



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN EXOESQUELETO DE
EXTREMIDAD SUPERIOR PARA CONTROLAR UN BRAZO
ROBOT**

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

MARLON PAUL MORALES ULCO

DIRECTOR: ING. GUILLERMO MOSQUERA CANCHINGRE MSC.

Quito, Marzo 2017

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

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1719680017
APELLIDO Y NOMBRES:	Morales Ulco Marlon Paul
DIRECCIÓN:	Tumbaco, Manuela Garaycoa E5-280 y Antonio de sierra.
EMAIL:	mar12ng@gmail.com
TELÉFONO FIJO:	2046294
TELÉFONO MOVIL:	0984946594

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Diseño e implementación de un exoesqueleto de extremidad superior para controlar un brazo robot.
AUTOR O AUTORES:	Morales Ulco Marlon Paul
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Marzo 2017
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Ing. Guillermo Mosquera, MSc
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero mecatrónico
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	<p>En el presente proyecto, se tuvo como objetivo el diseño, modelado e implementación de un sistema mediante el cual se pudo controlar un brazo robótico mediante comandos de movimiento captados por un exoesqueleto adaptado a una</p>

	<p>extremidad superior, se necesitó realizar un análisis de grados de libertad, ángulos de movimiento de las articulaciones y limitaciones que tuvieron tanto el brazo robótico como el exoesqueleto. Mediante la metodología de diseño mecatrónico se determinaron requerimientos que se verificaron una vez implementado el sistema, el diseño mecánico, eléctrico y de control se desarrollaron de forma conjunta de manera que un sistema no afecte la integridad de otro. El diseño mecánico se realizó y simuló en un programa CAD para comprobar el funcionamiento y la libertad de movimiento del sistema, se diseñó un sistema de alimentación capaz de alimentar el circuito de control que convirtió las señales recibidas por el exoesqueleto en órdenes de posición en los servomotores para llegar a un punto específico. Tras la integración de los sistemas diseñados y verificados se realizaron pruebas de funcionamiento y validación de requerimientos. El brazo robótico es capaz de replicar los movimientos realizados con el exoesqueleto, La reacción del brazo robótico ante movimientos a baja velocidad casi no presentó retraso, mientras que para altas velocidades este presentó un retraso que según las pruebas de funcionamiento es de hasta 0.42 segundos. El brazo robótico es capaz de levantar 250g sin comprometer su velocidad de reacción, la relación de movimientos entre brazo y exoesqueleto tiene un margen de hasta 5 grados de error.</p>
<p>PALABRAS CLAVES:</p>	<p>Exoesqueleto, brazo robótico, bluetooth, modelado, autonomía, simulación.</p>
<p>ABSTRACT:</p>	<p>The present project aimed at the design, modelling and implementation of a system</p>

	<p>through which a robotic arm could be controlled by movement commands captured by an exoskeleton adapted to a higher extremity, it was necessary to perform an analysis of degrees of freedom, joint movement angles and limitations that will have both the robotic arm and the exoskeleton. The mechatronics design methodology is used to determine requirements that will have to be verified once the system was implemented, the mechanical, electrical and control design are developed together so that one system does not affect the integrity of another. The mechanical design was realised and simulated in a CAD program to verify the operation and movement freedom that the system will have; a power system capable of feeding the control circuit is designed; the microcontroller turned the signals received by the exoskeleton into position orders for the servomotors to reach a specific point. After integration of the systems designed and verified, performance tests and validation of requirements were performed. The robotic arm is able to replicate the movements made with the exoskeleton, the reaction time in slow motion movements almost has no delays while for high speed movements this will present a delay which according working tests it is until 0.42 seconds. The robotic arm is able to lift 250g without compromising its reaction speed, the ratio of movements between arm and exoskeleton has a margin of up to 5 degrees of error.</p>
<p>KEYWORDS</p>	<p>Exoskeleton, robotic arm, bluetooth, modelling, autonomy, simulation.</p>

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

f. _____



MORALES ULCO MARLON PAUL

1719680017

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **MORALES ULCO MARLON PAUL**, CI 1719680017 autor del proyecto titulado: **diseño e implementación de un exoesqueleto de extremidad superior para controlar un brazo robot** previo a la obtención del título de **INGENIERO MECATRÓNICO** 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, Marzo de 2017

f:  _____

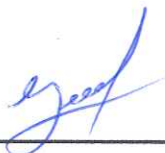
MORALES ULCO MARLON PAUL

1719680017

DECLARACIÓN

Yo **MARLON PAUL MORALES ULCO**, 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.



MORALES ULCO MARLON PAUL

C.I. 1719680017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "Diseño e implementación de un exoesqueleto para extremidad superior para controlar un brazo robot", que, para aspirar al título de Ingeniero mecatrónico fue desarrollado por **Marlon Paul Morales Ulco**, 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.



Guillermo Mosquera Canchingre

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 0802613059

DEDICATORIA

A mis padres, por haberme guiado a lo largo del camino para llegar a este punto siempre con su apoyo y consejos para convertirme en la persona que soy ahora.

A mis amigos, que se han vuelto una segunda familia, compartiendo varios momentos y creando recuerdos, apoyándonos durante lo que fue todo este ciclo de nuestras vidas siempre con humor y respeto.

A mis hermanos, por mostrar que siempre se puede seguir adelante marcando sus pasos para seguir y atravesar obstáculos.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Tecnológica Equinoccial por darme la oportunidad y abrir sus puertas para entrar en este ciclo de formación profesional con aportes de calidad y fomentando valores.

Al Ing. Guillermo Mosquera por su apoyo como director de tesis, por su tiempo y sugerencias que aportaron enormemente al desarrollo de este trabajo.

A todas las personal que se cruzaron en el camino a lo largo de la carrera ya que cada uno aportó a la experiencia que se tuvo durante mi formación académica.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 EXOESQUELETO GENERAL	4
2.2 EXOESQUELETO PARA BRAZO	4
2.3 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO	4
2.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN APLICACIÓN	5
2.4.1 APLICACIÓN NUCLEAR	5
2.4.2 MEDICINA.....	6
2.4.3 REHABILITACIÓN	7
2.4.4 REALIDAD VIRTUAL.....	8
2.4.5 COCINA	9
2.5 AVANCES Y DIFERENCIAS	10
3 METODOLOGÍA Y DISEÑO.....	11
3.1 METODOLOGÍA	12
3.1.1 REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO.....	12
3.1.2 DISEÑO MECÁNICO	12
3.1.3 DISEÑO ELECTRÓNICO.....	12
3.1.4 DISEÑO DE CONTROL.....	12
3.1.5 IMPLEMENTACIÓN.....	12
3.1.6 VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN.....	13
3.2 DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA	13
3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL SISTEMA.....	14
3.3 DISEÑO MECÁNICO DE EXOESQUELETO	16

3.3.1	ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LAS ARTICULACIONES DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR.....	16
3.3.2	MODELADO DE EXOESQUELETO EN SOFTWARE CAD.....	18
3.3.3	CÁLCULO DE POSICIONAMIENTO DE ARTICULACIONES DEL BRAZO ROBOT	24
3.3.4	CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE BRAZO ROBOT	25
3.3.5	MODELADO CAD DE BRAZO ROBOT	29
3.4	DISEÑO ELECTRÓNICO DE EXOESQUELETO Y BRAZO ROBÓTICO	32
3.4.1	SELECCIÓN DE MICROCONTROLADOR.....	32
3.4.2	SELECCIÓN DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA.....	34
3.4.3	SELECCIÓN DE ACTUADORES.....	35
3.4.4	DISEÑO DE CIRCUITO TRANSMISOR	35
3.4.5	DISEÑO DE CIRCUITO RECEPTOR	36
3.4.6	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	36
3.5	DISEÑO DE CONTROL DEL SISTEMA.....	38
3.5.1	LÓGICA DE CONTROL	38
3.5.2	FLUJOGRAMA DE CONTROL	39
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
4.1	SIMULACIÓN	41
4.1.1	SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	41
4.1.2	ESTUDIO DE DISEÑO DE LAS PARTES CRÍTICAS DE LA ESTRUCTURA.....	41
4.2	CONSTRUCCIÓN	44
4.3	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	48
4.3.1	CAPACIDAD DE CARGA DEL BRAZO	48
4.3.2	TIEMPO DE REACCIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO CON EL EXOESQUELETO.....	49

4.3.3	RELACIÓN DE MOVIMIENTO.....	50
4.3.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	53
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES.....	56
6	BIBLIOGRAFÍA.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Brazo robótico Neater 660	6
Figura 2. Robot DaVinci para cirugía asistida por robot.....	7
Figura 3. Sistema de rehabilitación integrando un exoesqueleto a la realidad virtual.....	7
Figura 4. Exoesqueleto para mano Dexmo F2.....	8
Figura 5. Robot chef diseñado por Moley robotics	9
Figura 6. Sistema de control de lazo abierto	13
Figura 7. Representación del sistema.....	14
Figura 8. Descripción de funcionamiento del sistema	15
Figura 9. Representación de las partes del sistema	15
Figura 10. Movimientos de articulaciones del hombro	16
Figura 11. Movilidad del codo	17
Figura 12. Modelo de brazo para diseño de exoesqueleto	19
Figura 13. Separación de articulación para abducción del sistema	20
Figura 14. Movimiento del exoesqueleto en flexión del hombro	20
Figura 15. Movimiento de exoesqueleto de rotación del hombro	21
Figura 16. Movimiento de exoesqueleto en abducción del hombro	21
Figura 17. Articulación de flexión del codo.....	22
Figura 18. Articulación de pronación.....	22
Figura 19. Mecanismo de captura de movimientos de muñeca	23
Figura 20. Identificación de las partes del exoesqueleto.....	23
Figura 21. Distribución de cargas del brazo	24
Figura 22. Relación de distancias en el brazo robótico	25
Figura 23. Eslabones de soporte del sistema	26
Figura 24. Diagrama de cargas sobre soporte de abducción.....	26
Figura 25. Diagrama de momentos en soportes de abducción	26
Figura 26. Diagrama de cargas en soporte general	27
Figura 27. Diagrama de momentos en soporte general	28
Figura 28. Modelo CAD de estructura del brazo	29
Figura 29. Ubicación de actuadores para abducción	29
Figura 30. Articulación de rotación del hombro	30
Figura 31. Articulación doble de flexión del hombro.....	30

Figura 32. Articulación del codo	31
Figura 33. Articulaciones de pronación y flexión de la muñeca.....	31
Figura 34. Identificación de las partes del sistema.....	32
Figura 35. Esquema de estructura de arduino	33
Figura 36. Conexión de circuito de transmisión	36
Figura 37. Conexión de circuito receptor	36
Figura 38. Flujograma de control del sistema	39
Figura 39. Simulación en proteus del sistema de control.....	41
Figura 40. Análisis de tensiones sobre soporte general.....	42
Figura 41. Análisis de deformación de soporte general	42
Figura 42. Análisis de tensiones sobre soporte abducción	43
Figura 43. Análisis de deformación de soporte abducción.....	43
Figura 44. Análisis de tensiones sobre columna.....	44
Figura 45. Análisis de deformación sobre columna.....	44
Figura 46. Impresión de elementos estructurales para el brazo robot	45
Figura 47. Acoplamiento de actuadores dentro de las piezas impresas	45
Figura 48. Ensamblaje estructural del brazo robot.....	46
Figura 49. Ensamble estructural del exoesqueleto	46
Figura 50. Conexiones del sistema de control de brazo robot	47
Figura 51. Conexión de sistema de control de exoesqueleto.....	47
Figura 52. Prototipo de brazo robótico.....	48
Figura 53. Software de procesamiento de imágenes para toma de tiempos.....	49
Figura 54. Prueba en abducción	51
Figura 55. Prueba en rotación.....	51
Figura 56. Pruebas en flexión del codo.....	52
Figura 57. Pruebas en flexión del hombro	52
Figura 58. Pruebas en movimientos de muñeca	53

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Ángulos de movimiento de articulaciones.....	18
Tabla 2. Propiedades de material impreso	25
Tabla 3. Comparación de microcontroladores	33
Tabla 4. Comparación módulos inalámbricos.....	34
Tabla 5. Comparación de actuadores.....	35
Tabla 6. Restricciones de movimiento del brazo con carga	48
Tabla 7. Tabla de pruebas de reacción con movimientos leves.	50
Tabla 8. Tabla de pruebas de reacción con movimientos rápidos.....	50
Tabla 9. Tabla de relación de movimiento.....	50

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
Anexo 1. Layout de placa de control del exoesqueleto	60
Anexo 2. Planos de sistema mecánico de exoesqueleto	61
Anexo 3. Planos de sistema mecánico de brazo robótico	62

RESUMEN

En el presente proyecto, se tuvo como objetivo el diseño, modelado e implementación de un sistema mediante el cual se pudo controlar un brazo robótico mediante comandos de movimiento captados por un exoesqueleto adaptado a una extremidad superior, se necesitó realizar un análisis de grados de libertad, ángulos de movimiento de las articulaciones y limitaciones que tuvieron tanto el brazo robótico como el exoesqueleto. Mediante la metodología de diseño mecatrónico se determinaron requerimientos que se verificaron una vez implementado el sistema, el diseño mecánico, eléctrico y de control se desarrollaron de forma conjunta de manera que un sistema no afecte la integridad de otro. El diseño mecánico se realizó y simuló en un programa CAD para comprobar el funcionamiento y la libertad de movimiento del sistema, se diseñó un sistema de alimentación capaz de alimentar el circuito de control que convirtió las señales recibidas por el exoesqueleto en órdenes de posición en los servomotores para llegar a un punto específico. Tras la integración de los sistemas diseñados y verificados se realizaron pruebas de funcionamiento y validación de requerimientos. El brazo robótico es capaz de replicar los movimientos realizados con el exoesqueleto, La reacción del brazo robótico ante movimientos a baja velocidad casi no presentó retraso, mientras que para altas velocidades este presentó un retraso que según las pruebas de funcionamiento es de hasta 0.42 segundos. El brazo robótico es capaz de levantar 250g sin comprometer su velocidad de reacción, la relación de movimientos entre brazo y exoesqueleto tiene un margen de hasta 5 grados de error.

ABSTRACT

The present project aimed at the design, modelling and implementation of a system through which a robotic arm could be controlled by movement commands captured by an exoskeleton adapted to a higher extremity, it was necessary to perform an analysis of degrees of freedom, joint movement angles and limitations that will have both the robotic arm and the exoskeleton. The mechatronics design methodology is used to determine requirements that will have to be verified once the system was implemented, the mechanical, electrical and control design are developed together so that one system does not affect the integrity of another. The mechanical design was realised and simulated in a CAD program to verify the operation and movement freedom that the system will have; a power system capable of feeding the control circuit is designed; the microcontroller turned the signals received by the exoskeleton into position orders for the servomotors to reach a specific point. After integration of the systems designed and verified, performance tests and validation of requirements were performed. The robotic arm is able to replicate the movements made with the exoskeleton, the reaction time in slow motion movements almost has no delays while for high speed movements this will present a delay which according working tests it is until 0.42 seconds. The robotic arm is able to lift 250g without compromising its reaction speed, the ratio of movements between arm and exoskeleton has a margin of up to 5 degrees of error.

1 INTRODUCCIÓN

El sistema de control en un brazo robótico operado mediante un programa o el uso de un mando de control, puede llegar a ser complicado y necesitar de una capacitación previa para poder ser manejado, el uso de un sistema de control que sea fácil de usar ayudaría a reemplazar los métodos actuales.

