



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO DE UN BRAZO ROBÓTICO ASISTENCIAL PARA
PERSONAS CON DISCAPACIDAD**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

ADRIÁN RICARDO TAPIA HIDALGO

DIRECTOR: ING. GUILLERMO MOSQUERA CANCHINGRE MSC.

Quito, Agosto 2017

© Universidad Tecnológica Equinoccial 2017.
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, **ADRIÁN RICARDO TAPIA HIDALGO**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

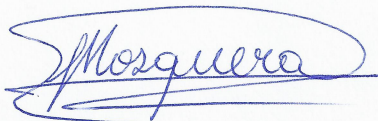


Adrián Ricardo Tapia Hidalgo

C.I. 1716265432

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**Diseño de un brazo robótico asistencial para personas con discapacidad**", que, para aspirar al título de Ingeniero en Mecatrónica fue desarrollado por **Adrián Ricardo Tapia Hidalgo**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 Y 28.



Ing. Guillermo Mosquera Canchingre MSc.

C.I. 0802613059

DEDICATORIA

A mis padres por su apoyo y dedicación continua a lo largo de los años que con su visión han forjado mi carácter y espíritu.

A mi hermana Daniela, por su compañía y estar dispuesta a escuchar en momentos importantes.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Tecnológica Equinoccial por acogerme con calidez y buena disposición para cumplir esta meta.

Al Ingeniero Guillermo Mosquera por sus sugerencias y aporte como guía para el desarrollo de este trabajo.

A Diana y Juan por su apoyo constante e indoblegable con el cual han sabido levantarme de los tropiezos de la vida.

A Claudia y Mauricio por las innumerables horas de estudio y esfuerzo conjunto.

A mis amigos más cercanos por sus consejos y apoyo en las diversas circunstancias de la vida académica y cotidiana.

A los docentes que fueron parte de mi formación por impartir su conocimiento con empeño y siempre procurando un futuro brillante para sus educandos.

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO**PROYECTO DE TITULACIÓN**

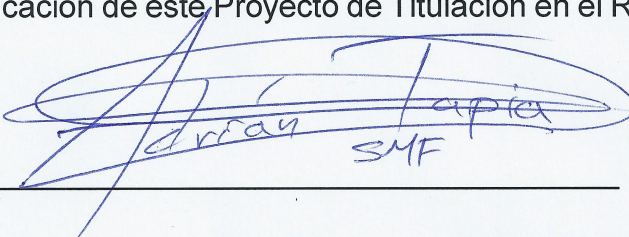
DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1716265432
APELLIDO Y NOMBRES:	Tapia Adrián Ricardo
DIRECCIÓN:	Jorge González y Hernán Vásquez esq.
EMAIL:	adrianqql88@gmail.com
TELÉFONO FIJO:	(+593)22451737
TELÉFONO MOVIL:	(+593)998592300

DATOS DE LA OBRA	
TITULO:	Diseño de un brazo robótico asistencial para personas con discapacidad
AUTOR O AUTORES:	Tapia Hidalgo Adrián Ricardo
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	21 de Septiembre del 2017
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Mosquera Canchingre Guillermo Alfredo
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	<p>El desarrollo de sistemas robóticos asistenciales es un tema al cual se ha volcado la investigación en robótica en los últimos años. Estos sistemas tienen una íntima relación con una rama de la medicina llamada terapia ocupacional en la cual un cuidador se encarga de ayudar a este tipo de pacientes.</p> <p>A diario las personas con discapacidad tienen dificultad para realizar actividades cotidianas como alimentarse, esto hace sentir a los pacientes que son dependientes de otras personas para poder desenvolverse en su entorno con normalidad.</p> <p>Debido a los avances tecnológicos y la integración de la robótica en todos los campos tanto en ingeniería y medicina aparecen los</p>

	<p>manipuladores robóticos asistenciales con la intención de ayudar en el manejo y cuidado de personas con discapacidad.</p> <p>Este proyecto pretende proveer asistencia física para la alimentación correcta del sujeto en cuestión además de fomentar la inclusión de tecnología dirigida a personas dependientes que sufren limitaciones severas. En el documento a continuación se detalla el diseño, simulación y validación del funcionamiento de un brazo robótico asistencial con la capacidad de reconocer la boca de un paciente y alimentarlo de manera apropiada, basándose en requerimientos previamente planteados para su desarrollo además de un estudio de factibilidad con el objetivo de plasmar el proyecto no sólo como un prototipo sino como un modelo para producción en masa en un trabajo posterior que busque dicho alcance.</p> <p>El brazo robótico cuenta con un sistema de visión artificial el cual permite la interacción humano-robot (<i>HRI</i>) lo cual constituye un elemento fundamental para asegurar que este sistema es autónomo y útil para el usuario final.</p>
PALABRAS CLAVES:	Robótica, tecnología asistencial, alimentación, visión artificial, cuidado personal.
ABSTRACT:	The development of assistive robotic systems is a field to which robotics research has turned to in recent years. These systems are related to a medicine branch called occupational therapy in which a caregiver is in charge of helping this kind of patient.

	<p>Every day, disabled people have difficulty to do their daily activities like eating; this makes patients feel they are dependent on other people to develop their activities normally.</p> <p>Due to the robotics technological advances and integration in many fields of science such as in engineering as in medicine, assistive robotic manipulators appear with the intention of assisting in the management and care of people with disabilities.</p> <p>This project pretends to provide physical assistance for correct feeding of the patient; in addition, it encourages the inclusion of technology aimed to dependent people, which suffer severe limitations.</p> <p>This document details the design, simulation and validation of the assistive robotic arm behavior. The system is capable of properly feeding a person, after a recognition of patient's mouth, based on previously set requirements for its development and as a plus a feasibility study has been done thinking on shaping the project in the future not only as a prototype but also as a mass production model in a later work that seeks such scope.</p> <p>The robotic arm has an artificial vision system which allows the human-robot interaction (<i>HRI</i>) which is a fundamental element to assure the autonomy and usefulness of the system for the final user.</p>
KEYWORDS	Robotics, assistive technology, feeding, artificial vision, personal care.

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f.  _____

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

TAPIA HIDALGO ADRIÁN RICARDO

C.I. 1716265432

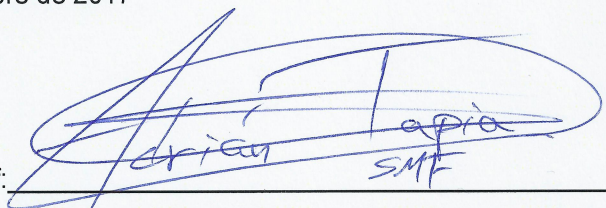


DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **TAPIA HIDALGO ADRIÁN RICARDO**, CI 1716265432 autor/a del proyecto titulado: **“Diseño de un brazo robótico asistencial para personas con discapacidad”** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** en la Universidad Tecnológica Equinoccial.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad Tecnológica Equinoccial a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 12 de septiembre de 2017

f. 

TAPIA HIDALGO ADRIÁN RICARDO

C.I. 1716265432

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PÁGINA

ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE ANEXOS	vii
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. MEDICINA Y ROBÓTICA.....	6
2.2. ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE DISCAPACIDAD EN EL ECUADOR	6
2.3. GRADOS DE DISCAPACIDAD (BAREMOS DE DISCAPACIDAD)	10
2.4. BRAZOS ROBÓTICOS ASISTENCIALES	11
2.4.1. SISTEMAS MONTADOS SOBRE SILLAS DE RUEDAS	11
2.4.1.1. MANUS	11
2.4.1.2. RAPTOR	12
2.4.1.3. ROMAN	13
2.4.2. SISTEMAS MÓVILES AUTÓNOMOS.....	13
2.4.2.1. MOVAID	13
2.4.2.2. HCR (HEALTH CARE ROBOT).....	13
2.4.3. SISTEMAS FIJOS.....	14
2.4.3.1. NEATER EATER	14
FUNCIONAMIENTO	14
APLICACIONES	15
2.4.3.2. MYSPOON	15
FUNCIONAMIENTO	15
APLICACIONES	17
3. METODOLOGÍA Y DISEÑO	18
3.1. METODOLOGÍA MECATRÓNICA	19
3.2. REQUERIMIENTOS	19
3.3. DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS	20

3.4.	DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA.....	21
3.5.	DISEÑO ESPECÍFICO.....	22
3.5.1.	SELECCIÓN DE MATERIALES.....	22
3.5.2.	DISEÑO MECÁNICO.....	24
3.5.2.1.	CÁLCULO DE GRADOS DE LIBERTAD	24
3.5.2.2.	ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE LOS MODELOS CAD.....	25
3.5.2.3.	ÁREA DE TRABAJO	29
3.5.3.	MODELO MATEMÁTICO.....	31
3.5.4.	CÁLCULO DE TORQUES	33
3.5.4.1.	SELECCIÓN DE SERVOMOTORES.....	40
3.5.5.	DISEÑO ELECTRÓNICO	41
3.5.5.1.	SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL SISTEMA DE CONTROL.....	41
3.5.5.2.	SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL SISTEMA DE POTENCIA.....	42
3.5.6.	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	45
3.5.6.1.	VISIÓN ARTIFICIAL	45
3.6.	INTEGRACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS	45
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1.	PRUEBAS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS.....	52
4.1.1.	SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL (RECONOCIMIENTO DE BOCA)	52
4.1.2.	SISTEMA DE CONTROL.....	56
4.1.3.	CÁLCULO DE ERRORES EN EL SISTEMA DE CONTROL.....	59
5.	ESTUDIO DE FACTIBILIDAD	64
5.1.	INVERSIÓN EN UN PROTOTIPO	65
5.2.	PRESUPUESTO PARA PRODUCCIÓN EN MASA	65
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
	CONCLUSIONES.....	70
	RECOMENDACIONES.....	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

PÁGINA

Tabla 1. Índices estadísticos de discapacidad a nivel provincial	8
Tabla 2. Índices estadísticos de discapacidad a nivel cantonal	8
Tabla 3. Cuadro comparativo para selección de materiales	23
Tabla 4. Propiedades físicas de los sub-ensambles del brazo robótico	26
Tabla 5. Selección se servomotores dado su torque (articulaciones 1 a 3)	40
Tabla 6. Selección se servomotores dado su torque (articulaciones 4 a 6)	41
Tabla 7. Corrientes especificadas por el fabricante bajo distintas condiciones de carga	42
Tabla 8. Cálculo de corrientes	44
Tabla 9. Promedio de error medido en cada articulación	63
Tabla 10. Costo de fabricación/adquisición de componentes	65
Tabla 11. Datos del producto a presupuestar	65
Tabla 12. Costo de equipamiento	66
Tabla 13. Costo de mano de obra	66
Tabla 14. Costo de materiales e insumos	66
Tabla 15. Costos indirectos	67
Tabla 16. Subtotal del presupuesto final	67
Tabla 17. Análisis de costo de garantía	67
Tabla 18. Presupuesto final del brazo robótico	68

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 1. Personas con discapacidad registradas.....	7
Figura 2. Personas con discapacidad registradas, por provincia.....	7
Figura 3. Personas con discapacidad registradas, por tipo de discapacidad.....	9
Figura 4. Personas con discapacidad registradas, por porcentaje de discapacidad.....	9
Figura 5. Personas con discapacidad registradas, por edad.....	10
Figura 6. Robot “MANUS” (robot móvil montado sobre una silla de ruedas).....	11
Figura 7. Software de robot “MANUS” utilizado para terapia cerebrovascular	12
Figura 8. Robot “RAPTOR” (robot móvil montado sobre una silla de ruedas).....	12
Figura 9. Robot autónomo “MOVAID”	13
Figura 10. Robot fijo “NEATER EATER”	14
Figura 11. Robot fijo “MYSPOON”	15
Figura 12. Selección de la bandeja de comida en modo manual	16
Figura 13. Selección de la bandeja de comida en modo semiautomático ...	16
Figura 14. Selección de la bandeja de comida en modo automático	17
Figura 15. Ejemplo de disposición de comida	17
Figura 16. Modelo en V.....	19
Figura 17. Diagrama explicativo del brazo robótico asistencial	21
Figura 18. Bosquejo del brazo robótico.....	24
Figura 19. Extensión máxima del brazo robótico.....	26
Figura 20. Longitudes de los eslabones.....	27
Figura 21. Ensamble final del brazo robótico	28
Figura 22. Posiciones extremas de brazo robótico.....	29
Figura 23. Vista de sección compartimiento para cuchara	30
Figura 24. Área de trabajo	30
Figura 25. Parámetros de Denavit-Hartenberg utilizados para el brazo robótico asistencial	32

Figura 26. Modelo matemático del brazo robótico	32
Figura 27. Cálculo de matriz homogénea de ejemplo	33
Figura 28. Cadena cinemática con seis eslabones	34
Figura 29. Cadena cinemática con cinco eslabones	35
Figura 30. Cadena cinemática con cuatro eslabones	36
Figura 31. Cadena cinemática con tres eslabones	37
Figura 32. Cadena cinemática con dos eslabones	38
Figura 33. Cadena cinemática con el eslabón final (“gripper”)	39
Figura 34. Tarjeta de control “ArbotiX-M Robocontroller”	42
Figura 35. Diagrama de interacción del Sistema de Control	45
Figura 36. Diagrama de interrelación de los diferentes sistemas	46
Figura 37. Diagrama de interacción del controlador	46
Figura 38. Diagrama de interacción del “gripper”	46
Figura 39. Funcionamiento de todos los sistemas en conjunto	47
Figura 40. Posición de las articulaciones	47
Figura 41. Velocidad de las articulaciones	48
Figura 42. Aceleración de las articulaciones	48
Figura 43. Torques medidos en la articulación dos	49
Figura 44. Trayectoria registrada durante la simulación	49
Figura 45. Modelo del brazo en Simulink	49
Figura 46. Modelo simulado en entorno virtual	50
Figura 47. Reconocimiento de boca a contraluz y uso de lentes	52
Figura 48. Reconocimiento de boca a contraluz y uso de lentes y barba	53
Figura 49. Reconocimiento de boca uso barba	53
Figura 50. Reconocimiento de boca con luz artificial blanca	54
Figura 51. Reconocimiento de boca con fondo oscuro	54
Figura 52. Reconocimiento de boca con poca luz	55
Figura 53. Reconocimiento de boca sin luz (sólo brillo de la pantalla del ordenador)	55
Figura 54. Reconocimiento de boca con imagen sobre expuesta con luz natural	56
Figura 55. Vista lateral del brazo robótico (articulaciones)	57
Figura 56. Posición de las articulaciones en movimiento de entrega de comida (regreso a la posición de espera)	57

Figura 57. Velocidad de las articulaciones en movimiento de entrega de comida (regreso a la posición de espera).....	58
Figura 58. Aceleración de las articulaciones en movimiento de entrega de comida (regreso a la posición de espera).....	58
Figura 59. Torque ejercido en la articulación dos en movimiento de entrega de comida (extensión y contracción del brazo)	59
Figura 60. Trayectoria seguida para recoger sopa	59
Figura 61. Medición de señales de entrada y salida en articulación q1	60
Figura 62. Medición de señales de entrada y salida en articulación q2	60
Figura 63. Medición de señales de entrada y salida en articulación q3	61
Figura 64. Medición de señales de entrada y salida en articulación q4	61
Figura 65. Medición de señales de entrada y salida en articulación q5	62
Figura 66. Medición de señales de entrada y salida en articulación q6	62

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO 1. PLANOS DE CONSTRUCCIÓN	74
ANEXO 2. PROFORMAS PARA IMPRESIÓN 3D	75

RESUMEN

El desarrollo de sistemas robóticos asistenciales es un tema al cual se ha volcado la investigación en robótica en los últimos años. Estos sistemas tienen una íntima relación con una rama de la medicina llamada terapia ocupacional en la cual un cuidador se encarga de ayudar a este tipo de pacientes.

A diario las personas con discapacidad tienen dificultad para realizar actividades cotidianas como alimentarse, esto hace sentir a los pacientes que son dependientes de otras personas para poder desenvolverse en su entorno con normalidad.

Debido a los avances tecnológicos y la integración de la robótica en todos los campos tanto en ingeniería y medicina aparecen los manipuladores robóticos asistenciales con la intención de ayudar en el manejo y cuidado de personas con discapacidad.

Este proyecto pretende proveer asistencia física para la alimentación correcta del sujeto en cuestión además de fomentar la inclusión de tecnología dirigida a personas dependientes que sufren limitaciones severas.

En el documento a continuación se detalla el diseño, simulación y validación del funcionamiento de un brazo robótico asistencial con la capacidad de reconocer la boca de un paciente y alimentarlo de manera apropiada, basándose en requerimientos previamente planteados para su desarrollo además de un estudio de factibilidad con el objetivo de plasmar el proyecto no sólo como un prototipo sino como un modelo para producción en masa en un trabajo posterior que busque dicho alcance.

El brazo robótico cuenta con un sistema de visión artificial que permite la interacción humano-robot (*HRI*) lo cual constituye un elemento fundamental para asegurar que este sistema es autónomo y útil para el usuario final.

ABSTRACT

The development of assistive robotic systems is a field to which robotics research has turned to in recent years. These systems are related to a medicine branch called occupational therapy in which a caregiver is in charge of helping this kind of patient.

Every day, disabled people have difficulty to do their daily activities like eating; this makes patients feel they are dependent on other people to develop their activities normally.

Due to the robotics technological advances and integration in many fields of science such as in engineering as in medicine, assistive robotic manipulators appear with the intention of assisting in the management and care of people with disabilities.

This project pretends to provide physical assistance for correct feeding of the patient; in addition, it encourages the inclusion of technology aimed to dependent people, which suffer severe limitations.

This document details the design, simulation and validation of the assistive robotic arm behavior. The system is capable of properly feeding a person, after a recognition of patient's mouth, based on previously set requirements for its development and as a plus a feasibility study has been done thinking on shaping the project in the future not only as a prototype but also as a mass production model in a later work that seeks such scope.

The robotic arm has an artificial vision system which allows the human-robot interaction (*HRI*) which is a fundamental element to assure the autonomy and usefulness of the system for the final user.

1. INTRODUCCIÓN

Un sinnúmero de tareas requieren la manipulación de objetos por parte de los seres humanos utilizando para ello sus extremidades superiores. Al existir cualquier problema con ellas debido a enfermedades o accidentes deriva en la incapacidad para realizar tareas fisiológicas como alimentarse por sí mismos.

Históricamente la terapia ocupacional se ha encargado de ayudar a los pacientes que han pasado por procesos infecciosos, quirúrgicos o accidentes cerebrovasculares incluidos derrames cerebrales o embolias, entre otros, después de los cuales su autonomía se ha visto reducida o ha desaparecido totalmente. A pesar que los métodos tradicionales son funcionales no pueden abarcar por completo todas las áreas debido a que los pacientes al ser impedidos de sus labores más básicas sufren de depresión y baja autoestima; este proyecto les brinda la posibilidad de valerse por sí mismos en una actividad repetitiva y cotidiana como es la alimentación lo cual les otorga algo más de independencia.

Según el Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades (CONADIS), 1.22% de la población sufre de alguna discapacidad. La provincia de Pichincha, en el segundo lugar, con 15.18% de discapacitados de los cuales el 44.37% tienen discapacidad física, esto invita a reflexionar sobre la necesidad de la creación de sistemas de robótica asistencial que faciliten la vida de los pacientes a un costo accesible de acuerdo con nuestro entorno económico. (Consejo Nacional de Discapacidades, 2017)

Aunque en Ecuador no se acostumbra a ver sistemas robóticos trabajando en actividades cotidianas, es importante resaltar la necesidad de que este tipo de tecnología sea incluida de manera proactiva para explotar todo su potencial.

El objetivo general de este proyecto es diseñar un brazo robótico, el cual tenga la capacidad de alimentar a personas que no pueden mover sus extremidades superiores, utilizando para ello visión artificial.

Los objetivos específicos a ser tomados en cuenta para el desarrollo apropiado del proyecto son:

- Determinar los grados de libertad que debe tener el brazo robótico para que pueda cumplir con las tareas requeridas
- Determinar las longitudes necesarias para los eslabonamientos con la finalidad de que el manipulador alcance la boca del paciente
- Definir las coordenadas de posición de la boca en el plano XZ utilizando para ello el software MATLAB
- Hallar los ángulos a los cuales deben ser movidos los eslabones utilizando cinemática inversa
- Diseñar el sistema articulado del brazo robótico mediante el uso de herramientas CAD para su posterior simulación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. MEDICINA Y ROBÓTICA

Los primeros esfuerzos de la robótica en el área de la medicina se direccionaron a la cirugía, este primer robot cirujano fue conocido como el "Arthrobot" el cual fue desarrollado en Vancouver, Canadá y fue utilizado por primera vez en el año de 1983. Fue desarrollado por un equipo liderado por el Dr. James McEwen y Geof Auchinlek, trabajando en colaboración con el cirujano ortopédico Dr. Brian Day. (Mohammad, 2013)

Las dos áreas específicas en las cuales la robótica ha dirigido sus desarrollos dentro de la medicina son: la asistencia a los médicos y la asistencia a los pacientes. En la primera los robots están enfocados y diseñados para cirugía, exploración, diagnóstico y terapia; mientras que en la segunda se subdividen en una que se encarga de la rehabilitación de los pacientes y la otra orientada a asistir a personas discapacitadas o de la tercera edad. (Feil-Seifer & Matarić, 2011)

La robótica asistencial se especializa en el diseño y desarrollo de robots que interactúan directamente con el paciente. La característica más importante de este tipo de equipos es que posibilita al usuario reincorporarse a sus actividades cotidianas por cuanto este cubre alguna de las deficiencias ocasionadas por condiciones médicas.

El objetivo es suplir una o varias actividades realizadas comúnmente por la terapia ocupacional pero brindando cierta autonomía a la persona que depende de estos métodos para cubrir sus necesidades.

2.2. ÍNDICES ESTADÍSTICOS DE DISCAPACIDAD EN EL ECUADOR

Con el fin de sustentar la necesidad de realización de este trabajo se llevó a cabo la recopilación de datos estadísticos de discapacidad en el Ecuador, los cuales se presentan a continuación.

En la Figura 1 se muestra el tipo de discapacidad y la cantidad de personas con esta, así como también la comparación del número de individuos de cada sexo a nivel nacional.



Figura 1. Personas con discapacidad registradas.
(Consejo Nacional de Discapacidades, 2017)

Según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), la población actual del Ecuador es de 16086362 personas (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2017); al comparar, se observa que a nivel nacional el número total de personas con discapacidad física es de 196312 que representa el 1.22% de la población del país.

La segunda provincia con mayor número de discapacitados es Pichincha con 62862 personas afectadas como se muestra en la Figura 2.

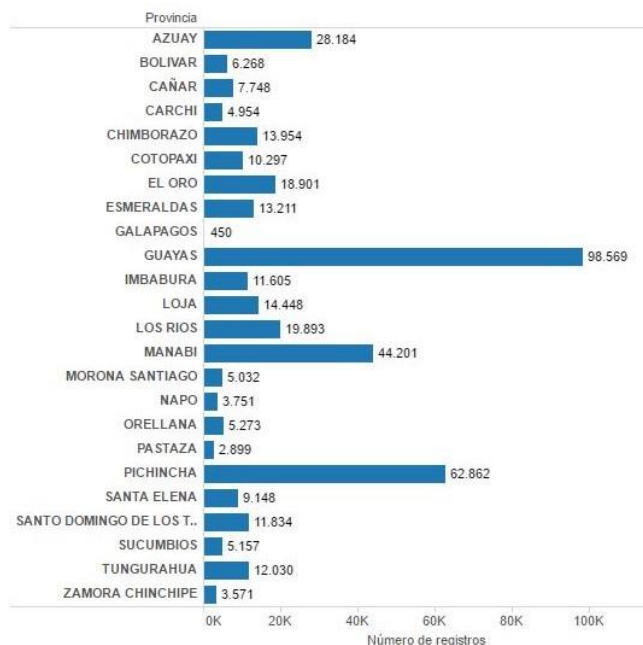


Figura 2. Personas con discapacidad registradas, por provincia.
(Consejo Nacional de Discapacidades, 2017)

En la Tabla 1 se observa que el total de personas con discapacidad física en Pichincha es de 27890, lo cual representa el 44.37% de la provincia.

Tabla 1. Índices estadísticos de discapacidad a nivel provincial

Provincia	Cantón	Tipo Discapacidad Actual	HOMBRE	MUJER	Total general
PICHINCHA	TODOS	AUDITIVA	5222	4638	9860
		FÍSICA	15032	12858	27890
		INTELECTUAL	7395	6114	13509
		LENGUAJE	467	349	816
		PSICOSOCIAL(MENTAL)	1860	1530	3390
		VISUAL	4238	3159	7397
Total General			34214	28648	62862

(Consejo Nacional de Discapacidades, 2017)

Por otra parte, en el cantón Quito existen 24781 personas con este tipo de discapacidad, que representan el 39.42% del total nacional como muestran los datos en la Tabla 2.

Tabla 2. Índices estadísticos de discapacidad a nivel cantonal

Provincia	Cantón	Tipo Discapacidad Actual	HOMBRE	MUJER	Total general
PICHINCHA	QUITO	AUDITIVA	4594	4063	8657
		FÍSICA	13267	11514	24781
		INTELECTUAL	6353	5276	11629
		LENGUAJE	395	310	705
		PSICOSOCIAL(MENTAL)	1703	1415	3118
		VISUAL	3796	2859	6655
Total General			30108	25437	55545

(Consejo Nacional de Discapacidades, 2017)

En la Figura 3 se observa claramente que el índice que sobresale de entre otros tipos de discapacidad debido a la cantidad de individuos es el de discapacidad física con 47.39% a nivel nacional.

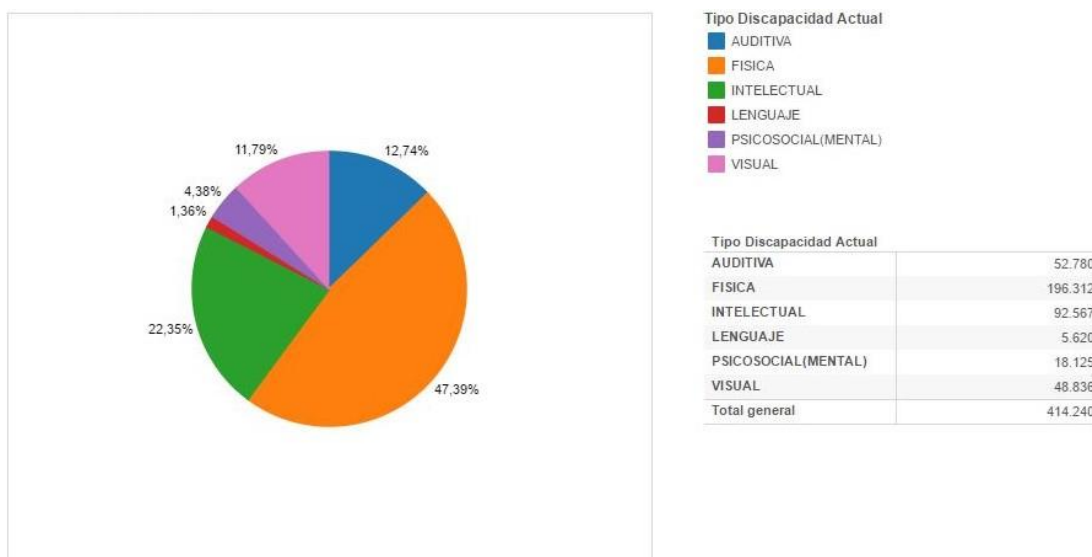


Figura 3. Personas con discapacidad registradas, por tipo de discapacidad.
(Consejo Nacional de Discapacidades, 2017)

Por otro lado se puede evidenciar en la Figura 4 que las personas con porcentajes de discapacidad entre el 50% al 74% y del 75% al 100% (que se encuentran representados en el diagrama en color verde y rojo respectivamente) abarca más de la mitad con respecto a los porcentajes de discapacidad menores al 50%. Esto quiere decir que las personas con porcentajes de discapacidad elevados son mayoría.

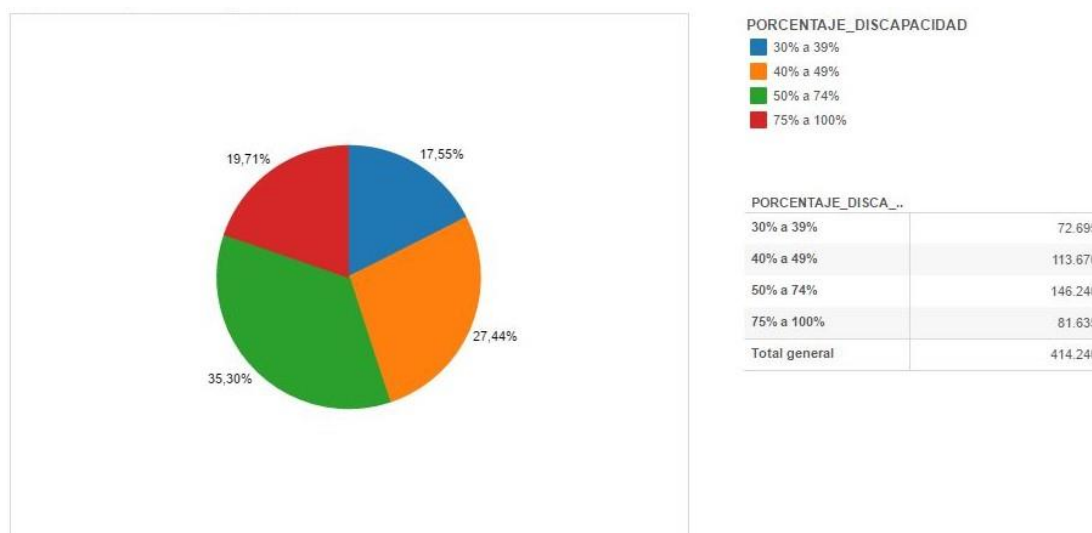


Figura 4. Personas con discapacidad registradas, por porcentaje de discapacidad.
(Consejo Nacional de Discapacidades, 2017)

Se evidencia que el 84.02% de la población con discapacidad tiene de 19 años en adelante (Figura 5), siendo la población joven (sin excluir al resto de subgrupos que pueden beneficiarse de este proyecto) la cual es la más afectada por algún tipo de discapacidad.

