIO de la Raspberry utilizados son el N. 8 y 10, correspondientes a los pines TX y RX respectivamente, además del pin N.6 que es una tierra de la Raspberry se conecta con el polo negativo de la fuente de energía de 7.4VDC para su correcto funcionamiento.

En la figura 3.31 se puede observar un diagrama de la conexión entre la Raspberry Pi B+ y el servomotor Herkulex.

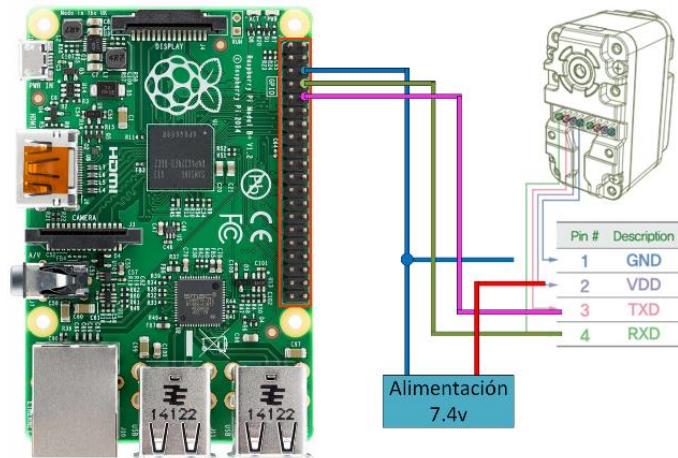


Figura 3.31. Diagrama de conexión entre Raspberry Pi B+ y el servo motor Herkulex.

3.3.5.2.2 Movimiento de la articulación prismática

El actuador lineal Actuonix es ocupado para la tercera articulación del manipulador, que desplaza verticalmente el gripper. El funcionamiento de este actuador es igual que el servomotor Hi-Tec 311, con el tiempo de estado activo de la señal RC (de radio comando) se contraerá o desplazará. En el manual del actuador lineal se indica que con 1 milisegundo de estado activo del PWM permanecerá retraído y con 2 milisegundos de estado activo permanecerá extendido.

La conexión eléctrica de control para el actuador lineal utiliza la terminal N.32. Esta terminal es la que envía la señal de ancho de pulso necesaria; la fuente de alimentación requerida es de 12VDC, donde el polo negativo debe ir a la terminal N.25, que es una tierra de la Raspberry. En la figura 3.32 se muestra el diagrama de la conexión del actuador lineal y la Raspberry.

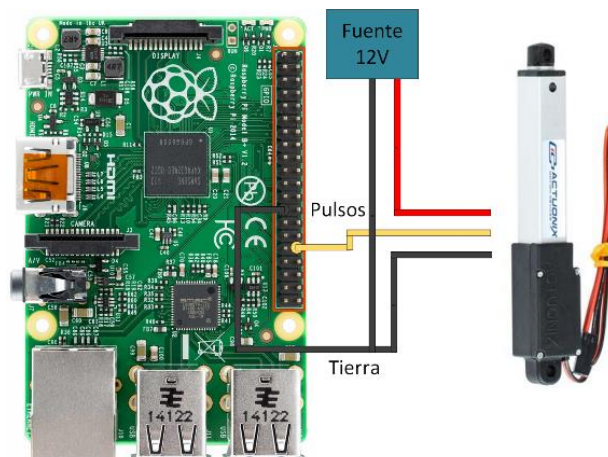


Figura 3.32. Diagrama de conexión entre Raspberry y el actuador lineal.

3.3.5.2.3 Actuador final y su movimiento

La sujeción de los viales para su correcto traslado depende de las características del gripper. Este debía cumplir con ciertas condiciones, por ejemplo, el espacio de apertura debía ser suficiente para los viales, el material del gripper debía evitar que los viales resbalaran, además de ser capaz de fijarlo en el manipulador.

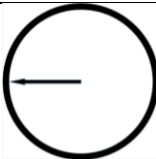
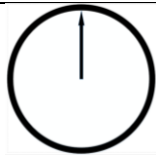
Teniendo en cuenta estas consideraciones se eligió un gripper (figura 3.33) de la tienda web de Robotshop, el cual cumplía con los requerimientos que se tenían. Para la apertura y cierre del gripper se requería un servomotor como actuador para ejecutar dichas tareas.

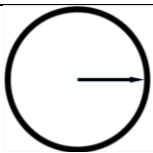


Figura 3.33. Gripper.

El servomotor utilizado para el funcionamiento del gripper es el modelo Hi-Tec 311, el cual es montado en éste, controla la dirección y el ángulo de la rotación, así como la apertura de éste.

Tabla 3.3. Rango de operación del servomotor.

Ancho de pulso	Posición	Imagen
1000u	-90 grados	
1500u	0 grados	

2000u	90 grados	
-------	-----------	---

El rango de operación del Hi-Tec 311 es de 1000-2000 microsegundos de estado activo de la señal de control PWM, por lo cual se debió calibrar para que en 1000 microsegundos de ancho de pulso abriera la pinza y en 2000 microsegundos se cerrara.

Para el control por modulación por ancho de pulso, el servomotor se conecta a la terminal N.33 y el polo negativo de la fuente de alimentación de 5VDC va conectada con la tierra de la Raspberry siendo esta la terminal N.9 (figura 3.34).

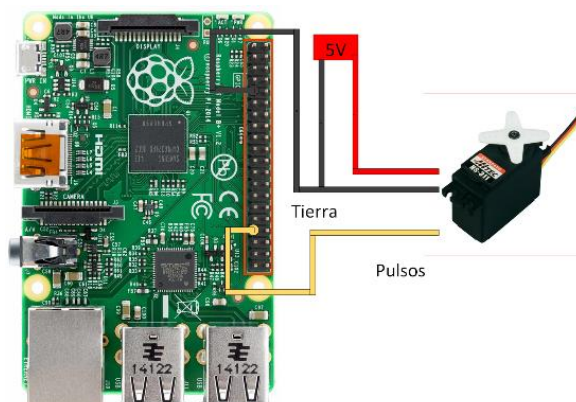


Figura 3.34. Diagrama de conexión entre Raspberry y servomotor.