Históricamente el desarrollo de robots ha avanzado a pasos agigantados y se han usado en campos de medicina, industria e investigación. Los actuales sistemas de control requieren de un gran conocimiento para manejar uno de estos equipos teniendo que invertir más tiempo en el manejo, por lo que en este trabajo se buscó desarrollar un sistema de fácil control y a la vez de gran destreza para realizar tareas.

La aplicación de este sistema que sigue las órdenes directas del usuario con sus movimientos puede permitir realizar tareas en las cuales se necesita destreza, por ejemplo, trabajos peligrosos o en robots exploradores enviados a tomar muestras.

Para el desarrollo de este proyecto se plantea el siguiente objetivo general:

Diseñar e implementar un exoesqueleto para extremidad superior que controle un brazo robot.

Para el cumplimiento del objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos, diseñar y modelar el sistema mecánico del brazo robótico con estructura similar a un brazo con un exoesqueleto, diseñar el sistema eléctrico del brazo robótico, diseñar y modelar un exoesqueleto para tomar datos de posicionamiento del brazo del usuario, diseñar el sistema de control para el brazo robótico e implementar los sistemas del brazo y exoesqueleto.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 EXOESQUELETO GENERAL

“Un exoesqueleto, se define como un sistema biomecatrónico, donde el mecanismo se encuentra adaptado al cuerpo humano. Con un control que puede estar vinculado a las mismas señales sensoriales del cerebro. Con actuadores que vía analógica generan o reproducen las funciones del cuerpo. Actuando como un sólo sistema integrado que puede desarrollar actividades variadas”.(Ayala Lozano et al., 2015)

Un exoesqueleto es un sistema mecánico que consiste en un armazón externo para llevar puesto en el cuerpo, este puede cubrir todo el cuerpo o solo una extremidad, se puede componer de actuadores de potencia que transfiere su energía al usuario para facilitar actividades o usa sensores para capturar información de los movimientos del mismo.

Usualmente está elaborado de materiales ligeros, el soporte es lo suficientemente fuerte para sostener el peso del miembro así como el del exoesqueleto y sus componentes.

2.2 EXOESQUELETO PARA BRAZO

Los exoesqueletos desarrollados únicamente para las extremidades superiores pueden tener finalidades de aumentar las capacidades físicas del portador principalmente fuerza o rehabilitar dicha extremidad para recuperar capacidades perdidas por diferentes circunstancias, el diseño de exoesqueletos se adapta al cuerpo del portador según sus características físicas.

Ha surgido una nueva rama de exoesqueletos cuya finalidad es capturar información de los movimientos realizados por el portador para replicarlos en sistemas a parte o controlar extremidades dentro de la realidad virtual.

2.3 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

Al hablar de brazos robóticos son varios los parámetros a ser tomados en cuenta a la hora de su diseño basados en la aplicación del mismo, a continuación se presentan dichos parámetros:

Grados de libertad: se conoce a estos como la cantidad de movimientos que puede tener el brazo ya sean estos de traslación o de rotación, se sabe que para un brazo el número de grados de libertad es 6, 3 para definir la posición en el espacio de un punto y 3 para definir la orientación de dicho punto.

Precisión: es la capacidad de posicionamiento del sistema para alcanzar un punto con un mínimo de error.

Capacidad de carga: es el peso que el robot será capaz de manejar sin afectar su funcionalidad.

Sistema de coordenadas: es el sistema que se usará para especificar el posicionamiento del robot.

Programación: para el tipo de programación se tiene los métodos de punto a punto mediante el cual se genera una trayectoria para el robot marcando puntos por los cuales este debe pasar, otro método conocido es el de aprendizaje por el cual el sistema es capaz de guardar los movimientos indicados por el usuario, el último método de programación se conoce como directo, este se trata del manejo directo del robot por el usuario.

Espacio de accesibilidad: se conoce así al conjunto de puntos a los cuales puede llegar el punto terminal del robot, explicado de otra manera el alcance del robot, los puntos dentro de este espacio pueden ser total o parcialmente accesibles, puntos totalmente accesibles son aquellos a los cuales el punto terminal se puede ubicar en todas las orientaciones posibles mientras que parcialmente significa que el punto terminal puede ser alcanzado pero no de todas las formas.

Velocidad: la velocidad máxima de las articulaciones para llegar a un punto determinado.

Ergonomía: este parámetro se refiere a la adaptabilidad y comodidad del mando con el usuario.

2.4 CLASIFICACIÓN SEGÚN APLICACIÓN

2.4.1 APLICACIÓN NUCLEAR

El robot NEATER 660, un sistema diseñado únicamente para aplicaciones nucleares, este robot es parte de la familia AEA TECHNOLOGY INC., sus parámetros se muestran a continuación, utiliza servomotores, el sistema de control para este brazo se basa en mandos de fuerza tipo palancas.

Los requerimientos para cada uno de estos sistemas puede variar según la aplicación que este vaya a tener, unos pueden enfocarse más en la potencia del brazo al aumentar la carga útil mientras otros requieren precisión para operaciones delicadas.

Los parámetros son establecidos por el objetivo a cumplir por el robot, en el caso del NEATER 660 sus parámetros son:

- Alcance 2.0 metros
- Carga útil 25 kg
- 6 grados de libertad

- Tele-robot o control de robot.
- El controlador de MV™ adept.
- Servomotores.



Figura 1. Brazo robótico Neater 660
(Gonzales, 2002)

Como se observa los aspectos principales son la capacidad de carga, el espacio de accesibilidad, la programación utilizada es de método directo.

2.4.2 MEDICINA

Actualmente se ha implementado el método de robots controlados por movimiento en el campo de la medicina siendo creados robots operados a distancia, en los cuales el cirujano manipula mandos como herramientas mientras el robot replica esos movimientos con la misma precisión, un sistema de precisión es usado en el campo de la medicina conocido como robot-assisted surgery (cirugía asistida por robot), para este caso el cirujano opera la maquina desde una pequeña cabina en la cual consta un monitor en el que visualiza las acciones que está realizando el robot, en sus manos constan un par de mandos que envían la señal al robot para replicar el movimiento que hace el cirujano con gran precisión, estos mandos pueden tener formas de herramientas para dar al operador la sensación de estar realizando la operación de forma directa.(Hartman, 2014).

El robot Da Vinci utilizado para la cirugía asistida por robot cumple con parámetros de precisión, de la misma forma su programación es directa razón por la cual es operado desde una cabina en la que se ubican los mandos los cuales fueron diseñados de manera ergonómica.



Figura 2. Robot DaVinci para cirugía asistida por robot
(Hartman, 2014)

Los exoesqueletos en los últimos años han sido desarrollados con el fin de aumentar las capacidades físicas de una persona especialmente su fuerza o en el caso de la rehabilitación estos se usan para recuperar movimientos que se han perdido por cualquier motivo que haya ocasionado la pérdida total o parcial del movimiento en una extremidad ya sea superior o inferior.

2.4.3 REHABILITACIÓN

Los exoesqueletos diseñados para rehabilitar extremidades no requieren mucha capacidad de carga ni precisión debido a que estos deben realizar movimientos suaves que ayuden a la recuperación del paciente, un parámetro fundamental de estos es la ergonomía ya que de ser incómodos pueden incluso llegar a causar daño, dependiendo de cuál parte del cuerpo se diseña, se define su grado de libertad, en caso de ser para el brazo completo el grado de libertad será 6, el espacio de accesibilidad es limitado según los ejercicios a realizarse. (Alejandro, Cardona, Spitia, & López, 2010)

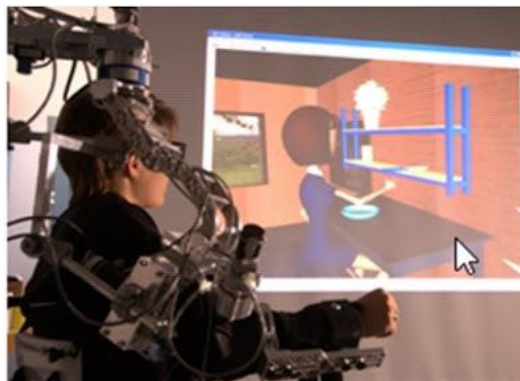


Figura 3. Sistema de rehabilitación integrando un exoesqueleto a la realidad virtual
(Dominguez, 2009)

El uso de exoesqueletos como medio de control se ha estado desarrollando los últimos años para el campo de los videojuegos y la realidad virtual, de igual manera se ha usado estos para rehabilitar mediante una interfaz en la cual los movimientos tomados por el exoesqueleto replican una acción en un

monitor que simula una extremidad o todo un ambiente con el cual se interactúa realizando movimientos.

2.4.4 REALIDAD VIRTUAL

Un sistema integral de exoesqueleto con la realidad virtual es desarrollado por Dexta Robotics con un prototipo llamado Dexmo F2, se plantea este sistema como un medio para romper las barreras entre el mundo digital y real puesto que el principal problema de la realidad virtual es la limitación que tiene el usuario al no tener un control total de las acciones que puede realizar dentro de dicho mundo haciendo que se pierda la ilusión de estar dentro de un nuevo mundo, el exoesqueleto se basa en un conjunto de sensores y mecanismos capaces de tomar los movimientos que se realizan y convertirlos en información para posteriormente imitar el movimiento en un monitor representando una extremidad y de esta manera mover objetos virtuales con nuestras propias manos. (Rodríguez, 2015)

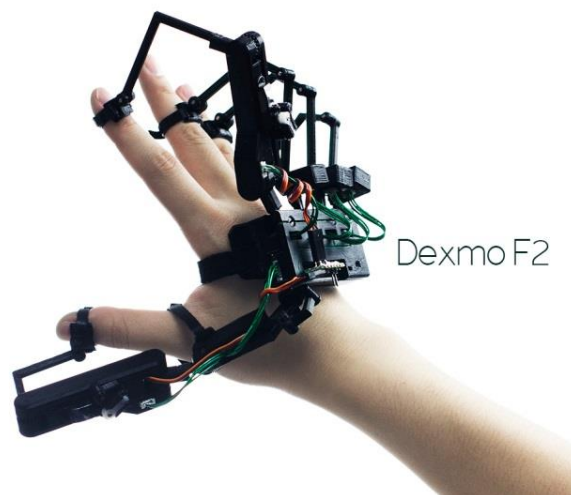


Figura 4. Exoesqueleto para mano Dexmo F2
(Rodríguez, 2015)

El exoesqueleto para mano desarrollado por Dexta robotics destaca sus parámetros de ergonomía puesto que está destinado a un uso prolongado por su aplicación en la realidad virtual, debido a esto parámetros como grados de libertad y espacio de accesibilidad no se toman en cuenta puesto que los datos tomados por el exoesqueleto se manifiestan en un espacio cibernético.

Posteriormente se busca implementar un sistema que estimule la mano del usuario cuando se toque un objeto dentro del mundo virtual, actualmente el exoesqueleto ha sido diseñado únicamente para la mano.

2.4.5 COCINA

La empresa Moley Robotics con su sistema llamado robot chef, se basa en un par de guantes y sensores en el antebrazo que usados por un chef controlan un par de brazos robóticos instalados en la cocina del cliente, el objetivo de este sistema es ofrecer al cliente la experiencia de tener a un chef profesional en casa ya que con los guantes los brazos robóticos copian exactamente los movimientos que sean realizados teniendo la misma habilidad de una persona, ya sea a la hora de cocinar como posiblemente la realización de otras operaciones a futuro.

El sistema propuesto por Moley robotics, el robot chef, es el sistema más completo dentro de los dispositivos que se están analizando, su diseño tomó en cuenta la mayoría de los parámetros para su desarrollo por ejemplo:

- Precisión: tiene la habilidad de reproducir los movimientos de una persona de manera exacta para realizar las operaciones necesarias para preparar los platos que se deseen.
- Velocidad: con su sistema de aprendizaje al ser controlado por los guantes del chef este imita sus movimientos en el tiempo exacto.
- Grados de libertad: al igual que un brazo humano tiene 6 grados de libertad.
- Espacio de accesibilidad: ubicados bajo un riel los brazos tienen al alcance cuanto espacio requiera según el sitio donde son instalados.
- Capacidad de carga: está característica no le fue dada en exceso, lo suficiente para levantar cosas que una persona promedio requeriría en la cocina.
- Programación: tiene de 2 tipos programación directa y de aprendizaje esto quiere decir que puede ser controlado en tiempo real o puede guardar movimientos para realizar actividades como un brazo programado.
- Para sus movimientos consta de 24 juntas y 20 motores cada brazo.



Figura 5. Robot chef diseñado por Moley robotics

2.5 AVANCES Y DIFERENCIAS

Se puede apreciar el cambio en el diseño y desarrollo de brazos robóticos y los tipos de control que usan estos, de igual manera las motivaciones para el diseño de estos fue reorientado en comparación a sus inicios.

Los primeros brazos eran desarrollados con fines de realizar operaciones que podían presentar un riesgo para el usuario como se ha dicho anteriormente fueron usados en el sector nuclear para manipulación de materiales peligrosos.

Los sistemas actuales tienen similitudes y diferencias basado en las aplicaciones que tendrán cada uno de estos, los aspectos de diseño que se toman en cuenta son potencia, velocidad, alcance, precisión y el control.

En un inicio brazos robóticos eran controlados por mandos que podían constar de botones o palancas con las cuales se regulaba el movimiento, al cambiar las formas de control de estos sistemas también se cambió sus diseños dándoles más características como grados de libertad que le pudieran permitir a estos realizar una diversidad de movimientos más amplia.

Las diferencias entre estos equipos se da debido a su aplicación, por ejemplo entre un sistema NEATER660 cuya característica más resaltada es la potencia de carga no necesita tener la precisión de un robot utilizado en robot-assisted surgery, los sistemas que utilizan un exoesqueleto como medio de control, ya sea para integrarlo a la realidad virtual como es el caso de dexmo F2 o para realizar operaciones a distancia como el robot chef, brindan libertad al operador y una mayor velocidad para adaptarse al sistema y manejarlo de manera adecuada.

Los avances logrados en los últimos años al aplicar este sistema usuario-máquina abren paso a una nueva generación de equipos con alta destreza que permitirá su aplicación en áreas nuevas como es el caso de Moley Robotics incursionando en el sector culinario.

El sistema a desarrollar en este trabajo tiene como objetivo lograr un sistema usuario-máquina mediante un exoesqueleto inspirado en los trabajos presentados anteriormente e integrarlo a un brazo capaz de reproducir los movimientos indicados por el exoesqueleto. Las formas para tomar los datos desde el exoesqueleto y convertirlos en una orden para el brazo pueden ser distintas por lo cual se plantea buscar una forma económica sin perder la funcionalidad del mismo.

3 METODOLOGÍA Y DISEÑO

3.1 METODOLOGÍA

3.1.1 REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO

- Brazo robótico con 6 grados de libertad.
- Diseño de exoesqueleto adaptable a extremidad superior.
- Brazo robótico debe replicar movimientos realizados por el exoesqueleto controlado por el usuario.
- Velocidad de respuesta entre 0.5 segundos y 1 segundo.

3.1.2 DISEÑO MECÁNICO

- Desarrollar modelo CAD
- Realizar estudio de diseño de las partes.
- Realizar análisis de cargas del sistema.
- Seleccionar material.
- Implementar las partes con el material seleccionado.

3.1.3 DISEÑO ELECTRÓNICO

Se selecciona un microcontrolador que cumpla los requerimientos como velocidad de respuesta entre la toma de datos y el control de motores. Se analiza y elige sensores capaces de tomar datos del movimiento de las articulaciones.