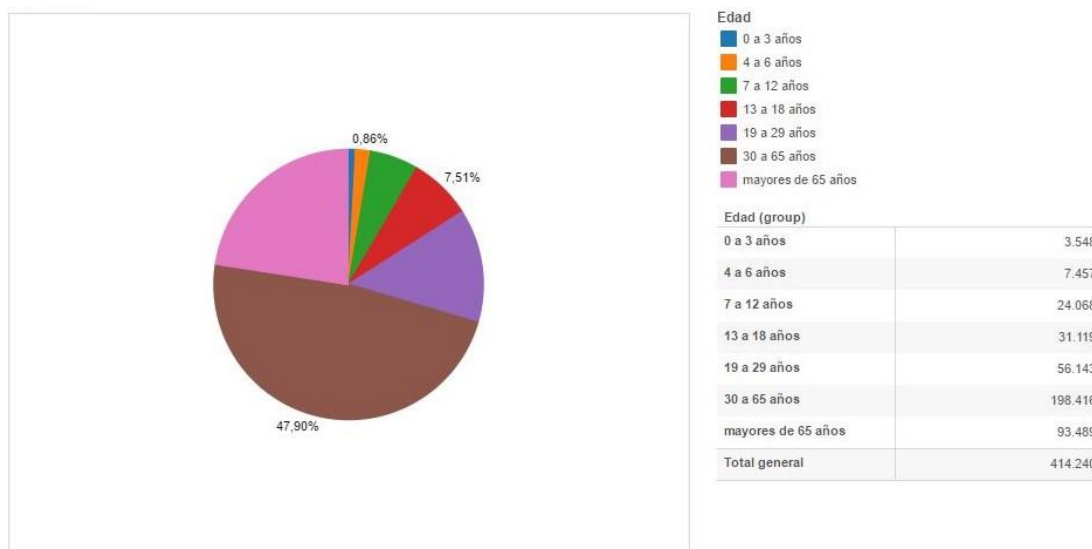


Figura 5. Personas con discapacidad registradas, por edad.
(Consejo Nacional de Discapacidades, 2017)

2.3. GRADOS DE DISCAPACIDAD (BAREMOS DE DISCAPACIDAD)

Grado I o discapacidad nula: 0% de discapacidad, corresponde a clase 1.

Clase 1: secuelas no disminuyen la realización de las actividades diarias.

Grado II o discapacidad leve: 1% a 24% de discapacidad, corresponde a clase 2.

Clase 2: secuelas determinan alguna dificultad para realizar las actividades de vida diaria.

Grado III o discapacidad moderada: 25% a 49% de discapacidad, corresponde a clase 3.

Clase 3: las secuelas imposibilitan la realización de algunas actividades de la vida diaria.

Grado IV o discapacidad severa o grave: 50% a 70% de discapacidad, corresponde a clase 4.

Clase 4: secuelas imposibilitan la mayoría de las actividades de la vida diaria generales más alguna de autocuidado.

Grado V o discapacidad muy grave: 75% o más de discapacidad, corresponde a clase 5.

Clase 5: secuelas imposibilitan la realización de las actividades de la vida diaria y de autocuidado, el paciente depende de otra persona. (Asociación Ecuatoriana de Psiquiatría, 2010)

2.4. BRAZOS ROBÓTICOS ASISTENCIALES

Tradicionalmente la robótica en este campo se ha centrado específicamente en lo que concierne a la parte física del robot y su control; los parámetros que han tratado de optimizarse se relacionan principalmente en el tiempo para finalizar una tarea, la precisión y el consumo de energía del dispositivo. Por esta razón todos los experimentos se centran en torno a estos indicadores. Debido a la interacción a la que están expuestos estos sistemas es importante incluir en la experimentación a todas aquellas personas que forman parte de este círculo, dejando de lado a sus desarrolladores.

A continuación se presentan algunos tipos de brazos robóticos asistenciales que se han creado en varios países del mundo, los cuales se han convertido en pioneros en esta rama.

2.4.1. SISTEMAS MONTADOS SOBRE SILLAS DE RUEDAS

La posibilidad de montar el robot sobre la propia silla de ruedas confiere al usuario la capacidad de manipular los objetos de su entorno, además de desplazarse libremente en él. (Jardón, 2006)

2.4.1.1. MANUS

El robot MANUS fue diseñado hace más de 20 años y después de su proceso de desarrollo, pruebas de usuario y modificaciones tanto en el sistema eléctrico y motor como en su programación, se encuentra comercialmente disponible; este consiste en un brazo robótico montado en una silla de ruedas (Figura 6), este sistema fue diseñado para personas con un porcentaje de discapacidad considerable en todas sus extremidades pero que posea cierto grado de control en sus manos para poder ejecutar los comandos del brazo robótico mediante un mando o joystick (Huete, Vicores, Martínez, Giménez, & Balaguer, 2012).



Figura 6. Robot “MANUS” (robot móvil montado sobre una silla de ruedas)
(Barea, 2012)

Debido a un tipo de entrenamiento de este robot que se observa en la Figura 7, el cual tiene la finalidad de educar al paciente en el uso del “joystick”, realizado con un monitor y dicha palanca, está considerado como un robot de terapia cerebrovascular puesto que permite la fisioterapia para pacientes que perdieron la movilidad en sus brazos.



Figura 7. Software de robot “MANUS” utilizado para terapia cerebrovascular (Barea, 2012)

2.4.1.2. RAPTOR

El raptor es un brazo robótico montado sobre una silla de ruedas que cuenta con cuatro grados de libertad como se muestra en la Figura 8; está diseñado para alcanzar objetos sobre la cabeza del paciente, sobre una mesa o también recoger objetos del suelo.



Figura 8. Robot “RAPTOR” (robot móvil montado sobre una silla de ruedas) (Fernandez, 2009)

2.4.1.3. ROMAN

Este tipo de robot fue diseñado en Alemania, el cual es un manipulador móvil que utiliza como base el brazo ligero MANUS. Su diferencia principal es que puede recibir comandos de voz para su funcionamiento, esto es muy importante sobre todo para personas que tienen discapacidades motoras muy severas.

2.4.2. SISTEMAS MÓVILES AUTÓNOMOS

Este tipo de sistemas disponen de una base móvil, lo cual le permite tener una mayor área de trabajo puesto que las acciones que realizan pueden ser alejadas del usuario cuando este lo requiera.

2.4.2.1. MOVAID

Este consta de estaciones fijas en puntos estratégicos de la casa así como un robot móvil, el cual se muestra en la Figura 9, éste tiene la capacidad de evadir objetos y dispone de un brazo robótico. Éste robot está proyectado para realizar tareas asistenciales en el hogar como calentar comida en un horno microondas, servir la comida en la cama, limpieza de la cocina, retirar las sábanas, entre otros. El sistema de navegación está basado en odometría, ultrasonido y láser.



Figura 9. Robot autónomo "MOVAID"
(Jardón, 2006)

2.4.2.2. HCR (HEALTH CARE ROBOT)

En este caso el robot cuenta con una cámara a color, sensores ultrasónicos, infrarrojos y de contacto lo cual le permite desplazarse de manera autónoma. El brazo robótico incorporado tiene seis grados de libertad y su alcance máximo es de 1 m de distancia. La interfaz hombre máquina trabaja con la información recogida por los sensores pero también acepta comandos del usuario como son voz y "joystick".

2.4.3. SISTEMAS FIJOS

2.4.3.1. NEATER EATER

El brazo robótico NEATER EATER V6 (Figura 10) puede ser utilizado por cualquier persona que tenga la capacidad de masticar y tragar. Es de diseño portable lo cual lo convierte en adecuado para salir a un restaurante o en la comida diaria. Existen múltiples opciones de programas para ajustarse a las necesidades del usuario con la opción de poder trabajar desde una tablet o teléfono inteligente u operarlo mediante una interfaz de pantalla táctil compuesta por botones.



Figura 10. Robot fijo “NEATER EATER”
(Neater Solutions Ltd., 2017)

FUNCIONAMIENTO

El “NEATER EATER” puede ser usado en una variedad de formas pero una de sus funciones principales es recoger la comida, luego la cuchara acerca la comida a la boca a una posición pre-programada y se detiene por un momento para que la persona pueda tomar la comida.

Dado que este robot trabaja con un plato circular uno de los controles permite girarlo de tal manera que se puedan alinear los alimentos a ser tomados así como también posee funciones para limpiar el exceso de algún líquido de la parte inferior de la cuchara en el filo del plato o vaciar este utensilio.

Para hallar las coordenadas de la boca se lo hace de manera manual y es así que los motores realizan el mapeo de la posición elegida.

La cuchara puede ser reemplazada por un tenedor y el NEATER EATER puede detectar este cambio de utensilio cambiando así la manera de tomar los alimentos puesto que al utilizar un tenedor en vez de tomar las cosas empujándolas ahora las punzará para recogerlas pero esta última función requiere calibrar la posición del tenedor y el ítem en el plato para poder tomarlo, asimismo posee una función para vaciar el tenedor.

Cabe destacar que el NEATER EATER puede detectar el tamaño del plato con el que está trabajando y así poder realizar los movimientos necesarios para trabajar con ese diámetro de vajilla.

APLICACIONES

El robot asistencial NEATER EATER puede trabajar tanto con sólidos como con líquidos debido a la versatilidad provista al trabajar con un plato circular.

2.4.3.2. MYSPOON

Este brazo robótico asistencial desarrollado en el Japón (Figura 11) puede ser utilizado con muchos tipos de comidas que pueden prepararse en casa debido a que no requiere paquetes especiales prefabricados así como también flexibilidad a consecuencia de que se adapta a tipos específicos de discapacidad utilizando mandos intercambiables.



Figura 11. Robot fijo "MYSPOON"
(SECOM CO. LTD., 2017)

FUNCIONAMIENTO

El robot MYSPOON puede ser utilizado en sus tres modalidades:

Modo manual.- Como se detalla en la Figura 12, este modo permite al usuario seleccionar el compartimento del cual desea obtener la comida, una vez en esta posición se debe acercar la cuchara al ítem, a continuación se atrapa el ítem y se lo transporta hasta la boca del paciente.

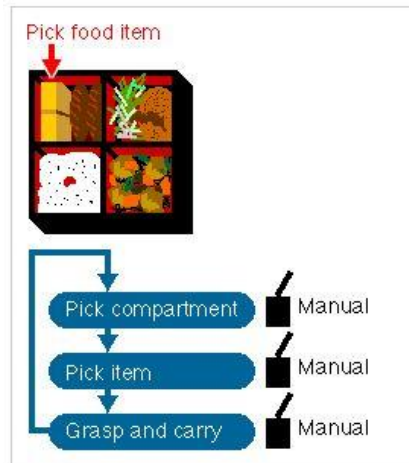


Figura 12. Selección de la bandeja de comida en modo manual (SECOM CO. LTD., 2017)

Modo semiautomático.- En la Figura 13 se indica el funcionamiento de este modo, el paciente sólo puede escoger el compartimento en el cual se encuentra el ítem deseado, el resto de acciones son realizadas de manera automática por el robot.

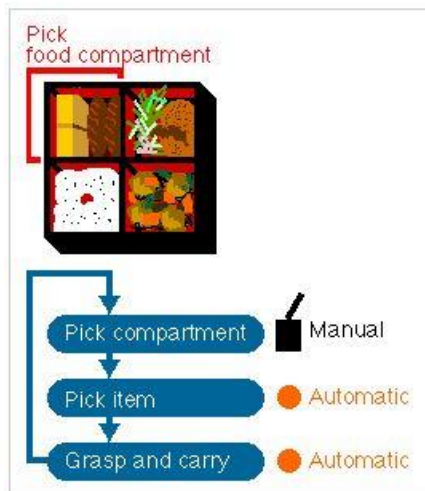


Figura 13. Selección de la bandeja de comida en modo semiautomático (SECOM CO. LTD., 2017)

Modo automático.- En el modo a continuación (Figura 14), el robot sólo requiere que se presione un botón para que la secuencia pre programada de inicio, en la cual el robot realiza de manera automática todos los pasos antes descritos.

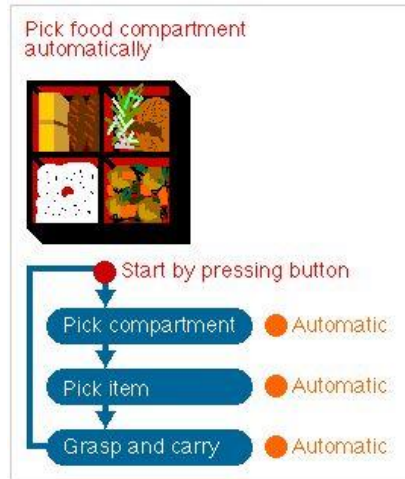


Figura 14. Selección de la bandeja de comida en modo automático (SECOM CO. LTD., 2017)

APLICACIONES

Este robot permite el consumo de varios tipos de comida. Dentro de las comidas sólidas se tiene: arroz, pollo frito, salsas, huevos revueltos, fruta, postres; alimentos delgados tales como vegetales revueltos o ensaladas; alimentos suaves como ensalada de papa, tofu, mermelada y finalmente tallarín entre los cuales se recomienda tallarines revueltos, tallarines chinos, entre otras pastas tal y como se muestra en el ejemplo de disposición de la comida (arroz, tofu, ensalada, tallarín, pollo frito) del robot "MYSPOON" con sus respectivos compartimentos en la Figura 15.



Figura 15. Ejemplo de disposición de comida (SECOM CO. LTD., 2017)

3. METODOLOGÍA Y DISEÑO

3.1. METODOLOGÍA MECATRÓNICA

La estructura de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, con la finalidad de obtener un producto de provecho para los usuarios a los cuales está enfocado, será la que se observa en la Figura 16.

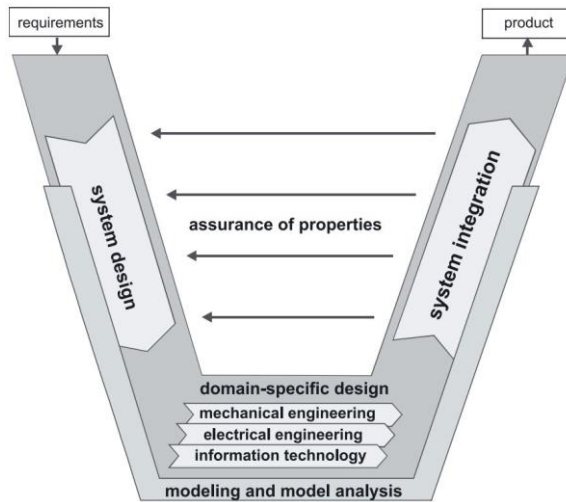


Figura 16. Modelo en V
(Verein Deutscher Ingenieure, 2004)

3.2. REQUERIMIENTOS

Para definir los requerimientos que debe cumplir el brazo se toma en cuenta: alcance máximo, montaje sencillo, portable, contar con los grados de libertad suficientes para un óptimo desempeño.

El paciente debe tener control en los movimientos al menos de su cuello y boca para completar la operación de alimentación.

En cuanto al diseño general se establece cómo se encuentra constituido el sistema de manera general y los elementos que lo conforman, de igual manera el comportamiento del brazo robótico al estar en funcionamiento.

El diseño específico consta de tres etapas concurrentes:

- Diseño mecánico.- En esta etapa se determina el modelo matemático, el cual será el encargado de mantener la relación de posición de todos los eslabones que componen el brazo robótico respecto a un eje de coordenadas absoluto, así mismo se establece la dimensión de los eslabones para su posterior modelado con herramientas CAD.
- Diseño eléctrico y electrónico: En esta etapa se analiza tanto la manera de energizar los actuadores que forman parte del brazo robótico como el envío de las señales de control que permiten el posicionamiento correcto del efector final y su respectiva alimentación.
- Diseño de control.- Se configurará un sistema de visión artificial que le permita al robot identificar la boca de la persona, es así que se vuelve

indispensable determinar cuál es el algoritmo más apropiado que permita reconocer la boca del paciente para el posterior cálculo de las coordenadas en el plano XZ (perpendicular al plano horizontal); además de esto se debe obtener el modelo matemático que represente el brazo robótico con los respectivos grados de libertad que se definirán posteriormente.

Integración de los sistemas.- Se integrarán los diferentes modelos y algoritmos, tanto matemático, de visión artificial y CAD por medio de una plataforma informática para poder analizar su comportamiento y de esta manera detectar incompatibilidades entre los elementos que conforman el sistema.

Comprobación de propiedades.- Se confirma el cumplimiento de los requerimientos planteados.

Producto.- Diseño de un prototipo de un brazo robótico validado que cumple con los requerimientos establecidos al inicio del proyecto.

3.3. DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS

El sistema de visión artificial debe ser capaz de reconocer la boca del sujeto antes de realizar el movimiento de entrega de comida con la finalidad de acercarse a la boca tanto como sea posible.

El brazo robótico debe contar con los grados de libertad necesarios para poder alcanzar todas las posiciones que se encuentren dentro de su rango de trabajo.

El brazo robótico debe ser colocado en superficies planas y sin inclinaciones respecto al piso como mesones o mesas.

El área de trabajo del brazo robótico no deberá superar los 0.4 m².

El brazo extendido, medido desde la articulación del hombro hasta el elemento que tiene contacto con el paciente (cuchara, tenedor, etc.), no deberá superar los 800 mm de longitud.

Debido a que la única función que cumple el sistema es la alimentación de un paciente, su herramienta de alimentación se diseñará de manera tal que no pueda abarcar un volumen considerable y por lo tanto la masa contenida en cada movimiento de recolección no superará los 10 g, por ende ésta será la carga máxima a la cual se verá sometido el brazo robótico.

El brazo robótico y todos sus componentes tales como actuadores y cableado no debe tener un peso mayor a 3 kg con la finalidad de que sea portable.

El tiempo de respuesta del robot debe ser menor a cinco segundos desde que recibe las coordenadas de la boca hasta que entrega el alimento al paciente.

La temperatura de trabajo a la cual estará expuesto el robot será como máximo 100°C (por ejemplo, en los componentes que se encuentren en contacto directo con la comida) es por esto que se debe escoger un material que funcione apropiadamente por debajo de esta temperatura.

Debido a que el robot debe ser versátil en cuanto a su posicionamiento no deberá contar con puntos de sujeción específicos o dispositivos de soporte como ventosas o tornillos que requieran un ensamble permanente sino más bien sea colocado en diferentes superficies de acuerdo a las necesidades del usuario.

3.4. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA

A continuación se detalla cómo estará constituido el brazo robótico asistencial con el siguiente diagrama (Figura 17):

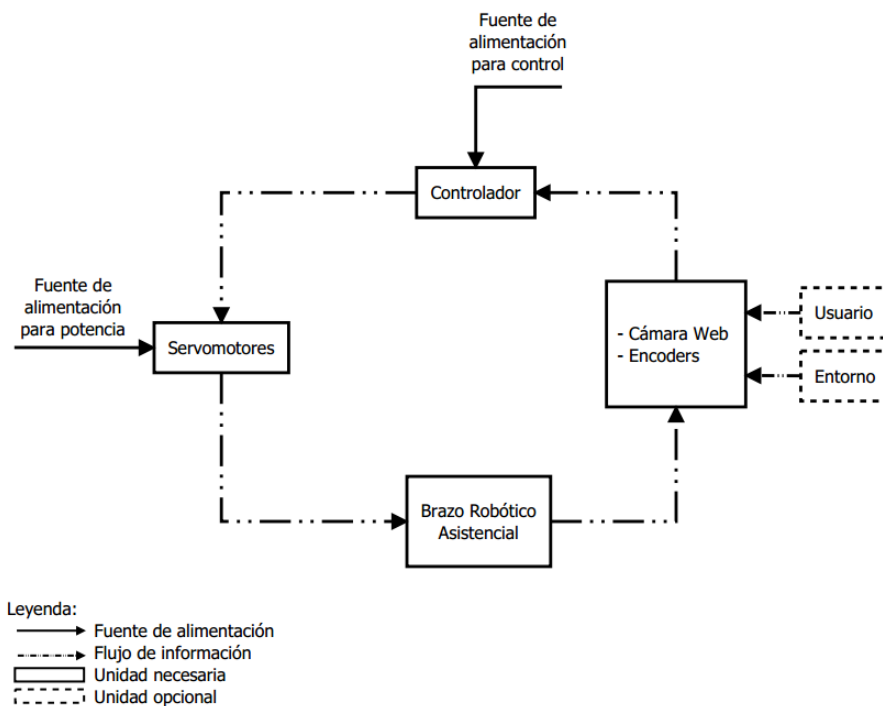


Figura 17. Diagrama explicativo del brazo robótico asistencial

Descripción:

El sistema estará alimentado por dos fuentes de corriente continua, las cuales proveerán de energía al circuito de control y a los servomotores del brazo robótico.

Los actuadores que forman parte del brazo robótico son todos servomotores que tienen diferentes torques dependiendo del requerimiento mecánico en cada articulación.

Los sensores a ser utilizados serán: una cámara web para capturar una imagen del sujeto y así poder encontrar las coordenadas de la boca de este; además de esto se requieren “encoders” para obtener las posiciones de los diferentes actuadores en cada articulación (éstos se encuentran dentro de cada uno de los actuadores).

El entorno representa las condiciones ambientales tanto de iluminación como de fondos de contraste que tiene el usuario al momento de capturar la imagen a ser analizada.

El controlador estará conformado por el modelo matemático del brazo robótico, algoritmos para reconocimiento de características faciales mediante el uso de visión artificial, algoritmos de cálculo tanto de cinemática directa como inversa y el algoritmo de comparación de las posiciones de los actuadores con respecto a las posiciones calculadas.

El brazo robótico asistencial está formado por los eslabones de la cadena cinemática que lo componen y tienen la función de dotar al brazo de los grados de libertad necesarios para que cumpla la función para la cual fue diseñado; también incluye los puntos de anclaje para el correcto ajuste de los servomotores y las canalizaciones necesarias por las cuales recorre el cableado tanto eléctrico para alimentar a los actuadores como el de información, por el cual se envían e interpretan las diferentes señales generadas por la tarjeta de control o recibidas desde los encoders.

3.5. DISEÑO ESPECÍFICO

3.5.1. SELECCIÓN DE MATERIALES

Los elementos constitutivos del brazo robótico deben cumplir con dos características fundamentales: ser ligero y resistente a la corrosión. Como materiales resistentes a la corrosión tenemos por ejemplo aceros inoxidable, aluminios y plásticos.

Con la finalidad de que el sistema sea liviano y fácil de manufacturar se propone la utilización de algún tipo de plástico que cumpla con los requerimientos mecánicos del proyecto y además esté disponible en el mercado local.

De los materiales antes mencionados, el único que cumple con ambas características pertenece a la familia de los plásticos, por esta razón se descartan automáticamente materiales de tipo metálico puesto que supondría

un peso muy grande y los actuadores a ser utilizados tendrían que ser de mayor torque, encareciendo así la manufactura.

En la Tabla 3 se observan las propiedades de diferentes tipos de plásticos para poder realizar el análisis respectivo previo a su selección.

Tabla 3. Cuadro comparativo para selección de materiales

Material	Precio (\$/kg)	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la flexión a 23°C (MPa)	Resistencia al impacto (ft·lb/in ²)	Temperatura de uso continuo (°C)
ABS	16.97	1.04 a 1.11	51.99 a 81.36	2.7 a 14	60 a 75
PLA	19.99	1,24 a 1,26	60.87 a 105.28	1.6 a 3	45 a 50
PET	21.99	1.25 a 1.41	73.08 a 164.09	0.95 a 3.7	96 a 164

(UL LLC, 2017a, 2017b, 2017c)

Se considerará al plástico ABS para la fabricación de los componentes de la cadena cinemática del brazo robótico ya que a pesar que no cuenta con la mejor temperatura máxima para uso continuo es suficiente para la aplicación propuesta y además cumple con el requerimiento fundamental de poseer la menor densidad y por lo tanto el menor peso.

Por otro lado, siguiendo la normativa propuesta por el Instituto Ecuatoriano de Normalización, INEN, en el Reglamento Técnico Ecuatoriano *RTE INEN 100* “MATERIALES Y ARTÍCULOS PLÁSTICOS DESTINADOS A ESTAR EN CONTACTO CON LOS ALIMENTOS”; dentro de la cual se especifica en la lista de materiales aceptados para este fin el Tereftalato de polietileno (*PET* o *PETE*) que también fue considerado dentro del estudio de materiales propuestos para la fabricación de los componentes del brazo robótico (INEN, 2014).

Al ser de carácter obligatorio es indispensable que se realice la impresión en este material de dos de los componentes del brazo robótico (el plato y la cuchara) para que de esta manera se pueda escalar el proyecto de un simple prototipo a un modelo de producción en masa.

3.5.2. DISEÑO MECÁNICO

3.5.2.1. CÁLCULO DE GRADOS DE LIBERTAD

Según Corke, un brazo robótico con seis grados de libertad (GDL) puede alcanzar virtualmente cualquier posición que se encuentre dentro de su área de trabajo además de ser la forma más común para aplicaciones de brazos robóticos industriales. (Corke, 2015a).

Por esta razón se ha decidido que el brazo robótico cuente con dicho número de grados de libertad como se observa en la Figura 18 donde se contabilizan tanto el número de eslabones como de juntas.

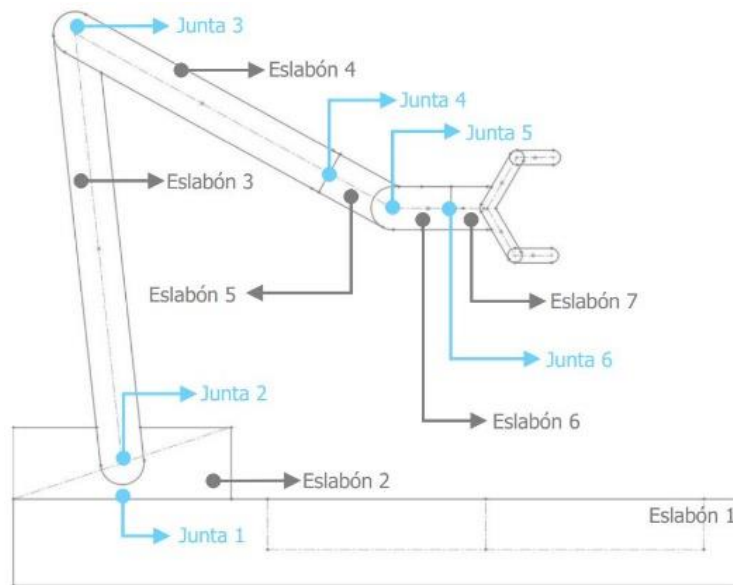


Figura 18. Bosquejo del brazo robótico

Cabe destacar que todas las juntas son revolutas y que además las juntas uno, cuatro y seis son concéntricas al eje axial.

De acuerdo con Norton, el grado de libertad para mecanismos espaciales se obtiene ampliando el concepto de Gruebler a tres dimensiones, lo cual “conduce a la ecuación de movilidad de Kutzbach para eslabonamientos espaciales” (Norton, 2009).

Ecuación de movilidad de Kutzbach:

$$M = 6(L - 1) - 5J_1 - 4J_2 - 3J_3 - 2J_4 - J_5 \quad (1)$$

donde:

$M \rightarrow$ movilidad del sistema

$L \rightarrow$ número de eslabones que componen la cadena cinemática

$J_i \rightarrow$ número de grados que elimina la junta

Debido a que no existen juntas que posean dos, tres, cuatro o cinco grados de libertad, sino que todas y cada una de ellas poseen sólo un grado de libertad, esto convierte en cero a todos los valores con subíndices con dicho número. Esto se debe a que una junta de un grado de libertad elimina 5 GDL, una de dos grados de libertad elimina 4 GDL, etc.

entonces:

$$L = 7$$

$$J_1 = 6$$

$$J_2 = J_3 = J_4 = J_5 = 0$$

Reemplazando estos valores se obtiene:

$$M = 6(7 - 1) - 5(6) - 0$$

$$M = 6(6) - 30$$

$$M = 36 - 30$$

$$\boxed{M = 6 \text{ GDL}}$$

Debido a que se ha comprobado que el robot cuenta con seis grados de libertad implica que posee siete eslabones en su cadena cinemática abierta.

Para el modelado CAD se tomará como referencia este cálculo para proceder a diseñar cada uno de los eslabones necesarios.

3.5.2.2. ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE LOS MODELOS CAD

Para la determinación de la longitud total del brazo robótico (Figura 19) se tomó en cuenta la longitud promedio del brazo de una mujer de entre 18 a 65 años de edad (686mm) y la de un hombre con el mismo rango de edad (748mm) como base de un estudio realizado en México por un grupo de investigadores de dicho país. (Ávila-Chaurand, León Prado, & González Muñoz, 2007)

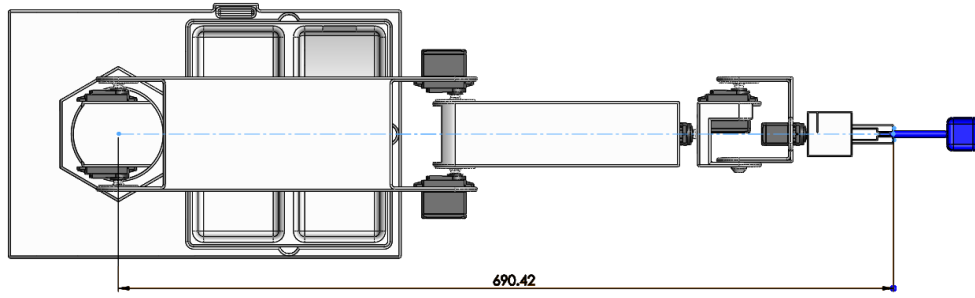


Figura 19. Extensión máxima del brazo robótico

En la Tabla 4 se pueden observar los distintos sub-ensambles (o partes) que constituyen el brazo robótico así como las propiedades físicas necesarias para el análisis posterior en MATLAB.

Tabla 4. Propiedades físicas de los sub-ensambles del brazo robótico

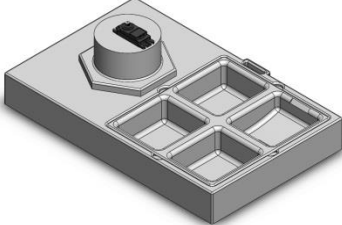
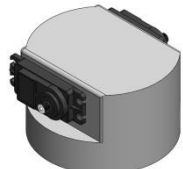

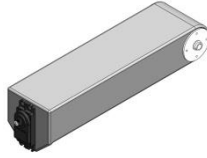
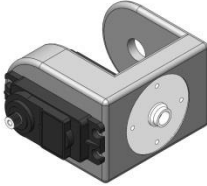

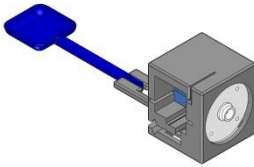
Propiedades de Eslabones del Brazo Robótico Asistencial					
Eslabón	Nombre	Masa (g)	Dimensiones (mm)		
			x	y	z
	Bancada	1566.65	226	350	111.3
	Cintura	213	90.69	80	50
	Brazo	340.42	149.57	340	40
	Antebrazo	205.46	58.09	218.79	57.5

Tabla 4. Propiedades físicas de los sub-ensambles del brazo robótico continuación...

Propiedades de Eslabones del Brazo Robótico Asistencial					
Eslabón	Nombre	Masa (g)	Dimensiones (mm)		
			x	y	z
	Muñeca1	72.7	74.39	53.04	40
	Muñeca2	77.08	84.9	76.02	63
	Gripper	57.45	40	153.21	45

Las medidas de todos los eslabones que son parte de la cadena cinemática del brazo robótico asistencial se detallan a continuación (Figura 20).