3.4. Racks del sistema

El sistema mecatrónico propuesto cuenta con dos racks, cada uno tiene una función para los viales. El rack de llenado es de suma importancia, ya que en este rack los viales son llenados con las sustancias radiactivas. El segundo rack que es de almacenamiento será donde se depositen los viales después de su llenado para seguir con el proceso.

3.4.1 Diseño del Rack

Como ya se mencionó en la sección 1.3, se requerían dos racks para la colocación de los viales. El primer rack que es de llenado (figura 3.35) requería tener una longitud para albergar siete viales, el primer vial será el que contenga la sustancia que se suministrará a los seis viales restantes.

Durante el proceso de llenado, cuando el primer vial este completo, el rack se desplazará para que el manipulador pueda tomarlo y colocarlo en el rack de almacenamiento, así el siguiente vial podrá ser llenado. Para esta función de desplazamiento se consideró en el diseño del rack de llenado un sistema capaz de realizar los desplazamientos lineales.

El segundo rack que es de almacenamiento se diseñó con capacidad para seis viales dispuestos en dos hileras (ver fig. 3.36).

El diseño de los viales se realizó en Solidworks® con el fin de analizar las dimensiones entre las posiciones de los viales de manera que el gripper pudiera sujetarlos sin colisión alguna. Basado en este diseño se procedió a la construcción de estos.

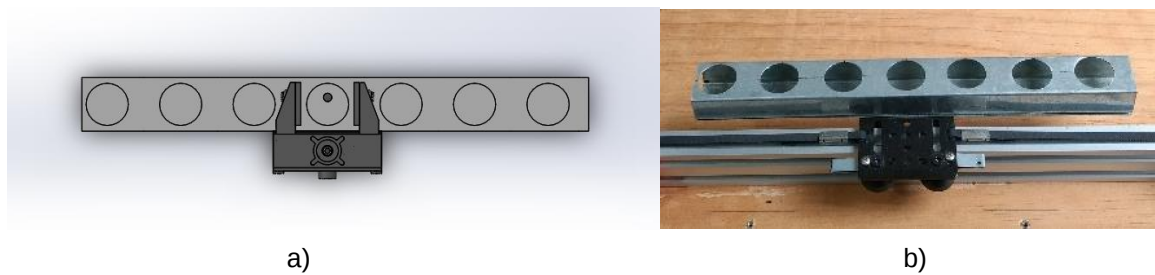


Figura 3.35 Rack de llenado a) Diseño en Solidworks® b) Rack construido

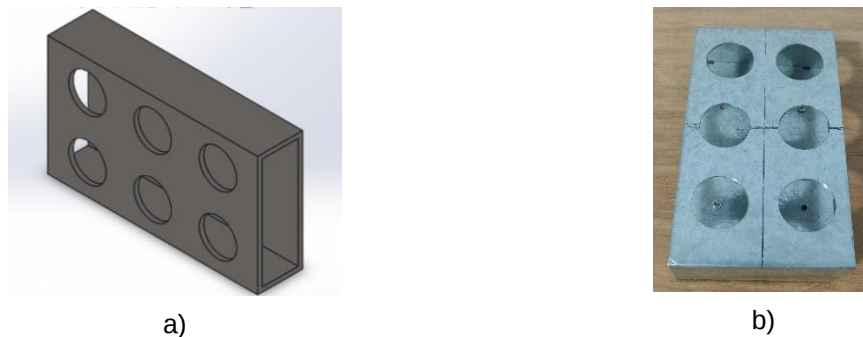


Figura 3.36. Rack de almacenamiento a) Rack diseñado en Solidworks® b) Rack construido.

La construcción de ambos racks se llevó acabo con lámina galvanizada, de 0.5mm de espesor, se seleccionó dicho material por su resistencia y ligereza.

En la figura 3.35b y 3.36b se muestran los racks contruidos. La distancia entre perforaciones contada de centro a centro de cada perforación es de 43.5 mm.

3.4.2 Sistema lineal para el rack de llenado

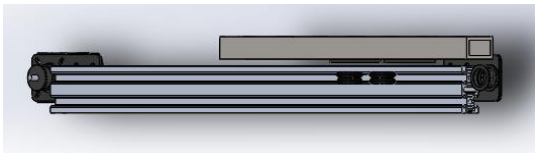
Para la selección del sistema lineal, se llevó a cabo una revisión y análisis de los sistemas existentes en el mercado, se encontró una gran variedad de sistemas con diversas características, de los cuales, entre mayor número de características, el costo se elevaba.

El sistema lineal utilizado, se seleccionó de la tienda virtual OpenBuilds (ver figura 3.37). Éste se seleccionó porque dispone de una mesa que se desplaza linealmente y cuenta con perforaciones para sujeción del rack de llenado de los viales.

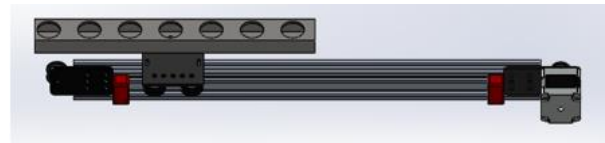


Figura 3.37. Sistema lineal.

Definido el modelo del actuador lineal a utilizar y sus dimensiones, se llevó a cabo el diseño en Solidworks® del mecanismo completo. En la figura 3.38 (a) y (b) se muestran dos vistas del diseño final en donde se puede apreciar el montaje del rack de llenado en el actuador. A partir de este diseño se procedió a la construcción del mecanismo físico (ver figura 3.38 c).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.38. Sistema lineal con el rack.

3.4.2.1 Driver

El actuador que se utiliza para el sistema lineal es un motor a pasos nema17, que brinda una resolución de 0.7° por paso, por lo cual se necesitó un driver para el motor a pasos y una fuente de alimentación.

Para el control del sistema lineal se adquirió un driver para motores a pasos bifásico (driver DQ542MA). En la figura 3.39 se muestra un diagrama para la conexión del controlador con el driver, donde las líneas empleadas son:

PLS: Se refiere a los pulsos que recibirá.

DIR: Determina la dirección que tendrá el motor, varía el giro si se encuentra activada o desactivada la entrada del driver.

ENA: Activa o desactiva el controlador.