Se establece los siguientes puntos:

- Selección de microcontrolador.
- Diseño de circuito de exoesqueleto para toma de datos.
- Diseño de circuito de brazo robot para control de actuadores.

3.1.4 DISEÑO DE CONTROL

- Realizar el programa en un lenguaje compatible con el tipo de microcontrolador.
- Acondicionamiento de señales para control de actuadores mediante señales recibidas por los sensores.
- Simulación de sistema de control.

3.1.5 IMPLEMENTACIÓN

El proceso de implementación se realiza de manera integral, comprobando que no existan incompatibilidades entre los diseños de los diferentes sistemas, realizando una verificación constante durante el desarrollo del proyecto.

3.1.6 VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

Una vez implementadas e integradas las partes se realiza las siguientes pruebas:

- Toma de tiempos de reacción entre movimientos de exoesqueleto y brazo robótico.
- Cantidad de movimientos capaces de replicar el brazo robot.
- Se realiza todos los movimientos descritos en el diseño comprobando el correcto funcionamiento de cada articulación.
- Tiempo de duración de la batería.

3.2 DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA

Para el presente proyecto se debe establecer los mecanismos y el tipo de control que gobierna el sistema en general.

El sistema se maneja por un tipo de control de lazo abierto en el que se convierte directamente la señal tomada por los sensores en una posición para los actuadores.

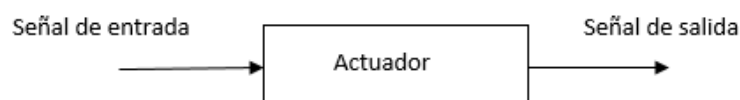


Figura 6. Sistema de control de lazo abierto
(Bergren, 2003)

Se puede representar el sistema en general como se muestra en la figura 7.

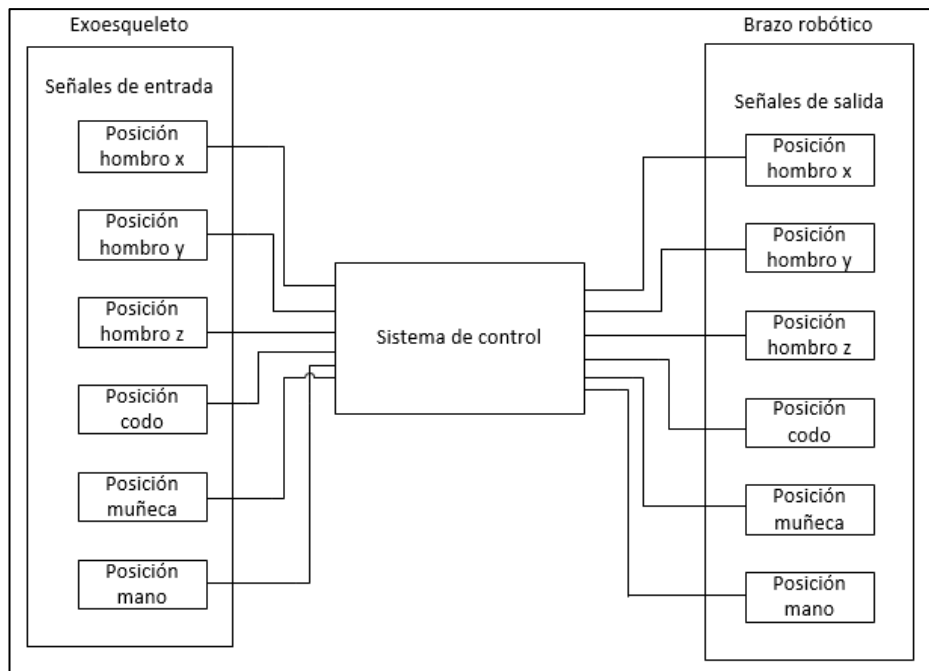


Figura 7. Representación del sistema

3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL SISTEMA

Estructura: el diseño del exoesqueleto se realizó de manera que tenga libertad de movimientos de la extremidad, sin conflictos, para una toma correcta de datos y el robot fue diseñado basado en las capacidades de carga de sus actuadores y que pueda replicar movimientos según las señales del exoesqueleto.

Sensores: los sensores utilizados para la toma de posiciones desde el exoesqueleto fueron potenciómetros ubicados en forma de articulación convirtiendo el movimiento en una señal que pudo ser interpretada por la parte de control.

Actuadores: servomotores que en conjunto con el diseño estructural del robot realizan los movimientos del mismo, la capacidad de carga de estos fue un factor importante a la hora del diseño de la estructura y para definir las capacidades del sistema.

Controladores: El microcontrolador se encargó de convertir las señales del exoesqueleto en señales de posicionamiento para los servomotores.

Alimentación: dado el consumo de los servomotores se diseñó una fuente capaz de dar la potencia suficiente para el funcionamiento eficiente del sistema y una fuente diferente para la parte de control.

En la figura 8 se describe el modo en el que opera el sistema de forma general.

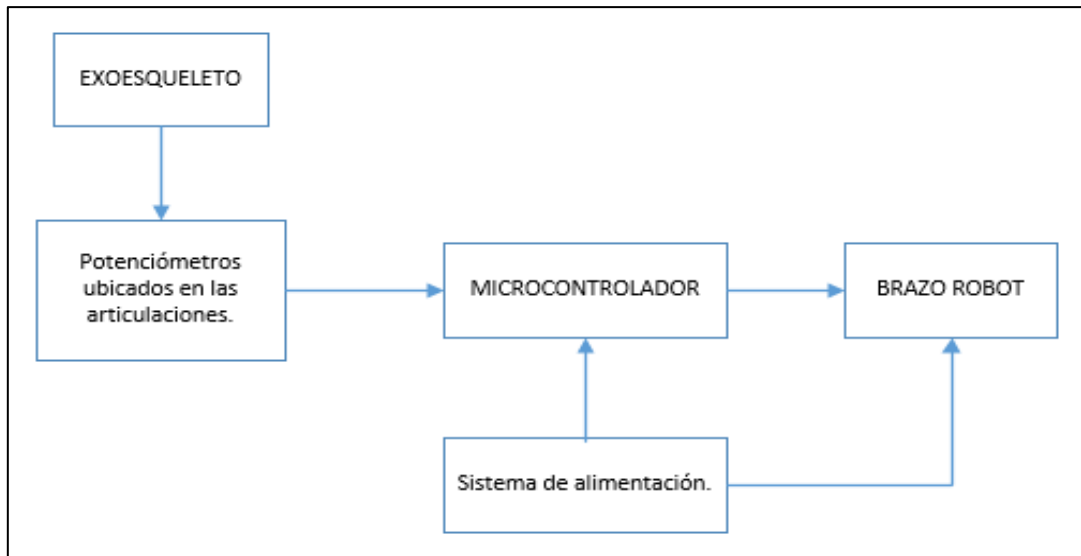


Figura 8. Descripción de funcionamiento del sistema

En la figura 9 se representa las partes que componen el sistema en general.

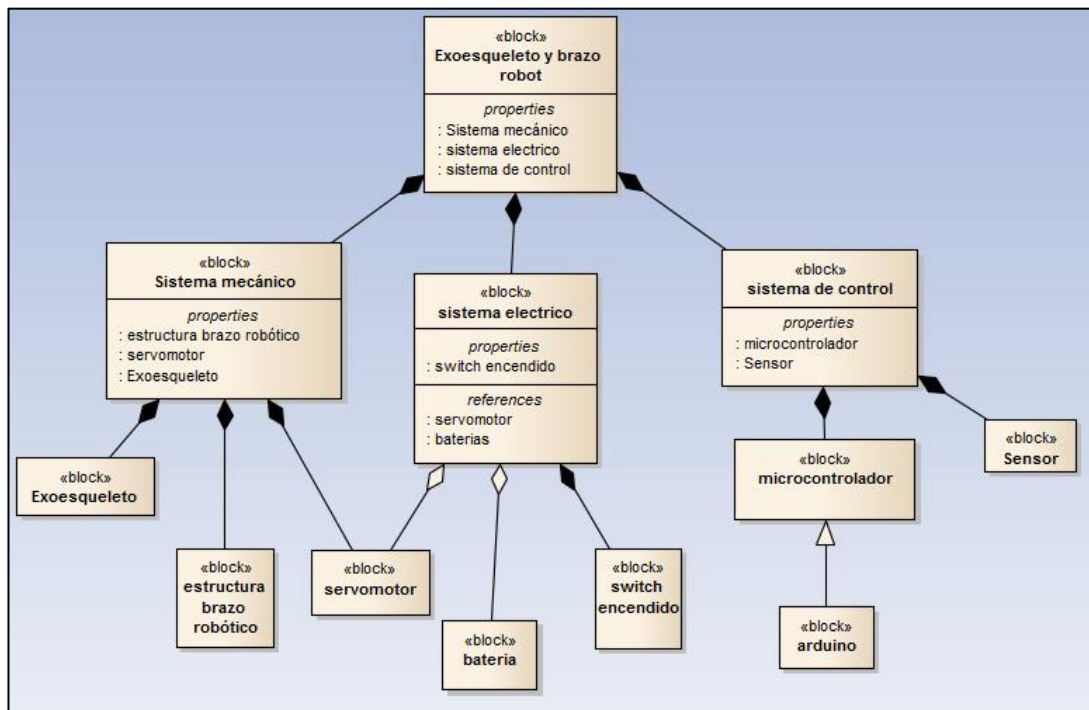


Figura 9. Representación de las partes del sistema

3.3 DISEÑO MECÁNICO DE EXOESQUELETO

3.3.1 ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE LAS ARTICULACIONES DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR

Se realiza un estudio y medición de los ángulos que recorre la extremidad en cada uno de estos movimientos, estos datos fueron utilizados como referencia al momento de la programación del microcontrolador para el posicionamiento de los actuadores.

En las figuras 10 y 11 se muestra los tipos de movimientos presentes en la extremidad superior.

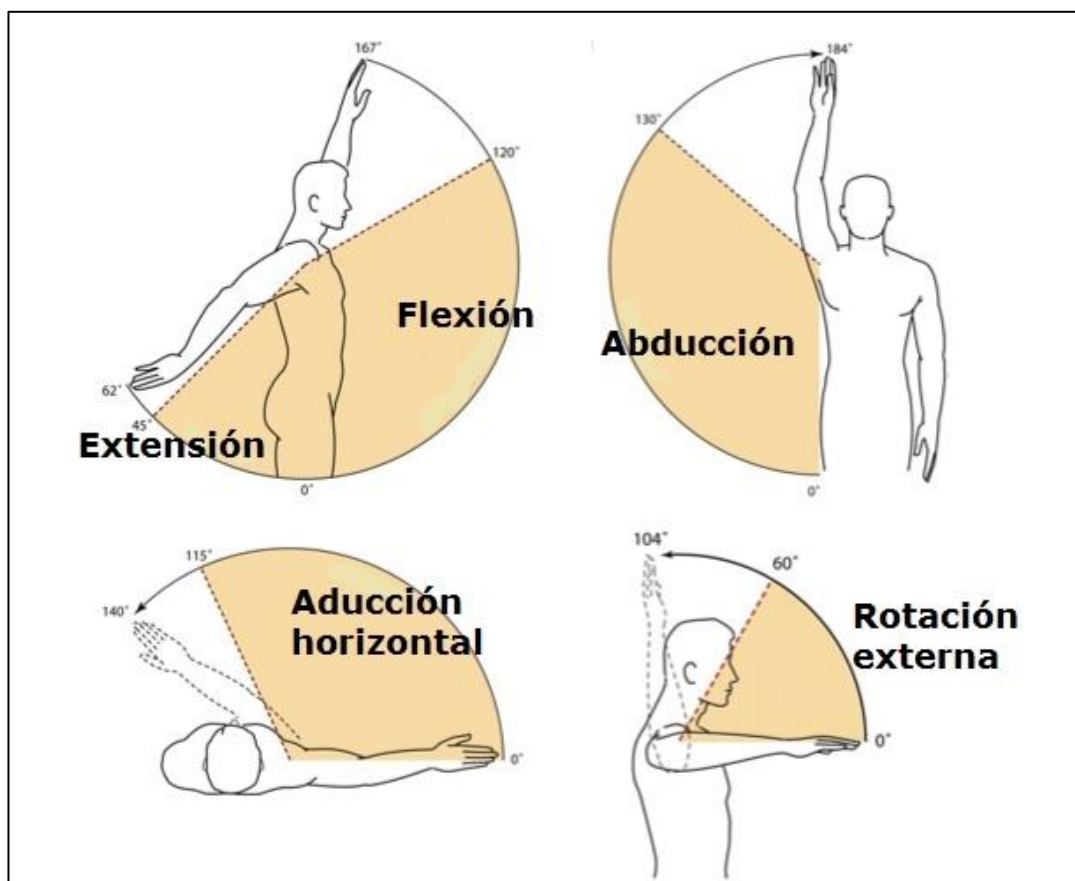


Figura 10. Movimientos de articulaciones del hombro
(Trujillo Laura, 2015)

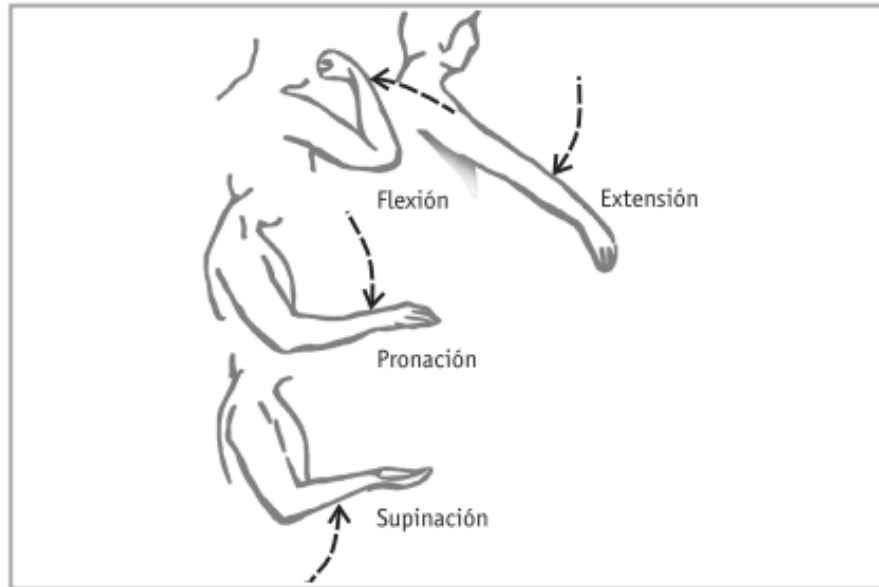


Figura 11. Movilidad del codo
(Tobergte & Curtis, 2013)

Los movimientos que posee el hombro lo convierten en un sistema complejo cuyo funcionamiento requiere de varios elementos, a esta se la considera una articulación inestable. (Trujillo Laura, 2015).

El punto neutro anatómico de cada articulación se considera como punto de partida o cero grados para la medición de la capacidad de movimiento de las mismas, cuando una articulación sobrepasa el punto neutro o en reposo en posición contraria es considerada hiperextensión. (Tobergte & Curtis, 2013).

Teniendo en cuenta estos aspectos se puede considerar los movimientos que fueron representativos para el diseño del sistema y algunos que fueron obviados como es el caso de la hiperextensión de las articulaciones.

Tomando en cuenta el punto neutro de las articulaciones se realiza una medición de cada tipo de movimiento para obtener una tabla de datos.

La tabla 1 muestra el rango de giro que tiene cada articulación de la extremidad superior.