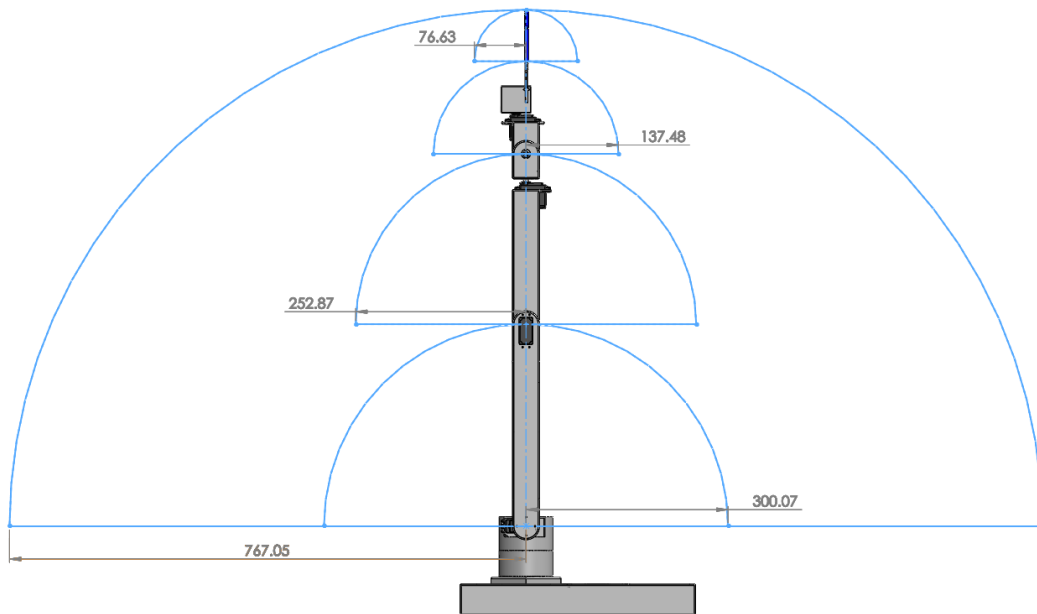


Figura 20. Longitudes de los eslabones

Una imagen renderizada del ensamblaje, que representa de manera realista el aspecto que tendría el brazo robótico, de manera completa y detallada con todas las partes que lo constituyen se puede apreciar en la Figura 21.

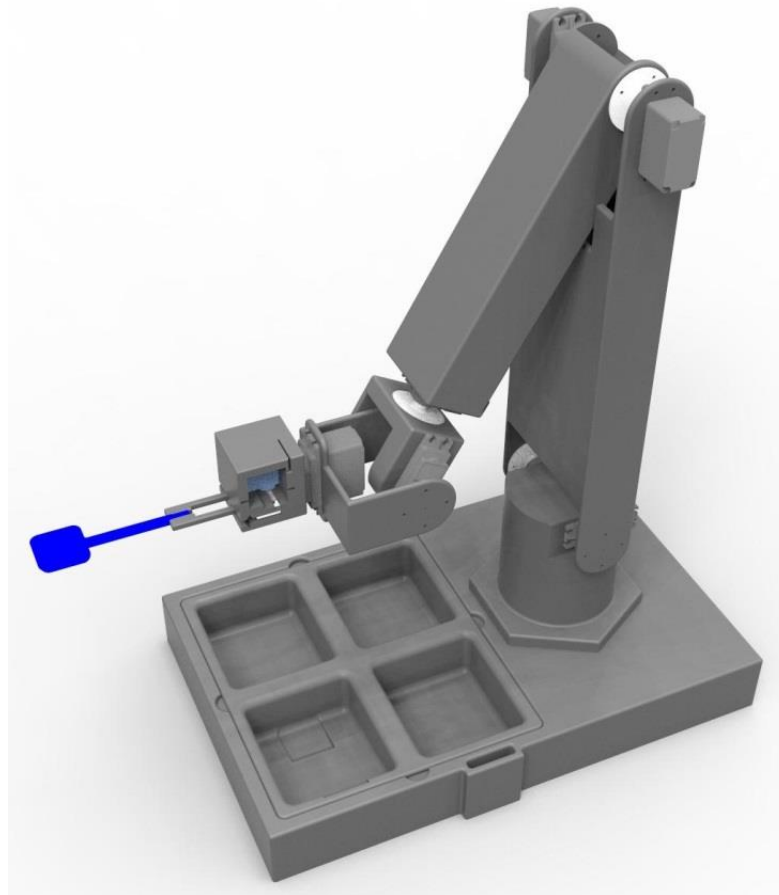


Figura 21. Ensamble final del brazo robótico

El diseño del brazo robótico está basado en la normativa ISO 13482 la cual contempla entre otros aspectos los estándares de seguridad para este tipo de robots asistenciales y los define como: “Robots de cuidado personal”, aquí se destaca que normalmente son de mucha menor potencia que los robots industriales o de manufactura, no necesitan ser muy precisos y son utilizados por usuarios en entornos no estructurados para realizar una amplia gama de tareas (o una tarea específica), la mayoría de las cuales involucrarán la interacción humano-robot además del contacto humano-robot. Este tipo de robots son considerados de asistencia en el hogar (Virk & Cameron, 2014).

Se tomó especial cuidado en los siguientes aspectos a la hora del diseño:

- Peligros relacionados con la forma del robot
- Peligros relacionados con el movimiento del robot
- Control de velocidad relacionado con la seguridad
- Límites a los espacios operativos (ISO, 2014).

3.5.2.3. ÁREA DE TRABAJO

El área de trabajo del brazo robótico asistencial se ha calculado utilizando las posiciones en las cuales el sistema tiene el alcance máximo. Estas dos posiciones delimitan esos valores que tiene al recoger la sopa y entregar el alimento al usuario respectivamente como se muestra en la Figura 22.

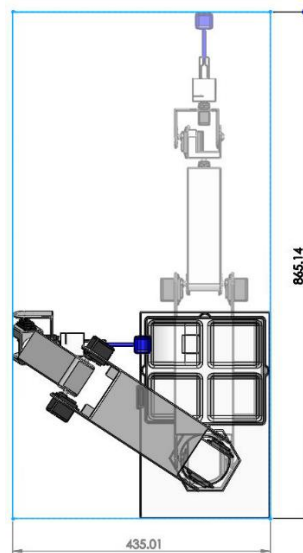


Figura 22. Posiciones extremas de brazo robótico

El área total ocupada por el brazo robótico en el plano XY cuando este se encuentra en funcionamiento se calcula a continuación:

Área:

$$A = a \times b \quad (2)$$

donde:

$$a = 435.01 \text{ [cm]} = 0.435 \text{ [m]}$$

$$b = 865.14 \text{ [cm]} = 0.865 \text{ [m]}$$

entonces:

$$A = 0.435 \text{ [m]} \times 0.865 \text{ [m]}$$

$$A = 0.376 \text{ [m}^2\text{]}$$

Es importante señalar que el brazo robótico cuenta con un compartimiento diseñado exclusivamente para el almacenaje del utensilio a ser utilizado (en este caso la cuchara) de tal manera que ésta se encuentre limpia y lista para usarse en cada ocasión (Figura 23).

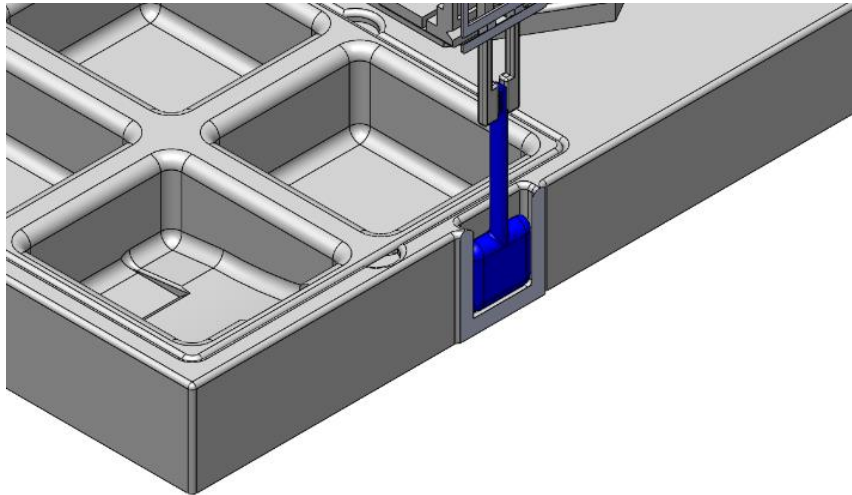


Figura 23. Vista de sección compartimiento para cuchara

Al posicionar el sistema a la distancia establecida para su funcionamiento, el área de trabajo del brazo robótico se define de forma circular debido a que los movimientos a los cuales se encuentra restringido generan un volumen similar a un cono regular recto tal como se muestra en la Figura 24 en la cual se encuentra simbolizado mediante un modelo en 3D el sujeto a ser alimentado. Se observa también que el radio de acción alrededor de la boca del paciente se encuentra representado por la letra r , de esta manera se puede calcular el área en centímetros dentro de la cual el brazo robótico puede alimentar al paciente.

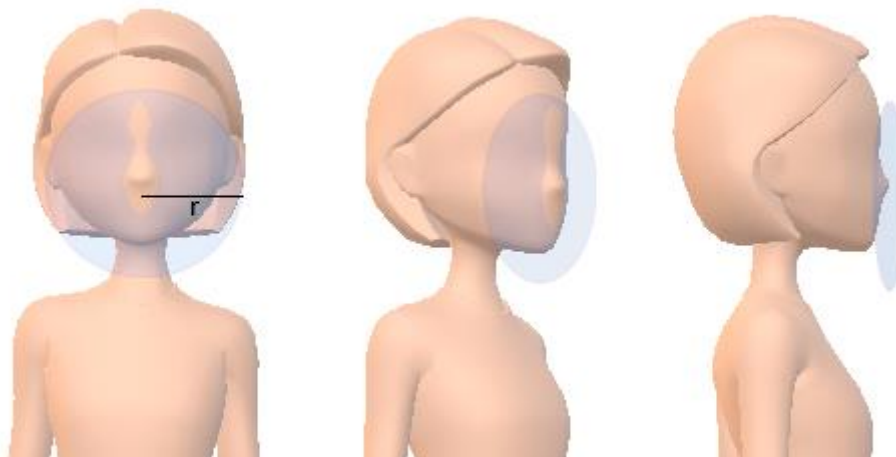


Figura 24. Área de trabajo

El área total en la que puede trabajar el brazo robótico en el plano YZ, cuando este se encuentra alimentando al paciente se calcula a continuación, utilizando como r un valor estimado medido en Solidworks:

Área:

$$A = \pi \times r^2 \quad (3)$$

donde:

π : constante que relaciona perímetro con diámetro de la circunferencia

r : radio máximo alcanzado por el sistema

entonces:

$$r = 8.744 \text{ [cm]}$$

$$A = 3.1415 \times (8.744)^2 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$A = 240.19 \text{ [cm}^2\text{]}$$

De esta manera queda definido el área de trabajo que requiere el sistema para su correcto funcionamiento tanto en el área que necesita para realizar sus operaciones como la que puede alcanzar cerca de la cara del paciente.

3.5.3. MODELO MATEMÁTICO

Para obtener el modelo matemático que represente al brazo robótico con los respectivos grados de libertad que han sido definidos previamente se ha utilizado la herramienta de software libre para este fin llamada "Robotics Toolbox for Matlab" versión 9.10 creada por Peter Corke en el año de 1996, basada en su tesis doctoral y la cual se ha sido actualizada regularmente hasta la actualidad. (Corke, 2017)

De acuerdo con Corke, Robotics Toolbox (RTB) ofrece una amplia gama de funciones para simular robots móviles y tipo brazo. Manipuladores arbitrarios tipo "Serial Link" pueden ser creados y el toolbox proporciona funciones tanto para la cinemática directa como inversa así como también dinámica. El toolbox incluye funciones para manipular y convertir entre tipos de datos tales como vectores, transformaciones homogéneas, representaciones de tres ángulos y unidades cuaternios que son necesarias para representar la posición y la orientación tridimensional. (Corke, 2011)

Para encontrar tanto la cinemática inversa como la directa del brazo robótico se utilizó la metodología ideada por Jacques Denavit y Richard Hartenberg en la cual se tienen que definir sus distintos parámetros.

Los parámetros definidos para el brazo robótico que se muestran en la Figura 25, que devuelve el programa al llamar a dicha cadena cinemática.


```

>> mdl_asist
>> asist

asist =

Brazo Asistencial (6 axis, RRRRRR, stdDH, fastRNE)
Parámetros de Denavit - Hartenberg usados en el modelo;
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
| j |   theta |     d |     a |   alpha |   offset |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| 1 |     q1 |     0 |     0 |   1.571 |     0 |
| 2 |     q2 |     0 | 0.3001 |     0 |     0 |
| 3 |     q3 |     0 | 0.2529 | -1.571 |     0 |
| 4 |     q4 |     0 |     0 |   1.571 |     0 |
| 5 |     q5 |     0 |     0 | -1.571 |     0 |
| 6 |     q6 |     0 | 0.2139 |     0 |     0 |
+-----+-----+-----+-----+-----+

grav = 0 base = 1 0 0 0 tool = 1 0 0 0
        0         0 1 0 0         0 1 0 0
        9.81      0 0 1 0         0 0 1 0
                0 0 0 1         0 0 0 1
>> |

```

Figura 25. Parámetros de Denavit-Hartenberg utilizados para el brazo robótico asistencial

Cabe destacar que el programa nos muestra el ángulo de cada una de las juntas de manera simbólica ya que es de este modo como realiza el álgebra pertinente para realizar los cálculos cinemáticos así como el número de ejes que posee el brazo robótico y a qué tipo de junta pertenece cada uno de ellos; vemos por lo tanto que todas las juntas son rotacionales y se trabaja con la metodología estándar para Denavit-Hartenberg.

A continuación se muestra el modelo matemático del brazo robótico expresado como una matriz de transformación homogénea del último eslabón de la cadena cinemática abierta que representa a dicho sistema donde sus elementos han sido calculados de manera simbólica (Figura 26).

```

Command Window
>> mdl_asist
>> syms q1 q2 q3 q4 q5 q6
>> qi = horzcat(q1,q2,q3,q4,q5,q6);
>> modelo = asist.fkine(qi)

modelo =

[
      cos(q6)*cos(q5)*cos(q4)*((81129638414606686663546605165575*cos(q1 + q2 + q3))/162
[ cos(q6)*cos(q5)*sin(q4)*((403032377821159498335588895202304015643716683825*cos(q1 + q2 + q3))/1
[
[
fx >> |

```

Figura 26. Modelo matemático del brazo robótico

Debido a la extensión de la matriz es imposible desplegarla por completo y es por ello que se utilizará un ejemplo en el cual se ha realizado esta operación con un modelo de una cadena cinemática de dos eslabones con la finalidad de poder observar una analogía de los cálculos simbólicos realizados por el software (Figura 27).

```

>> mdl_twolink
>> syms q1 q2
>> twolink.fkine([q2](q1))

ans =

[ cos(q1 + q2), -sin(q1 + q2), 0, cos(q1 + q2) + cos(q1)]
[ sin(q1 + q2),  cos(q1 + q2), 0, sin(q1 + q2) + sin(q1)]
[ 0, 0, 0, 1, 0]
[ 0, 0, 0, 0, 1]

```

Figura 27. Cálculo de matriz homogénea de ejemplo (Corke, 2015b)

3.5.4. CÁLCULO DE TORQUES

Para calcular los torques en cada articulación es necesario utilizar dinámica puesto que la cadena cinemática se encontrará en constante movimiento y esto aumenta la magnitud del momento de torsión que se debe ejercer en cada junta.

Conforme a lo expuesto por Bedford, las ecuaciones de movimiento para un cuerpo rígido en movimiento plano incluyen la segunda ley de Newton,

$$F = m \times a \quad (4)$$

donde a es la aceleración del centro de masa. Si el cuerpo rígido gira respecto a un eje fijo O , el momento total respecto a O es igual al producto del momento de inercia respecto a O por la aceleración angular. (Bedford & Fowler, 2012)

La fórmula para torque dinámico, equivalente a la expresada en la segunda ley de Newton es:

$$\sum \tau = I * \alpha \quad (5)$$

donde:

I : *inercia del ensamble*

α : *aceleración angular*

Esta fórmula es un facsímil de la segunda ley de Newton donde el momento de inercia y aceleración angular son los equivalentes rotacionales de la masa y la aceleración respectivamente.

Para el cálculo de los torques en cada articulación se utilizan los datos que se han obtenido con la herramienta “*propiedades de masa*”, las cuales son calculadas para el ensamble mediante Solidworks y se muestran a continuación con sus respectivos cálculos.

Articulación de la cintura:

Eslabones necesarios para el cálculo dinámico en la articulación 1 y localización del centro de masa del ensamble respecto al eje de giro correspondiente (Figura 28).

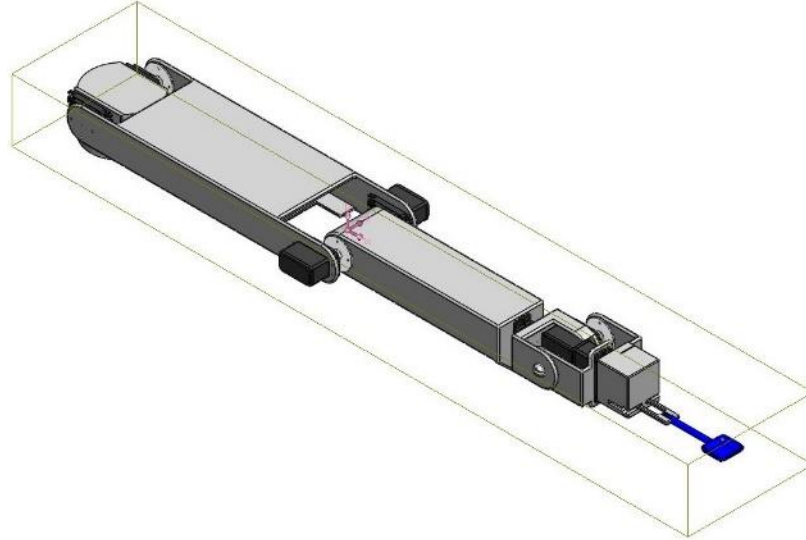


Figura 28. Cadena cinemática con seis eslabones

Datos obtenidos mediante Solidworks:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= 0.2816 \left[\frac{rad}{s^2} \right] \\ I_{zz1} &= 0.1184 [kg * m^2] \\ m_1 &= 0.9661 [kg] \\ r_1 &= 0.2810 [m]\end{aligned}$$

Cálculos dinámicos:

$$\begin{aligned}\sum \tau &= I \times \alpha \\ \tau_{cintura} &= I_{zz1} \times \alpha_1 \\ \tau_{cintura} &= (0.1184) (0.2816) \\ \tau_{cintura} &= 0.0333 \left[\frac{kg \times m^2}{s^2} \right] \\ \tau_{cintura} &= 3.334 [N * cm]\end{aligned}$$

Articulación del hombro:

Eslabones necesarios para el cálculo dinámico en la articulación 2 y localización del centro de masa del ensamble respecto al eje de giro correspondiente (Figura 29).

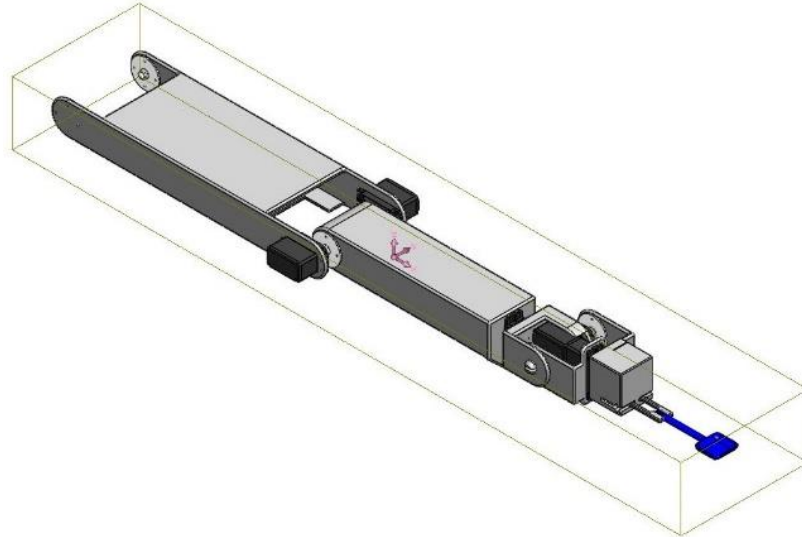


Figura 29. Cadena cinemática con cinco eslabones

Datos obtenidos mediante Solidworks:

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= 0.9508 \left[\frac{rad}{s^2} \right] \\ I_{yy2} &= 0.1189 \left[kg * m^2 \right] \\ m_2 &= 0.7531 \left[kg \right] \\ r_2 &= 0.3517 \left[m \right]\end{aligned}$$

Cálculos dinámicos:

$$\begin{aligned}\sum \tau &= I \times \alpha \\ \tau_{hombro} - W_{hombro} \times r_2 &= I_{yy2} \times \alpha_2 \\ \tau_{hombro} &= I_{yy2} \times \alpha_2 + W_h \times r_2 \\ \tau_{hombro} &= (0.1189) (0.9508) + (0.7531) (9.806) (0.3517) \\ \tau_{hombro} &= 2.7104 \left[\frac{kg \times m^2}{s^2} \right] \\ \tau_{hombro} &= 271.04 \left[N * cm \right]\end{aligned}$$

Articulación del codo:

Eslabones necesarios para el cálculo dinámico en la articulación 3 y localización del centro de masa del ensamble respecto al eje de giro correspondiente (Figura 30).

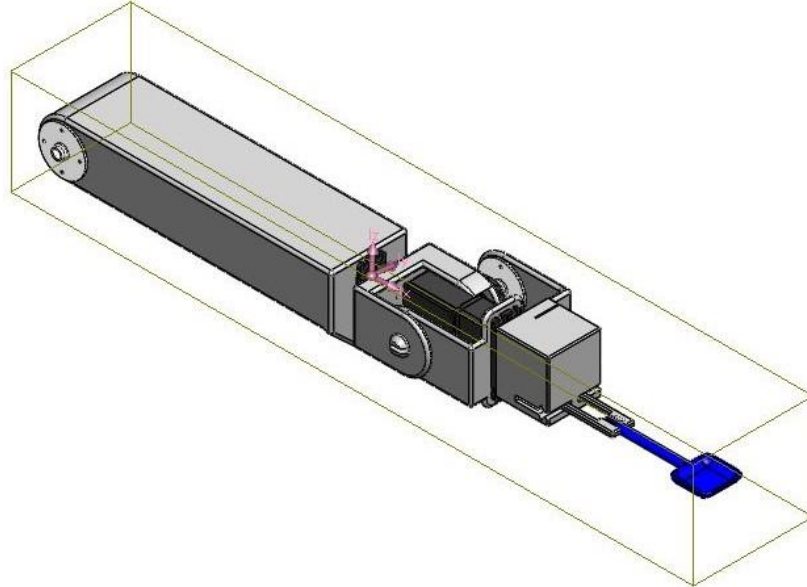


Figura 30. Cadena cinemática con cuatro eslabones

Datos obtenidos mediante Solidworks:

$$\begin{aligned}\alpha_3 &= 0.1971 \left[\frac{rad}{s^2} \right] \\ I_{yy3} &= 0.0204 \left[kg * m^2 \right] \\ m_3 &= 0.4127 \left[kg \right] \\ r_3 &= 0.1985 \left[m \right]\end{aligned}$$

Cálculos dinámicos:

$$\begin{aligned}\sum \tau &= I \times \alpha \\ \tau_{codo} - W_{codo} \times r_3 &= I_{yy3} \times \alpha_3 \\ \tau_{codo} &= I_{yy3} \times \alpha_3 + W_{codo} \times r_3 \\ \tau_{codo} &= (0.0204) (0.1971) + (0.4127) (9.806) (0.1985) \\ \tau_{codo} &= 0.80732 \left[\frac{kg \times m^2}{s^2} \right] \\ \tau_{codo} &= 80.732 \left[N * cm \right]\end{aligned}$$

Articulación de la muñeca 1:

Eslabones necesarios para el cálculo dinámico en la articulación 4 y localización del centro de masa del ensamble respecto al eje de giro correspondiente (Figura 31).

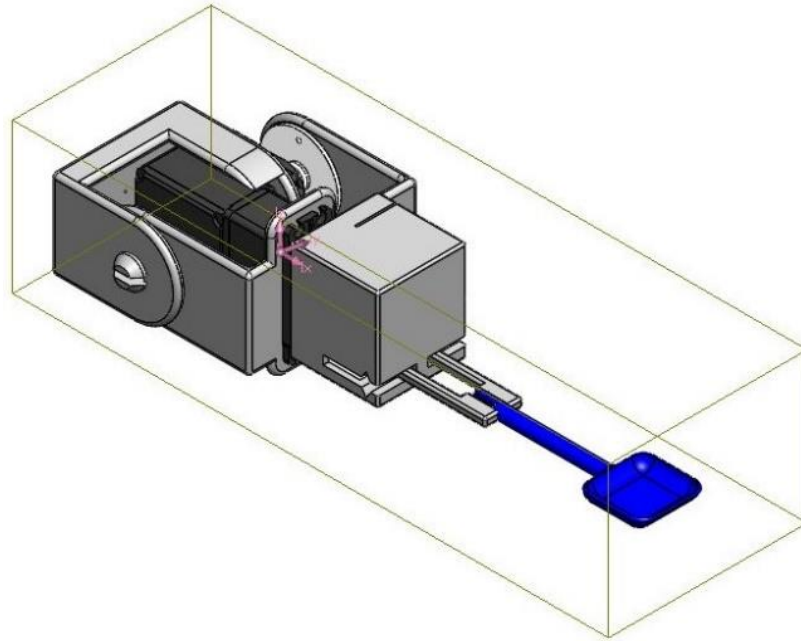


Figura 31. Cadena cinemática con tres eslabones

Datos obtenidos mediante Solidworks:

$$\alpha_4 = 0.8288 \left[\frac{rad}{s^2} \right]$$

$$I_{xx4} = 0.125 \times 10^{-3} [kg * m^2]$$

$$m_4 = 0.2072 [kg]$$

$$r_4 = 0.0722 [m]$$

Cálculos dinámicos:

$$\sum \tau = I \times \alpha$$

$$\tau_{muñeca1} = I_{xx4} \times \alpha_4$$

$$\tau_{muñeca1} = (0.125 \times 10^{-3}) (0.8288)$$

$$\tau_{muñeca1} = 104 \times 10^{-6} \left[\frac{kg \times m^2}{s^2} \right]$$

$$\tau_{muñeca1} = 10.4 \times 10^{-3} [N * cm]$$

Articulación de la muñeca 2:

Eslabones necesarios para el cálculo dinámico en la articulación 5 y localización del centro de masa del ensamble respecto al eje de giro correspondiente (Figura 32).

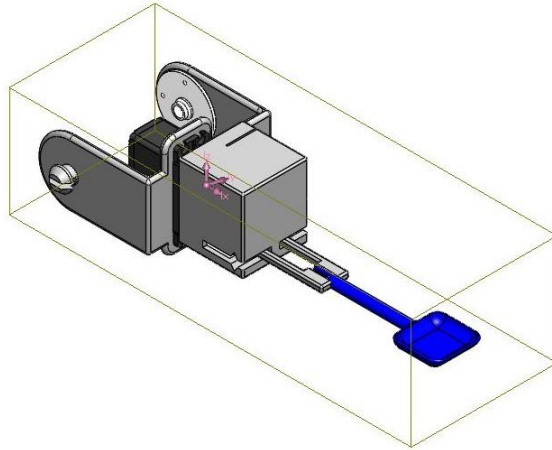


Figura 32. Cadena cinemática con dos eslabones

Datos obtenidos mediante Solidworks:

$$\begin{aligned}\alpha_5 &= 0.3024 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right] \\ I_{yy5} &= 0.609 \times 10^{-3} \text{ [kg} * \text{m}^2\text{]} \\ m_5 &= 0.1345 \text{ [kg]} \\ r_5 &= 0.0557 \text{ [m]}\end{aligned}$$

Cálculos dinámicos:

$$\begin{aligned}\sum \tau &= I \times \alpha \\ \tau_{muñeca2} - W_{muñeca2} \times r_5 &= I_{yy5} \times \alpha_5 \\ \tau_{muñeca2} &= I_{yy5} \times \alpha_5 + W_{muñeca2} \times r_5 \\ \tau_{muñeca2} &= (0.609 \times 10^{-3}) (0.3024) + (0.1345) (9.806) (0.0557) \\ \tau_{muñeca2} &= 0.1469 \left[\frac{\text{kg} \times \text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \\ \tau_{muñeca2} &= 14.691 \text{ [N} * \text{cm]}\end{aligned}$$

Articulación del “gripper”:

Eslabones necesarios para el cálculo dinámico para el “gripper” y localización del centro de masa del eslabón final respecto al eje de giro correspondiente (Figura 33).

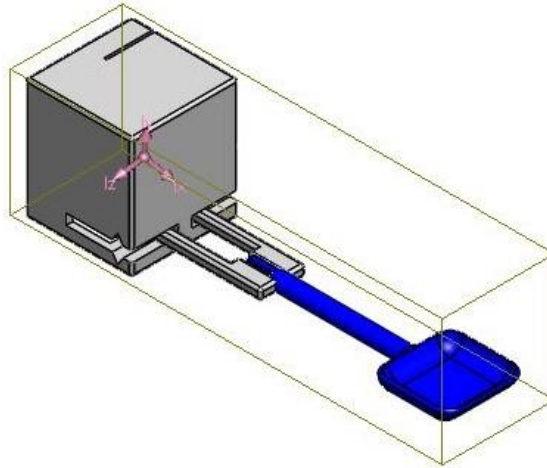


Figura 33. Cadena cinemática con el eslabón final (“gripper”)

Datos obtenidos mediante Solidworks:

$$\begin{aligned}\alpha_6 &= 0.1217 \left[\frac{rad}{s^2} \right] \\ I_{xx6} &= 16.01 \times 10^{-6} [kg * m^2] \\ m_6 &= 0.0575 [kg] \\ r_6 &= 0.0278 [m]\end{aligned}$$

Cálculos dinámicos:

$$\begin{aligned}\sum \tau &= I \times \alpha \\ \tau_{gripper} &= I_{xx6} \times \alpha_6 \\ \tau_{gripper} &= (16.01 \times 10^{-6}) (0.1217) \\ \tau_{gripper} &= 2 \times 10^{-6} \left[\frac{kg \times m^2}{s^2} \right] \\ \tau_{gripper} &= 0.2 \times 10^{-3} [N * cm]\end{aligned}$$

Al convertir los torques necesarios en las unidades correspondientes a las de los “datasheet” para mover las articulaciones obtenemos:

$$\tau_{cintura} = 0.34 \text{ [kgf * cm]}$$

$$\tau_{hombro} = 29.02 \text{ [kgf * cm]}$$

$$\tau_{codo} = 8.232 \text{ [kgf * cm]}$$

$$\tau_{muñeca1} = 1.66 \times 10^{-3} \text{ [kgf * cm]}$$

$$\tau_{muñeca2} = 1.498 \text{ [kgf * cm]}$$

$$\tau_{gripper} = 20.39 \times 10^{-6} \text{ [kgf * cm]}$$

Con esto quedan determinados los valores de torque necesario en cada articulación y se procede a la selección de servomotores.