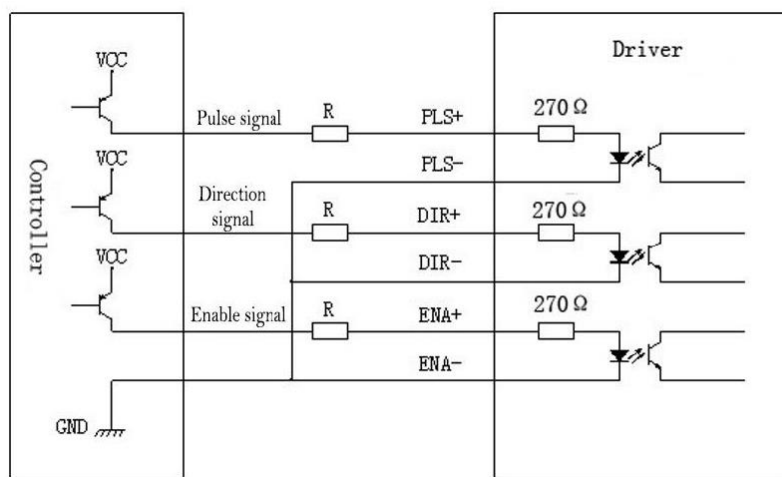


Figura 3.39. Diagrama de conexión del controlador con el driver.

La resistencia “R” indicada en el diagrama de la figura 3.39, varía dependiendo del voltaje de salida del controlador, en el manual de usuario del driver indica que cuando el VCC sea igual a 5V no lleva resistencia, ya que el driver tiene una resistencia interna la cual limita la corriente, por lo tanto, como la Raspberry proporciona máximo 3.3V de salida no se requirió incluir resistencia.

El driver (DQ542MA) cuenta con (8) diferentes interruptores para configurar su funcionamiento. Como se muestra en la figura 3.40 con los interruptores del 5 al 8 se configura la función llamada micro step, la cual permite seleccionar las diferentes resoluciones para el motor a pasos, desde 400 pulsos/rev hasta 25000 pulsos/rev.

SW5	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
SW6	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
SW7	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
SW8	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
PULS E/RE V	400	800	160 0	320 0	640 0	128 00	256 00	100 0	200 0	400 0	500 0	800 0	100 00	200 00	250 00

Figura 3.40. Configuración de resolución para el motor a pasos.

Para este sistema se configuró el controlador para 1600 pulsos por revolución sw5=OFF sw6=OFF sw7=ON sw8=ON.

En la figura 3.41. se observan los interruptores del controlador numerados del 1 al 3, que se utilizan para configurar la corriente que se proporciona al motor a pasos, esto es importante ya que se debe seleccionar la corriente adecuada para el motor, esta información la proporciona la ficha técnica de éste.

Output current (A)				
SW1	SW2	SW3	PEAK	RMS
ON	ON	ON	1.00	0.71
OFF	ON	ON	1.46	1.04
ON	OFF	ON	1.91	1.36
OFF	OFF	ON	2.37	1.69
ON	ON	OFF	2.84	2.03
OFF	ON	OFF	3.31	2.36
ON	OFF	OFF	3.76	2.69
OFF	OFF	OFF	4.20	3.00

Figura 3.41. Configuración de corriente para el motor.

El interruptor 4, funciona para indicar si se trabajará con el 100% de la corriente, esto es, cuando esta encendido o con solo el 50% de la corriente estando apagado.

El motor a pasos utilizado para el funcionamiento del sistema es un Nema 17, su ficha técnica indicó que trabaja con 2A, por lo cual se configuró el driver SW1= ON, SW2=OFF, SW3=ON.

La ecuación 3.1 se utilizó para obtener el número de revoluciones que se necesitan para una distancia arbitraria, el resultado se multiplica por 1600 que son el número de pulsos para completar un giro del motor a pasos y con esto se obtiene el número de pulsos que necesita el motor para desplazarse dicha distancia.

$$Pulsos = rev * 1600 \quad 3.1$$

3.4.2.2. Conexión eléctrica

En la figura 3.42 se muestra la conexión del controlador con la Raspberry Pi B+. La terminal de pulsos del driver va conectada con la terminal N.12 de la Raspberry Pi B+, esta terminal es la que enviará los pulsos para el control. La terminal de dirección del driver se conecta con la terminal N.16, el cual estando activo o inactivo indicará la dirección de giro del motor a pasos. La terminal enable del driver se conecta a la terminal N.18, el cual estando activo encenderá el motor a pasos.

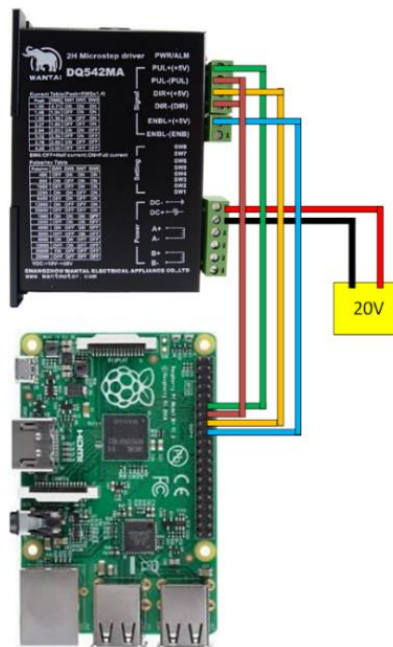


Figura 3.42. Diagrama de la conexión eléctrica de la Raspberry Pi B+ con el driver.

3.5 Máquina para el Llenado de Viales

Para realizar el diseño de la máquina de llenado de viales se consideraron jeringas semiautomáticas ya que estas son las utilizadas en el ININ. El sistema actual cuenta con dos

mangueras, con las cuales se succionan y depositan las sustancias en los viales. Esta acción es realizada por el operador quien de forma manual activa la válvula para succionar o inyectar sustancias. Esta acción además se complica más ya que el trabajo se realiza a través de una pared de vidrio con blindaje de plomo y mediante guantes de seguridad.

Como parte de este proyecto se propuso el diseño de un nuevo prototipo automático y esbelto (figura 3.43). El diseño propuesto cuenta con dos motores a pasos; uno en la parte superior el cual está conectado a un tornillo sin fin para desplazar la jeringa verticalmente y succionar y/o inyectar la sustancia. El otro motor a pasos está colocado en la parte posterior el cual con ayuda de dos engranes cónicos mueven la válvula para la seleccionar de manera automática la acción de inyección o succión.