Tabla 1. Ángulos de movimiento de articulaciones

Articulación	movimiento	Grados
Hombro	Flexión	0° – 160°
	Abducción	0° – 105°
	Rotación externa	-20° - 90°
Codo	Flexión	0° – 160°
	Pronación	0° – 50°
	Supinación	0° – 90°

Existen ángulos a los cuales el hombro solo puede llegar mediante movimientos compuestos por lo que para llegar a un punto esta articulación puede requerir acciones de abducción y rotación al mismo tiempo. Estos valores y capacidades de movimiento también dependen del usuario debido a que no todos tienen las mismas características de flexibilidad lo cual no permitiría llegar a la totalidad de los movimientos. (García, n.d.)

3.3.2 MODELADO DE EXOESQUELETO EN SOFTWARE CAD

Conociendo las capacidades de movimiento de las articulaciones se pasa a modelar un sistema con las características para cumplir con dicha libertad de movimientos y posteriormente se establecieron posiciones de restricción del mismo.

Para tener un modelo proporcional de las articulaciones de las extremidades superiores y todos sus grados de libertad se recurrió a un modelo similar a un muñeco de madera usado para la animación, de este se tomó únicamente una extremidad superior como se muestra en la figura 12.

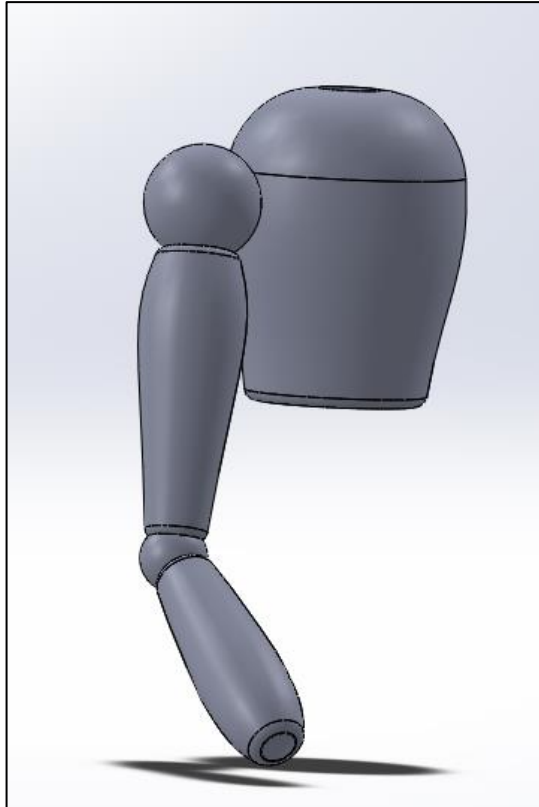


Figura 12. Modelo de brazo para diseño de exoesqueleto

Tras el análisis de movimiento realizado previamente se recurre a un diseño que consta de una articulación doble para los movimientos de flexión y rotación del hombro, debido a que estos son producidos por una rotación sobre su mismo eje, a diferencia de la abducción en la cual el hombro sufre una traslación limitando el movimiento, para solucionar dicho problema se aísla este movimiento enviando la articulación del exoesqueleto a la parte trasera haciendo así que todo el sistema se traslade al momento de la abducción.

En las figuras 13, 14 y 15 se muestra la ubicación de los sensores en el exoesqueleto para lograr los movimientos del hombro.



Figura 13. Separación de articulación para abducción del sistema

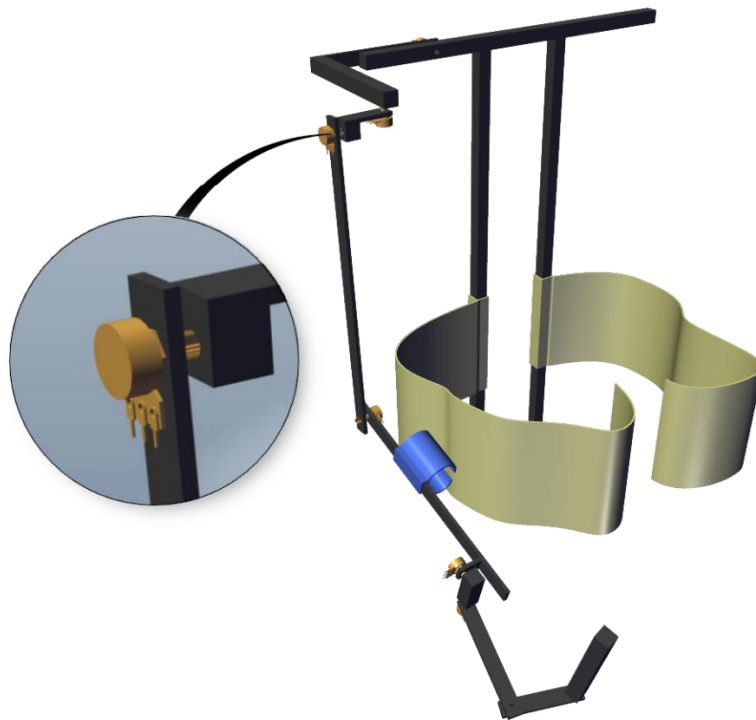


Figura 14. Movimiento del exoesqueleto en flexión del hombro

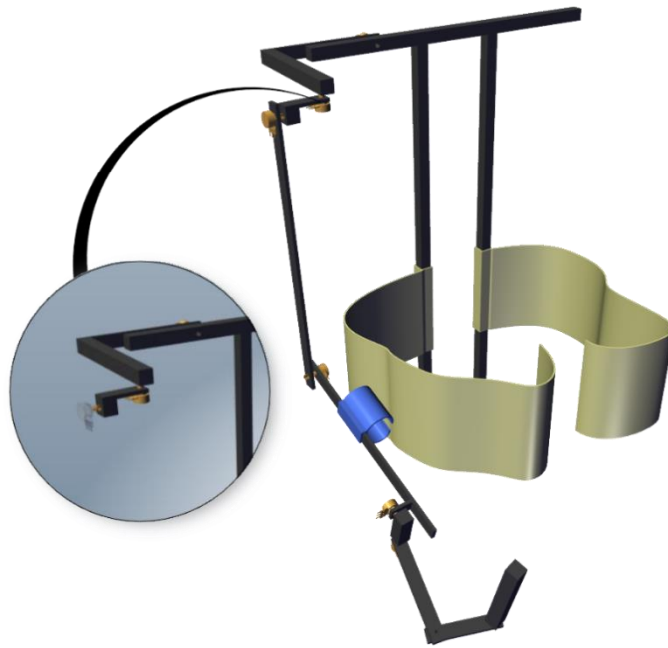


Figura 15. Movimiento de exoesqueleto de rotación del hombro

En la figura 16 comprueba que el sistema cumpla con la capacidad de movimientos que se tiene presentes en el hombro rotando cada articulación.

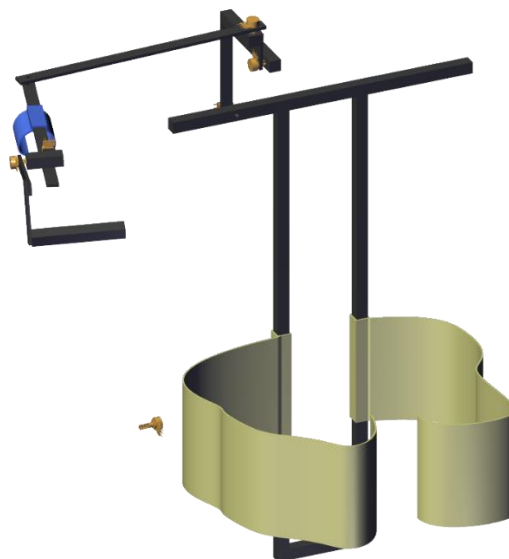


Figura 16. Movimiento de exoesqueleto en abducción del hombro

En la figura 17 se muestra que en el diseño del exoesqueleto se ubica una articulación para flexión en la misma posición del codo, la articulación para pronación se ubica en la parte media del antebrazo, como se muestra en la figura 18, seguida de un mecanismo que se extiende a la mano y a la vez

una articulación que captura el movimiento de la muñeca como se muestra en la figura 19.



Figura 17. Articulación de flexión del codo

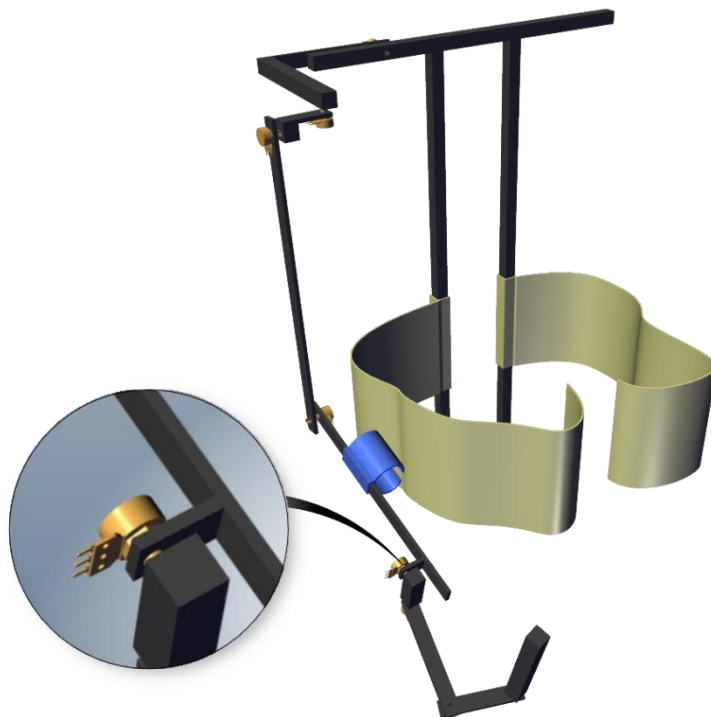


Figura 18. Articulación de pronación

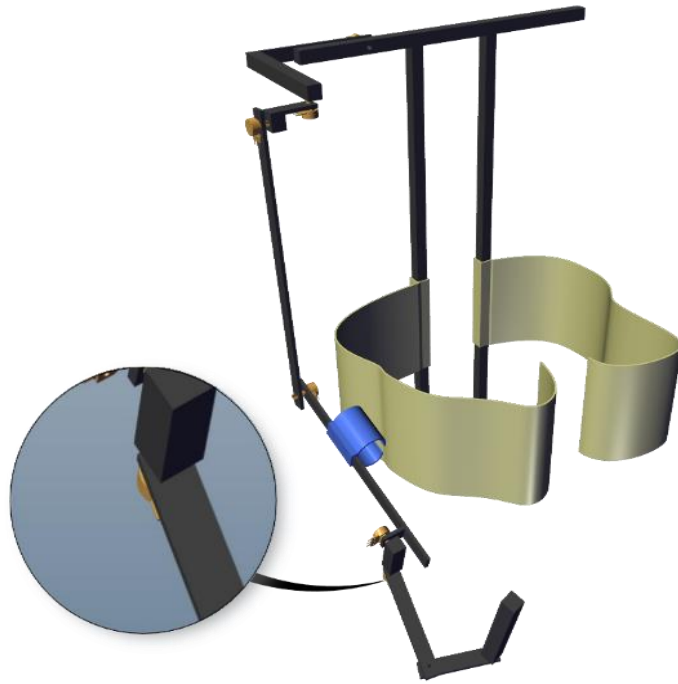


Figura 19. Mecanismo de captura de movimientos de muñeca

En la figura 20 se señalan las partes que componen el exoesqueleto.

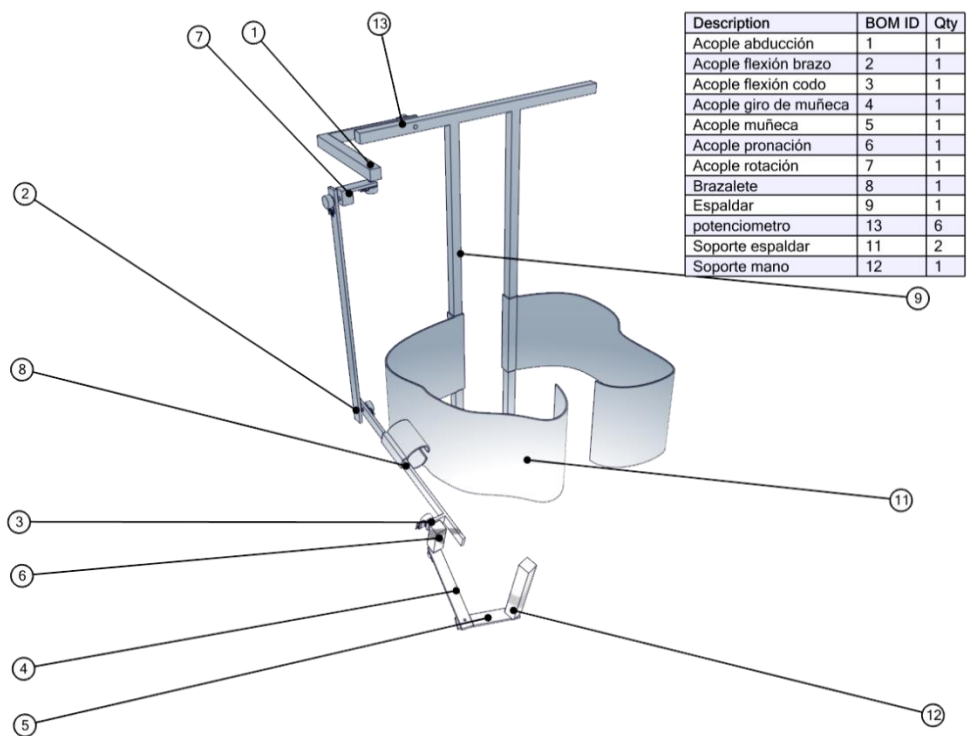


Figura 20. Identificación de las partes del exoesqueleto

3.3.3 CÁLCULO DE POSICIONAMIENTO DE ARTICULACIONES DEL BRAZO ROBOT

Se realizó un análisis estático del brazo robótico tomando en cuenta los pesos de los actuadores distribuidos a lo largo del brazo viéndolo como un solo eslabón y ubicando una carga en el extremo de este, esta carga será la capacidad que tendrá el brazo para cargar un peso determinado.

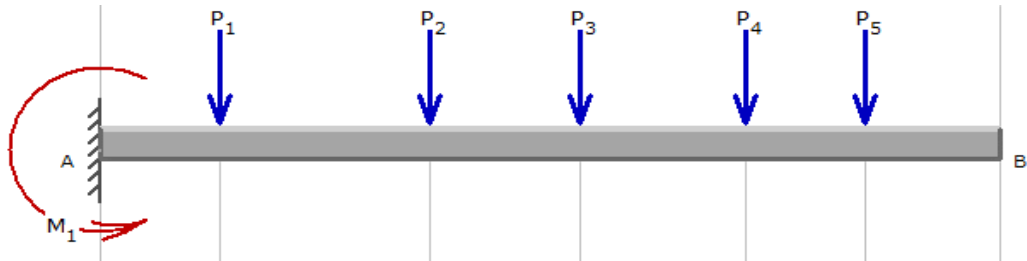


Figura 21. Distribución de cargas del brazo

Tomando en cuenta que un extremo son los actuadores encargados de la abducción del brazo, el torque que soportan estos da la capacidad que tendrá el brazo para llevar una carga P en el extremo.

Se utilizan 2 servomotores con 15kg/cm de torque cada uno, con lo que se estima, despreciando el peso del resto del brazo, que a una distancia de 30 cm desde la articulación de abducción hasta el punto final del brazo se puede llevar cargas menores a 1 kg.