3.5.4.1. SELECCIÓN DE SERVOMOTORES

En la Tabla 5 se muestran los cálculos realizados para la selección de los servomotores, en los cuales se incluyen factores de seguridad y especificaciones como modelo y marca de los servomotores elegidos.

Tabla 5. Selección se servomotores dado su torque (articulaciones 1 a 3)

Articulación	Cintura	Hombro	Codo
Torque Calculado (N-cm)	3.33	271.04	80.73
Factor de Conversión	9.807	9.807	9.807
Torque Calculado (kg-cm)	0.34	27.64	8.23
Factor de Seguridad	1.05	1.05	1.05
Torque Calculado Necesario (kg-cm)	0.36	29.02	8.64
Marca Servomotor	Hitec	Hitec	Hitec
Modelo Servomotor	HS-311	HS-5585MH	HSR-2645CR
Torque Entregado por Servomotor (kg-cm)	3	17	8
Número de Servomotores	1	2	2
Torque Total Disponible (kg-cm)	3	34	16

En la Tabla 6 se muestran los cálculos realizados para la selección de los servomotores de las articulaciones restantes.

Tabla 6. Selección de servomotores dado su torque (articulaciones 4 a 6)

Articulación	Muñeca1	Muñeca2	Gripper
Torque Calculado (N-cm)	1.04E-02	14.69	2.00E-04
Factor de Conversión	9.807	9.807	9.807
Torque Calculado (kg-cm)	1.06E-03	1.50	2.04E-05
Factor de Seguridad	1.05	1.05	1.05
Torque Calculado Necesario (kg-cm)	1.11E-03	1.57	2.14E-05
Marca Servomotor	Hitec	Hitec	Hitec
Modelo Servomotor	HSR-1425CR	HSR-1425CR	HSR-1425CR
Torque Entregado por Servomotor (kg-cm)	2.8	2.8	2.8
Número de Servomotores	1	1	1
Torque Total Disponible (kg-cm)	2.8	2.8	2.8

Como se puede observar en la tabla anterior, los servomotores del hombro y codo son aproximadamente el 50% del torque calculado necesario, debido a que estas articulaciones poseen dos motores se duplica este torque para alcanzar el valor necesario.

3.5.5. DISEÑO ELECTRÓNICO

3.5.5.1. SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL SISTEMA DE CONTROL

El “Robotics Toolbox” creado por Peter Corke contiene una “clase” llamada “Arbotix”, usada para la generación de código, la misma que sirve de interfaz de control del brazo robótico mediante un puerto serial a dicha tarjeta, Corke recomienda la utilización de la tarjeta de control “ArbotiX-M Robocontroller” que ha sido probada con éxito en el control de diferentes aplicaciones basadas en esta herramienta para MATLAB (Corke, 2011).

Esta tarjeta de control (Figura 34) funciona con una alimentación de 5 V, posee dos puertos independientes de entrada de voltaje para 6 y 12 V ya que estos son los voltajes máximos que puede ofrecer a los servos, siendo 3A la corriente máxima total que puede entregar para el trabajo en potencia (Trossen Robotics, 2017).

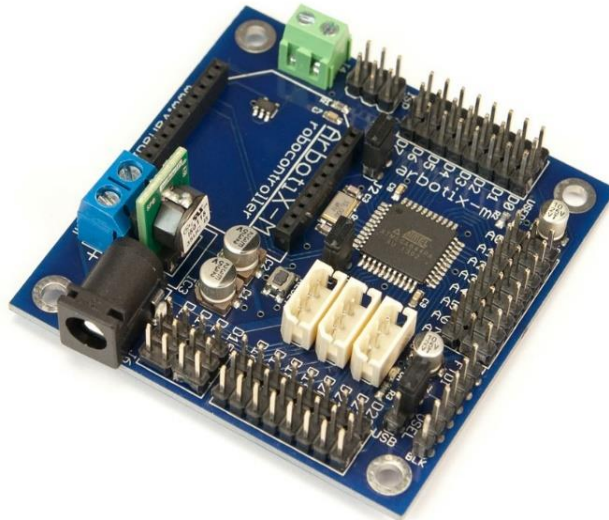


Figura 34. Tarjeta de control “ArbotiX-M Robocontroller”
(Trossen Robotics, 2017)

3.5.5.2. SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN PARA EL SISTEMA DE POTENCIA

En la Tabla 7 se puede observar la corriente sin carga y de bloqueo que exigen los servomotores para su funcionamiento, es importante recalcar que las corrientes pico sólo se generan en determinados instantes como por ejemplo cuando se necesita romper con la inercia a la que está sujeto el sistema.

Tabla 7. Corrientes especificadas por el fabricante bajo distintas condiciones de carga

Modelo del servomotor	Corriente (mA)		
	en ralentí	sin carga	de bloqueo
HS-311	7.7	180	800
HS-5585MH	4	300	2700
HSR-2645CR	3	110	1700
HSR-1425CR	8	150	640
HS-55	5.5	150	450

(Hitec RCD KOREA Inc., 2017; Hitec RCD USA Inc., 2017a, 2017b, 2017c, 2017d)

Para el cálculo de las corrientes fue necesario el cálculo de la potencia requerida por los servomotores en cada articulación utilizando la fórmula:

$$P = \frac{T \times n}{9550} \quad (6)$$

en la cual se debe trabajar con las siguientes unidades:

$$P \rightarrow \text{potencia en [kW]}$$

$$T \rightarrow \text{torque en [Nm]}$$

$$n \rightarrow \text{revoluciones por minuto [rpm]}$$

A continuación se calcula la corriente demandada por los servomotores mediante la ecuación:

$$P = V \times I \quad (7)$$

donde:

$$P \rightarrow \text{potencia en [kW]}$$

$$V \rightarrow \text{voltaje en [V]}$$

$$I \rightarrow \text{intensidad de corriente en [A]}$$

Esto se puede apreciar en el ejemplo de cálculo mostrado a continuación.

$$P_1 = \frac{T_1 \times n_1}{9550}$$

$$P_1 = \frac{(0.0333)(52.63)}{9550}$$

$$P_1 = 1.84 \times 10^{-4} \text{ [kW]}$$

$$\boxed{P_1 = 0.1835 \text{ [W]}}$$

$$P = V \times I$$

$$I_1 = \frac{P_1}{V_1}$$

$$I_1 = \frac{0.1835 \text{ [W]}}{4.8 \text{ [V]}}$$

$$I_1 = 0.03823 \text{ [A]}$$

$$\boxed{I_1 = 38.23 \text{ [mA]}}$$

Puesto que el valor de corriente se encuentra por debajo del valor consumido por el motor cuando no tiene carga (debido a que la carga es muy pequeña) se utiliza la corriente especificada por el fabricante para este caso.

$$\therefore \boxed{I_1 = 180 \text{ [mA]}}$$

Mediante el proceso mostrado previamente se han calculado todas las variables correspondientes para obtener las corrientes que se muestran en la Tabla 8, también se observa el valor de la corriente que debe ser entregada por la fuente de alimentación para la etapa de potencia con la finalidad de alimentar todos los actuadores que forman parte del brazo robótico.

Tabla 8. Cálculo de corrientes

Articulación	Art. 1	Art. 2	Art. 3	Art. 4	Art. 5	Art. 6	Tenazas
Número de servos	1	2	2	1	1	1	1
Torque Necesario [Nm]	0.03	2.71	0.81	1.04E-04	0.15	2.00E-06	0.11
Velocidad	0.19	0.14	N/A	N/A	N/A	N/A	0.17
Voltaje (V)	4.80	7.40	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80
T _(s) en 1 rev	1.14	0.84	N/A	N/A	N/A	N/A	1.02
T [Nm]	0.03	1.36	0.40	1.04E-04	0.15	2.00E-06	0.11
n (rpm)	52.63	71.43	48.00	43.00	43.00	43.00	58.82
P [W]	0.18	10.13	2.03	4.68E-04	0.66	9.01E-06	0.66
I _{requerida} (mA)	38.23	1369.54	422.68	0.10	137.80	1.88E-03	138.46
I _{real} (mA)	180.00	2739.09	845.36	150.00	150.00	150.00	150.00
I _{fuerza} (mA)	4364.45						

La fuente de poder necesaria para abastecer al sistema deberá tener la capacidad de entregar 4364,45 mA pero será necesario determinar un factor de seguridad que otorgue la fiabilidad necesaria al tener en funcionamiento el brazo robótico.

Se trabajará con un factor de seguridad de 1.25 con la finalidad de otorgar al sistema la corriente necesaria cuando se produzcan picos, es así que:

$$I_{Total} = I_{fuente} \times f.s. \quad (8)$$

$$I_{Total} = (4364,45 \text{ [mA]}) (1.25)$$

$$I_{Total} = 5455,56 \text{ [mA]}$$

Se trabajará con una batería sellada de ácido-plomo, libre de mantenimiento de 12V y 7000mA, necesaria para el óptimo funcionamiento del sistema.

Idealmente la duración de la batería será:

$$Duración\ batería = \frac{capacidad\ de\ la\ batería}{consumo\ del\ circuito} \quad (9)$$

$$Duración\ batería = \frac{(12\ V)(7000\ mA)}{(4.8)(180 + 845.36 + 4(150)) + (7.4)(2739.09)}$$

$$Duración\ batería = 2.99\ horas$$

$$Duración\ batería = 2\ horas\ y\ 59\ minutos$$

3.5.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.5.6.1. VISIÓN ARTIFICIAL

Se ha configurado un sistema de visión artificial para poder encontrar las coordenadas de la boca de la persona, de esta manera el computador puede comparar la posición en la que se encuentra y aquella a la cual debe llegar utilizando para ello tanto la cinemática directa como inversa respectivamente. El reconocimiento de una característica facial como lo es la boca de un individuo se realizó mediante el algoritmo Viola-Jones que se encuentra en la librería de MATLAB (The MathWorks Inc., 2017).

El sistema de control se encuentra constituido por los elementos mostrados en la Figura 35 en la cual se puede observar cómo se relacionan además del flujo de información.

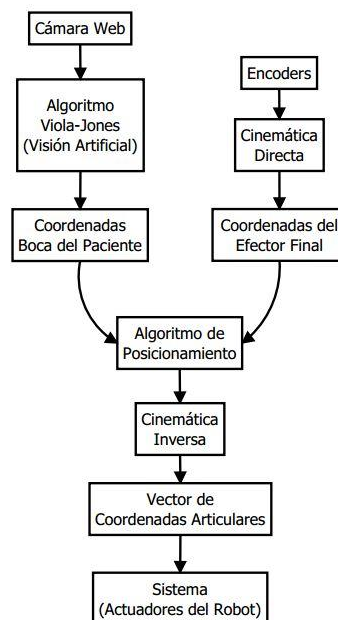


Figura 35. Diagrama de interacción del Sistema de Control

3.6. INTEGRACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS

En la Figura 36 se observa cómo se relacionan todas las partes que constituyen el robot así como también la influencia que tiene el usuario sobre el sistema y la respuesta de este al alimentar al paciente.

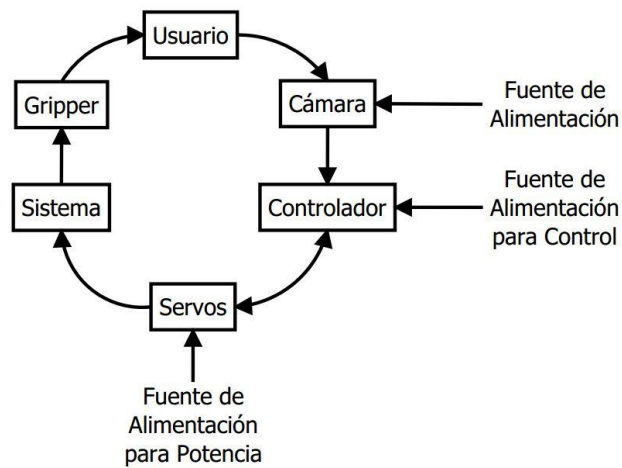


Figura 36. Diagrama de interrelación de los diferentes sistemas

Algunas partes como el controlador se relacionan con otras de manera interna para realizar los cálculos pertinentes (Figura 37).

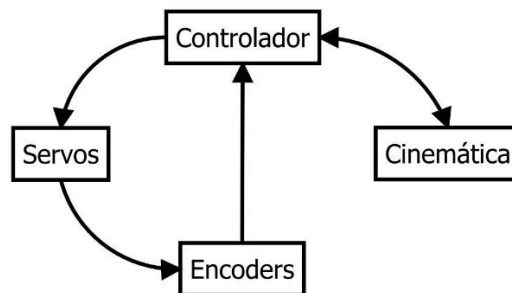


Figura 37. Diagrama de interacción del controlador

La cadena cinemática actúa sobre el último eslabón o "gripper" y es éste el encargado de interactuar tanto con las bandejas de comida, el alimento contenido en ellas y finalmente el usuario (Figura 38).

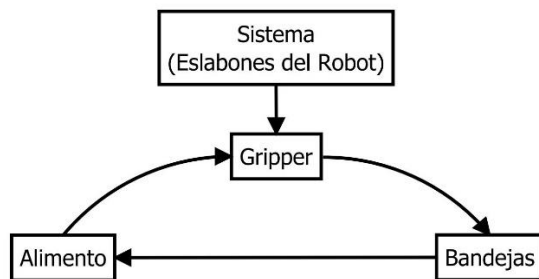


Figura 38. Diagrama de interacción del "gripper"

La integración de los subsistemas que componen el brazo robótico asistencial también se puede apreciar en las distintas pruebas y simulaciones realizadas.:

Se puede apreciar (Figura 39) la interacción de los subsistemas dentro de la plataforma informática en la cual realizan un intercambio de información entre ellos que empieza con el usuario al enviar los datos de las coordenadas de su boca mediante la cámara web hacia el algoritmo de posicionamiento que, después de los cálculos pertinentes envía el vector de coordenadas articulares al modelo generado en Simulink para finalmente comprobar su funcionamiento en el “Mechanics Explorer”.

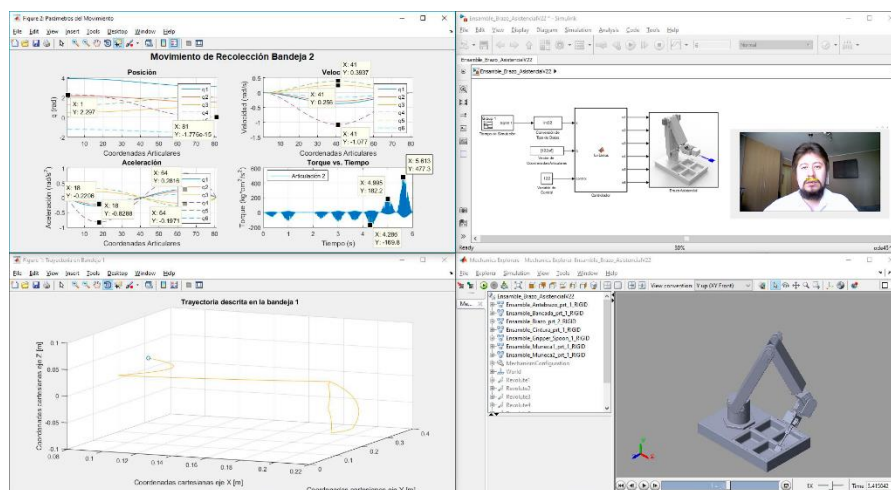


Figura 39. Funcionamiento de todos los sistemas en conjunto

Para este movimiento específico se ha tomado como referencia a la articulación número cuatro, la misma que indica un mayor desplazamiento angular, esto refleja una magnitud mayor de velocidad y aceleración angular respecto al resto de articulaciones (Figura 40).

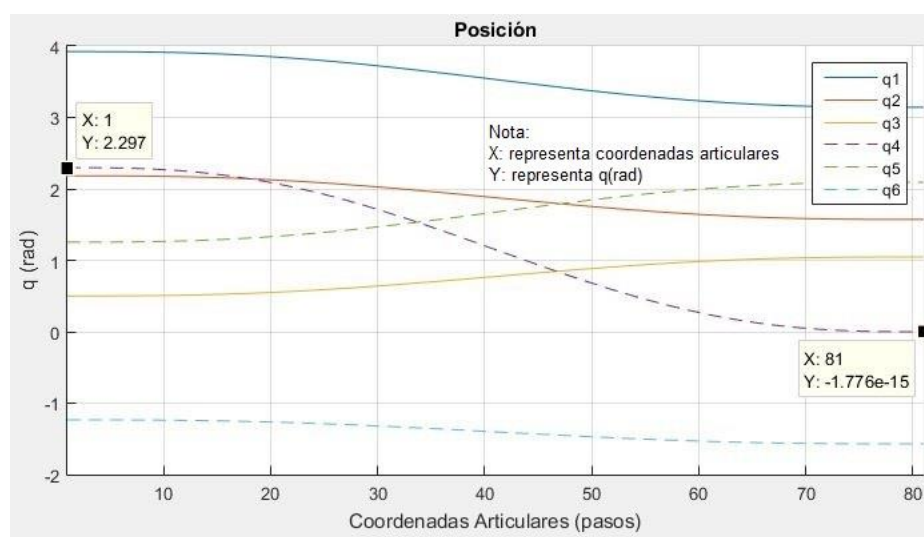


Figura 40. Posición de las articulaciones

Aun cuando todas las articulaciones poseen una velocidad, y por lo tanto se han movido, la articulación que destaca es la número cuatro con una velocidad de -1.077 rad por segundo (Figura 41).

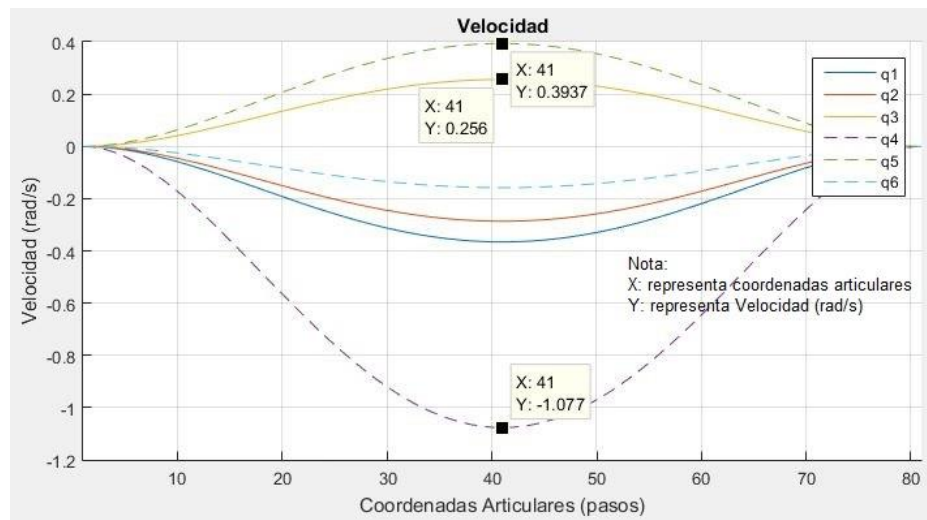


Figura 41. Velocidad de las articulaciones

En la Figura 42 se puede verificar el control de aceleración que existe en las articulaciones (acelerando en la primera mitad del movimiento y desacelerando en la segunda mitad) procurando así que el movimiento sea suave. Una vez más la articulación número cuatro destaca por su aceleración máxima en comparación con el resto de articulaciones.

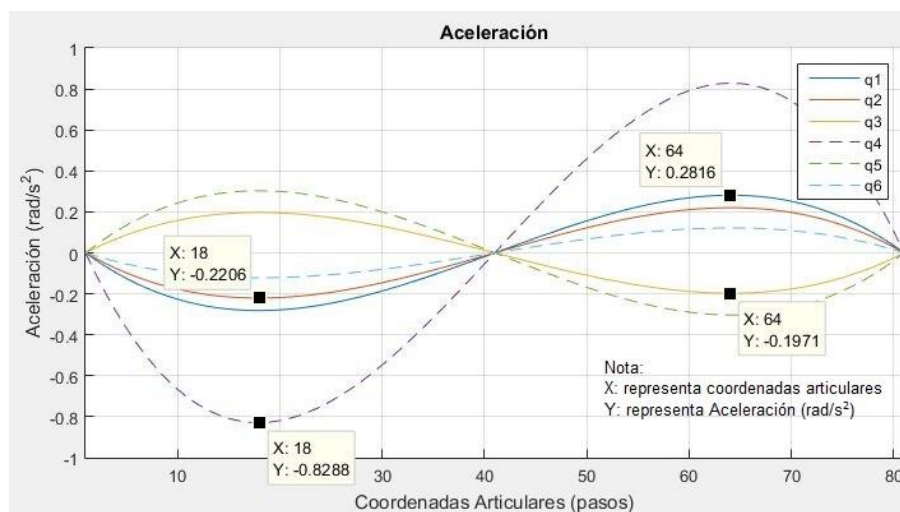


Figura 42. Aceleración de las articulaciones

Los torques han sido medidos en la articulación número dos durante el lapso de tiempo que toma el primer movimiento de recolección para la bandeja número dos (seis segundos) y se han seleccionado los valores más representativos para su análisis. En esta aparecen tanto los movimientos en sentido horario como anti horario de los servomotores que controlan dicha articulación (Figura 43).

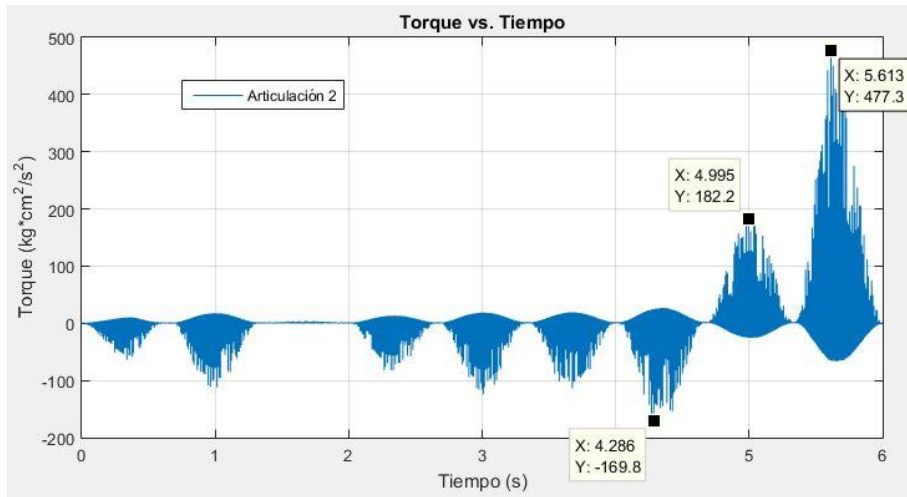


Figura 43. Torques medidos en la articulación dos (q_2)

Se puede observar también la trayectoria registrada para la recolección de la sopa en tres dimensiones (Figura 44).

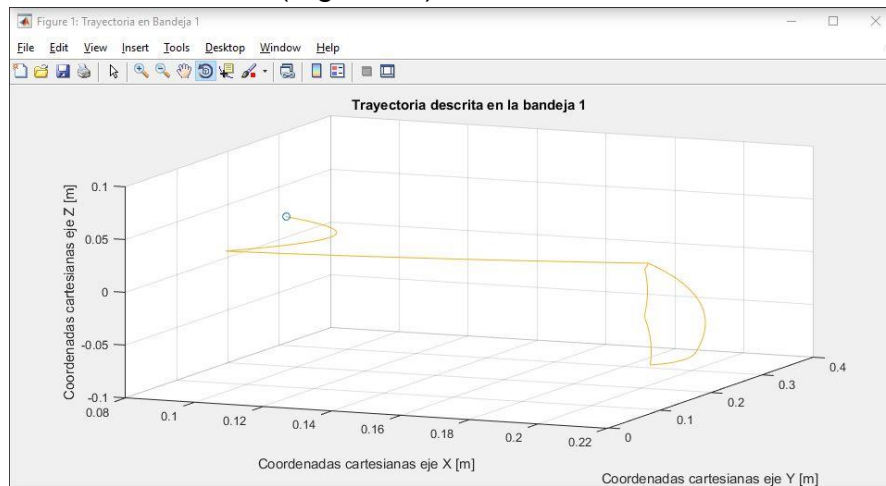


Figura 44. Trayectoria registrada durante la simulación

En la Figura 45 se observa la cadena cinemática representada por cuerpos rígidos en Simulink, recibiendo los distintos valores de coordenadas articulares que serán enviadas al modelo virtual para su simulación.

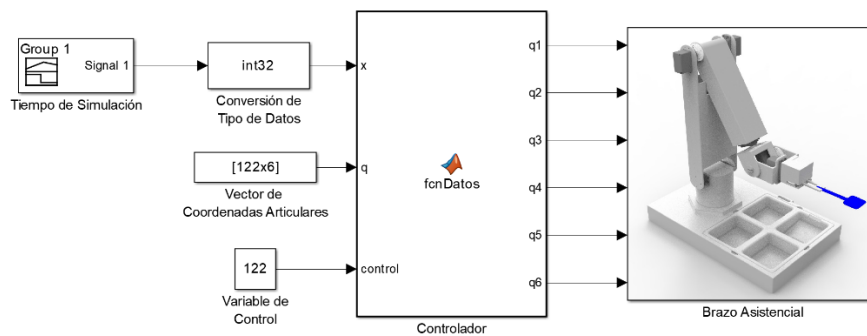


Figura 45. Modelo del brazo en Simulink

Finalmente, en un instante determinado a 1.55s, se observa la posición de las articulaciones y la interacción del “gripper” y la cuchara con las coordenadas en el espacio de la boca del paciente desde diferentes vistas; esto se observa en tiempo real mediante la herramienta “Mechanics Explorer” de MATLAB (Figura 46).

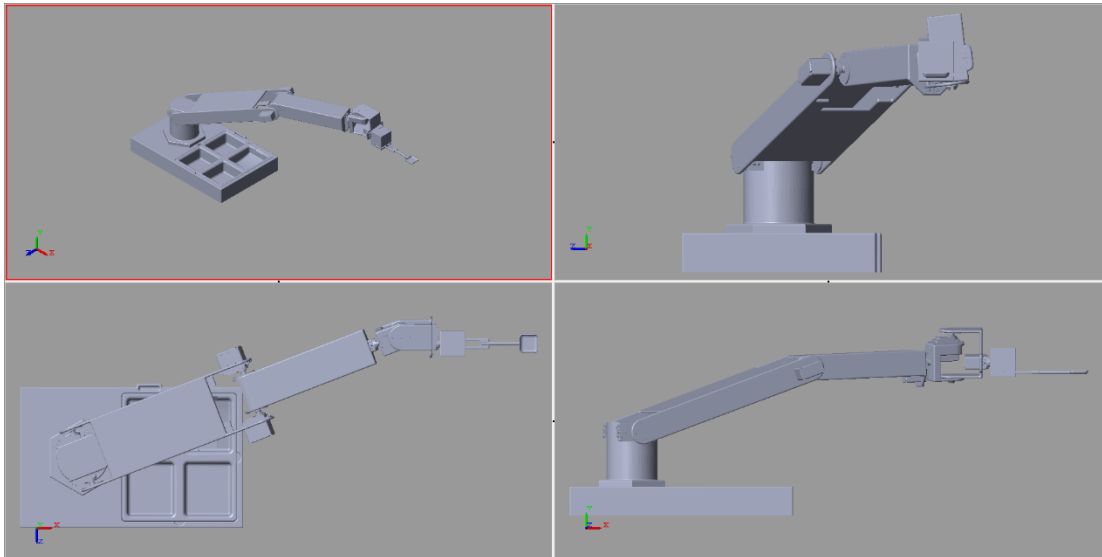


Figura 46. Modelo simulado en entorno virtual

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRUEBAS DE LOS DIFERENTES SISTEMAS

4.1.1. SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL (RECONOCIMIENTO DE BOCA)

Se realizaron pruebas del funcionamiento del algoritmo de reconocimiento de la boca bajo distintas condiciones de luz ambiental (tanto luz natural como artificial).

Dado que en las primeras pruebas que se realizaron existían problemas respecto a las diferentes características faciales o en su defecto al uso de accesorios tales como lentes o de barba en los varones, se procedió a reajustar ciertos parámetros para poder encontrar la boca.

Es importante señalar que el algoritmo Viola-Jones funciona correctamente siempre y cuando el eje vertical de la cara forme menos de 18° de inclinación respecto a la vertical, caso contrario el algoritmo deja de reconocer a la boca como una característica facial. Esto viene programado por defecto dentro del algoritmo y no es susceptible de modificación.

Entre la Figura 47 a la Figura 54 se muestran algunas pruebas bajo diferentes condiciones que podrían afectar el correcto reconocimiento de la boca.