La figura 3.43 muestra dos vistas del diseño en Solidworks® de la máquina de llenado propuesta. En la vista lateral (figura 3.43 b) se puede observar una extensión la cual permite sujetar la manguera que llenará los viales del rack del sistema lineal.

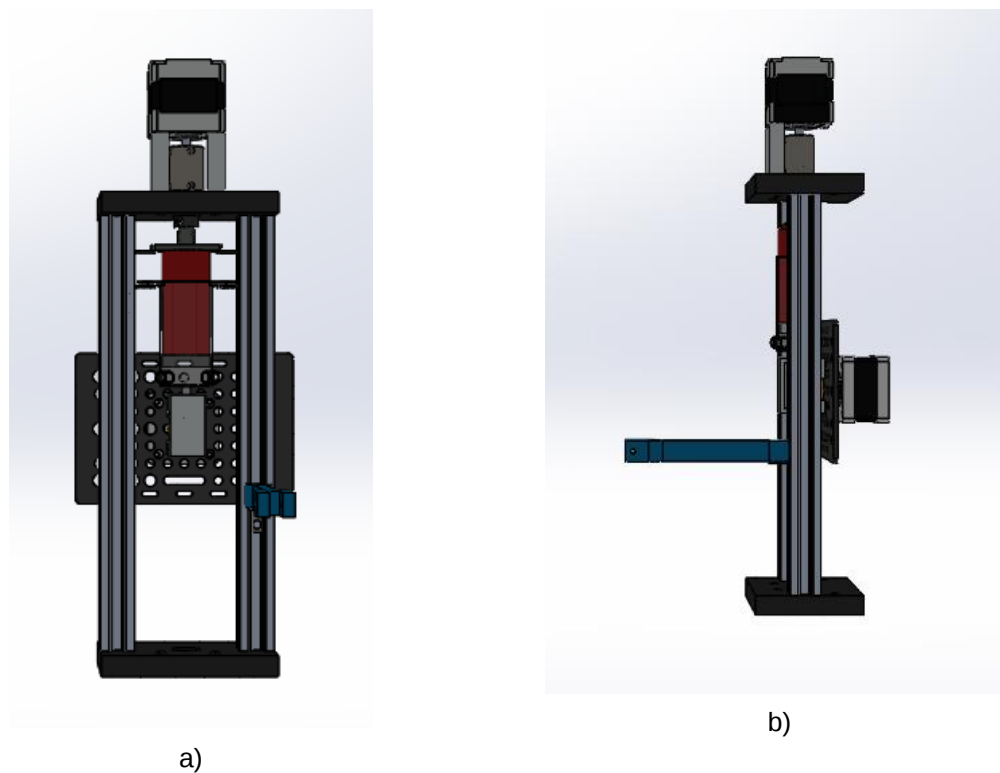


Figura 3.43. Diseño de la máquina para el llenado de viales. a) Vista frontal, b) Vista lateral.

Para la máquina del llenado de viales se propuso un control similar al del sistema lineal, con la diferencia que para este caso se toma en cuenta el área de la jeringa para conocer la cantidad de sustancia que se adquiere. Entonces se emplea la ecuación 3.2 del volumen y se despeja para h .

$$V = A * h \quad 3.2$$

$$h = \frac{V}{A} \quad 3.3$$

donde:

V: volumen

A: Área de la base

h: Altura, o para este caso en particular, desplazamiento lineal (DI)

Teniendo h se sustituye en la fórmula 2.14 como DI . Del mismo modo, el resultado se sustituye en la fórmula 3.1 y se obtiene el número de pulsos para una cantidad de sustancia requerida.

Capítulo 4 Modelo de desplazamiento del manipulador

Para la programación de la rutina del manipulador se utilizó una curva de Bézier y la cinemática inversa. Partiendo de la cinemática inversa del manipulador tipo Scara (Sección 2.3.2.1) se prosigue a modelar la trayectoria del manipulador con ayuda de la curva de Bézier (Sección 2.6.1). Para esto primero se definen cuatro puntos para desarrollar la curva de Bézier, punto inicial, punto final y los dos puntos de control, donde cada punto obtenido por la curva será el nuevo punto para aplicar la cinemática inversa, obteniendo así los ángulos que deben alcanzar las articulaciones.

4.1 Curva de Bézier de la Trayectoria

En la figura 4.1 se observa el espacio de trabajo del manipulador delimitado por los dos círculos. En esta figura se visualiza también la trayectoria que tendrá el actuador lineal del manipulador, el punto inicial, los dos puntos de control y el punto final que describe la trayectoria de Bézier.

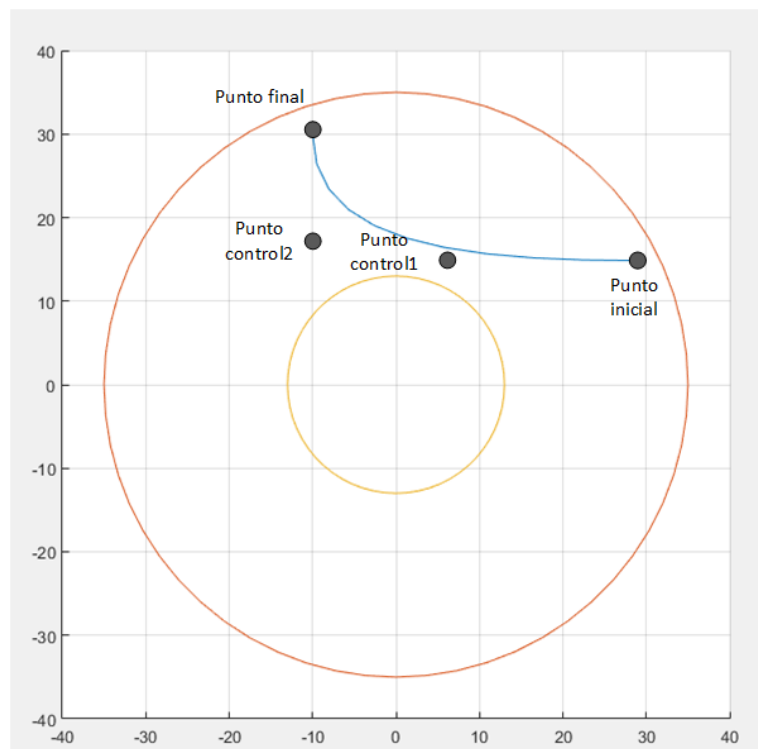


Figura 4.1. Área de trabajo del manipulador Scara y puntos que definen la trayectoria.