Se tomó en cuenta el peso que añade cada actuador a lo largo del brazo, debido a que esto reduce la capacidad de carga del brazo de acuerdo a la distancia a la que se encuentra.

Para esto se hizo un análisis de fuerzas en función de las distancias a las que estos podrían estar distribuidos, los actuadores para flexión del hombro están continuos a la articulación de abducción, conociendo sus dimensiones y su carga a lo largo del brazo se ubica a 4 cm.

Datos

$$M_o = 30\text{Kg}\cdot\text{cm} = 2.94 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$\text{Peso actuadores} = 0.055 \text{ Kg}$$

$$P = 1 \text{ kg}$$

$$L = 4 + a + b + c + d$$

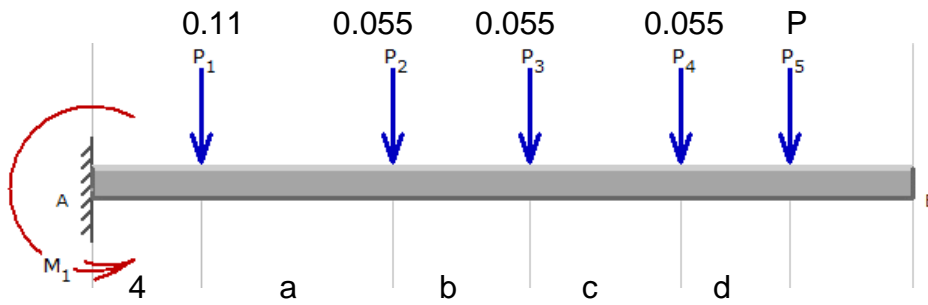


Figura 22. Relación de distancias en el brazo robótico

$$\sum M = 0$$

$$M_0 - p_1 * 4 - p_2 * (4 + a) - p_3 * (4 + a + b) - p_4 * (4 + a + b + c) - p_5 * L = 0 \quad [1]$$

$$30 - 4(0.11) - 4(0.055) - 0.055a - 0.055(4) - 0.055 * (a + b) - 0.055(4) - 0.055(a + b + c) - (4 + a + b + c + d) = 0$$

$$30 - 0.44 - 0.22 - 0.22 - 0.22 - 4 - 1.165a - 1.11b - 1.055c - d = 0$$

$$24.9 - 1.165a - 1.11b - 1.055c - d = 0$$

Con esta ecuación se despeja d y en una hoja de cálculo se variaron los valores de las distancias.

$$d = 24.9 - 1.165a - 1.11b - 1.055c \quad [2]$$

Tomando en cuenta esta ecuación se determinaron restricciones en el dimensionamiento del brazo robot para evitar sobrecargas sobre los actuadores que realizan mayor esfuerzo.

3.3.4 CÁLCULO DE ESTRUCTURAS DE BRAZO ROBOT

Las partes que componen la estructura del brazo robot son de PLA.

Las propiedades del PLA se obtuvieron mediante pruebas de tracción a probetas, con esto se obtuvo las propiedades del material presentadas en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de material impreso

Propiedad	Valor
Módulo de young	3.5 GPa
Sut, Sy	14.92 MPa
Densidad	1.25 gr/cm ³

(PROAÑO, 2016)

Se realizó el análisis y diseño de las partes que soportan mayor carga que son, los soportes de abducción y el soporte general del sistema como se muestra en la figura 23.

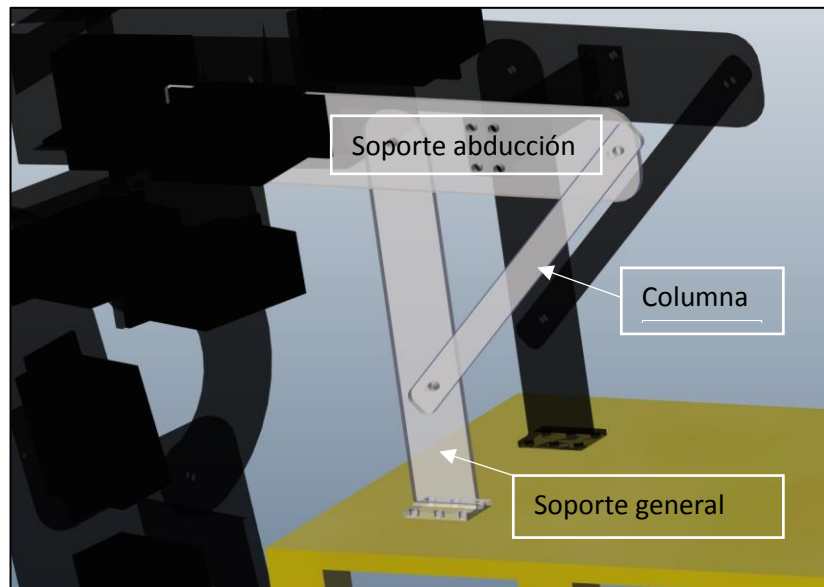


Figura 23. Eslabones de soporte del sistema

Las figuras 24 y 25 muestran las cargas y el diagrama de momentos sobre el soporte de abducción.

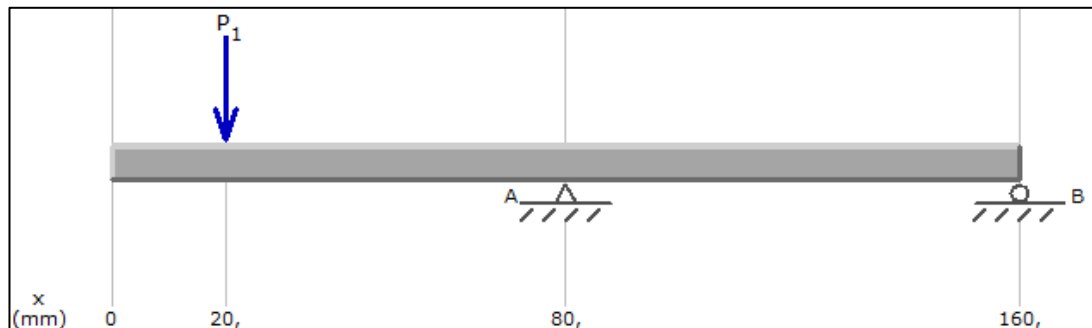


Figura 24. Diagrama de cargas sobre soporte de abducción

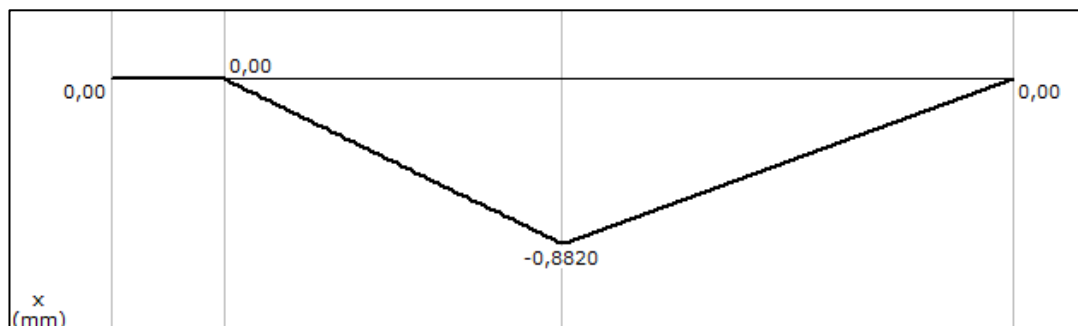


Figura 25. Diagrama de momentos en soportes de abducción

Debido a las dimensiones de los servomotores esta pieza debe tener 3cm de grosor por lo que se calcula el factor de seguridad cuando esta varía de 2 a 3 mm de espesor.

$$\sigma_{Permisible} = \frac{St}{s} \quad [3]$$

$$\sigma = \frac{M * C}{I} \quad [4]$$

Donde:

M= 0.882 Nm

C= 0.015m

I con espesor 2mm = $4.5 \cdot 10^{-9}$

I con espesor 3mm = $6.75 \cdot 10^{-9}$

Reemplazando estos valores se obtiene:

Factor de seguridad a 2 mm= 5

Factor de seguridad a 3mm= 7.6

El siguiente elemento que se analizó de la misma manera fue el soporte general del sistema en el cual se tiene las cargas como se muestra en la figura 26.

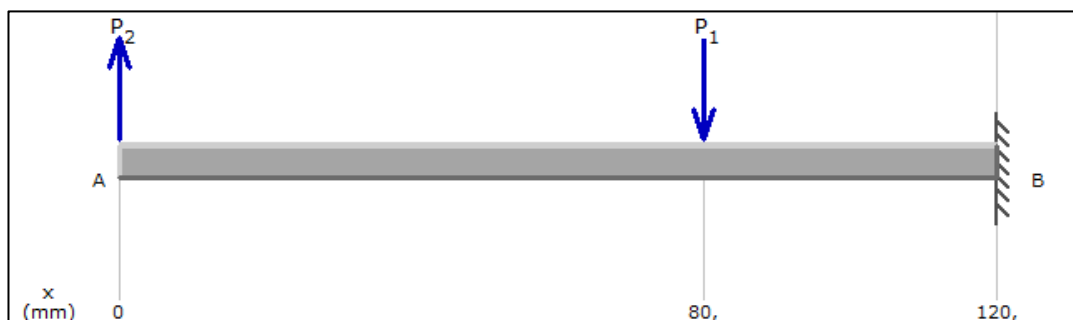


Figura 26. Diagrama de cargas en soporte general

En la figura 27 se muestra el diagrama de momentos sobre el soporte general.

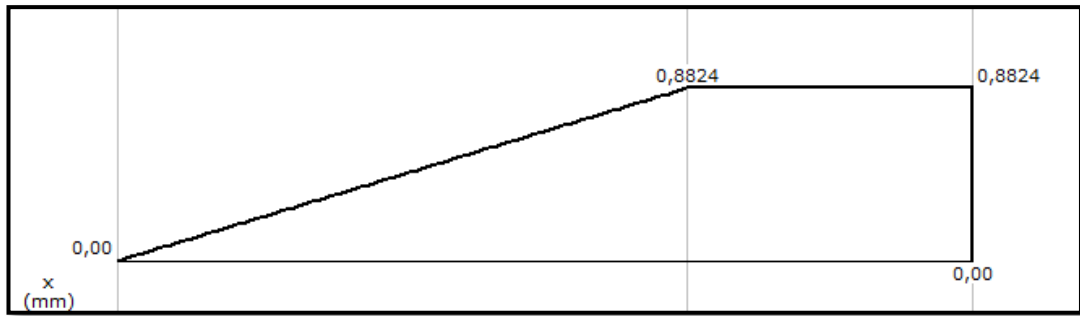


Figura 27. Diagrama de momentos en soporte general

A diferencia del soporte de abducción este no requiere el espacio de los servomotores por lo cual en su diseño se calculó las dimensiones que debe tener este elemento.

$$\sigma_{Permisible} = \frac{St}{s} \quad [5]$$

$$\sigma_{Permisible} = \frac{14.92}{3}$$

$$\sigma_{Permisible} = 4.97MPa$$

$$\sigma = \frac{M * C}{I} \quad [6]$$

$$4.97MPa = \frac{0.8824 * a/2}{\frac{1}{12} (0.002)a^3}$$

Dónde: a = ancho de la pieza

Con esto se obtuvo que el ancho que debe tener la pieza para trabajar con un factor de seguridad de 3 es 2.3cm.

Realizando el cálculo de columna se obtiene que es una columna corta la cual con dimensiones en su área transversal de 1cm x 2mm soporta una carga crítica de 248.9N.

3.3.5 MODELADO CAD DE BRAZO ROBOT.

Tomado en cuenta todo lo anterior se desarrolló un modelo que sin problemas tenga los movimientos esenciales mencionados previamente, así como las dimensiones calculadas en el diseño mecánico y la ubicación de los servomotores como se muestra en la figura 28.



Figura 28. Modelo CAD de estructura del brazo

Debido a la capacidad de los actuadores se realizaron articulaciones con 2 servomotores para tener mayor torque en los movimientos de abducción y flexión del hombro.

En la figura 29 se señala la ubicación de la articulación para el movimiento de abducción del hombro.

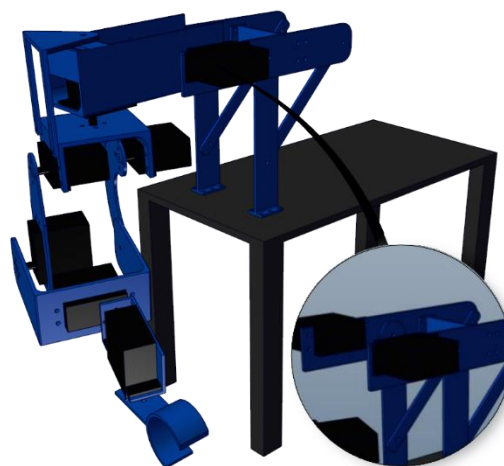


Figura 29. Ubicación de actuadores para abducción

En la figura 30 se señala la ubicación de la articulación para el movimiento de rotación del hombro.

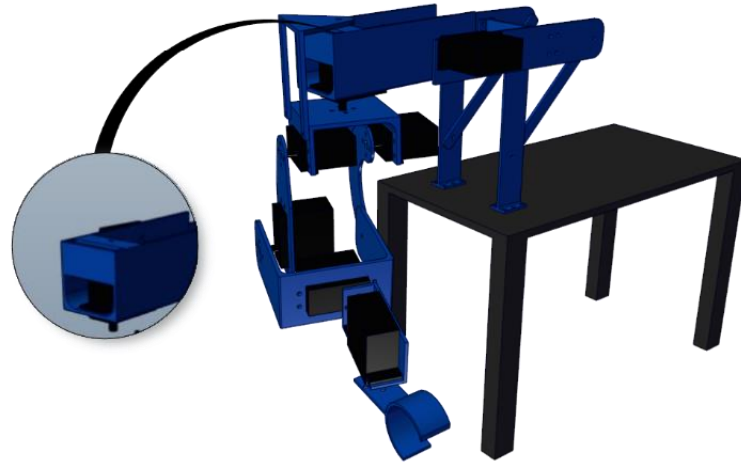


Figura 30. Articulación de rotación del hombro

En la figura 31 se señala la ubicación de la articulación para el movimiento de flexión del hombro.

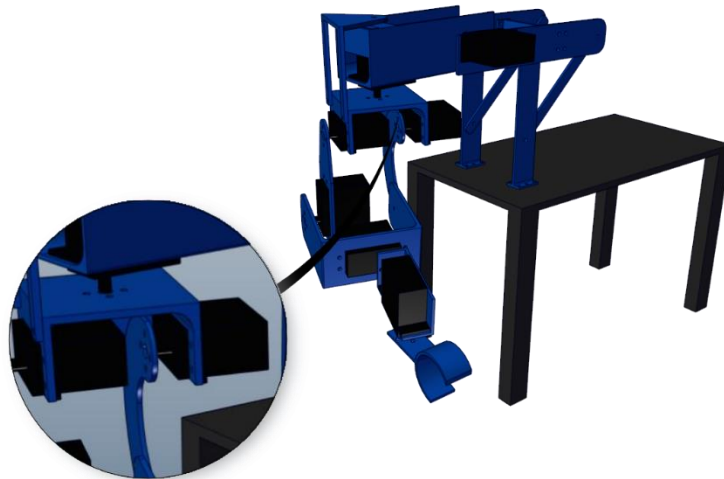


Figura 31. Articulación doble de flexión del hombro

En la figura 32 se señala la ubicación de la articulación para el movimiento de flexión del codo.