Figura 47. Reconocimiento de boca a contraluz y uso de lentes



Figura 48. Reconocimiento de boca a contraluz y uso de lentes y barba

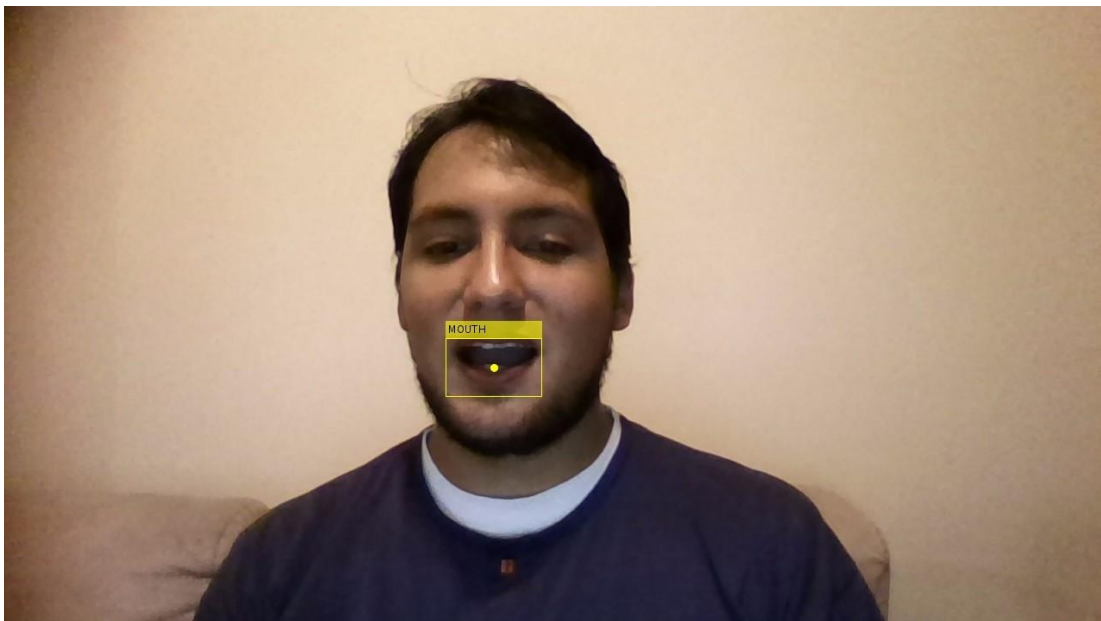


Figura 49. Reconocimiento de boca uso barba

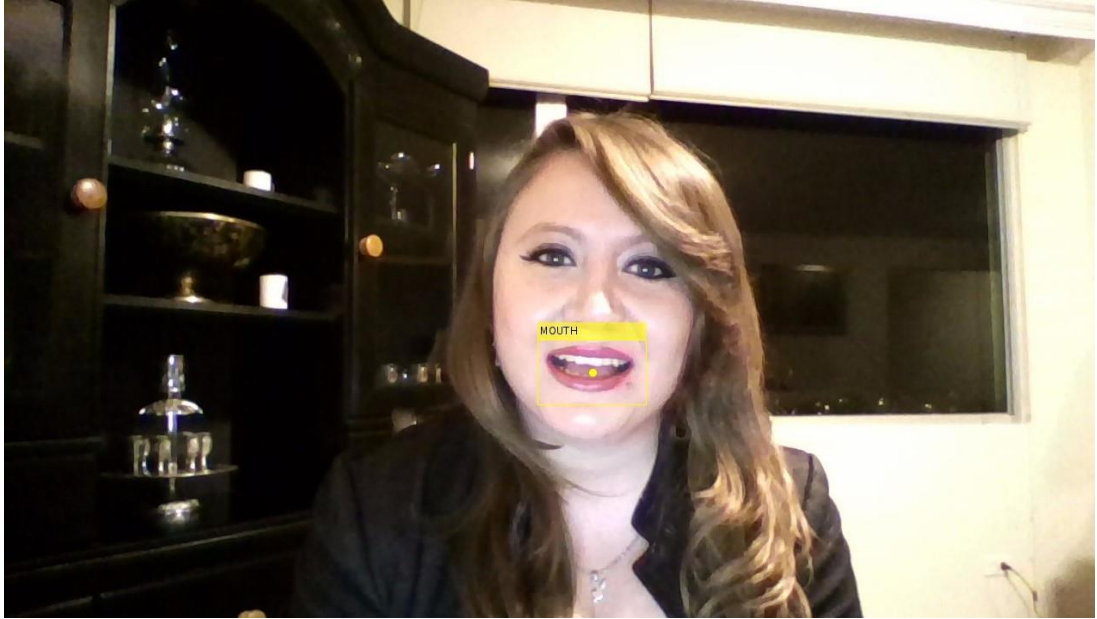


Figura 50. Reconocimiento de boca con luz artificial blanca

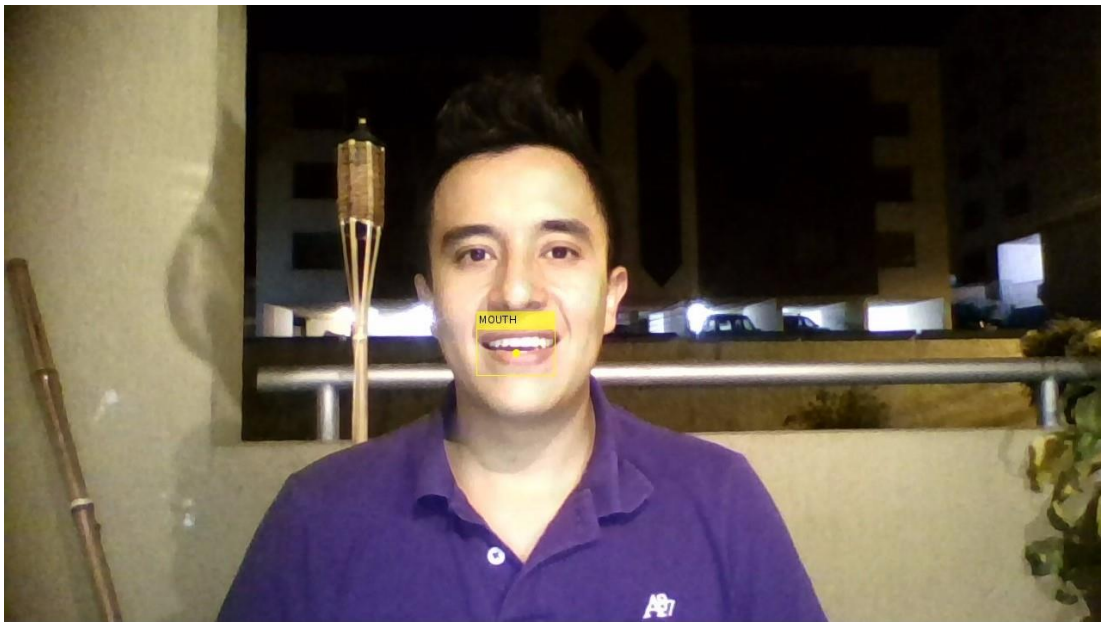


Figura 51. Reconocimiento de boca con fondo oscuro

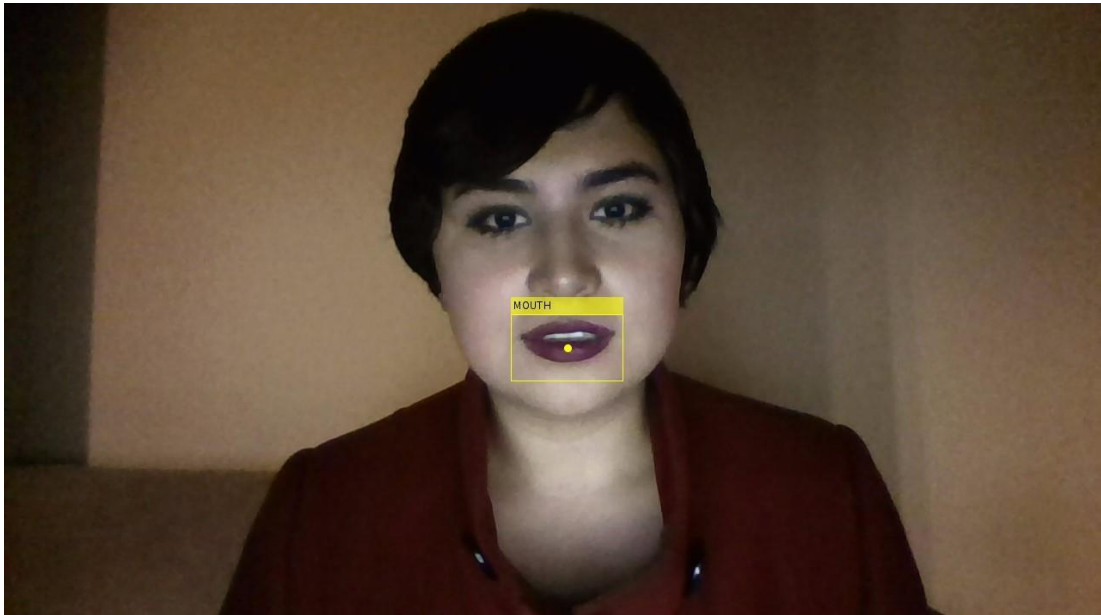


Figura 52. Reconocimiento de boca con poca luz

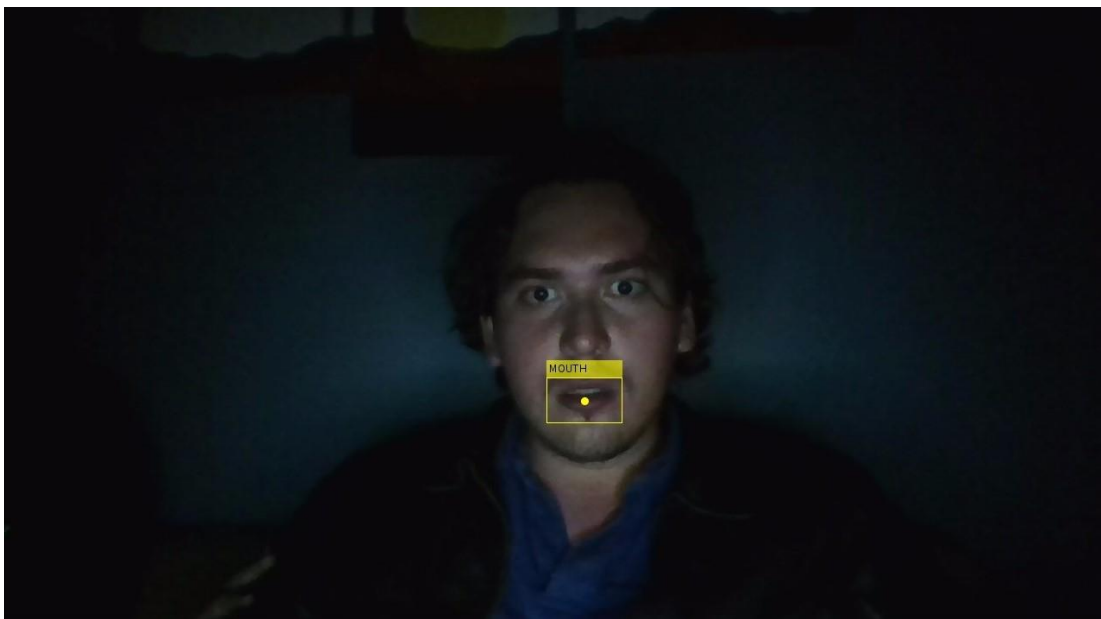


Figura 53. Reconocimiento de boca sin luz (sólo brillo de la pantalla del ordenador)



Figura 54. Reconocimiento de boca con imagen sobre expuesta con luz natural

El algoritmo de Viola-Jones funciona apropiadamente en el 100% de las pruebas realizadas bajo diferentes condiciones del entorno.

4.1.2. SISTEMA DE CONTROL

Para analizar el funcionamiento del sistema de control se han puesto en marcha todos los sub-sistemas que lo conforman para realizar mediciones pertinentes, obteniendo así las variables necesarias para una valoración integral del desempeño del brazo robótico asistencial.

El análisis tanto de la velocidad como de la aceleración a la que se mueven los actuadores es fundamental para considerar un funcionamiento adecuado, en el cual los alimentos no sean arrojados de la cuchara y lleguen a la boca del paciente.

Otra de las variables a ser analizadas es el torque ejercido en las articulaciones sometidas a un requerimiento mecánico elevado con respecto al resto para validar la selección de los servomotores a ser utilizados; además se analiza el correcto funcionamiento del sistema de visión artificial al hallar la boca del sujeto y evitar falsos positivos.

En la Figura 55 se observan las articulaciones del brazo robótico numeradas, iniciando por la más cercana a la bancada como número uno y así en orden ascendente hasta la articulación número seis; asimismo se enumeran los ángulos que corresponden al movimiento de cada articulación, por esto a la articulación uno le corresponde el ángulo q_1 , a la articulación dos le corresponde el ángulo q_2 y así sucesivamente hasta la articulación seis.

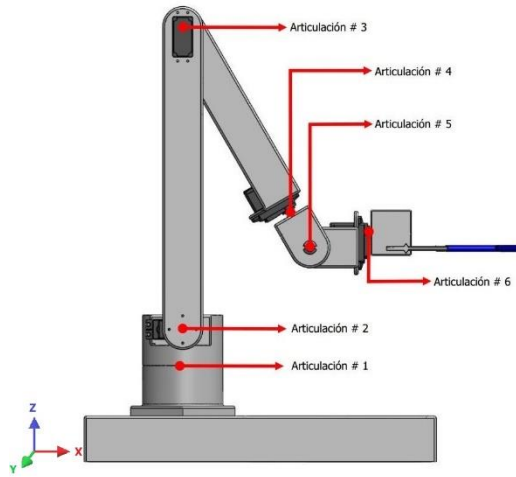


Figura 55. Vista lateral del brazo robótico (articulaciones)

A continuación se muestra la variación en el ángulo de cada una de las articulaciones que componen el brazo robótico (Figura 56) en el movimiento de retorno después de entregar la comida.

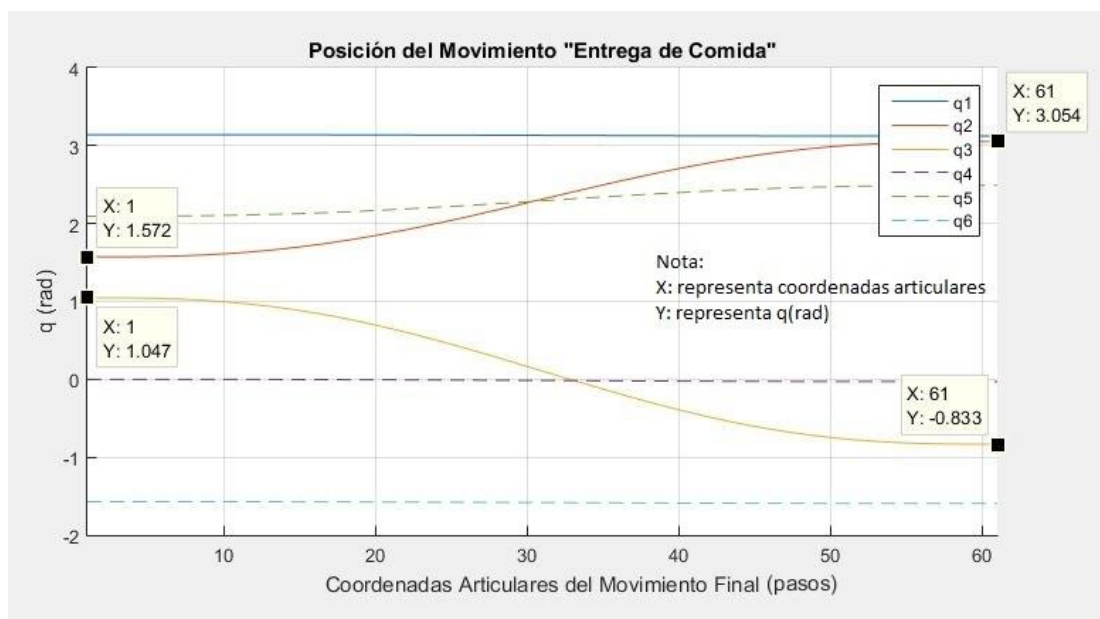


Figura 56. Posición de las articulaciones en movimiento de entrega de comida (regreso a la posición de espera)

En la Figura 57 se puede apreciar cómo se encuentra realizado el control de velocidad de las articulaciones que intervienen en el movimiento de retorno a la posición de espera del brazo robótico luego de entregar la comida. Se destaca que las articulaciones implicadas incrementan su velocidad angular hasta una velocidad máxima para luego desacelerar hasta una velocidad de cero.

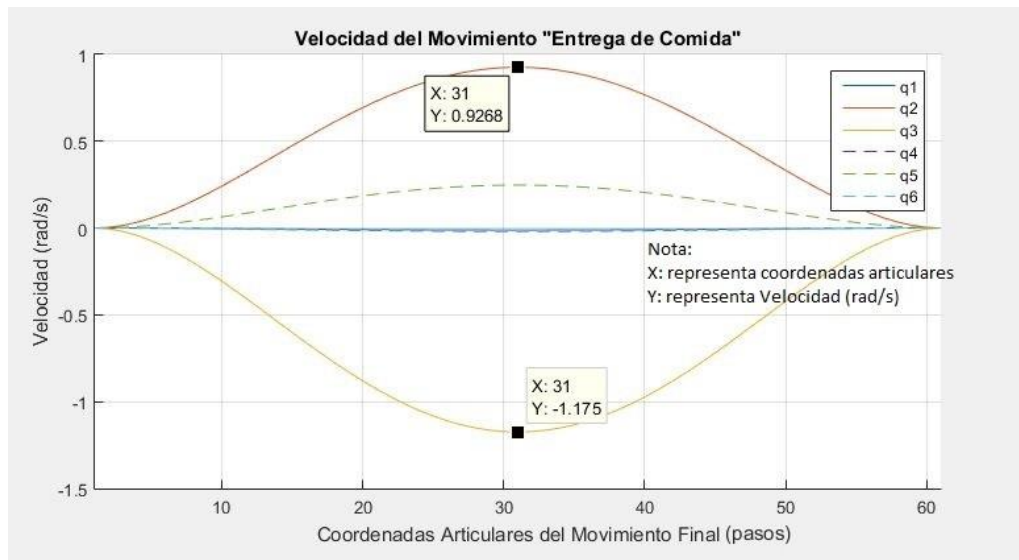


Figura 57. Velocidad de las articulaciones en movimiento de entrega de comida (regreso a la posición de espera)

A continuación (Figura 58) se muestra el comportamiento que tiene la aceleración de las articulaciones implicadas en este movimiento. La aceleración se encuentra controlada para que el movimiento sea lo más delicado posible, procurando tanto un inicio así como un final lento de este. Así también se pueden apreciar los valores máximos que se imprimen a las articulaciones número dos y tres (por lo tanto presentan los valores más significativos para este movimiento).

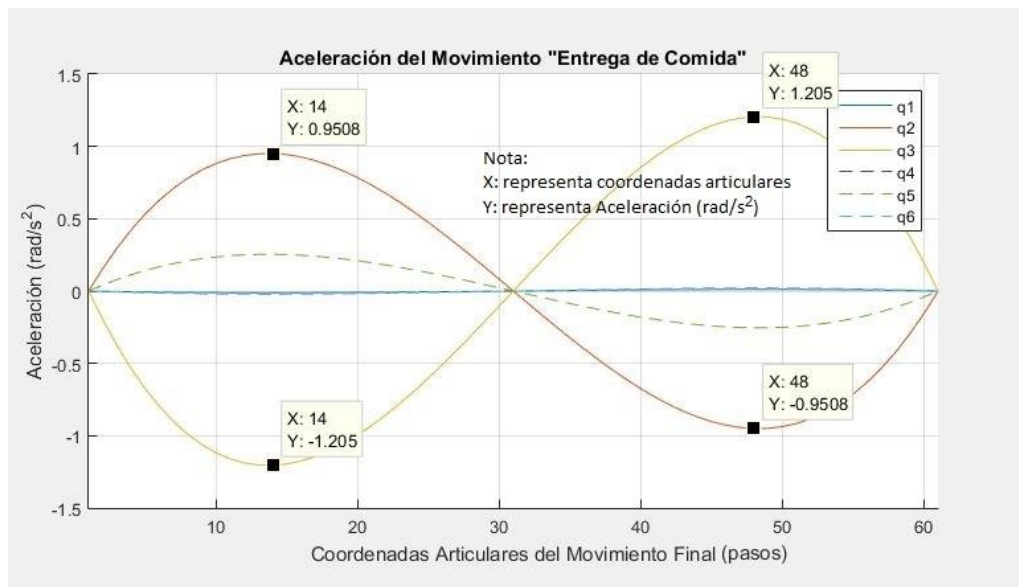


Figura 58. Aceleración de las articulaciones en movimiento de entrega de comida (regreso a la posición de espera)

Se puede observar en la Figura 59 el comportamiento que tienen los torques que se ejercen en la articulación número dos (hombro). Se han medido los valores máximos del torque aplicado en dicha articulación con la finalidad de comprobar que se encuentran dentro de los rangos calculados.

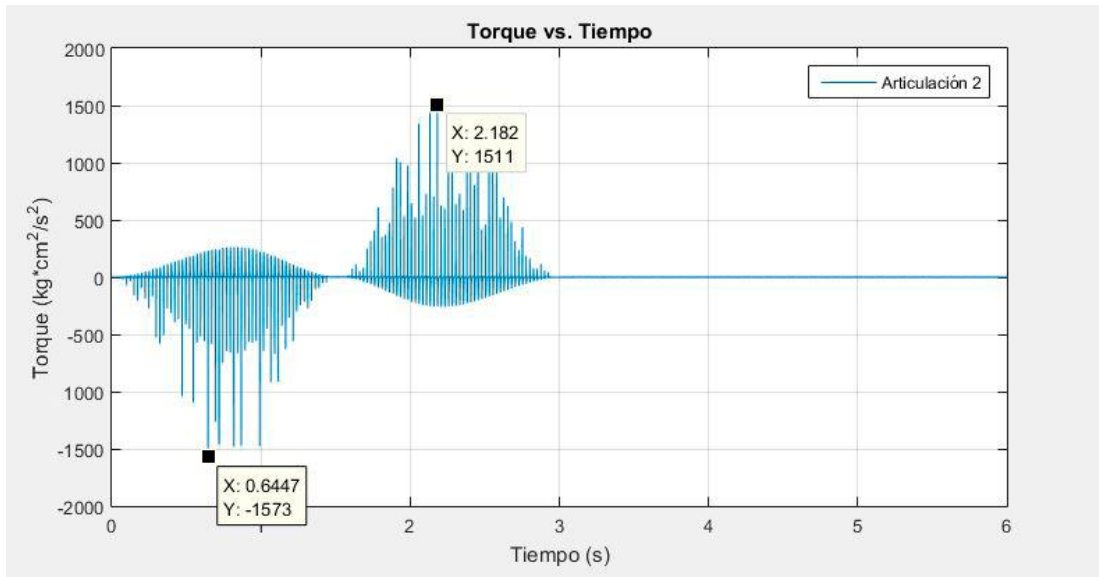


Figura 59. Torque ejercido en la articulación dos en movimiento de entrega de comida (extensión y contracción del brazo)

En la Figura 60 se muestra la trayectoria por la cual se mueve el efector final en el espacio para poder ejecutar los movimientos necesarios en la bandeja 1 (de este recipiente se recoge sopa) y así cumplir con las condiciones necesarias para que este líquido no se derrame.

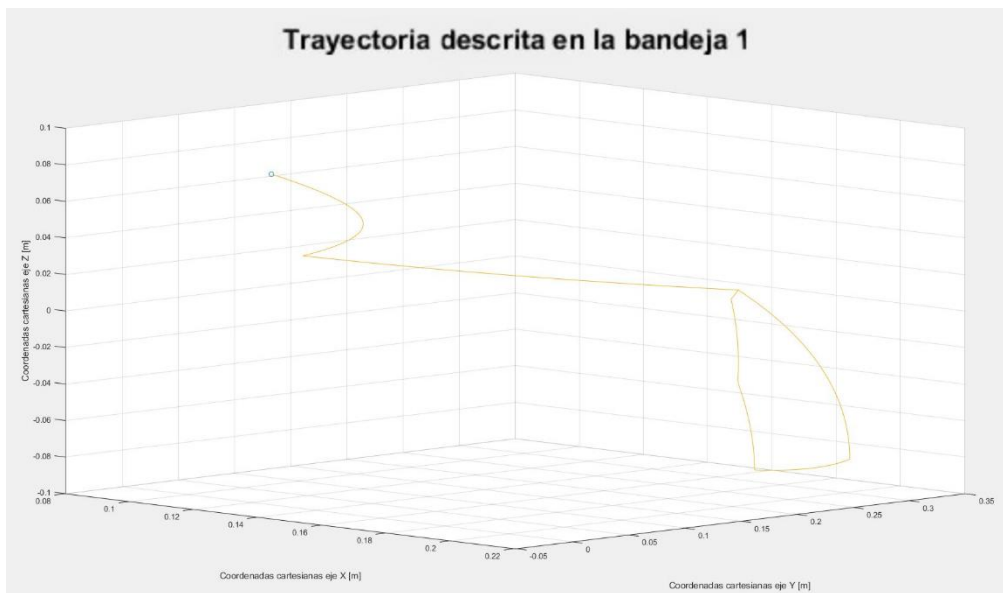


Figura 60. Trayectoria seguida para recoger sopa

4.1.3. CÁLCULO DE ERRORES EN EL SISTEMA DE CONTROL

Para realizar un análisis respecto a la precisión y exactitud del sistema de control después de recibir las coordenadas de la boca del paciente, se ha realizado una prueba en la cual se pone la imagen (fotografía) de una persona con la boca abierta en la misma posición durante 10 repeticiones del proceso

de entrega de comida. Es así que se mantiene el sistema invariante durante la prueba para poder comprobar su efectividad.

A continuación desde la Figura 61 hasta la Figura 66 se muestra un ejemplo en el cual se puede observar la señal de entrada en la junta tanto como la medición realizada para la señal de salida de dicha articulación, de esta manera se comprueba el funcionamiento del sistema de control.

Para la correcta apreciación de ambas señales se ha utilizado una herramienta que permite realizar un acercamiento a una porción de las gráficas para que el error generado sea de fácil interpretación.

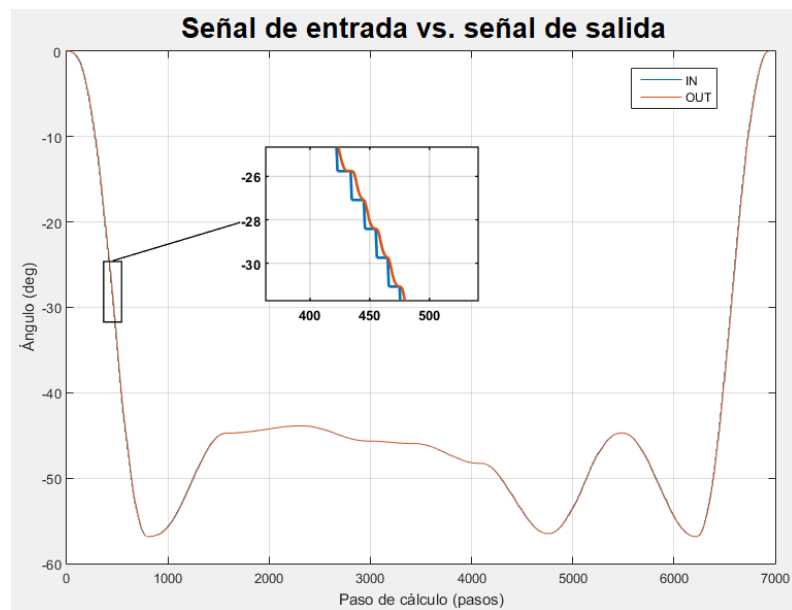


Figura 61. Medición de señales de entrada y salida en articulación q1

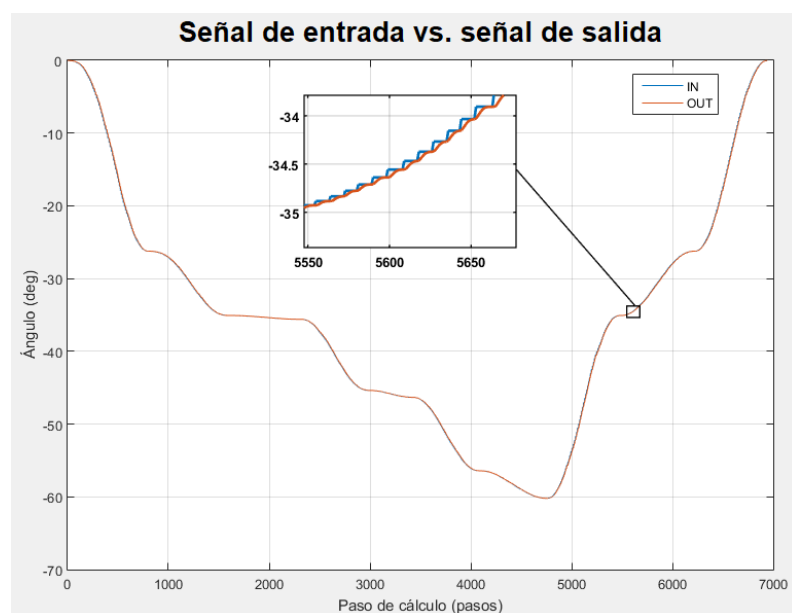


Figura 62. Medición de señales de entrada y salida en articulación q2

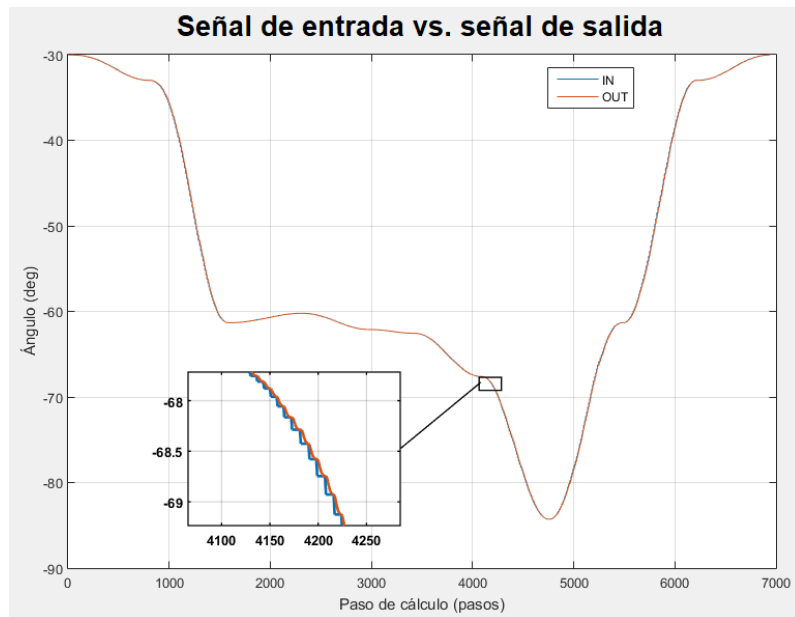


Figura 63. Medición de señales de entrada y salida en articulación q3

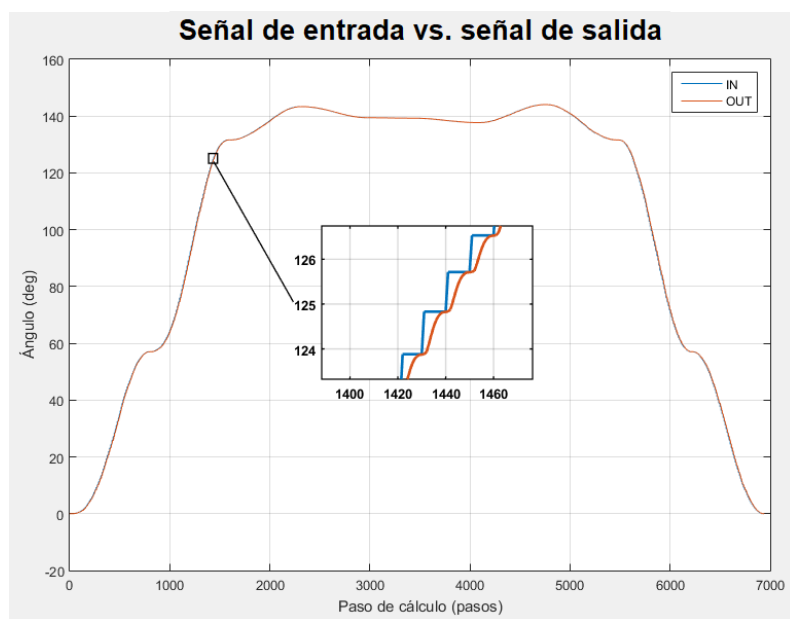


Figura 64. Medición de señales de entrada y salida en articulación q4

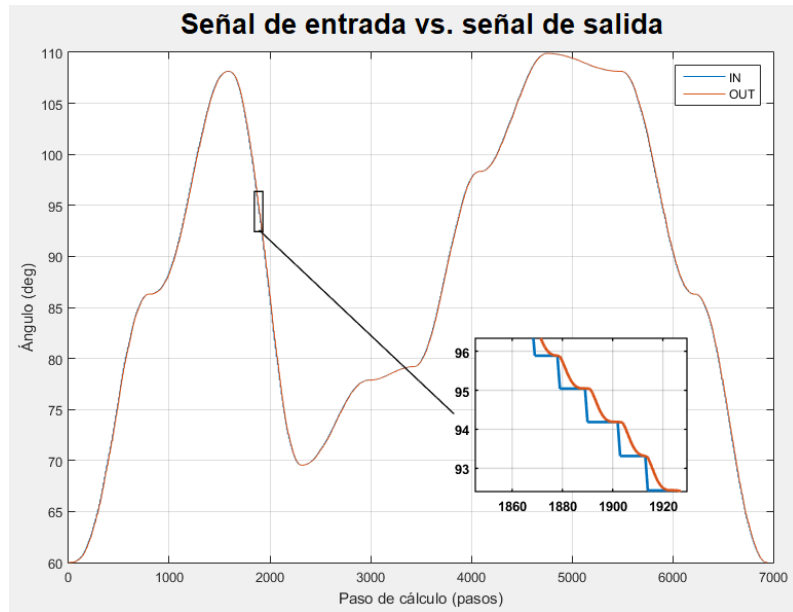


Figura 65. Medición de señales de entrada y salida en articulación q5

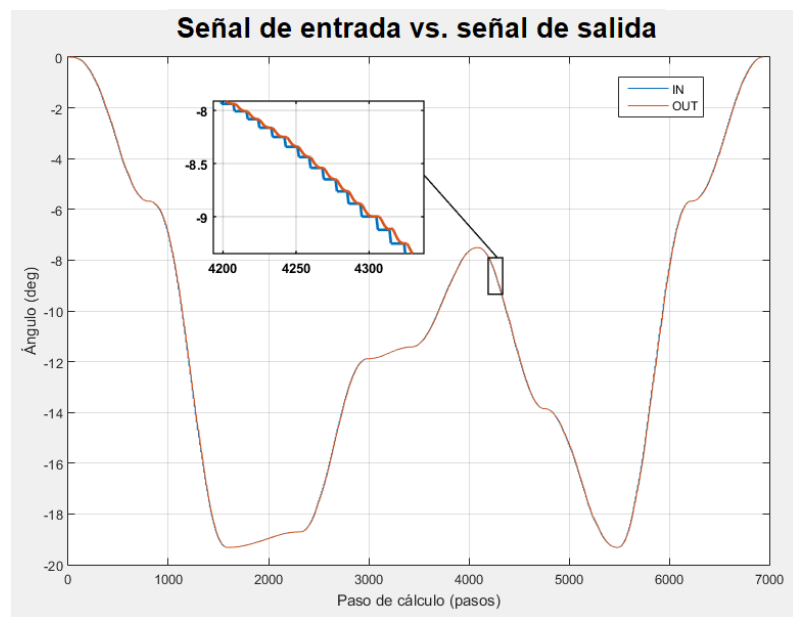


Figura 66. Medición de señales de entrada y salida en articulación q6

En la tabla se muestra el cálculo del porcentaje de error cometido en las diez mediciones realizadas como el promedio del porcentaje de error anteriormente mencionado. Las operaciones se realizaron mediante el uso la herramienta MATLAB.