Estos cuatro puntos se sustituyen como coordenadas en la fórmula 2.16 (ver sección 2.6.1). Primeramente, los valores en el eje coordenado de X y posteriormente en Y, se realizan las iteraciones incrementando el valor de $t = +0.1$, lo que nos da como resultado las coordenadas de los diez puntos que generan la trayectoria (Tabla 4.1) a partir del punto inicial.

Tabla 4.1

Puntos X	-10.0	-9.5016	-8.0545	-5.7311	-2.6039	1.2549	5.7228	10.877	16.496	22.557	28.988
Puntos Y	30.0	26.410	23.422	20.982	19.039	17.539	16.431	15.660	15.175	14.922	14.850

4.2 Cinemática inversa del manipulador tipo Scara

Ya que se obtiene la trayectoria, los puntos dados por la curva de Bézier son utilizados para obtener los ángulos de las articulaciones. Aplicando la cinemática inversa (ver sección 2.3.2.1) se obtienen los ángulos que cada articulación debe tener para reproducir dicha curva (Tabla 4.2).

Tabla 4.2

ángulo 1	138.30	151.37	159.61	163.49	162.16	154.24	139.39	119.95	99.193	77.998	53.157
ángulo 2	124.74	103.55	87.636	74.742	64.701	58.513	57.882	64.127	77.476	98.361	131.76

A partir de los ángulos obtenidos mediante la cinemática inversa, se puede observar cómo será el movimiento del manipulador. En la figura 4.2, la curva que se observa es la trayectoria que sigue el gripper y las líneas rectas son las diferentes posiciones que los vínculos del manipulador deben tomar para generar dicha trayectoria.

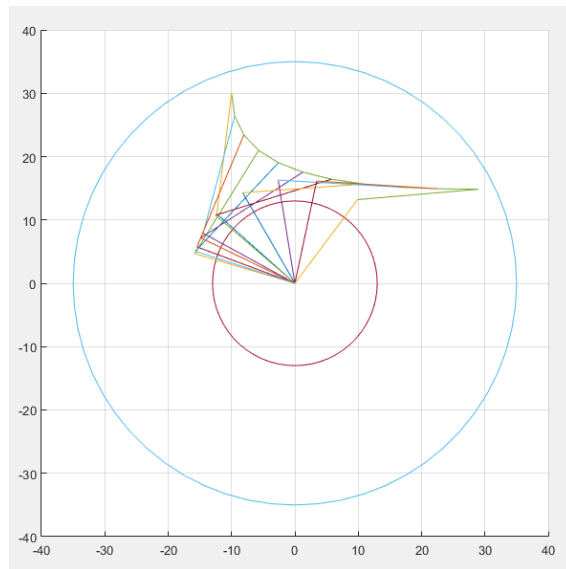


Figura 4.2. Representación de la evolución de las articulaciones para generar la curva de Bézier.

La cinemática inversa debe aplicarse para el posicionamiento de cada vial. En la figura 4.3 se muestra los dos racks, el primer rack es del cual el manipulador toma los viales (rack de llenado) y el segundo en donde los deposita.

La tarea de trasladar un vial del rack de llenado al rack de almacenamiento debe realizarse para los seis viales, por lo cual se enumera los espacios del rack iniciando de la parte superior izquierda y finalizando por la parte inferior derecha; en la figura 4.3 se observan las seis curvas de las trayectorias que ejecuta el brazo para desplazar cada vial.

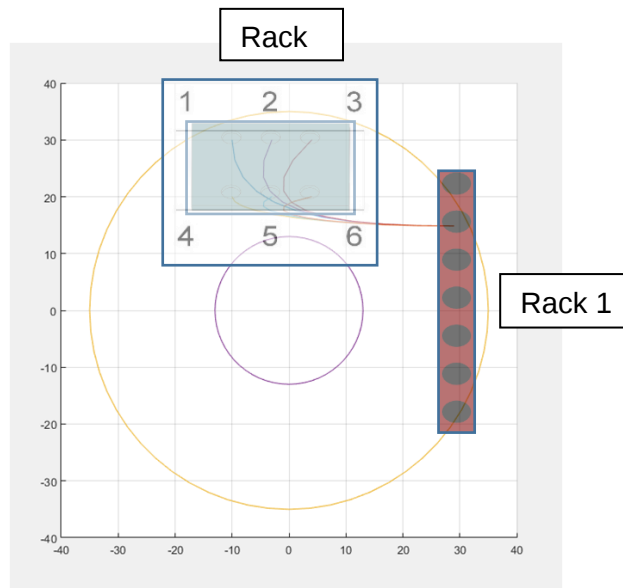


Figura 4.3. Representación de la trayectoria cada vial.

4.3 Interpolación de los servos Herkulex

Para realizar la rutina con los servomotores Herkulex, fue necesario realizar una interpolación para ajustar el sistema de coordenadas de los servos con el que se planteó para la cinemática inversa. En la figura 4.4 se muestra el sistema coordinado de los servomotores Herkulex, donde la línea vertical de color negro indica 0°.

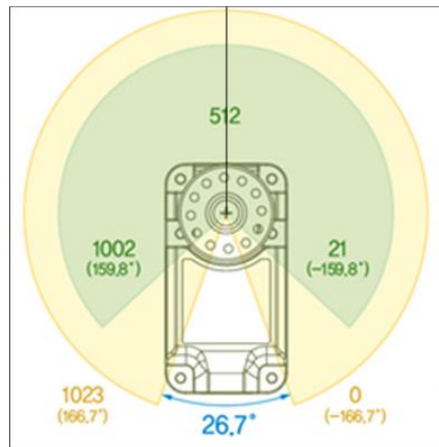


Figura 4.4. Sistema de referencia del servomotor Herkulex.

Como se puede apreciar, existe un desfase de 90° entre los dos sistemas coordinados, por lo que se realizó un ajuste de la siguiente manera:

$$\text{NuevoAngulo} = 90 - \text{ángulo} \quad 4.1$$

Donde:

NuevoAngulo: Ángulo ajustado.