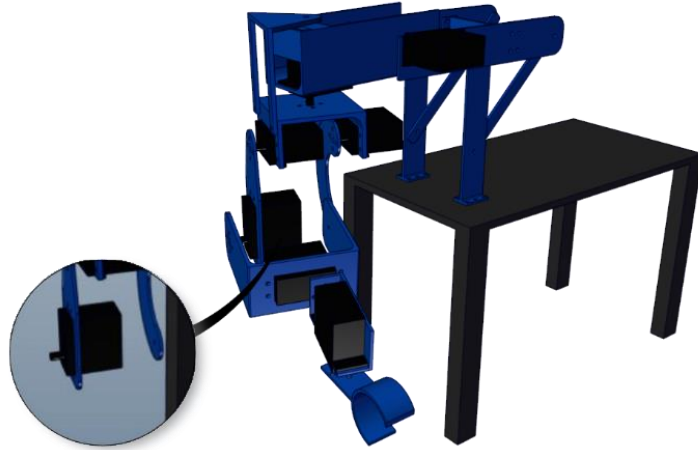


Figura 32. Articulación del codo

En la figura 33 se señala la ubicación de las articulaciones para los movimientos de pronación y flexión de la muñeca.

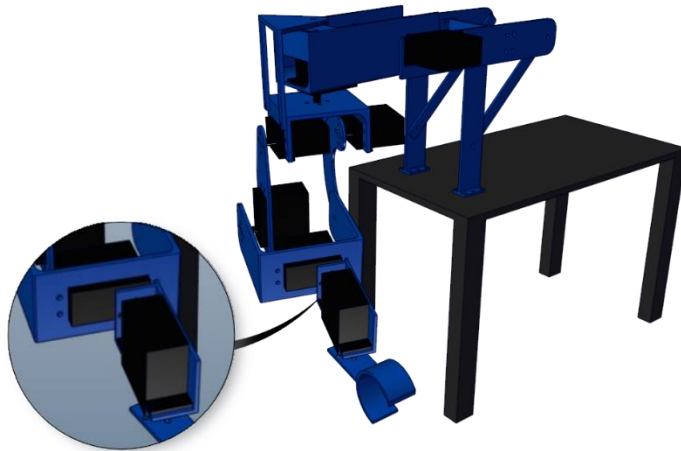


Figura 33. Articulaciones de pronación y flexión de la muñeca

En la figura 34 se señala cada parte que compone el sistema del brazo robótico.

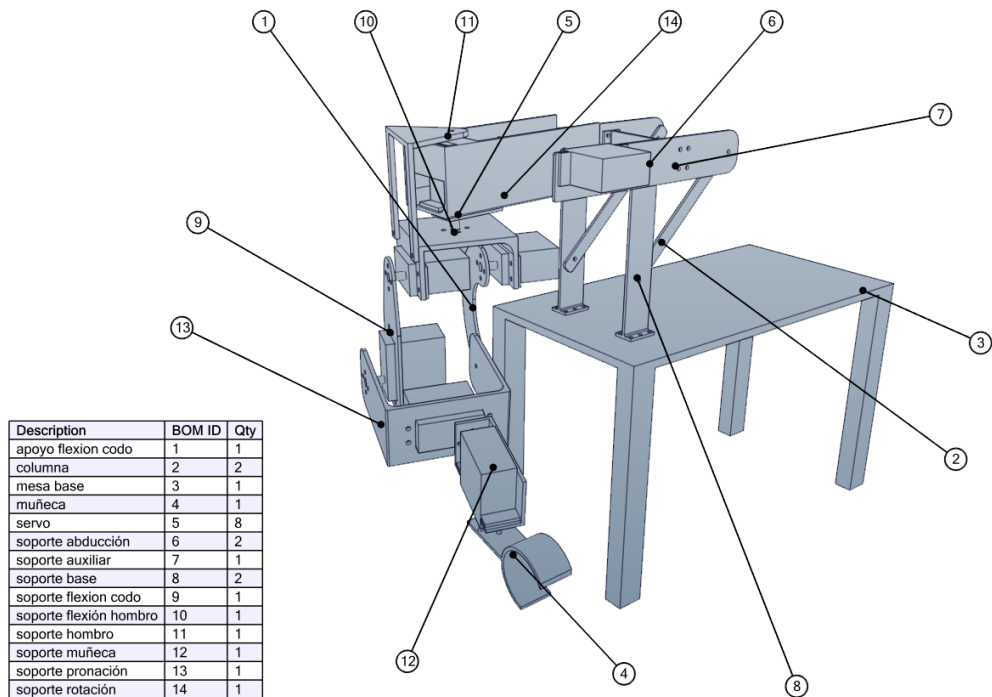


Figura 34. Identificación de las partes del sistema

3.4 DISEÑO ELECTRÓNICO DE EXOESQUELETO Y BRAZO ROBÓTICO

La parte electrónica de este sistema se divide en dos secciones, recepción y transmisión, el exoesqueleto necesita un sistema que tome los datos generados por cada potenciómetro ubicado en las diferentes articulaciones y procesarlas para convertirlas en un ángulo de posicionamiento para ser enviado al brazo robótico. La recepción por otra parte lee estos datos y envía las señales a los actuadores.

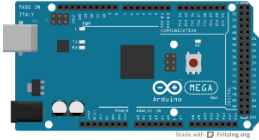
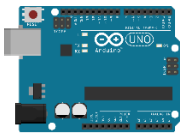

3.4.1 SELECCIÓN DE MICROCONTROLADOR

Para seleccionar el microcontrolador más apropiado para este proyecto se tomó en cuenta las siguientes consideraciones.

- Disponibilidad de librerías.
- 8 o más salidas PWM.
- 8 o más entradas analógicas.
- Capaz de alimentarse directamente con baterías disponibles en el mercado.
- Costo

La tabla 3 muestra la comparación de los módulos disponibles para el sistema de control

Tabla 3. Comparación de microcontroladores

			
Modelo	Arduino mega 2560	Arduino UNO	Pic 16f877a
Salidas PWM	15	6	2
Entradas analógicas	16	6	7
Alimentación	7 – 12 V	7 – 12 V	2 -5.5 V
Comunicación serial	4	1	No
Costo	\$35	\$15	\$5

Con estos requerimientos se tiene varias alternativas, pero se opta por una placa arduino mega 2560, a diferencia de microcontroladores como pic que requieren el diseño de una placa para trabajar, la disponibilidad del arduino ayudará a un desarrollo más rápido puesto que con sus plataformas se agiliza el proceso de prototipado para esta aplicación. Con 15 salidas PWM y 16 pines analógicos junto con su variedad de librerías tiene todo lo que se requiere para el cumplimiento de los objetivos.

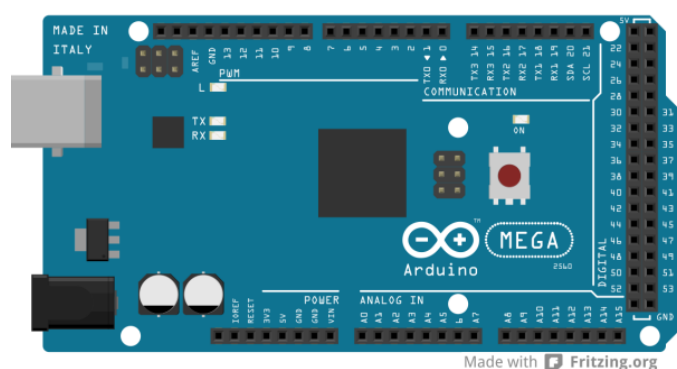


Figura 35. Esquema de estructura de arduino (Acuña, 2016)




3.4.2 SELECCIÓN DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Puesto que se busca que este sistema sea controlado a distancia se tiene opciones como radiofrecuencia, bluetooth o wifi. Para seleccionar el más adecuado se tomó en cuenta las siguientes consideraciones.

- Alcance de 5m.
- Configuración master-slave
- Costo
- Estabilidad de conexión
- Disponibilidad en el mercado

En la tabla 4 se compara varios módulos para comunicación inalámbrica, todos cumplen los requerimientos para este trabajo, por lo cual según su consumo energético, costo y disponibilidad en el mercado se opta por el módulo bluetooth.

Tabla 4. Comparación módulos inalámbricos

			
Modelo	HC-05	ESP8266	XBee s1
Alcance (metros)	18	100	100
Alimentación	3.3V – 5V	3.3V	2.8V-3.4V
Consumo (mA)	25	80	50
Costo	\$11	\$8	\$35

(Digi, 2014; John Romano D’Orazio, 2011; Systems, 2015)

En el mercado se encuentran varios modelos de módulos bluetooth como son HC-06, HC-05 y HC-03 de los cuales no todos poseen la característica master – slave, el módulo utilizado debe ser HC- 05 pese a que el módulo HC-03 cuenta con la misma característica, es menos común en el mercado.

3.4.3 SELECCIÓN DE ACTUADORES

La tabla 5 muestra la comparación de los diferentes actuadores disponibles en el mercado, se tomó en cuenta el voltaje de alimentación, torque, grados de giro y costo.

Tabla 5. Comparación de actuadores

			
Modelo	MG 995	AX-12A	MX-28T
Voltaje de operación	4 -7V	9 - 12V	10 -14.8V
Torque	1.47 N.m	1.52 N.m	3.1 N.m
Grados de giro	180°	360°	360°
Peso	55 gr	54.6 gr	72 gr
Costo	\$21	\$45	\$219

(Geelmid, 2014; Robotis, 2008, 2016)

Como se indicó para el dimensionamiento del brazo los actuadores que se utilizaron son servomotores con capacidad de torque de 15 kg/cm equivalente a 1.47N.m, pese a haber varios en el mercado con esta capacidad por disponibilidad y costo se utiliza los servomotores Towerpro MG995.

3.4.4 DISEÑO DE CIRCUITO TRANSMISOR

La parte electrónica para la transmisión se basa en la conexión de cada señal de los potenciómetros a la placa arduino y la conexión al módulo bluetooth como se muestra en la figura 36.

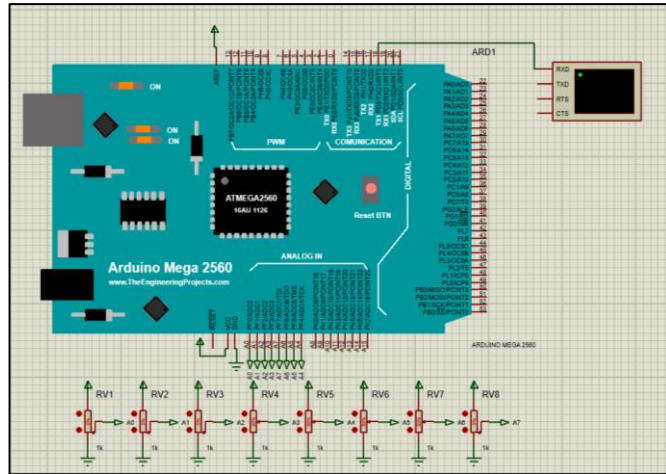


Figura 36. Conexión de circuito de transmisión

La placa para transmisión se diseñó de manera que esta se acople sobre la placa arduino y de igual forma que el módulo bluetooth se coloque sobre esta como se puede observar en el anexo 1.

3.4.5 DISEÑO DE CIRCUITO RECEPTOR

Al igual que el transmisor, se necesita la conexión del módulo bluetooth y enviar cada señal de posicionamiento a cada servomotor como se muestra en la figura 37.

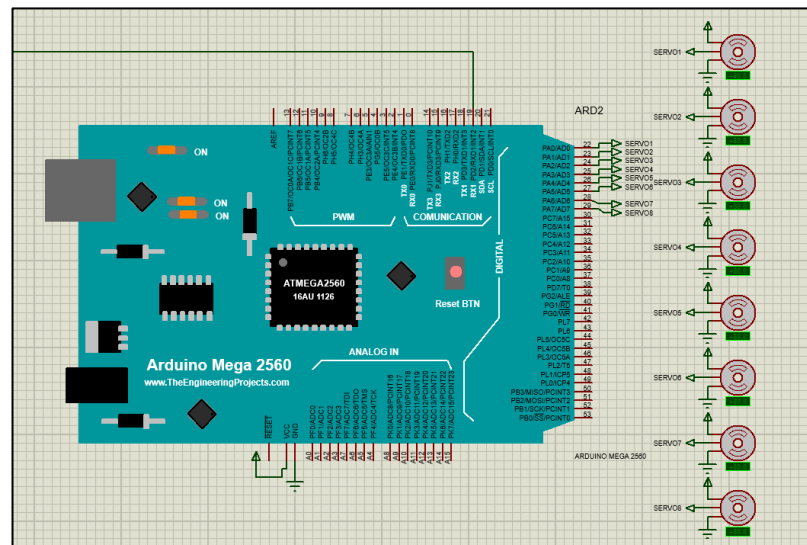


Figura 37. Conexión de circuito receptor

Debido al consumo por parte de los servomotores, estos requieren de una fuente externa.

3.4.6 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Para la selección del sistema de alimentación se tomó en cuenta el consumo de cada parte de este sistema.

Primero se calculó el consumo del exoesqueleto con el sistema de transmisión para esto se formuló la siguiente ecuación.

$$I_{\text{exoesqueleto}} = I_{\text{arduino}} + 6I_{\text{potenciómetro}} + I_{\text{bluetooth}} \quad [7]$$

$$I_{\text{exoesqueleto}} = 93\text{mA} + 6 * (5\text{mA}) + 25\text{mA}$$

$$I_{\text{exoesqueleto}} = 148\text{mA}$$

Debido al bajo consumo del sistema de transmisión se optó por una batería alcalina que es muy común en el mercado.

Estas baterías de 9V tienen una capacidad de 300mAh para lo cual se procedió a calcular la duración que se tendrá al alimentar el sistema con una de estas.

$$\text{Duración batería} = \frac{\text{capacidad de la batería}}{\text{consumo del circuito}} \quad [8]$$

Debido a la variación que se puede tener durante el funcionamiento del sistema se añadió un 25% de error al consumo.

$$\text{Consumo del circuito} = 1.25 * 148 \quad [9]$$

$$\text{Consumo del circuito} = 185\text{mA}$$

Al ser la batería de 9V y el circuito funciona a 5V para el cálculo del tiempo de duración se realizó en términos de potencia.

$$\text{Duración batería} = \frac{9\text{V} * 300\text{mAh}}{5\text{V} * 185\text{mA}}$$

La duración de la batería es:

$$\text{Duración batería} = \frac{2.7\text{Wh}}{0.925\text{W}}$$

$$\text{Duración batería} = 2.91\text{h}$$

El uso de una batería alcalina de 9V alimenta al circuito de transmisión durante aproximadamente 2 horas y 54 minutos.

De ser necesario una duración prolongada del sistema se realiza el cálculo basado en el tiempo que se requiere, en el caso de ser requerido por 6 horas realizando el procedimiento invertido obtendremos la capacidad de carga en la batería que necesitamos que sería 982.5 mAh a 5V.

Para el cálculo del sistema de alimentación para el brazo robot y el microcontrolador se calculó igualmente el consumo total de este, para los servomotores la corriente que consumen varía según su estado es decir si estos se encuentran en movimiento o estáticos. Se tomó el valor más alto para al cálculo del sistema de alimentación este se da cuando los servomotores se mantienen estáticos.

$$I_{brazo\ robótico} = I_{arduino} + 8I_{servomotor} + I_{bluetooth} \quad [10]$$

$$I_{brazo\ robótico} = 93mA + 8 * (350mA) + 25mA$$

$$I_{brazo\ robótico} = 2918mA$$

Los servomotores funcionan a 6V, si el voltaje de la batería es igual al consumo de los actuadores se toma en cuenta únicamente la corriente para el cálculo de la duración de la batería.