Tabla 9. Promedio de error medido en cada articulación

Articulación	Error (%)
q1	1.26
q2	0.76
q3	0.11
q4	1.31
q5	0.11
q6	1.43

Es así que se demuestra que todos los errores cometidos por el sistema de control se encuentran por debajo no sólo del 5% aceptable sino que incluso todos son menores al 1.5%.

5. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

5.1. INVERSIÓN EN UN PROTOTIPO

Para el primer estudio de factibilidad se propone la fabricación de un prototipo, utilizando para ello una empresa encargada de la impresión de los modelos en 3D y la adquisición de los motores y la cámara web a un proveedor cualquiera que cuente con los elementos especificados (Tabla 10).

Tabla 10. Costo de fabricación/adquisición de componentes

Componente	Modelo	Costo Unitario (\$)	Cantidad	Costo final (\$)
Impresión 3D	N/A	788,03	1	788,03
Servomotor	HS-311	10,98	1	10,98
Servomotor	HS-5585MH	60,58	2	121,16
Servomotor	HSR-2645CR	32,19	2	64,38
Servomotor	HSR-1425CR	19,42	3	58,26
Servomotor	HS-55	12,8	1	12,8
Cámara web	A871	12,8	1	12,8
TOTAL				1068,41

5.2. PRESUPUESTO PARA PRODUCCIÓN EN MASA

Para el segundo estudio de factibilidad se propone la fabricación del brazo robótico asistencial en serie, con el objetivo de disminuir los costos de fabricación y pueda ser asequible a personas de escasos recursos.

A continuación (Tabla 11) se muestran los datos del producto a presupuestar.

Tabla 11. Datos del producto a presupuestar

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL	
BRAZO ROBÓTICO ASISTENCIAL PARA PERSONAS CON DISCAPACIDAD	
<u>ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS</u>	
CÓDIGO RUBRO:	N/A UNIDAD : BRAZO
RUBRO:	FABRICACIÓN Y SUMINISTRO DE BRAZO ROBÓTICO

Para la adquisición de equipamiento se ha tomado en cuenta la compra de 10 impresoras 3D modelo CR-10, para las cuales se ha realizado un cálculo de costo por hora del uso de la impresora 3D y su rendimiento basado en la pieza a fabricarse que supone la restricción en dicho proceso de fabricación; además de esto se ha realizado un cálculo para la compra de herramienta menor tal como destornilladores, martillos, entre otros. (Tabla 12).

Tabla 12. Costo de equipamiento

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
IMPRESORA 3D	10,00	0,08	0,76	30,00	22,80
HERRAMIENTA MENOR (5% MANO DE OBRA)	0,05	84,96	4,25	1,00	4,25
SUB-TOTAL (M)					27,05

Siguiendo con el proceso de manufactura se tiene previsto la contratación de un operador para las impresoras y un técnico de ensamblaje (Tabla 13), personal suficiente para realizar estas tareas.

Tabla 13. Costo de mano de obra

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	JORNAL/HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO
OPERADOR DE IMPRESORA	1.00	4.06	4.06	19.60	79.58
TECNICO DE ENSAMBLAJE	1.00	2.69	2.69	2.00	5.38
SUB-TOTAL (N)					84.96

La adquisición de los materiales e insumos a un proveedor local, necesarios para el ensamblaje final del brazo robótico, viene detallada en la Tabla 14.

Tabla 14. Costo de materiales e insumos

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	COSTO
FILAMETO DE ABS	KG	2,30	16,97	39,03
CÁMARA WEB MODEL A871	UNIDAD	1,00	12,80	12,80
SERVOMOTOR MODEL HS-311	UNIDAD	1,00	10,98	10,98
SERVOMOTOR MODEL HS-5585-MG	UNIDAD	2,00	60,58	121,16
SERVOMOTOR MODEL HS-2645CR	UNIDAD	2,00	32,19	64,38
SERVOMOTOR MODEL HS-1425CR	UNIDAD	3,00	19,42	58,26
SERVOMOTOR MODEL HS-55	UNIDAD	1,00	12,80	12,80
TORNILLOS AUTORROSCANTES	KG	0,03	4,00	0,12
CABLE 25 AWG	KG	0,01	8,00	0,08
SUB-TOTAL (O)				319,61

Se estima (en porcentaje) la inversión de todos los costos indirectos que se generan en la fabricación del brazo robótico como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Costos indirectos

DESCRIPCIÓN	PORCENTAJE
ARRIENDO	2.0%
LUZ	0.1%
AGUA	0.2%
TELÉFONO	0.3%
SECRETARIA	4.0%
RENTABILIDAD	5.0%
TOTAL	12%

La suma de los rubros calculados previamente que se han generado hasta el momento se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Subtotal del presupuesto final

ESTOS PRECIOS NO INCLUYEN EL IVA	TOTAL COSTO DIRECTO (M+N+O+P):		\$ 431,62
	INDIRECTOS :	12,00%	\$ 51,79
	COSTO TOTAL DEL RUBRO		\$ 483,41
	VALOR DE PRODUCCION		\$ 483,41

Como un plus para el producto se ha decidido otorgar una garantía del producto terminado de un año de duración (Tabla 17), en esta se revisa el costo de la póliza, el periodo de cobertura y el costo de la garantía.

Tabla 17. Análisis de costo de garantía

Costo póliza por un bien (4 por 1000)	Período (meses)	Costo de la garantía
0,0040	12,00	\$ 0,05

El presupuesto final se muestra en la Tabla 18, incluyendo el costo de distribución y la garantía generada en el período de un año.

Tabla 18. Presupuesto final del brazo robótico

PRESUPUESTO FINAL REAL PARA FABRICACIÓN Y SUMINISTRO DE BRAZO ROBÓTICO ASISTENCIAL					
RUBRO	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P.UNITARIO	TOTAL
1	PRODUCCION DE BRAZO				
1,1	FABRICACIÓN Y SUMINISTRO DE BRAZO ROBÓTICO	BRAZO	1,00	483,41	\$ 483,41
1,2	DISTRIBUCION EN EL MERCADO	CIUDADES	1,00	20,00	\$ 20,00
1,3	GARANTIA	UNIDAD	1,00	24,17	\$ 24,17
	TOTAL PRESUPUESTO			527,58	\$ 527,58

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- A la hora de realizar cálculos aritméticos y de álgebra dentro de un software es preferible trabajar con métodos analíticos antes que iterativos puesto que estos ocupan menos recursos y el cálculo se realiza mucho más rápido, aprovechando así la capacidad de procesamiento del equipo.
- La naturaleza heterogénea de los individuos no supone un problema para el sistema de visión artificial que ha sido desarrollado para el brazo robótico.
- Para facilitar el reconocimiento mediante el algoritmo Viola-Jones se limitan las imágenes obtenidas a caras que apuntan a la cámara y con una inclinación del eje axial de la cabeza menor a 18 grados respecto al eje vertical, esto es una limitación propia del algoritmo con el cual se trabaja. De esta manera se ha obtenido un resultado del 100% de efectividad al encontrar la boca del paciente.
- Los grados de libertad con los que debe contar un manipulador robótico han sido definidos en seis, debido a que con este número es con el cual se puede alcanzar virtualmente cualquier posición deseada.
- Se han determinado las longitudes de los eslabones y en especial para definir el alcance máximo del brazo robótico basándose en la longitud de un brazo humano promedio y se ha llegado a determinar un valor total de 690,42mm.
- El cálculo de las coordenadas de la boca se realiza siempre y cuando el sistema de visión artificial haya detectado la boca, hallando así su centroide; debido a que el sistema ha reconocido la boca el 100% de los casos asimismo se han hallado las coordenadas con precisión y exactitud.
- Los ángulos a los cuales deben ser movidos los eslabones se calculan de manera precisa con errores menores al 0.001% el 100% de las veces.
- La simulación de la operatividad del brazo robótico funciona al 100% respecto a las restricciones geométricas definidas por la cadena cinemática modelada previamente mediante herramientas CAD.
- El algoritmo Viola-Jones reconoce la boca de los usuarios el 100% de las veces excluyendo efectivamente los objetos que aparecen en el fondo; también lo hace sin importar el uso de accesorios como lentes o barba (para el caso de los varones) y además sin importar las condiciones de iluminación o si la fuente de luz es natural o artificial.
- Tanto la aceleración como la velocidad de todos los eslabones que componen el brazo robótico están controladas utilizando funciones de tipo sinusoidal de tal manera que la inercia es vencida generando movimientos suaves y continuos desde la posición inicial hasta la final en el 100% de los movimientos para completar una acción específica.

- Los torques medidos se encuentran dentro del rango de valores que exige el sistema mecánico en sus respectivas articulaciones para su funcionamiento.
- La trayectoria de los eslabones así como del efector final nunca interfieren o chocan entre ellos o con los elementos que componen el brazo robótico y funcionan dentro del área de trabajo propuesta de 0.4 m².
- La precisión y exactitud del sistema de control se refleja en el porcentaje de error medido en diez ciclos de repetición a la hora de entregar la comida al paciente, con un valor menor al 1.5% en todas las juntas.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso del algoritmo KLT (Kanade-Lucas-Tomassi) que tiene la capacidad de reconocer caras con la finalidad de registrar la boca sólo dentro del área que se ha reconocido como cara.
- Se recomienda el uso de visión estereoscópica con la finalidad de dotar al brazo robótico con la capacidad de precisar profundidad.
- Se recomienda buscar un algoritmo de reconocimiento de características faciales con menos limitaciones que Viola-Jones, para así poder trabajar con pacientes con otro tipo de problemas.
- El uso de servomotores de alta gama, incrementa en gran medida los costos en materiales, por esta razón es importante analizar el uso de servomotores equivalentes en marcas más económicas.
- Al trabajar con un número reducido de brazos robóticos el costo de fabricación es excesivamente alto, debido a esto es importante plantear una propuesta para la adquisición de equipos de impresión ABS propios y así sacar el máximo provecho.
- Para la fabricación de un prototipo o su producción en masa, se recomienda la utilización de la tarjeta de control “ArbotiX-M Robocontroller” que ha sido probada con éxito en el control de diferentes aplicaciones basadas en la herramienta “Robotics Toolbox” para MATLAB.

ANEXOS

ANEXO 1
PLANOS DE CONSTRUCCIÓN

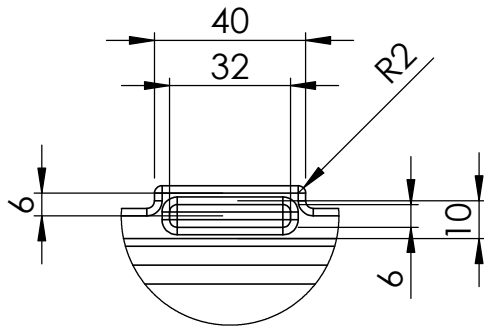
1

2

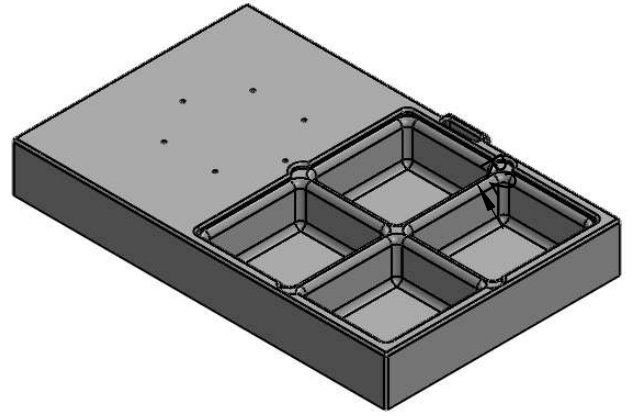
3

4

A

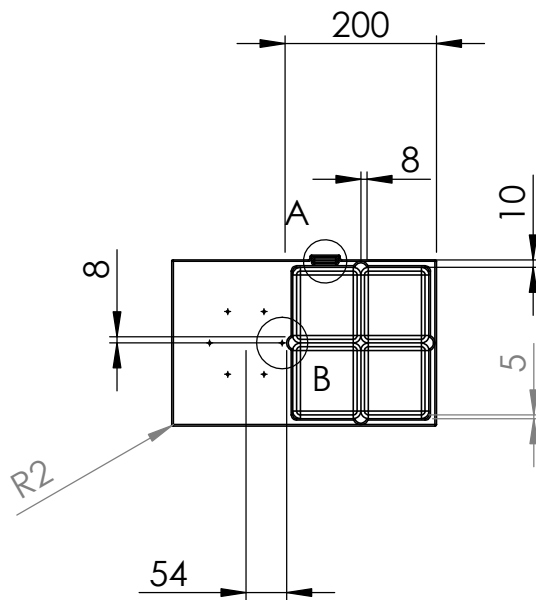


DETAIL A
SCALE 1 : 2



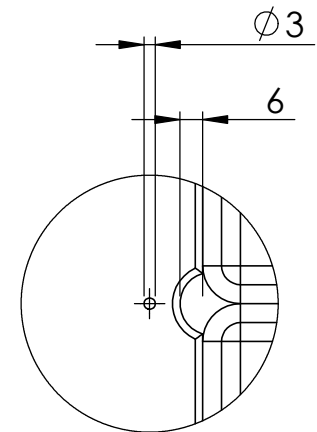
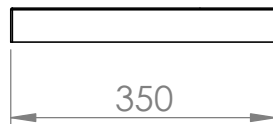
B

C

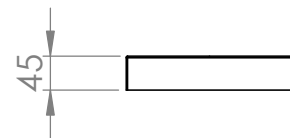



D

E



DETAIL B
SCALE 1 : 2



				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [g]: 1075.16	MATERIAL: ABS	
							ESCALA: 1:5
				Fecha Dibujado 8/7/2017	Nombre Adrián Tapia	<h1>Base 1</h1>	
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA: UTE		DIBUJO Nº:	HOJA: A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

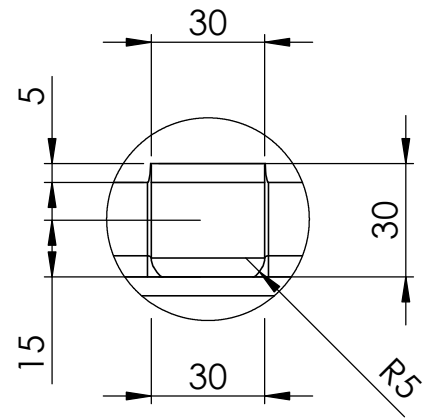
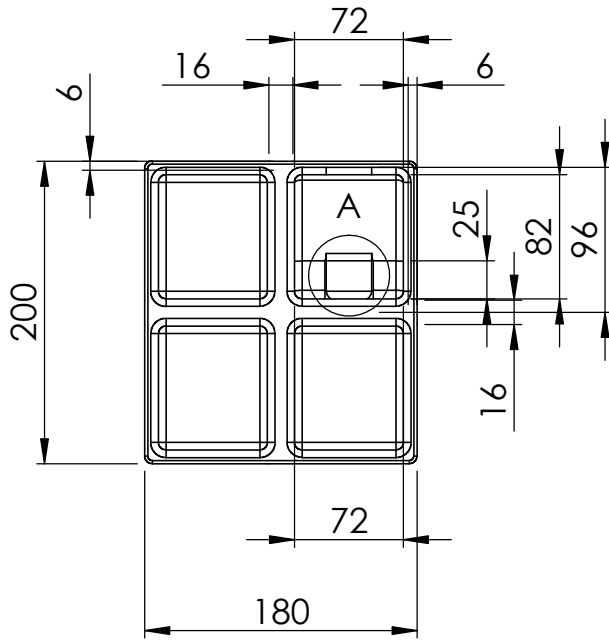
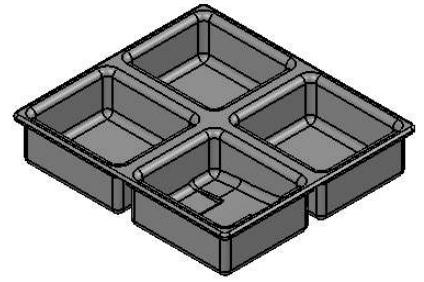
A

B

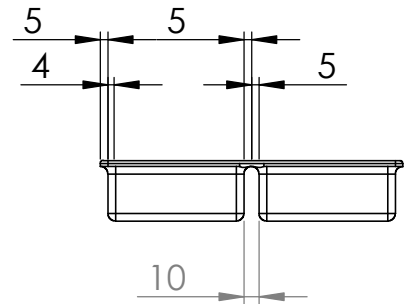
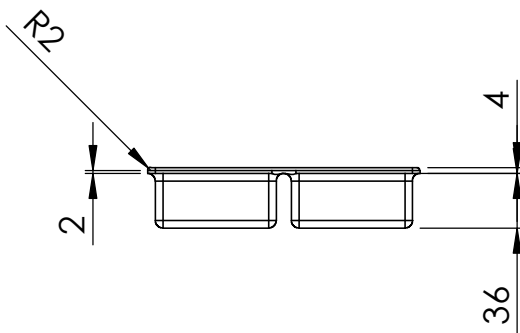
C

D

E



DETAIL A
SCALE 1 : 2



				TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:		
				±0.1	510.86	PET		
				Fecha	Nombre	<h1>Plato</h1>		ESCALA:
				Dibujado 8/10/2017	Adrián Tapia			1:5
				Revisado				
				Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA:	DIBUJO Nº:		HOJA:	
				UTE			A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre					

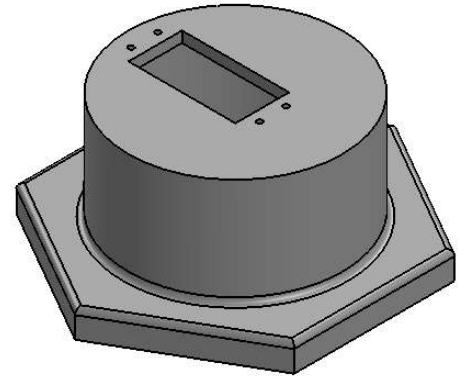
1

2

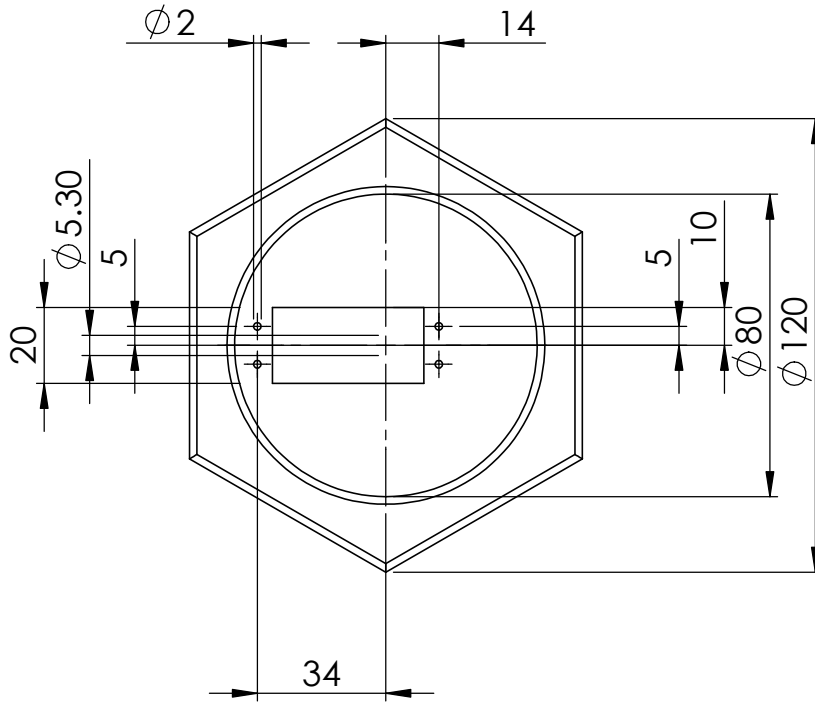
3

4

A

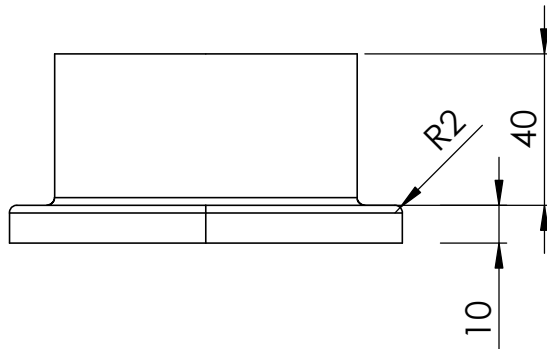


B



C

D



E

				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [g]: 81.53	MATERIAL: ABS	
							ESCALA: 1:2
				Fecha Dibujado 8/10/2017	Nombre Adrián Tapia	Base 2	
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA: UTE		DIBUJO Nº:	HOJA: A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

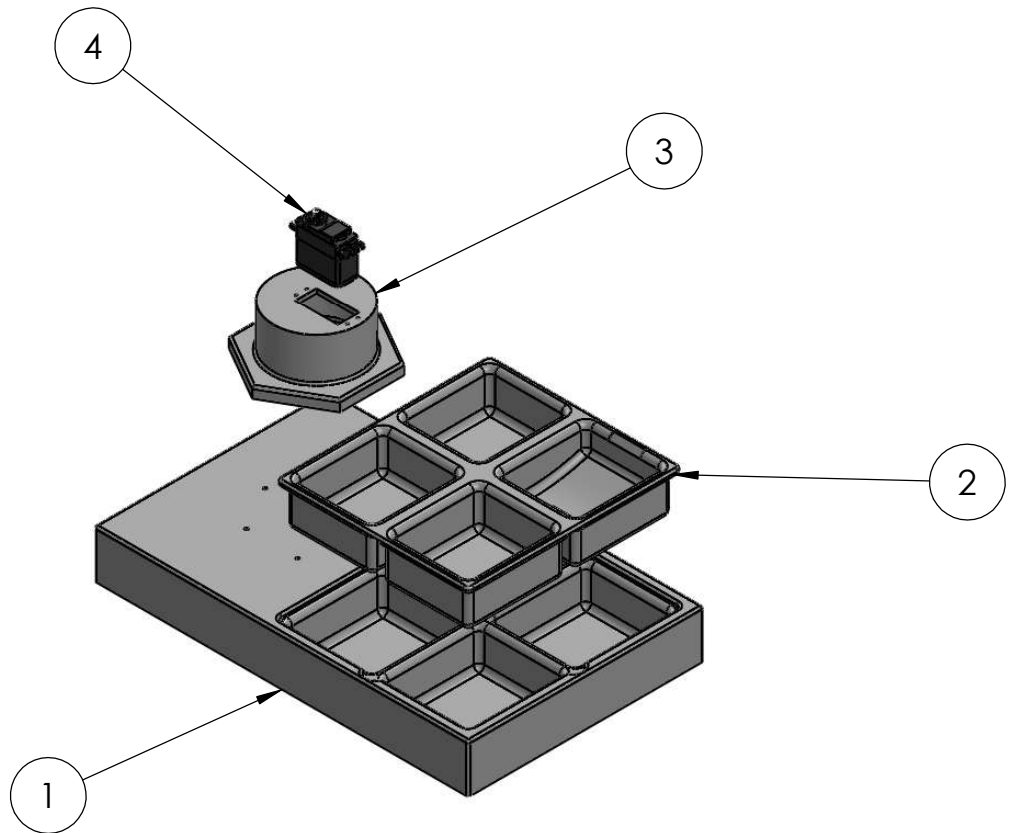
A

B

C

D

E



ITEM NO.	PART NAME	Material	QTY.
1	Base 1	ABS	1
2	Plato	ABS	1
3	Base 2	ABS	1
4	Servomotor	N/A	1

TOLERANCIA:

PESO [g]:

MATERIAL:

 ± 0.1

1565.78

Varios

Fecha

Nombre

Dibujado 8/10/2017

Adrián Tapia

Revisado

Aprobado

FIRMA / EMPRESA:

DIBUJO N°:

ESCALA:

Bancada

1:5

HOJA:

A4

Edición Modificación Fecha Nombre

UTE



1

2

3

4

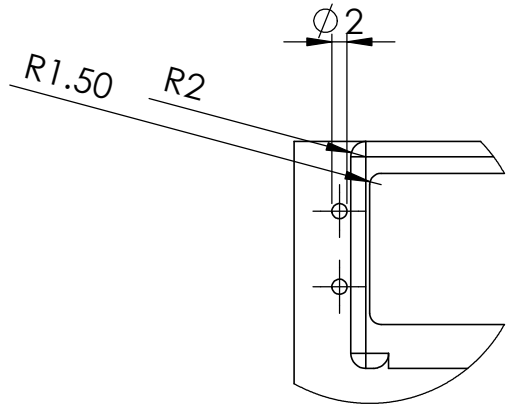
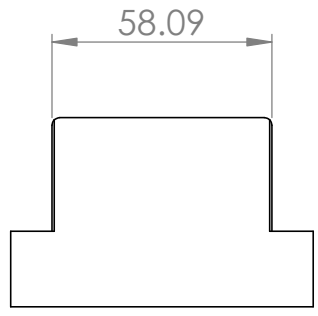
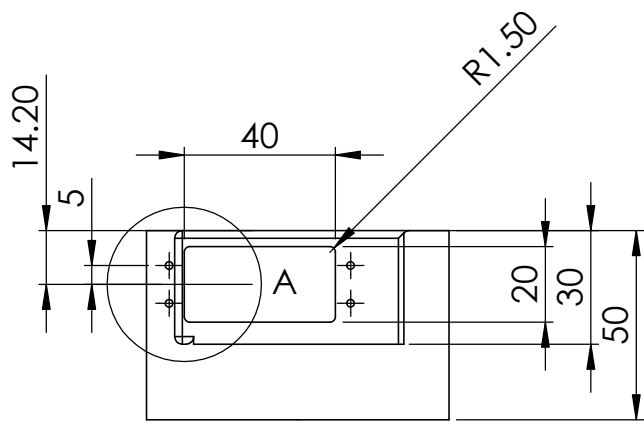
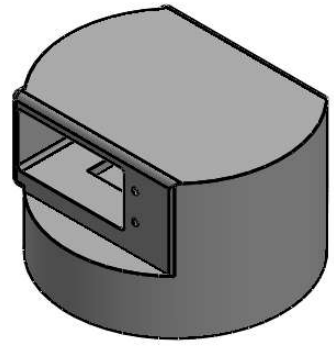
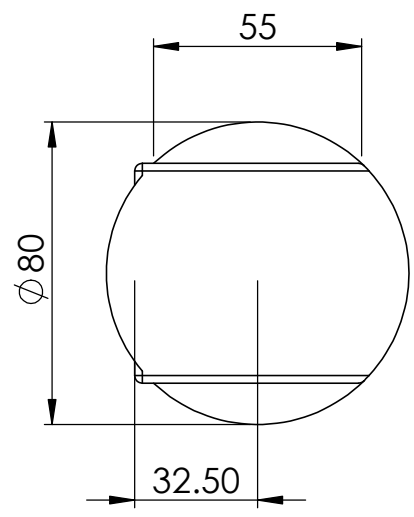
A

B


C

D

E



DETAIL A
SCALE 1 : 1

				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [g]: 98.82	MATERIAL: ABS	
				Fecha	Nombre	<h1>Cintura</h1>	ESCALA: 1:2
				Dibujado 8/10/2017	Adrián Tapia		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA: UTE		DIBUJO Nº:	HOJA: A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