Ángulo: Ángulo dado por la cinemática inversa.

Ya que la posición de los servomotores Herkulex es diferente, se realizó nuevamente una interpolación para el segundo servomotor Herkulex de la siguiente manera:

$$\text{NuevoAngulo} = -180 + \text{ángulo} \quad 4.2$$

Capítulo 5 Resultados

5.1 Pruebas

En la figura 5.1 se muestra parte del sistema mecatrónico propuesto, el cual está compuesto por el robot manipulador tipo Scara, el sistema lineal para el desplazamiento de los viales y los racks para la colocación de los mismos.

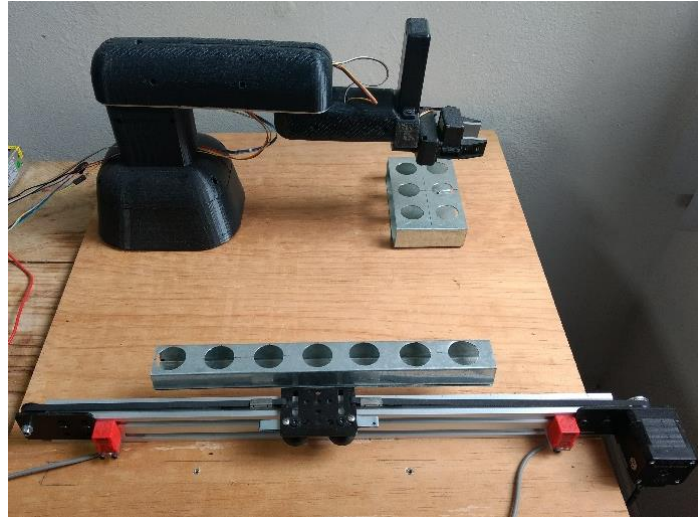


Figura 5.1. Manipulador tipo Scara y sistema lineal.

Se realizaron diversas pruebas con el sistema. La primera fue la calibración del sistema lineal, ésta consistió en la colocación de un vial en la misma posición repetidas veces. La segunda prueba consistió en calibrar el robot manipulador para que el efector final tomara y depositara los viales en cada posición con la necesaria precisión.

5.1.1 Pruebas del sistema lineal

El rack del sistema lineal se diseñó para que cada perforación de los viales tuviera la misma distancia entre ellos, sin embargo, por el proceso de fabricación del rack la distancia entre estos varía, por lo cual se consideró variaciones en las diferentes posiciones.

1. Se marcó en el sistema lineal las posiciones que debería alcanzar (figura 5.2).
2. Se ejecutó el programa.
3. Se tomaron datos de la posición alcanzada y de la posición obtenida (figura 5.3).
4. Se obtuvo una media para las distancias reales entre cada perforación.

$$media = \frac{4.55 + 4.2 + 4.4 + 4.4 + 4.3}{5} \quad 4.1$$

$$media = 4.37$$

5. Se ejecutó el programa con la nueva distancia y se obtuvo un error de $\pm 1\text{mm}$ (tabla 5.1), lo cual permite el acceso del manipulador a los viales.

Tabla 5.1

Posición	1	2	3	4	5
Error (cm)	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1

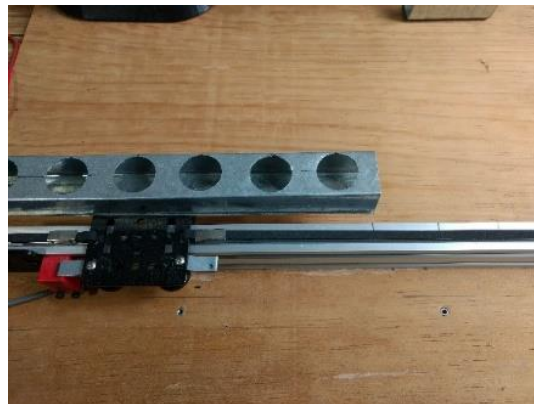


Figura 5.2. Sistema lineal en la primera posición con marcas como siguiente posición.



Figura 5.3. Sistema lineal en la segunda posición.

5.1.2 Pruebas sobre el Robot Manipulador.

A continuación, se muestran los pasos realizados para el posicionamiento de los viales:

1. Con ayuda de Solidworks® se obtuvieron las coordenadas de la ubicación del vial a tomar y de las posiciones finales (figura 5.4).
2. Se introdujeron las coordenadas al programa y se ejecutó.
3. El robot manipulador se mueve a la ubicación donde toma el vial y se obtiene información de la posición a la cual llega (figura 5.5).
4. Se realiza la trayectoria para llegar a la ubicación donde deja el vial y se adquiere información de la posición (figura 5.6).

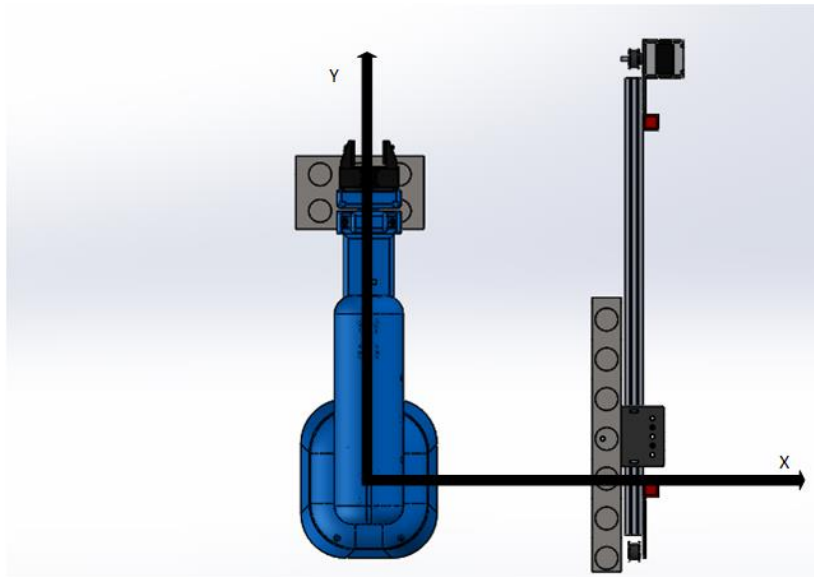


Figura 5.4. Sistema de referencia del sistema.