Si se requiere el uso del brazo robot durante 2.91 horas se obtiene que:

$$Duración\ batería = \frac{capacidad\ de\ la\ batería}{consumo\ del\ circuito}$$

$$2.91h = \frac{capacidad\ de\ la\ batería}{2918mA}$$

$$capacidad\ de\ la\ batería = 2.91h * 2918mA$$

$$capacidad\ de\ la\ batería = 8491.38mAh$$

Para la alimentación de los servomotores la batería tiene que ser de 6V con una capacidad mayor o igual a 8491.38mAh para lograr una autonomía de al menos 2 horas y 54 minutos, en el mercado se encuentra batería de celda seca de 6V a 7500mAh la cual da una autonomía de 2 horas y 34 minutos que limita el tiempo de funcionamiento de todo el sistema.

3.5 DISEÑO DE CONTROL DEL SISTEMA

3.5.1 LÓGICA DE CONTROL

El sistema de control se basó en enviar ordenes al brazo robótico únicamente cuando haya variación en una articulación, es decir, mientras el exoesqueleto no esté en movimiento no se envía ninguna señal, los potenciómetros dan valores de entre 0 y 1023 por lo que se toma el rango hasta el cual va a girar cada uno y se lo escaló para convertirlo en un ángulo, a cada articulación se le asignó una etiqueta y se envía junto con el valor del ángulo en el cual se posiciona, el microcontrolador del brazo robótico recibe la señal, la etiqueta y toma el valor para saber que articulación es la que debe reposicionarse.

3.5.2 FLUJOGRAMA DE CONTROL

En la figura 38 se representa el flujograma del sistema de control indicando el proceso que este realiza desde que se mueve el exoesqueleto hasta el reposicionamiento de las articulaciones el brazo robótico.

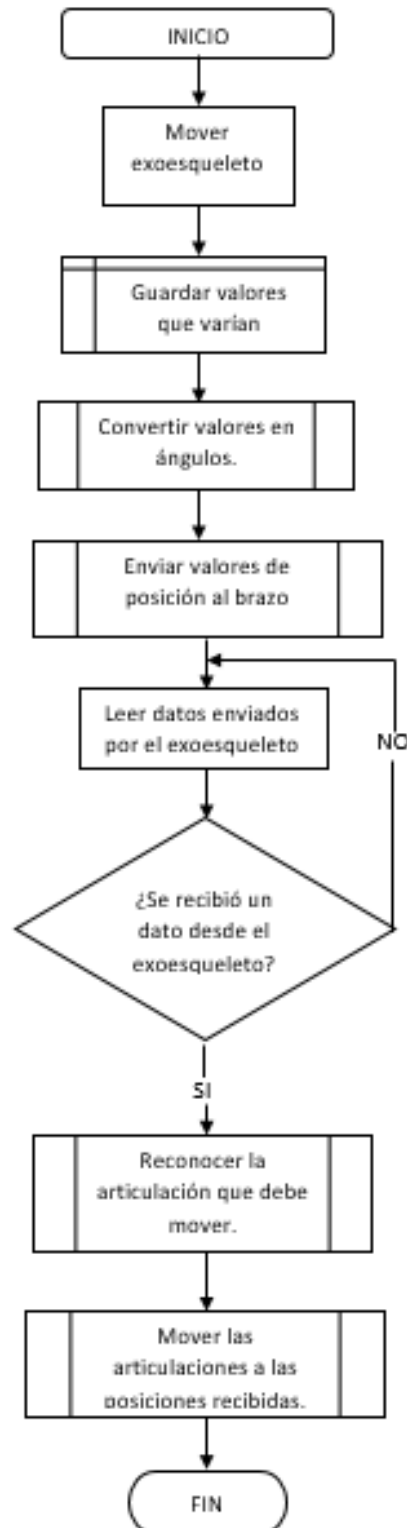


Figura 38. Flujograma de control del sistema

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 SIMULACIÓN

4.1.1 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

En la figura 39 se puede observar el funcionamiento del sistema de control mediante el cual con 6 potenciómetros ubicados en el exoesqueleto se controlan los 8 servomotores del brazo robótico esto debido a que se tiene 2 servomotores en abducción y flexión del hombro, en abducción los servomotores giran en sentido opuesto según la señal del exoesqueleto.

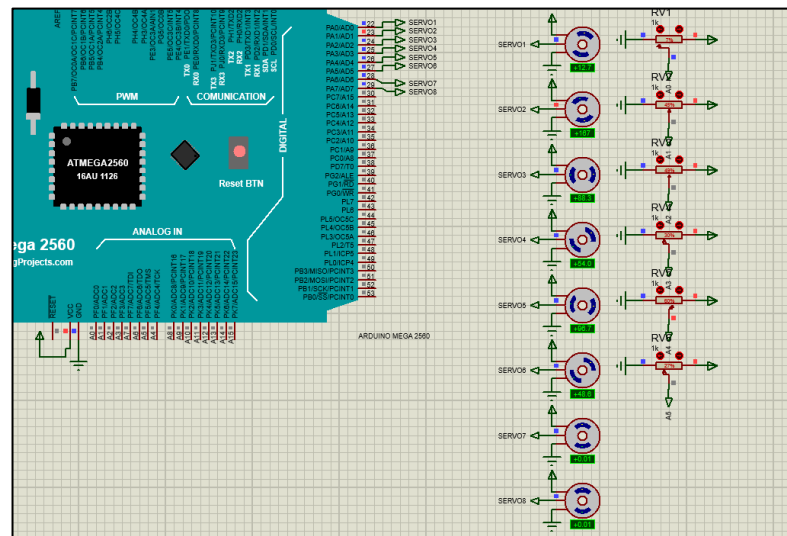


Figura 39. Simulación en proteus del sistema de control

4.1.2 ESTUDIO DE DISEÑO DE LAS PARTES CRÍTICAS DE LA ESTRUCTURA.

Como se mencionó anteriormente los elementos que mayor carga soportan son los soportes generales, la columna y los soportes de abducción.

En la figura 40 se puede observar las tensiones que se aplica sobre el soporte general, el esfuerzo máximo aplicado sobre este es de 9.5MPa según la gráfica aunque este se produzca en una zona muy pequeña de las sujeciones fijas.

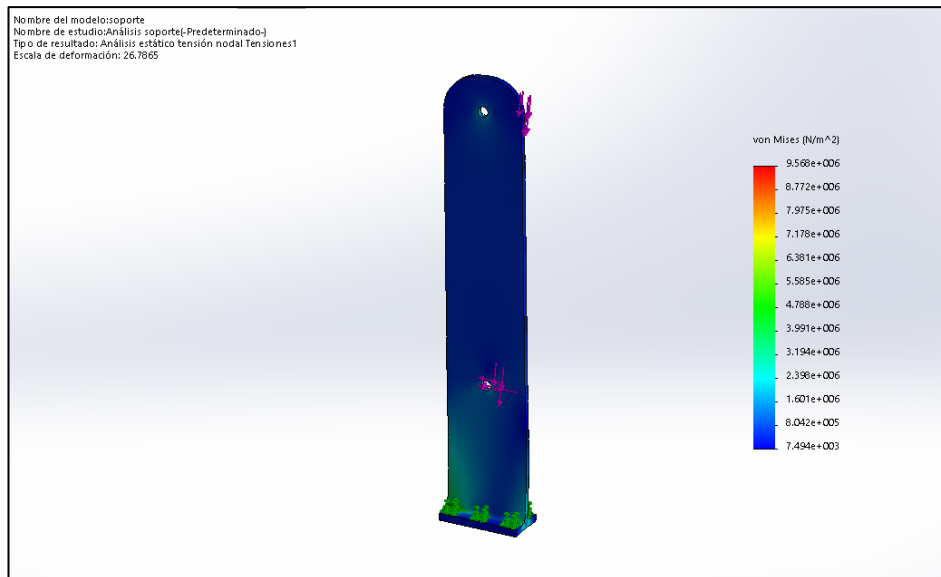


Figura 40. Análisis de tensiones sobre soporte general

En la Figura 41 se muestra el punto de deformación máxima de esta pieza cuando se somete a las cargas del sistema, como se muestra en la figura este se da en la parte superior en la sujeción con el soporte de abducción y es de 0.487 mm.

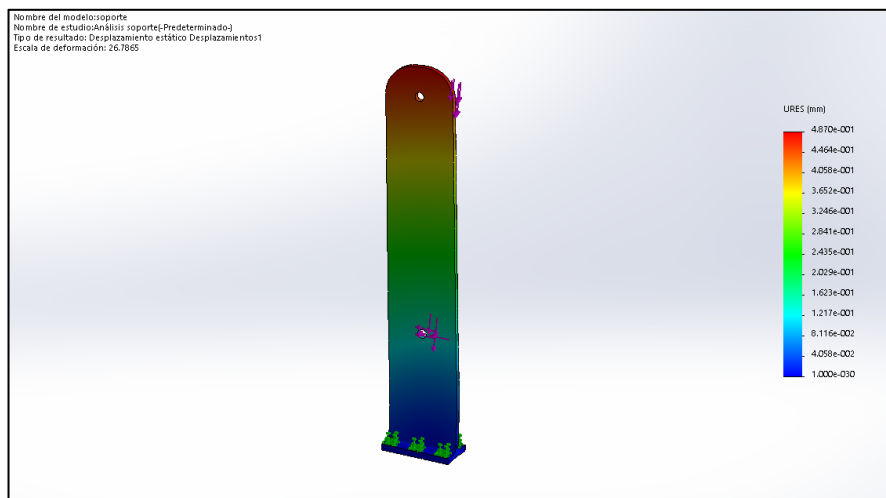


Figura 41. Análisis de deformación de soporte general

En las figuras 42 y 43 se observa las tensiones y la deformación q sufren los soportes de abducción al tener todo el sistema montado, el esfuerzo máximo soportado es de 14MPa tomando en cuenta que en la simulación no se coloca el actuador que aportaría resistencia en el sitio donde se da este esfuerzo, también se muestra la deformación máxima de este componente que se da en el extremo que descendería 1.25mm.

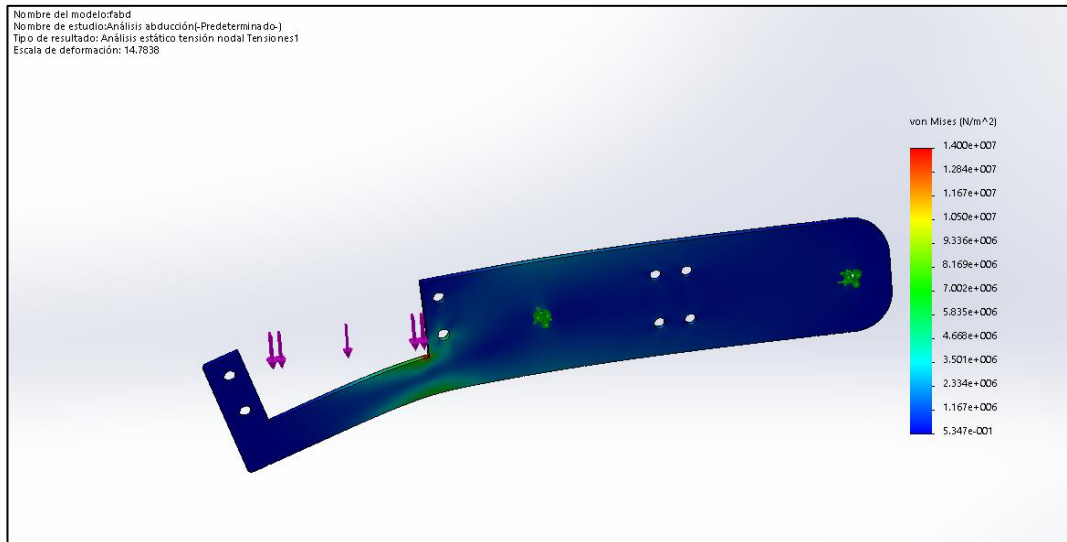


Figura 42. Análisis de tensiones sobre soporte abducción

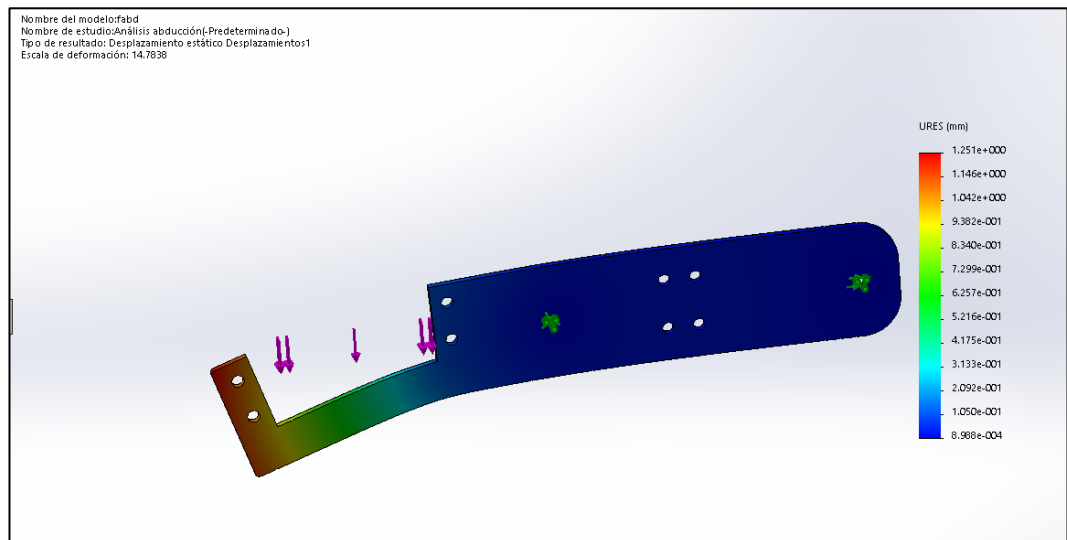


Figura 43. Análisis de deformación de soporte abducción

En la figura 44 se puede observar la distribución de tensiones, este componente es un apoyo para estabilizar la estructura, su mayor carga según la figura es 1.72 MPa.

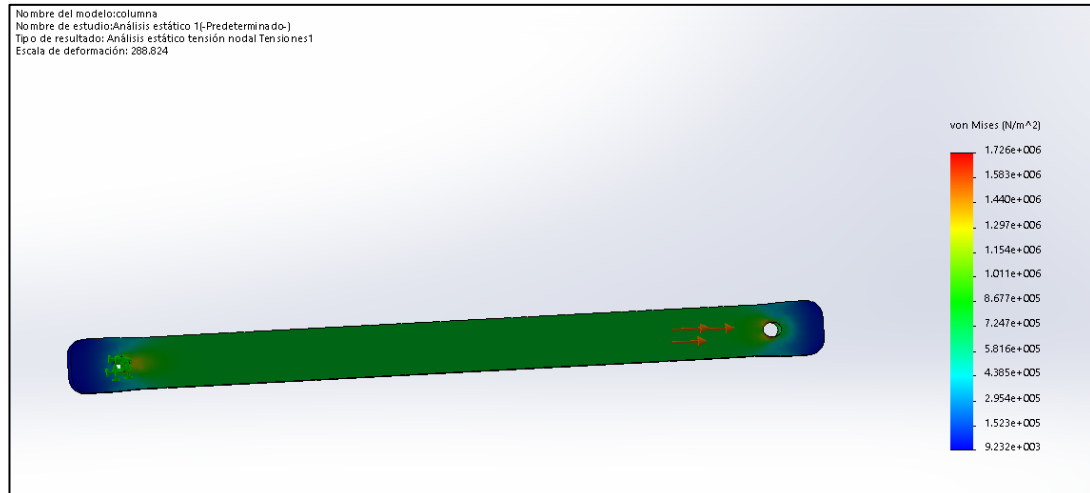


Figura 44. Análisis de tensiones sobre columna

En la figura 45 se puede observar la deformación de la columna, la cual tendrá una deformación máxima de 0.046mm.