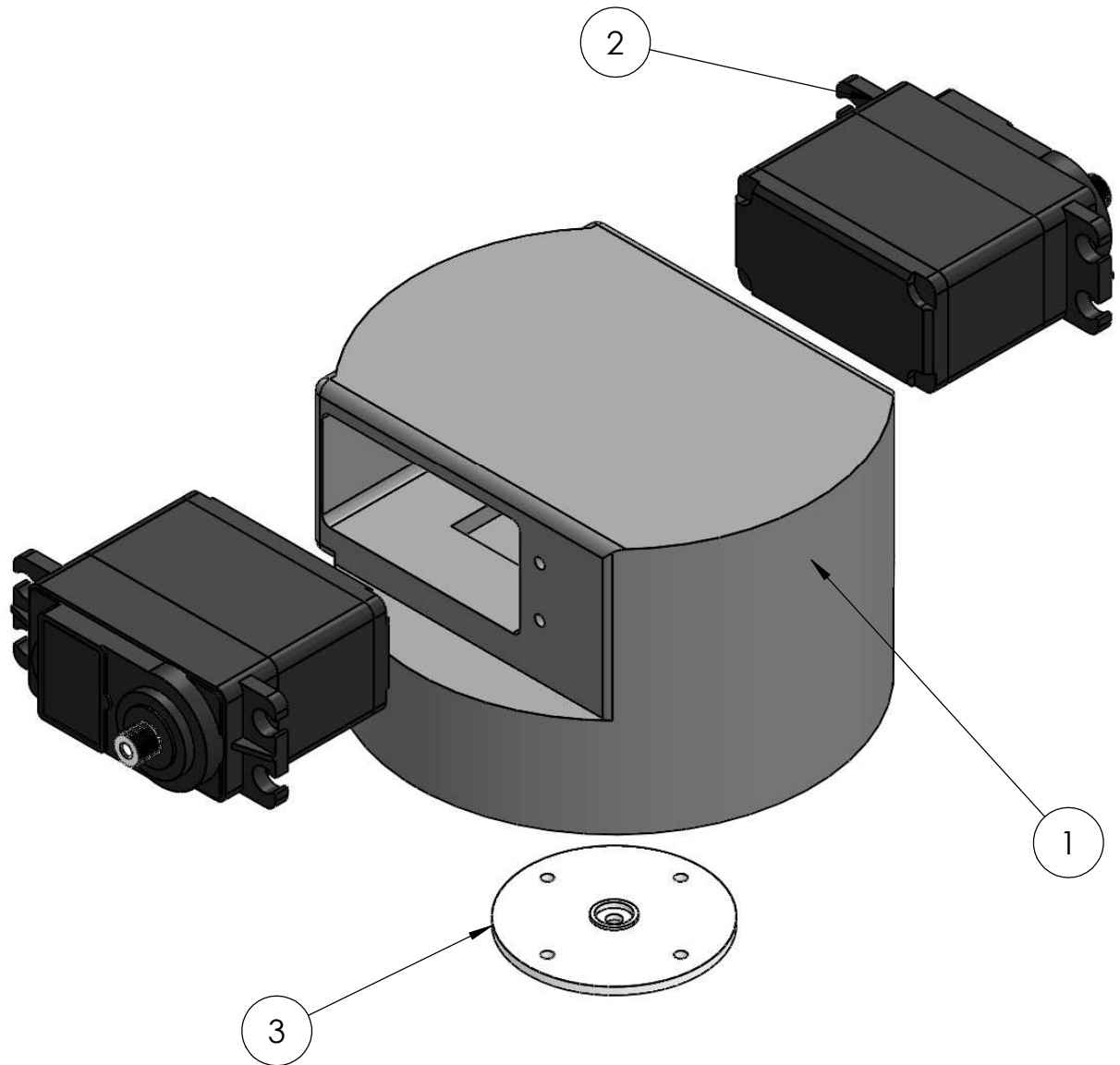
A

B

C

D

E



ITEM NO.	PART NAME	Material	QTY.
1	Cintura	ABS	1
2	Servomotor	N/A	2
3	Acople Servomotor	N/A	1

TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:
± 0.1	185.27	Varios
Fecha	Nombre	Cintura
Dibujado 8/10/2017	Adrián Tapia	
Revisado		
Aprobado		

ESCALA:

1:1

FIRMA / EMPRESA:

UTE



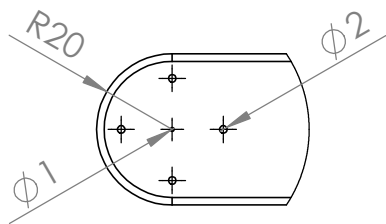
DIBUJO Nº:

HOJA:

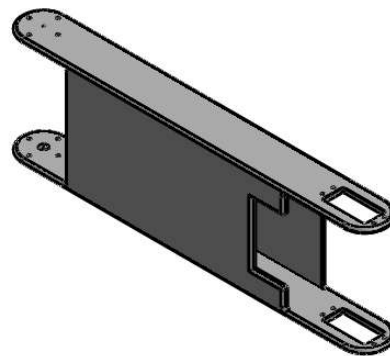
A4

Edición Modificación Fecha Nombre

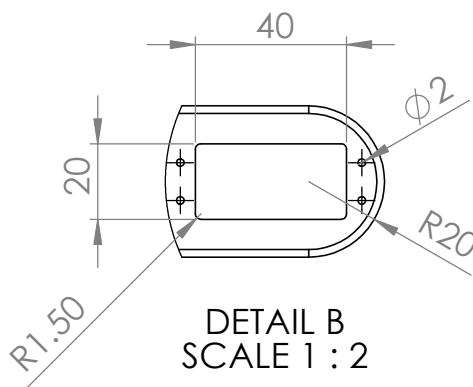
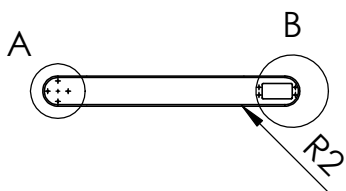
A



DETAIL A
SCALE 1 : 2



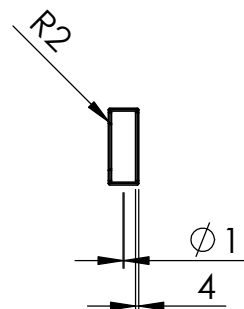
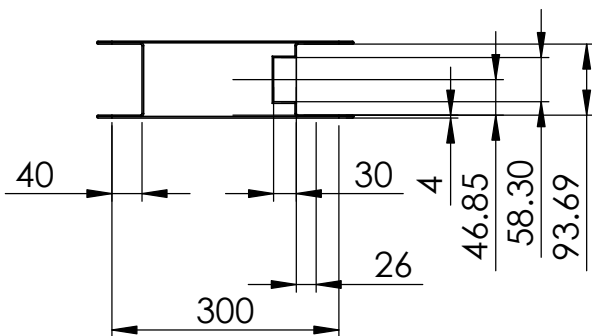
B



DETAIL B
SCALE 1 : 2

C

D



E

				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [g]: 248.06	MATERIAL: ABS		
						<h1>Brazo</h1>	ESCALA: 1:5	
				Fecha	Nombre			
				Dibujado	8/10/2017		Adrián Tapia	
				Revisado				
				Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA: UTE		DIBUJO Nº:	HOJA: A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre					

1

2

3

4

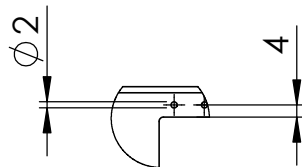
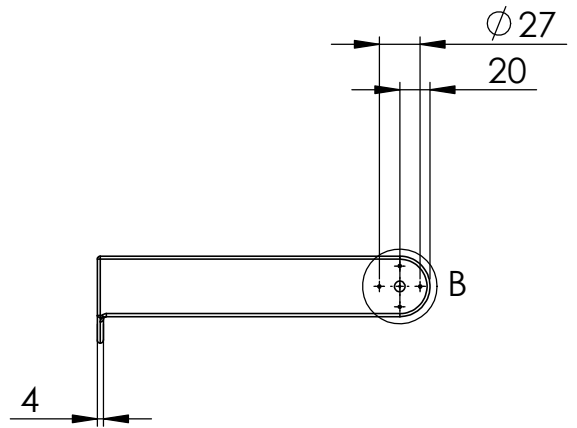
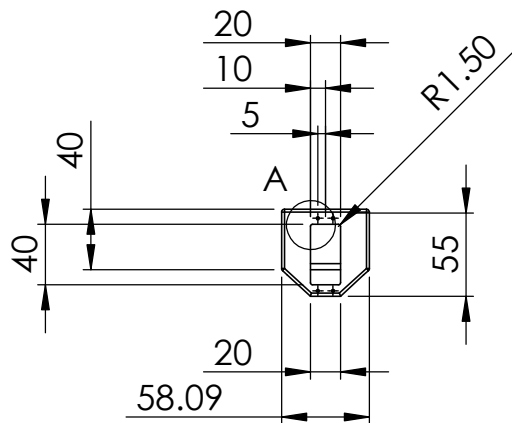
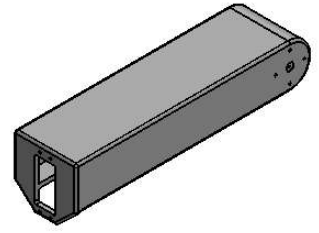
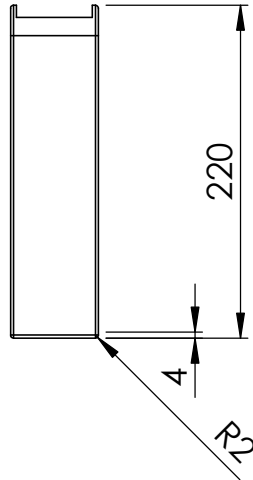
A

B

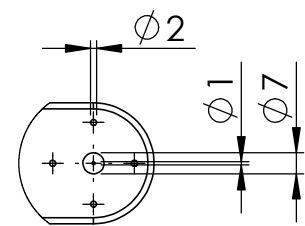
C

D


E



DETAIL A
SCALE 2 : 5



DETAIL B
SCALE 2 : 5

				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [g]: 157.10	MATERIAL: ABS	
				Fecha	Nombre	<h1>Antebrazo</h1>	ESCALA: 1:5
				Dibujado 8/7/2017	Adrián Tapia		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA: UTE		DIBUJO N°:	HOJA: A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

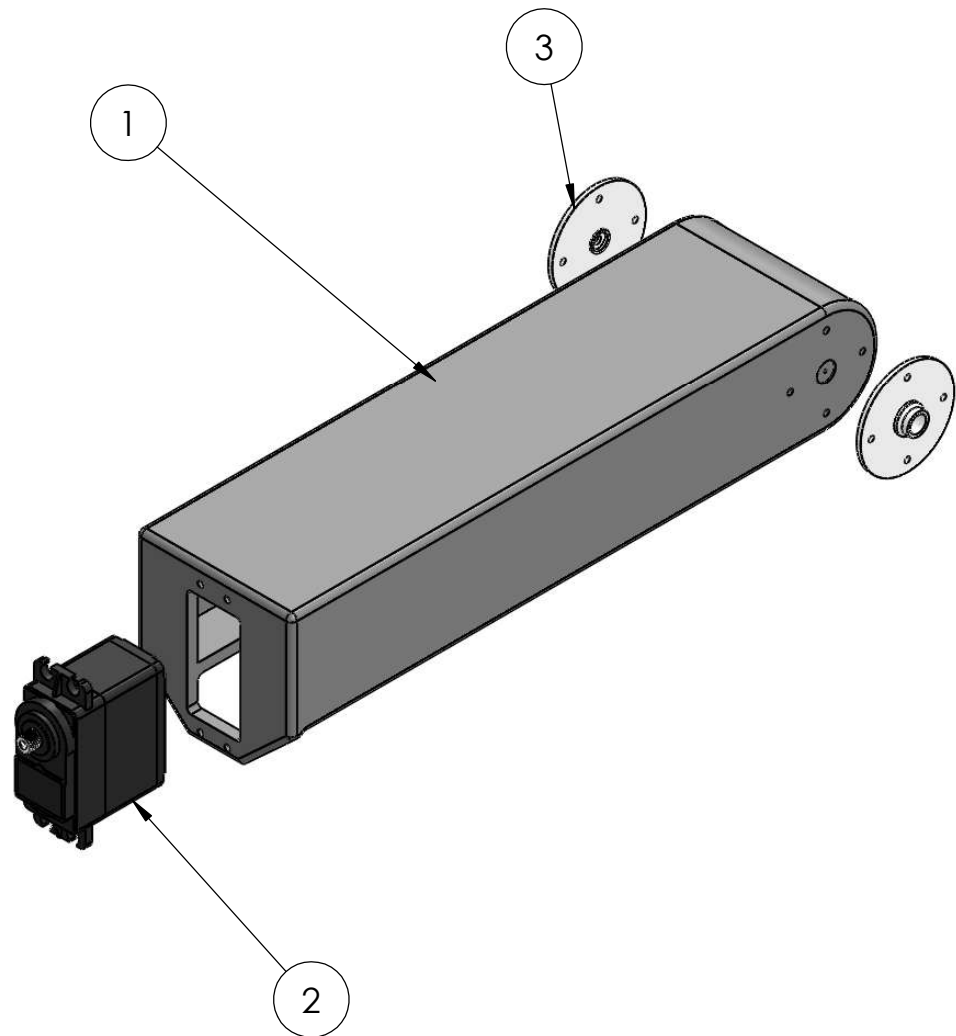
4

A

B


C

D



E

ITEM NO.	PART NAME	Material	QTY.
1	Antebrazo	ABS	1
2	Servomotor	N/A	1
3	Acople Servomotor	N/A	2

				TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:	
				± 0.1	203.59	Varios	
					Fecha	Nombre	ESCALA:
				Dibujado	8/10/2017	Adrián Tapia	1:2
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE			A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

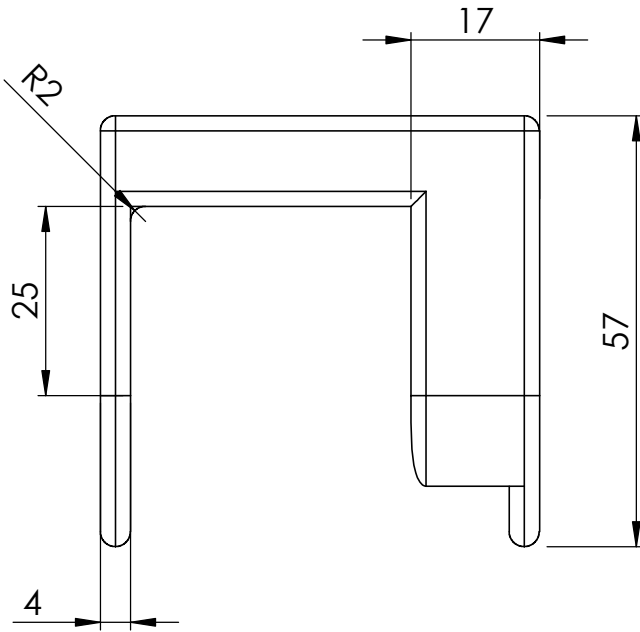
1

2

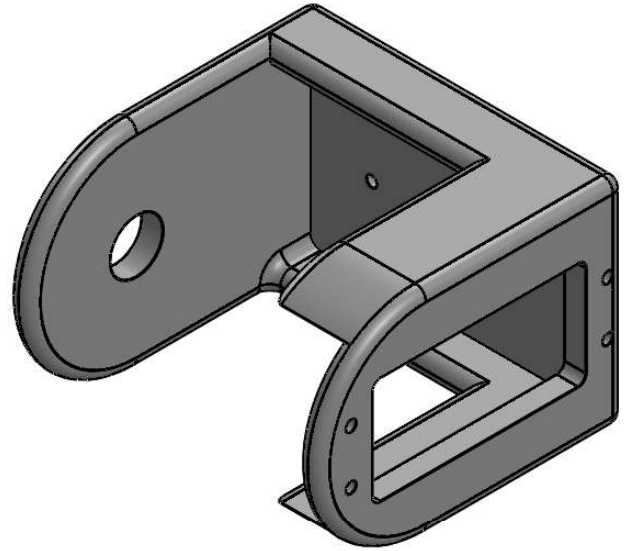
3

4

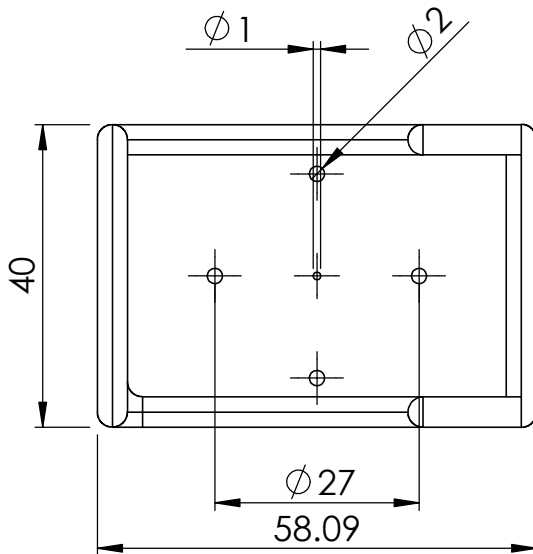
A



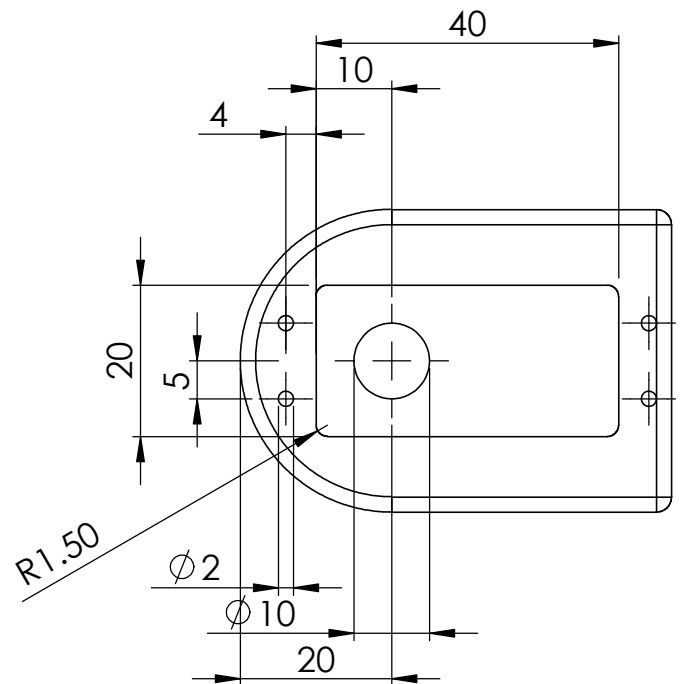
B



C



D



E

				TOLERANCIA: ± 0.1	PESO [g]: 26.52	MATERIAL: ABS	
							ESCALA: 1:1
				Fecha Dibujado 8/10/2017	Nombre Adrián Tapia	Muñeca 1	
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA: UTE		DIBUJO Nº:	HOJA: A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

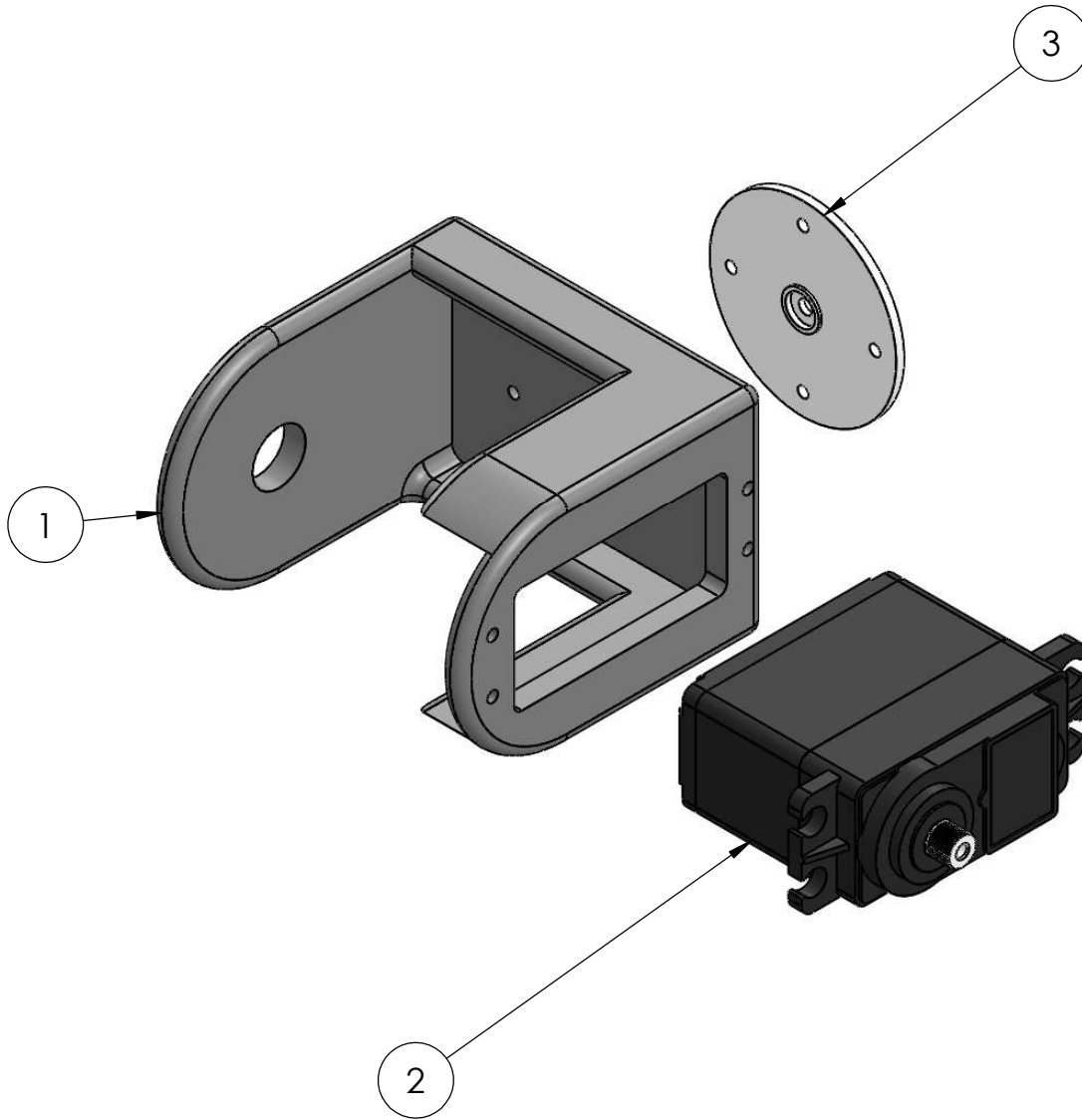
A

B

C

D

E



ITEM NO.	PART NAME	Material	QTY.
1	Muñeca 1	ABS	1
2	Servomotor	N/A	1
3	Acople Servomotor	N/A	1

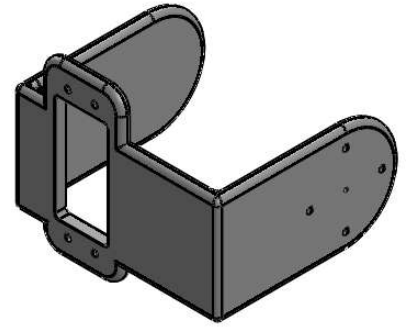
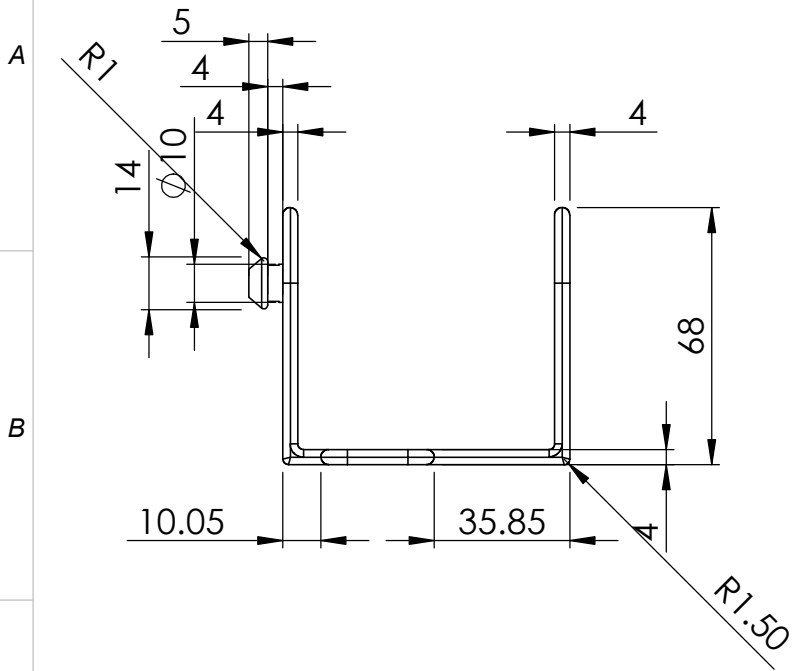
				TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:	
				± 0.1	70.83	Varios	
					Fecha	Nombre	Muñeca 1 ESCALA: 1:1
				Dibujado	8/10/2017	Adrián Tapia	
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE 			A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

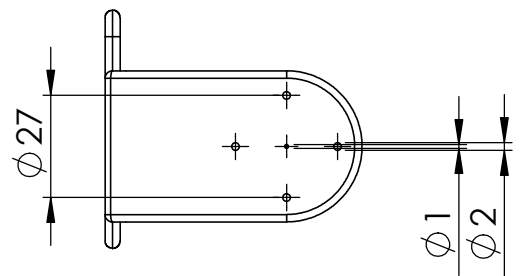
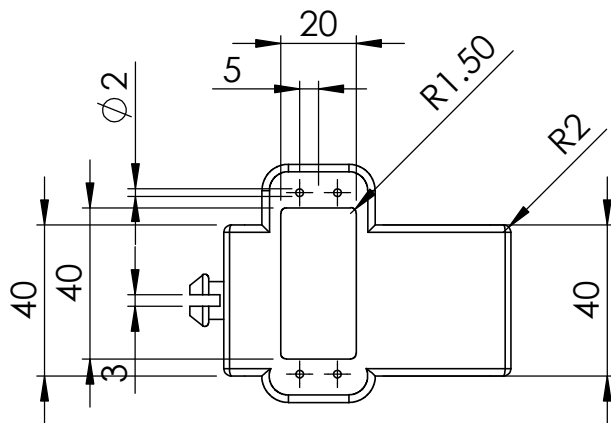
3

4



C

D



E

				TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:	
				± 0.1	30.90	ABS	
				Fecha	Nombre	<h1>Muñeca 2</h1>	ESCALA:
			Dibujado	8/10/2017	Adrián Tapia		1:2
			Revisado				
			Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE			A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

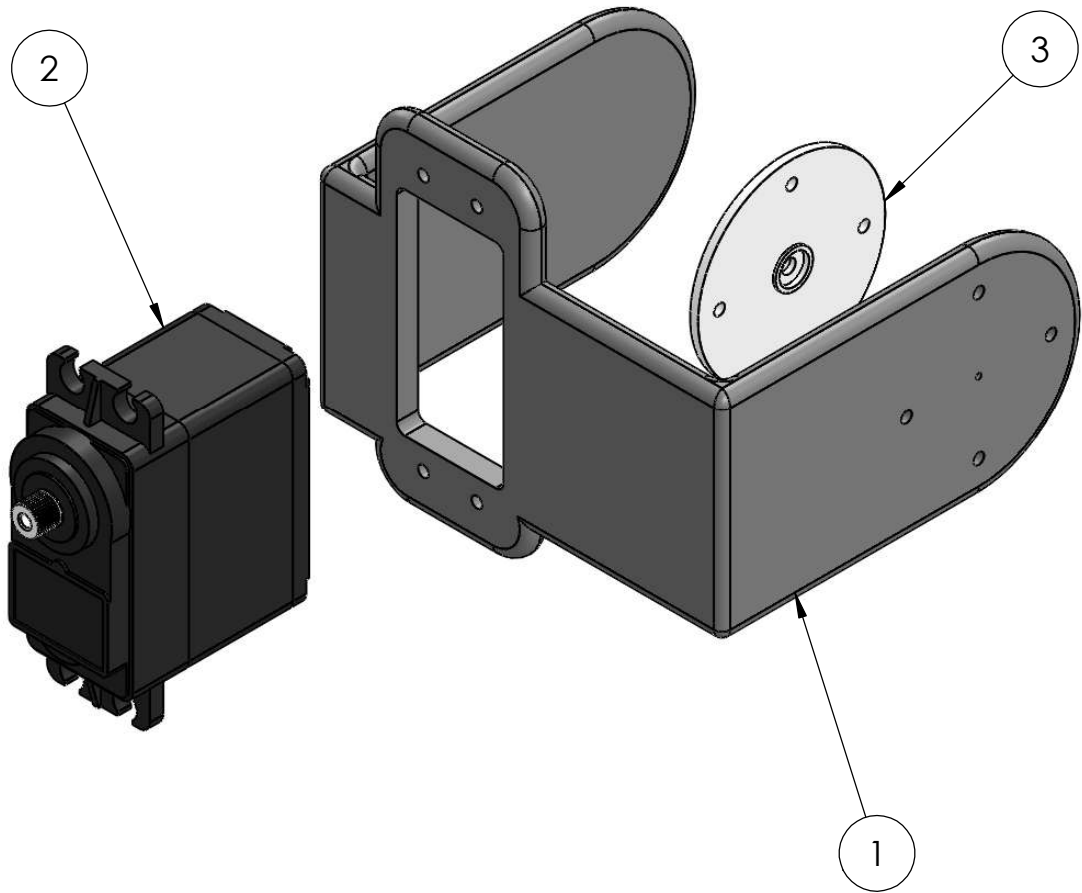
A

B

C

D

E



ITEM NO.	PART NAME	Material	QTY.
1	Muñeca 2	ABS	1
2	Servomotor	N/A	1
3	Acople Servomotor	N/A	1

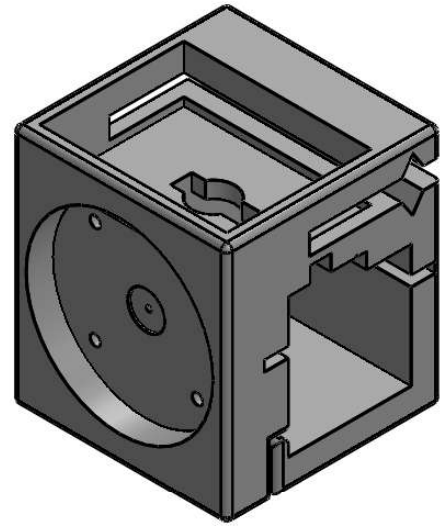
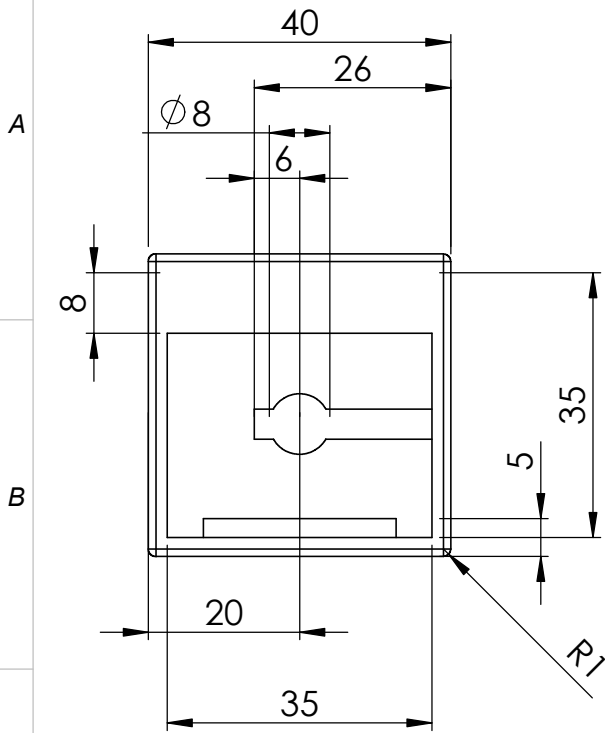
				TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:	
				± 0.1	75.22	Varios	
					Fecha	Nombre	ESCALA:
				Dibujado	8/10/2017	Adrián Tapia	1:1
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE			A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