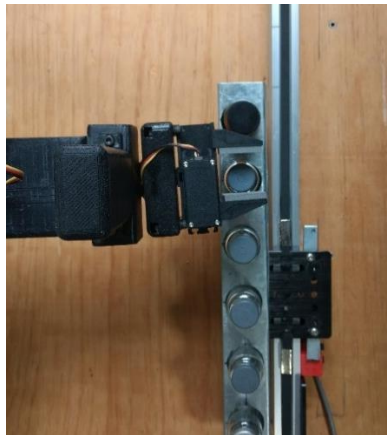


Figura 5.5. Vista superior del manipulador para tomar el vial.

Los pasos 3 y 4 se repitieron con la finalidad de:

- Corregir posiciones: aquellas en las cuales el gripper se aproximó a la posición, pero existía algún desplazamiento que afectaba para tomar y depositar los viales en su posición, como se muestra en las figuras 5.5 y 5.6 el gripper está desplazado del centro de los orificios.
- Reducir tiempo: entre cada movimiento de la rutina, se encontraron tiempos en los cuales el sistema quedaba estático, por lo cual se redujeron o se eliminaron esos tiempos, para que fuera eficiente y así reducir el tiempo total de la rutina.

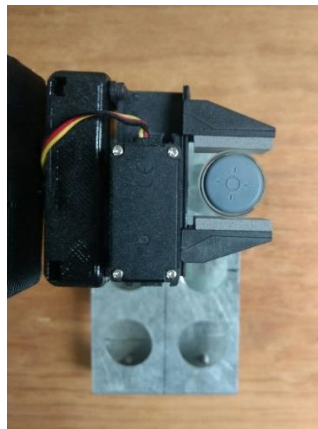


Figura 5.6. Vista superior del manipulador para dejar el vial.

Estas iteraciones se realizaron hasta que el manipulador fue capaz de realizar la rutina correctamente, tomando y posicionando cada vial en la debida ubicación. En la tabla 5.1 se muestran los resultados de las iteraciones, las posiciones son los espacios del rack de almacenamiento y las iteraciones están dadas en coordenadas X Y.

Como se muestra en la tabla (5.1), las primeras coordenadas obtenidas con ayuda de Solidworks® no son las reales del sistema, estas sirvieron como guía ya que en las primeras iteraciones el manipulador no fue capaz de colocar correctamente los viales en cada posición.

En total se realizaron diez iteraciones. En cada iteración se modificaron las coordenadas de las posiciones hasta que el manipulador fue capaz de colocar los viales sin errores. En la tabla 5.2 se muestra en fondo gris las coordenadas en las que el manipulador no logró colocar los viales y en fondo blanco las coordenadas en las cuales los posicionó en forma precisa.

Tabla 5.2. Resultados de iteraciones de posición

	Coordenadas	Iteraciones									
posicion 1	X	-5.36	-7.36	-6.86	-6.26	-7.26	-7.26	-7.26	-7.26	-7.26	-7.26
	Y	33.273	36.273	34.873	34.873	34.873	34.473	34.473	34.473	34.473	34.473
posicion 2	X	-1	-3	-2.6	-2.2	-3.2	-3.4	-3.4	-3.4	-3.3	-3.2
	Y	33.273	36.273	35.373	35.373	35.373	35.373	35.273	35.073	35.073	35.073
posicion 3	X	3.35	1.35	2.35	2.05	2.05	1.85	1.85	1.85	1.85	1.85
	Y	33.273	36.273	35.673	35.673	35.273	35.273	35.273	35.273	35.273	35.273
posicion 4	X	-5.36	-7.36	-6.86	-6.26	-6.26	-6.14	-6.04	-6.04	-6.04	-6.04
	Y	29.273	32.273	31.273	31.473	31.073	31.073	31.073	31.073	31.073	31.073
posicion 5	X	-1	-1	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
	Y	29.273	32.273	31.273	31.273	31.273	31.273	31.273	31.273	31.273	31.273
posicion 6	X	3.35	3.35	2.85	2.45	2.45	2.45	2.45	2.65	2.65	2.65
	Y	29.273	32.273	32.073	32.073	31.873	31.673	31.473	31.473	31.473	31.473
	No llegó a posición										
	Llegó a posición										

En la figura 5.7 se observa el comportamiento de los errores. Como se logra visualizar, en las tres primeras iteraciones existe error en el posicionamiento de los viales, gradualmente este error va disminuyendo hasta llegar a cero, lo cual indica que el manipulador está trabajando sin errores.

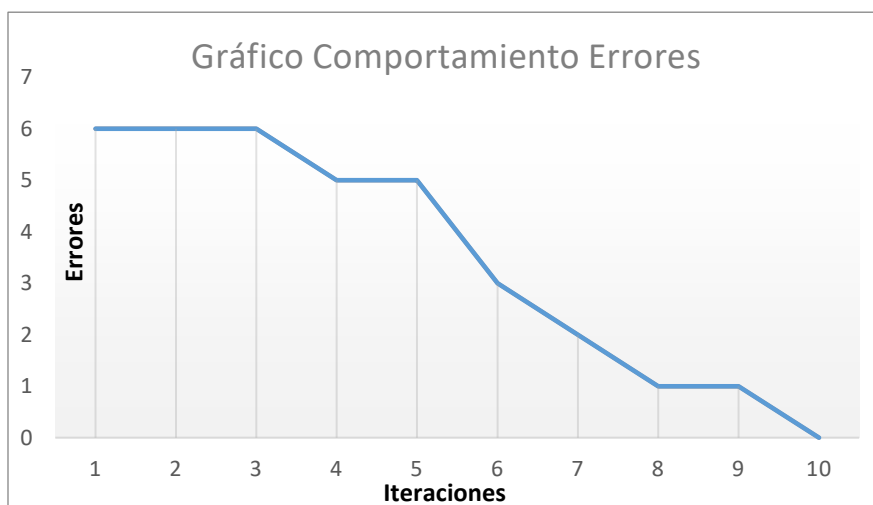


Figura 5.7 Gráfico comportamiento de errores

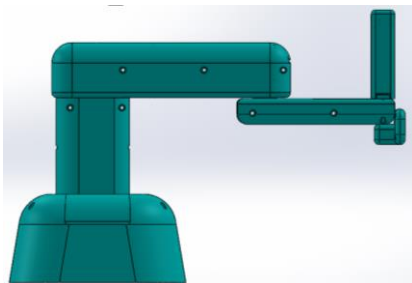
5.2 Rediseño del manipulador Tipo Scara

Durante la construcción del robot se observaron ciertas imperfecciones en las piezas lo que impedía al manipulador moverse libremente, por lo cual se realizó un nuevo diseño como propuesta para mejorar su funcionamiento, las imperfecciones que se pretenden eliminar son:

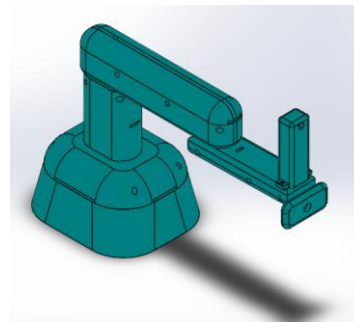
- Deformaciones en las piezas: Esto impide que se ensamble correctamente el robot manipulador.
- Método de sujeción: El robot manipulador fue diseñado para incrustarle tuercas, de este modo con un tornillo se ensamblaría, sin embargo, algunas tuercas llegan a desprenderse por la tensión a que se someten.
- Peso: Las piezas son grandes por lo cual se ve cierta deformación en el efector final.

Se analizó esta información para dejar como parte de este trabajo la propuesta de un nuevo diseño a partir del robot manipulador construido inicialmente. El rediseño de manipulador se muestra en la figura 5.8. y cuenta con las mejoras las siguientes:

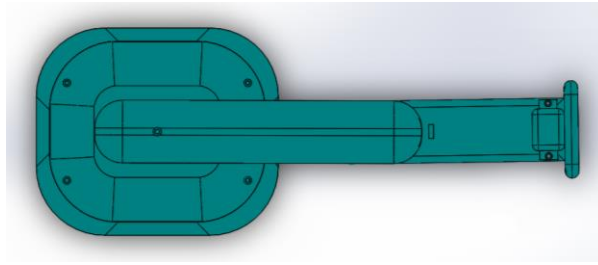
- Reducir el tamaño de las piezas: Con esto se reduce el peso del manipulador aproximadamente 1kg, reduciendo la deformación en el efector final.
- Seccionar grandes piezas: Una pieza de gran magnitud lleva cierto tiempo de impresión lo que provoca deformaciones, por lo cual, al dividir una pieza grande en dos pequeñas, se reduce el tiempo de impresión de cada una y de igual manera las deformaciones.
- Método de sujeción: Las tuercas para el ensamble no se incrustan, se colocan en la parte posterior de la pieza lo que genera un tipo de freno cuando se aprieta el tornillo.



a)



b)



c)

Figura 5.8. Rediseño del manipulador tipo Scara. a) Vista lateral, b) Vista isométrica, c) Vista superior.

Capítulo 6 Conclusiones

En este trabajo se diseñó y se construyó un sistema mecatrónico para el posicionamiento de viales, el cual está conformado por diversas partes: rediseño como propuesta de un robot manipulador tipo Scara; diseño y construcción de un sistema lineal para el desplazamiento de viales; el diseño de una máquina para el llenado de viales y el algoritmo de control para el sistema.

El desarrollo del programa para la ejecución de la rutina del robot manipulador Scara se basó en dos métodos matemáticos: curva de Bézier y cinemática inversa. El primero fue para definir la trayectoria que el manipulador debía seguir para ejecutar la rutina, el segundo método fue utilizado para conocer los ángulos que las articulaciones debían tener para seguir dicha trayectoria.

Algunos de los principales problemas fueron:

Piezas en impresora 3D: Las piezas que constituían al robot manipulador tenían imperfecciones, lo que dificultó el movimiento del manipulador y con ello la correcta colocación de los viales. Es por ello que se realizó un nuevo de diseño con la finalidad de reducir las imperfecciones y mejorar el movimiento durante la rutina.

Raspberry PWM: Durante la ejecución de la rutina, el actuador lineal como tercera articulación, sufría de movimientos repentinos que estaban fuera de la programación, esto se debe por el método en el cual la Raspberry genera los pulsos, se investigó algún otro método de la Raspberry que genere pulsos y existe uno, el cual utiliza una parte de la memoria del procesador, lo cual podría eliminar movimientos inesperados en el actuador, sin embargo, la librería encontrada está en mantenimiento y/o tiene un error, por lo cual se sugiere trabajar en la librería para eliminar el error o utilizar algún PIC para el sistema.

Como conclusión el sistema mecatrónico desarrollado cumple con el objetivo planteado, realiza la tarea de tomar y colocar viales con precisión sin intervención de un operador.

Referencias

- Reyes, F. (2011). Robótica. Control de robots manipuladores. México D.F.: Alfaomega.
- Kumar, S. (2010). Introducción a la robótica. México: Mc Graw Hill.
- Ollero, A. (2001). Robótica, Manipuladores y robots móviles. Barcelona, España: Marcombo.
- Barrientos, A. (2007). Fundamentos de robótica. México: Mc Graw Hill.
- Craig, J. (2006). Robótica. México: Pearson Educación.
- Gómez, S. (2008). El gran libro de SolidWorks. Barcelona, España: Marcombo.
- Seto, W. (1977). Vibraciones mecánicas. México: McGraw-Hill.
- Luna M., Hernández T., Serrano L., Peña A., Soto A. (2017). Freeze-dried multi-dose kits for the fast preparation of ^{177}Lu -Tyr3 -octreotide and ^{177}Lu -PSMA(inhibitor) under GMP conditions. 2183.
- Raspberry.(2017).Downloads.<https://www.raspberrypi.org/downloads/>
- Robotshop.(2017).UserManual.<https://www.robotshop.com/media/files/pdf/manual-drs-0101.pdf>
- RScomponents.(2017).DocumentacionTecnica.<https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/14ad/0900766b814ad9e2.pdf>
- CeroOneMechatronics.(2017).UserManual.<https://www.01mechatronics.com/sites/default/files/docs/Hitec%20HS%20-311-Factsheet%202018.pdf>
- LeadshineTechnology.(2017).UserManual.<https://robokits.download/datasheets/Leadshine%20DM542.pdf>