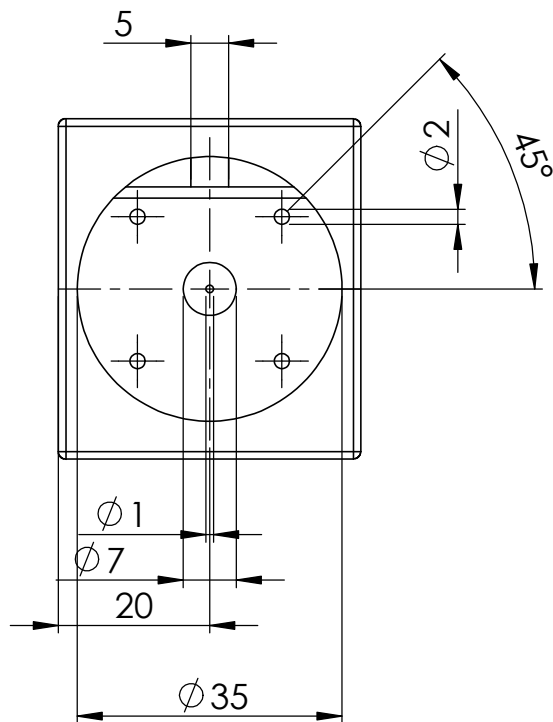
2

3

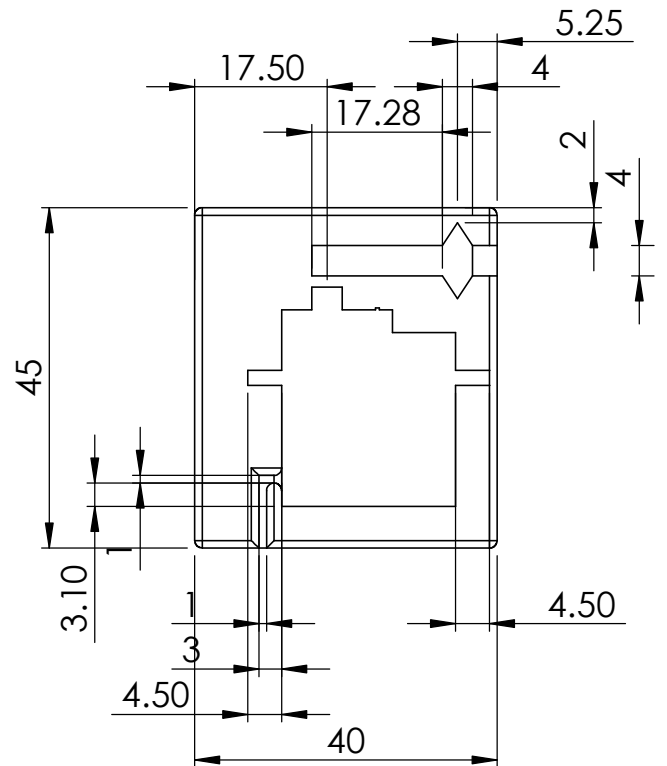
4



C



D



E

TOLERANCIA:

PESO [g]:

MATERIAL:

 ± 0.1

39.75

ABS

Fecha

Nombre

Dibujado

8/10/2017

Adrián Tapia

Revisado

Aprobado

FIRMA / EMPRESA:

UTE



DIBUJO Nº:

ESCALA:

Gripper Base

1:1

HOJA:

A4

Edición Modificación Fecha Nombre

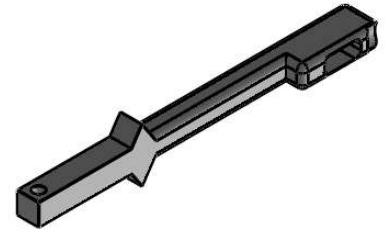
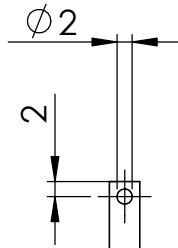
1

2

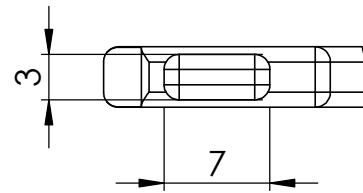
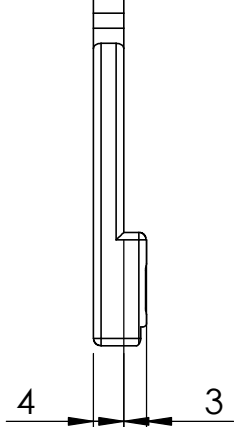
3

4

A



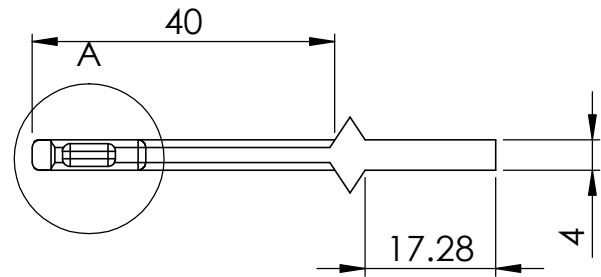
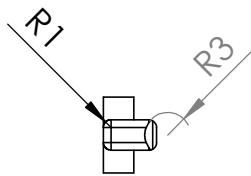
B



DETAIL A
SCALE 2 : 1

C

D



E

				TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:	
				±0.1	1.09	ABS	
				Fecha	Nombre	Gripper Tenaza	ESCALA:
			Dibujado	8/10/2017	Adrián Tapia		1:1
			Revisado				
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE			A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

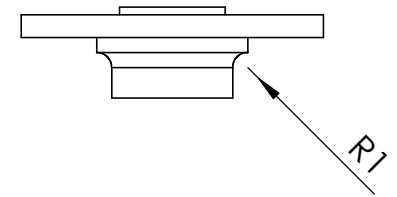
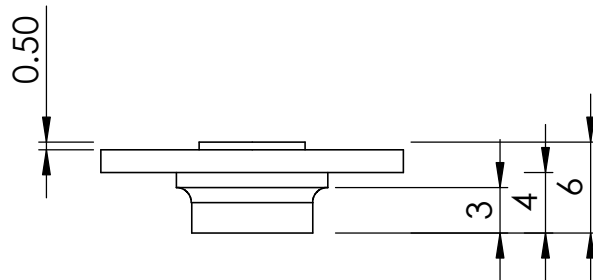
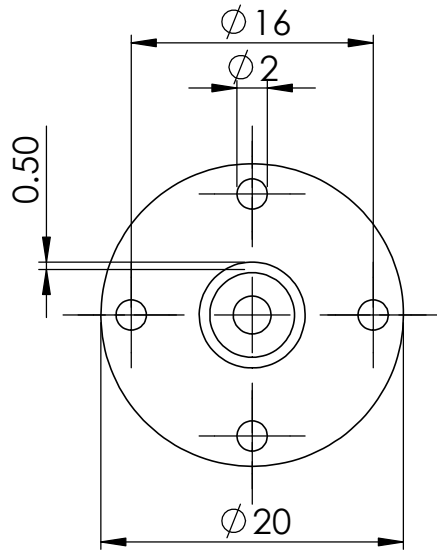
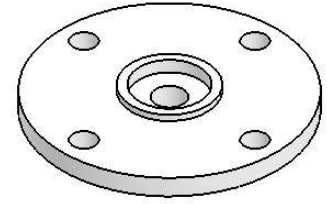
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:	
				± 0.1	0.65	ABS	
				Fecha	Nombre		ESCALA:
				Dibujado 8/7/2017	Adrián Tapia	Acople Micro-servomotor	2:1
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE			A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

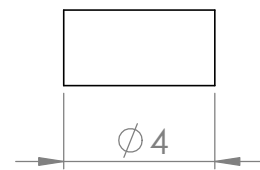
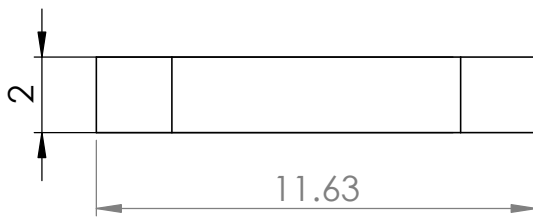
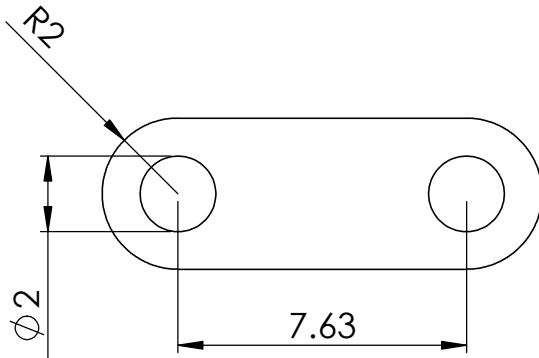
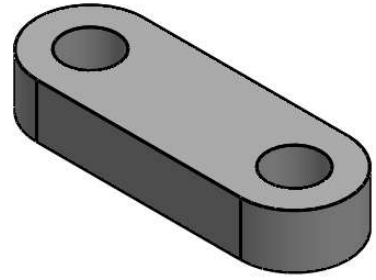
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:	
				± 0.1	0.08	ABS	
					Fecha	Nombre	ESCALA:
				Dibujado	8/10/2017	Adrián Tapia	5:1
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE			A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

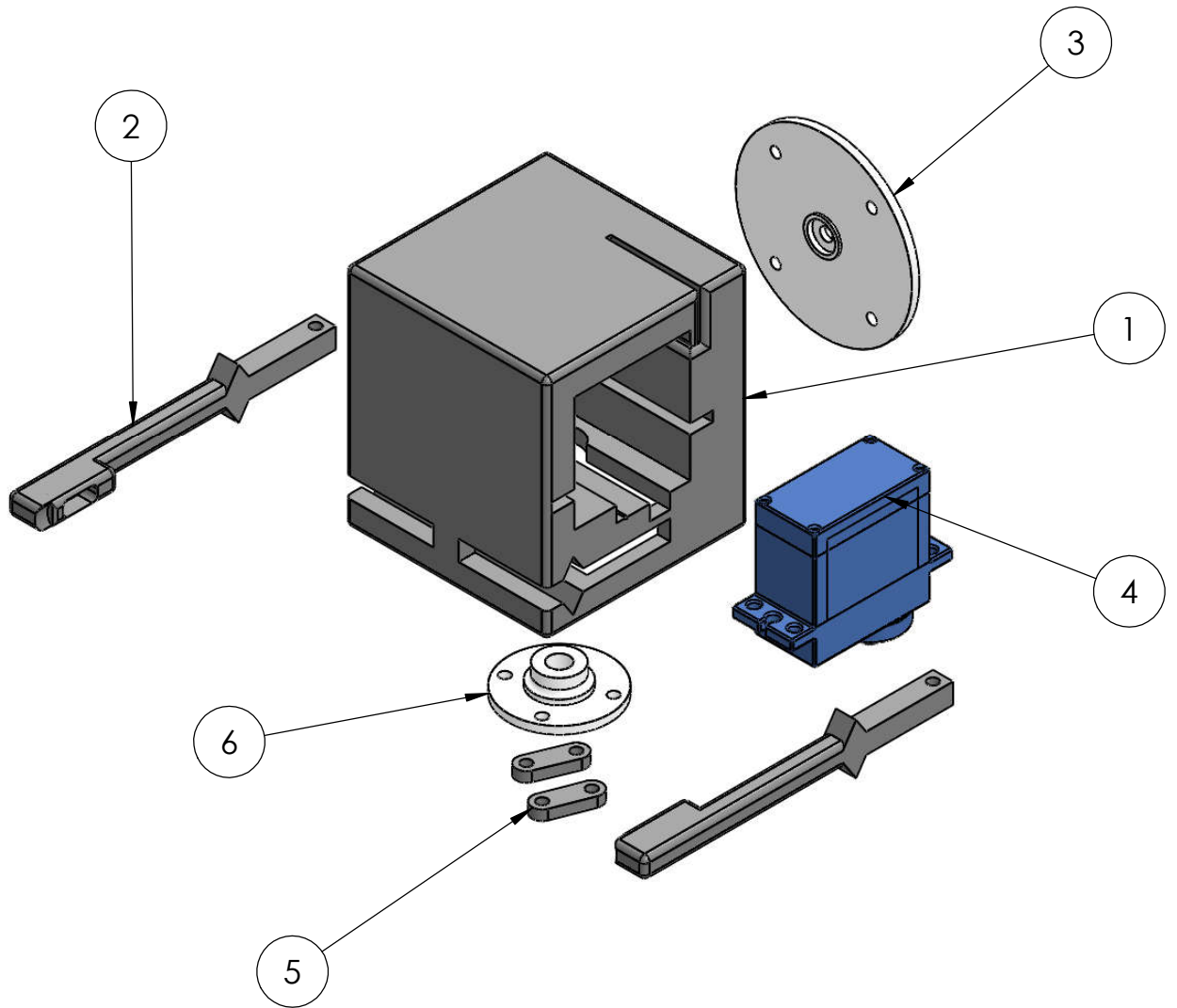
A

B

C

D

E



ITEM NO.	PART NAME	Material	QTY.
1	Base del gripper	ABS	1
2	Tenaza del gripper	ABS	2
3	Acople Servomotor	N/A	1
4	Micro-servomotor	N/A	1
5	Brazo del gripper	ABS	2
6	Acople micro-servomotor	ABS	1

TOLERANCIA:

PESO [g]:

MATERIAL:

±0.1

52.00

Varios

Fecha

Nombre

Dibujado 8/10/2017

Adrián Tapia

Revisado

Aprobado

FIRMA / EMPRESA:

DIBUJO Nº:

ESCALA:

1:1

HOJA:

A4

Edición Modificación Fecha Nombre

UTE



1

2

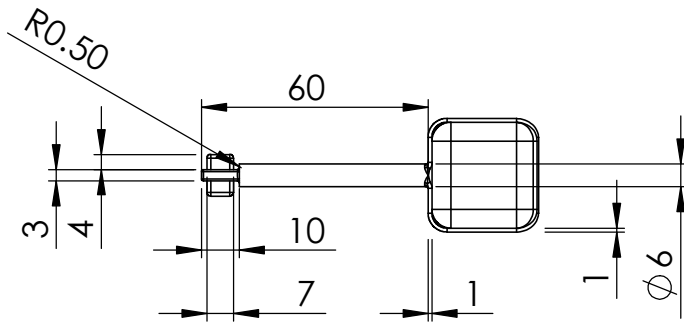
3

4

A

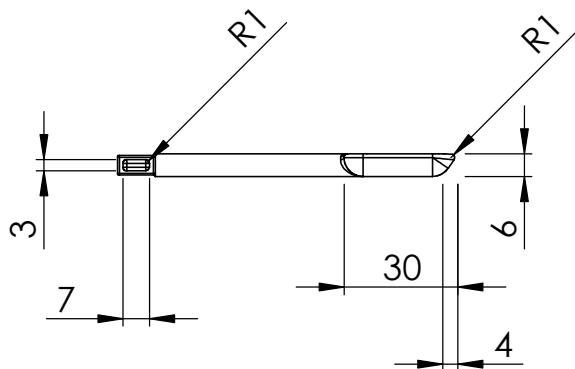


B

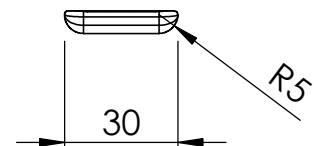


C

D



E



				TOLERANCIA:	PESO [g]:	MATERIAL:	
				±0.1	4.24	PET	
				Fecha	Nombre	<h1>Spoon</h1>	ESCALA:
			Dibujado	8/10/2017	Adrián Tapia		1:2
			Revisado				
			Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE			A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

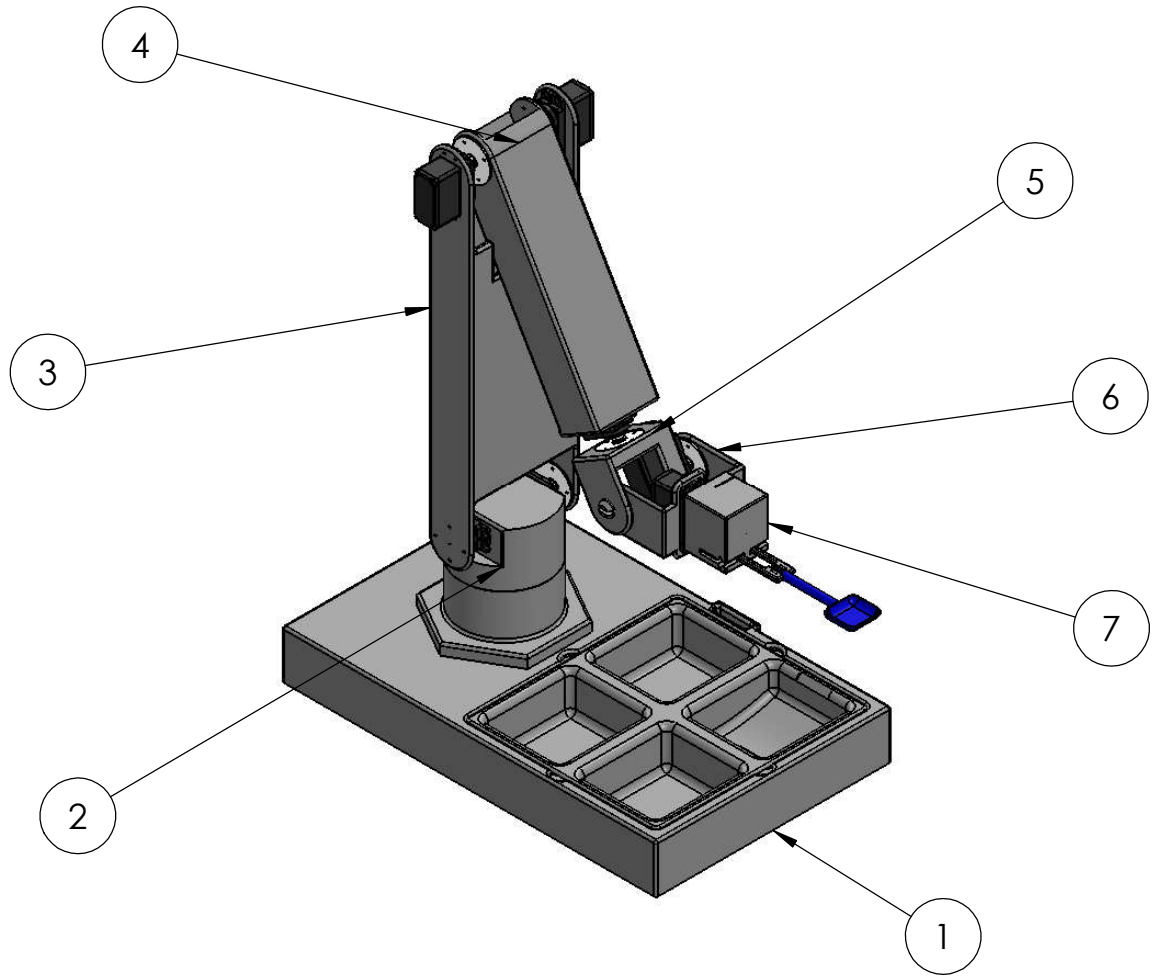
A

B

C

D

E



ITEM NO.	PART NAME	QTY.
1	Bancada	1
2	Cintura	1
3	Brazo	1
4	Antebrazo	1
5	Muñeca 1	1
6	Muñeca 2	1
7	Gripper-Spoon	1

TOLERANCIA:

PESO [g]:

MATERIAL:

 ± 0.1

2492.58

Varios

Fecha

Nombre

Dibujado 8/10/2017

Adrián Tapia

Revisado

Aprobado

Brazo Asistencial

ESCALA:

1:10

FIRMA / EMPRESA:

DIBUJO Nº:

HOJA:

UTE

Edición Modificación Fecha Nombre

A4

ANEXO 2
PROFORMAS PARA IMPRESIÓN 3D

Re: Cotización para impresión de piezas

Luis Chavez <compra-venta2017@hotmail.com>

jue 13/07/2017 12:52

Para: Adrian Tapia Hidalgo < @hotmail.com>;

Saludos cordiales estimado he recibido y revisado todos los archivos que usted requiere imprimir, 15 son grandes y los demás pequeños. Los grandes haciéndole un pequeño descuento por la cantidad le sale cada uno a usd \$22dolares y el resto más o menos a 3 dolares es por la cantidad de metros de filamento a utilizarse en su impresión; en las figuras grandes demora cada una dos a tres horas.

Total todas las piezas impresas le doy en los 380 dólares y necesitare un abono de 200 para adquirir dos rollos de filamento en color blanco y la diferencia a la entrega del trabajo en un lapso de 4 a 5 días laborables

Quedo en espera de su respuesta para proceder con el trabajo, favor llamar al 024507326 y ver si puede venir a que vea una prueba de como queda antes de proseguir con todo si usted acepta, gracias

Atte;

Luis Enrique Chavez

De: Adrian Tapia Hidalgo < @hotmail.com>

Enviado: jueves, 13 de julio de 2017 12:25:32

Para: compra-venta2017@hotmail.com

Asunto: Cotización para impresión de piezas

Buenos días,

He llamado hace poco para pedir una cotización de la impresión de unas piezas.

En el archivo adjunto envío dichas piezas en extensión .STL

Cabe destacar que la pieza con nombre "**Gripper_tenazaV2**" es la única pieza que **debe ser impresa dos veces** para completar el proyecto.

Como había comentado antes, si es necesario se podrían imprimir las piezas muy grandes por partes para poder pegarlas luego.

Por la atención brindada anticipó mis agradecimientos.

Adrián Tapia

DIEGO ANTONIO AGUINSACA G
SANGOLQUÍ, AV. GENERAL RUMIÑAHUI GUAYAS 11 Y MORONA
Telf: 022338961
RUC: 1104806359001

PROFORMA DE VENTA Nro: 165

CLIENTE: ADRIÁN TAPIA
FECHA: 13 de julio de 2017
DIRECCIÓN: QUITO

Elaborado
VENTAS
13/07/2017 16:55:06

Estimados Señores:
Por la presente nos es grato actualizar y cotizar lo siguiente:

Código Prod.	Descripción	Cantidad	Precio. Unit	%Dsto	Descuento	Total
SV-1046I3D	SERVICIOS IMPRESIÓN 3D_minutos de impresión (142H47)	1,00	540,60	0,00	0,00	540,60
SV-1046I3D	SERVICIOS IMPRESIÓN 3D_Gramos de material (1630,02 gr)	1,00	163,00	0,00	0,00	163,00

SON: SETECIENTOS OCHENTA Y OCHO 3/100 DÓLARES AMERICANOS

Esperando su pronta noticia y agradeciendo por considerar nuestros productos reitero mis sentimientos de alta consideración y estima.

Atentamente,

DIEGO ANTONIO AGUINSACA GARCÍA

ESTOS PRECIOS PUEDEN VARIAR SIN PREVIO AVISO

SubTotal:	703,60
Descuento:	0,00
Base 0%:	0,00
Base 12%:	703,60
IVA:	84,43
Total a Pagar:	788,03

Re: Cotización para impresión de piezas

Oriana De La Barrera <oriana.makergroup@gmail.com>

mié 12/07/2017 13:25

Para: Adrian Tapia Hidalgo <@hotmail.com>;

Estimado Adrian, gusto en saludarle.

Le comento lo siguiente:

- El archivo base 1, es muy grande, no entra en la plataforma de impresion. Lo factible es imprimir en 4 partes. En este caso, tendría que partirle y enviarme las 4 partes.
- Archivo brazo, es muy grande no entra en la plataforma, hay que imprimirle en 2 partes. Tendria que partirle y enviarme las 2 partes.
- El archivo Plato tarda 19horas 37 min de impresion, como le comente es demasiado para una sola impresion. Habría que imprimirle en partes y pegarle.
- Hay piezas que para poder realizar la impresion, generan soportes, los mismos le retiramos, pudiendo quedar rugosa la superficie donde estuvieron.

Le indico el tiempo de impresion por cada archivo, el precio de impresion es de \$8.50 mas iva por hora:

- Acople_ms : 6 min
- Antebrazo : 6h42min
- Base 1 (impreso en 4 partes) : 37 horas.
- Base 2 : 6h42min
- Brazo : 11h30min
- Cintura :4h26min
- Gripper base : 1h 44min
- Gripper brazo :3mim
- Gripper tenaza x 2 : 14 min
- Muneca 1 : 1h 44 min
- Muneca 2 : 2h04 min
- Plato :19horas 37min
- Spoon : 16 min

El valor total por las 14 piezas impresas en abs es de \$783.45 mas iva. **\$877.46**

Para proceder con las impresiones debe abonar el 50% del monto total y al finalizar, cuando retire cancela el monto restante.

Dado el monto total, le podemos ofrecer un 20 % de descuento.

Cualquier consulta, estoy para ayudarle.

Saludos,

Oriana De La Barrera

Maker Group | Quito - Ecuador.

Shyris N36-188 y NNUU, Edif. Shyris Park, Oficina 204.

telf: +593 292-6019 | +593 958739373

oriana.makergroup@gmail.com

www.makergroupecuador.com

 [makergroupecuador](#)

 [makergroup](#)

BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Ecuatoriana de Psiquiatría. (2010). Discapacidades y su calificación. Recuperado 2 de agosto de 2017, a partir de http://aep-quito.org/biblioteca-digital/doc_download/72-discapacidades-y-su-calificacion.html
- Ávila-Chaurand, R., León Prado, L. R., & González Muñoz, E. L. (2007). *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana* (Segunda ed). Jalisco.
- Barea, R. (2012). Robótica Médica. *Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá.*, 21. Recuperado a partir de <http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/5/RoboticaMedica.pdf>
- Bedford, A., & Fowler, W. (2012). *INGENIERIA MECANICA DINAMICA*. Massachussets.
- Consejo Nacional de Discapacidades. (2017). INFORMACIÓN ESTADÍSTICA DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD. Recuperado 18 de septiembre de 2017, a partir de <http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadistica/index.html>
- Corke, P. (2011). *Robotics, Vision and Control - Fundamental Algorithms in MATLAB*. *Robotics Research*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73958-6_2
- Corke, P. (2015a). Analytical inverse kinematics. Recuperado 19 de febrero de 2017, a partir de <https://github.com/petercorke/robotics-toolbox-matlab/blob/master/@SerialLink/ikine6s.m>
- Corke, P. (2015b). Frequently asked questions. Recuperado 5 de julio de 2017, a partir de <https://github.com/petercorke/robotics-toolbox-matlab/wiki/FAQ>
- Corke, P. (2017). Developer. Recuperado 3 de febrero de 2017, a partir de <http://petercorke.com/wordpress/toolboxes/support-developer>
- Feil-Seifer, D., & Matarić, M. J. (2011). Socially assistive robotics. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 18(1), 24-31. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2005.1501143>
- Fernandez, V. (2009). *Desarrollo de un Entorno Virtual para la Evaluación Experimental en Robótica Asistencial*. Online.
- Hitec RCD KOREA Inc. (2017). HSR-2645CR. Recuperado 18 de julio de 2017, a partir de http://hitecrd.co.jp/products/hitec/servo/pdf/32645C_HSR-2645CR_141114.pdf
- Hitec RCD USA Inc. (2017a). HS-311. Recuperado 18 de julio de 2017, a partir de <http://hitecrd.com/products/servos/sport-servos/analog-sport-servos/hs-311-standard-economy-servo/product>
- Hitec RCD USA Inc. (2017b). HS-55. Recuperado 18 de julio de 2017, a partir de <http://hitecrd.com/products/servos/micro-and-mini-servos/analog-micro-and-mini-servos/hs-55-economy-feather-servo/product>
- Hitec RCD USA Inc. (2017c). HS-5585MH. Recuperado 18 de julio de 2017, a partir de <http://hitecrd.com/products/servos/sport-servos/digital-sport-servos/hs-5585mh-economical-high-torque-digital-coreless->

servo/product

- Hitec RCD USA Inc. (2017d). HSR-1425CR. Recuperado 18 de julio de 2017, a partir de <http://hitecrcd.com/products/servos/robotic-servos/hsr-1425cr-continuous-rotation-servo/product>
- Huete, A. J., Victores, J. G., Martínez, S., Giménez, A., & Balaguer, C. (2012). Personal autonomy rehabilitation in home environments by a portable assistive robot. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 42(4), 561-570. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2011.2159201>
- INEN. (2014). Reglamento Técnico Ecuatoriano - INEN 100 -Materiales y artículos plásticos destinados a estar en contacto con los alimentos. *Pagina Web*, (14), 8. Recuperado a partir de <http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/09/RTE-100.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2017). Población y Demografía. Recuperado 18 de septiembre de 2016, a partir de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
- ISO. (2014). Robots and robotic devices — Safety requirements for personal care robots. Recuperado 13 de septiembre de 2017, a partir de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13482:ed-1:v1:en>
- Jardón, A. (2006). *Assistive robot design methodology. Application to portable robot ASIBOT*.
- Mohammad, S. (2013). Journal of oral biology and craniofacial research. Recuperado 7 de febrero de 2017, a partir de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3941295/>
- Neater Solutions Ltd. (2017). Neater Eater Robotic. Recuperado 3 de febrero de 2017, a partir de <http://www.neater.co.uk/neater-eater-2-2/>
- Norton, R. (2009). *DISEÑO DE MAQUINARIA*. (I. EDITORES, Ed.) (4.^a ed.). México D.F.: McGRRAW-HILL.
- SECOM CO. LTD. (2017). Meal-assistance Robot My Spoon. Recuperado 3 de febrero de 2017, a partir de <http://www.secom.co.jp/english/myspoon/>
- The MathWorks Inc. (2017). Product Documentation. Recuperado 15 de febrero de 2017, a partir de https://www.mathworks.com/help/vision/ref/vision.cascadeobjectdetector-class.html?s_tid=doc_ta
- Trossen Robotics. (2017). ArbotiX-M Robocontroller. Recuperado 12 de mayo de 2017, a partir de <http://www.trossenrobotics.com/p/arbotix-robot-controller.aspx>
- UL LLC. (2017a). Ácido poliláctico (PLA) Propiedades típicas. Recuperado 17 de marzo de 2017, a partir de <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/34/c/t/acido-polilactico-pla-properties-processing>
- UL LLC. (2017b). Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) Propiedades típicas Generic ABS. Recuperado 17 de marzo de 2017, a partir de <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/1/c/t/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-properties-processing>
- UL LLC. (2017c). Poliéster (poliéster) Propiedades típicas Generic PET. Recuperado 17 de marzo de 2017, a partir de <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/37/c/t/poliester-poliester->

properties-processing/sp/17

- Verein Deutscher Ingenieure. (2004). Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme Design methodology for mechatronic systems VDI 2206. *Design*, (June), 118. <https://doi.org/10.1002/mawe.19740050417>
- Virk, G. S., & Cameron, S. (2014). ISO - IEC standardization efforts in robotics. *Standardized Knowledge Representation and Ontologies for Robotics and Automation*, 5-6.