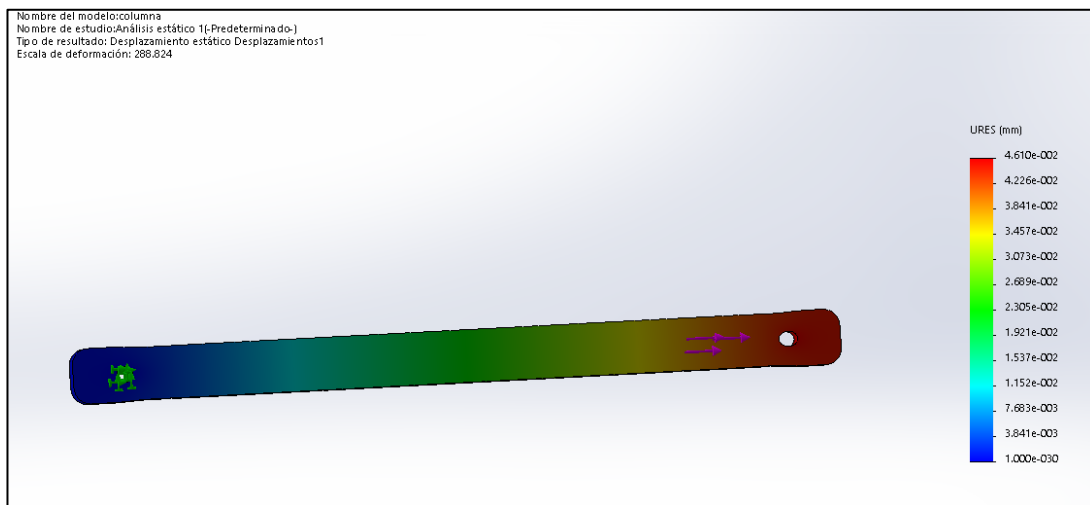


Figura 45. Análisis de deformación sobre columna

4.2 CONSTRUCCIÓN

Una vez adquiridos todos los componentes tanto de la parte electrónica como estructural se procedió a la implementación del brazo y exoesqueleto.

En la figura 46 se muestra la fabricación de los componentes estructurales del brazo robótico realizados por una impresora 3D.

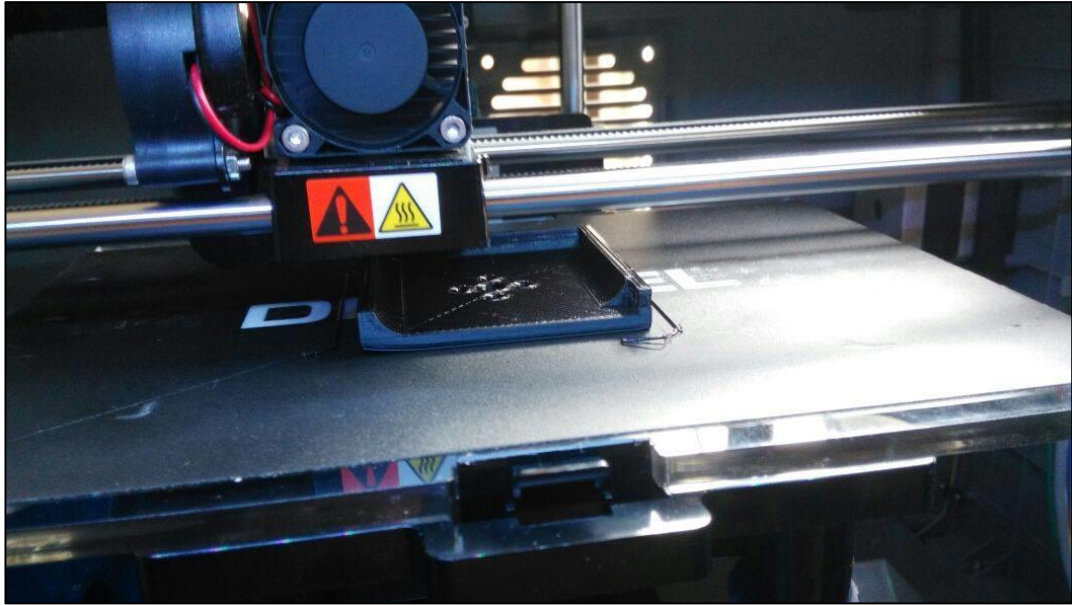


Figura 46. Impresión de elementos estructurales para el brazo robot

En la figura 47 se muestra el acoplamiento de cada actuador en los componentes estructurales del brazo robótico para el ensamble final.



Figura 47. Acoplamiento de actuadores dentro de las piezas impresas

En la figura 48 se muestra el ensamble completo de la parte estructural del brazo robótico.



Figura 48. Ensamblaje estructural del brazo robot

En la figura 49 se muestra el ensamble completo de la parte estructural del exoesqueleto.



Figura 49. Ensamble estructural del exoesqueleto

Se procede a la implementación de la parte electrónica y de control tanto en brazo como en exoesqueleto.

En la figura 50 se muestra el cableado del sistema de control del brazo robótico.

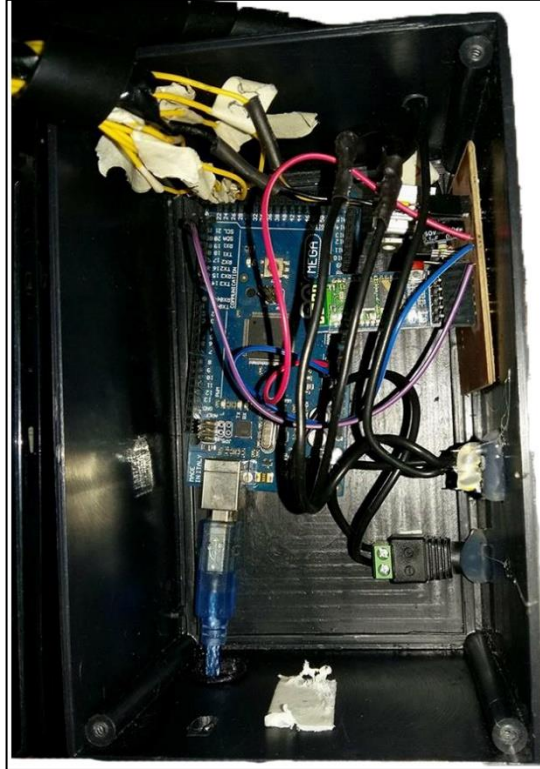


Figura 50. Conexiones del sistema de control de brazo robot

En la figura 51 se muestra el cableado del sistema de control del exoesqueleto.

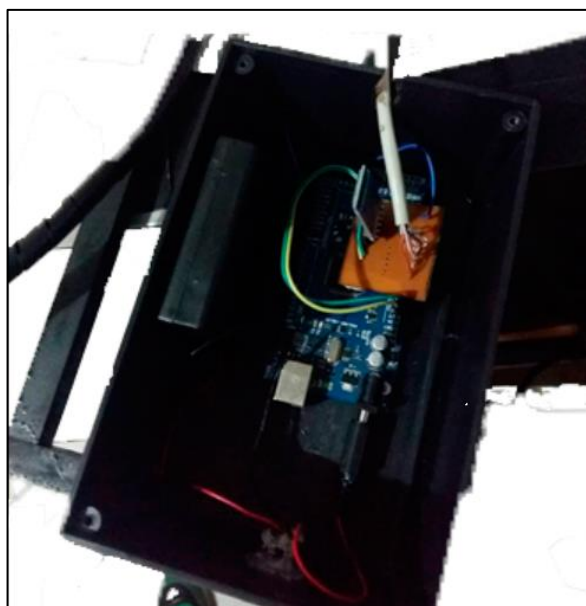


Figura 51. Conexión de sistema de control de exoesqueleto

La figura 52 muestra el ensamble final de la parte mecánica y electrónica del brazo robótico.

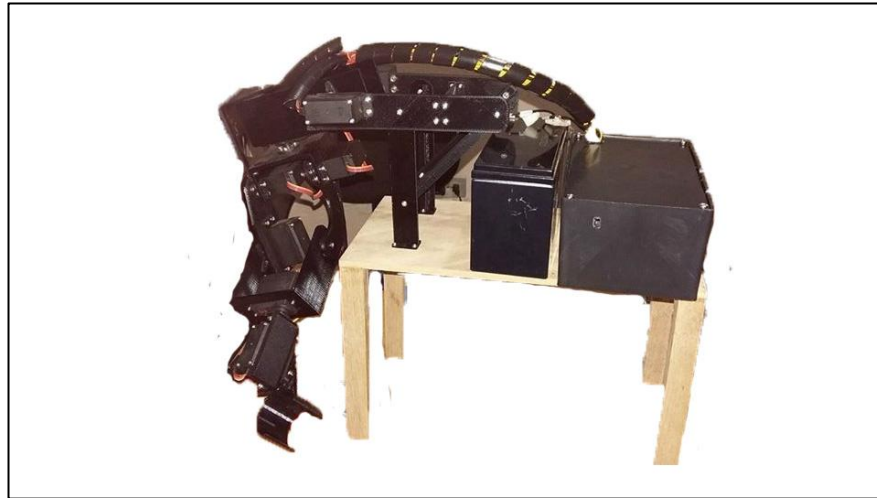


Figura 52. Prototipo de brazo robótico.

4.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para las pruebas de funcionamiento se tomó en cuenta la capacidad máxima de carga del brazo robot, la velocidad de respuesta que este tuvo ante el movimiento del exoesqueleto y la relación de movimiento debe ser acorde entre brazo robot y exoesqueleto.

4.3.1 CAPACIDAD DE CARGA DEL BRAZO

Para determinar la carga que soporte el brazo sin afectar su velocidad se aplicó diferentes cargas en su extremo y se pone en funcionamiento, mientras no se ve afectada su velocidad la carga se aumenta, las cargas aplicadas son 100g, 150g, 200g, 250g.

Al llegar a los 250 gramos la velocidad de movimientos del brazo empieza a disminuir como se muestra en la tabla 6, por lo que se toma este valor como el punto máximo de carga del sistema.

Tabla 6. Restricciones de movimiento del brazo con carga

	Restricción de movimiento					
	Hombro			Codo	Muñeca	
Peso (g)	Abducción	Rotación	Flexión	Flexión	Pronación	Flexión
100						
150						
200						
250		X		X		

4.3.2 TIEMPO DE REACCIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO CON EL EXOESQUELETO.

La toma de tiempos de reacción del brazo ante el movimiento del exoesqueleto se realizó de forma digital, es decir se graba en video un movimiento 3 veces, este se pasó a un software como se muestra en la figura 53, el cual divide el video en una secuencia de imágenes a una velocidad de 30 fotogramas por segundo.

Al comparar los fotogramas en secuencia se contó la cantidad de fotogramas en la cual se note el brazo descoordinado con el exoesqueleto así como la cantidad de fotogramas que tarda en llegar al punto final, cada fotograma representa un lapso de 0.03 segundos.

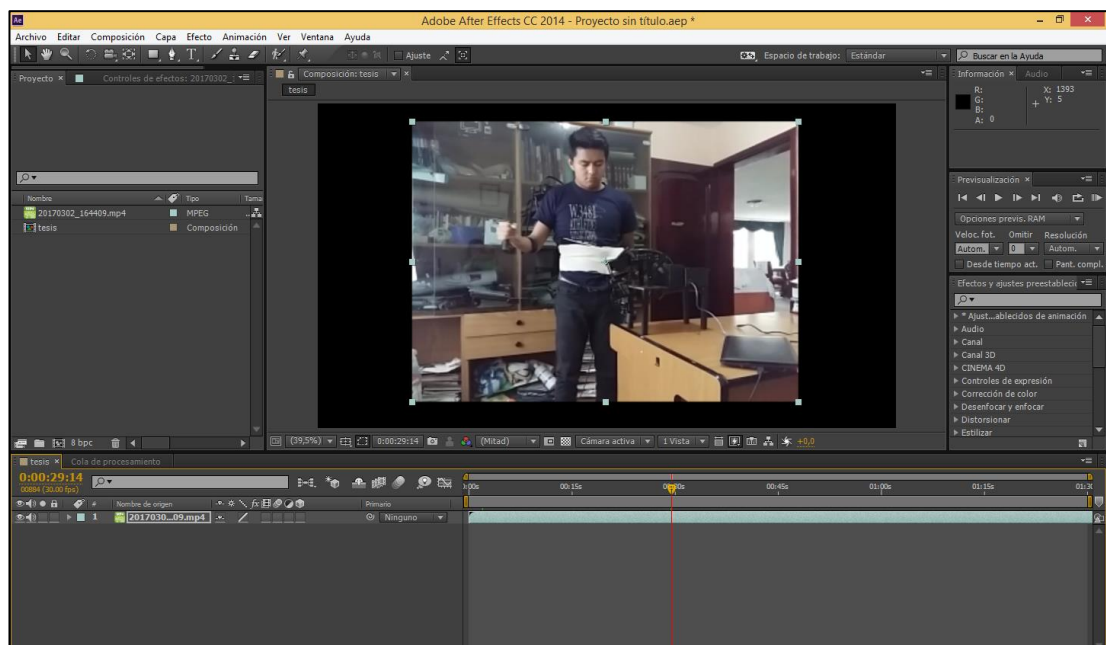


Figura 53. Software de procesamiento de imágenes para toma de tiempos

En estas pruebas se pudo apreciar que con movimientos leves se tiene un error promedio de 3 fotogramas en cada movimiento es decir 0.09 segundos como se muestra en la tabla 7, mientras que para movimiento a una velocidad más elevada se tuvo un máximo de 14 fotogramas o 0.42 segundos como se muestra en la tabla 8. Los mayores retrasos se dan en las articulaciones de abducción y flexión del hombro, estas son las articulaciones dobles.

Tabla 7. Tabla de pruebas de reacción con movimientos leves.

Pruebas con movimientos leves					
Movimientos	Fotogramas de retraso			Promedio (Fotogramas)	Promedio (segundos)
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3		
Abducción	3	4	2	3,0	0,09
Flexión Hombro	3	2	2	2,3	0,07
Rotación	4	2	2	2,7	0,08
Flexión codo	3	1	2	2,0	0,06
Pronación	1	2	2	1,7	0,05
Flexión muñeca	2	1	2	1,7	0,05

Tabla 8. Tabla de pruebas de reacción con movimientos rápidos.

Pruebas con movimiento de reacción rápida					
Movimientos	Fotogramas de retraso			Promedio (Fotogramas)	Promedio (segundos)
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3		
Abducción	15	15	12	14,0	0,42
Flexión Hombro	15	13	12	13,3	0,40
Rotación	12	14	12	12,7	0,38
Flexión codo	12	12	13	12,3	0,37
Pronación	10	11	9	10,0	0,30
Flexión muñeca	10	8	8	8,7	0,26

4.3.3 RELACIÓN DE MOVIMIENTO

Para determinar la relación de movimiento entre el exoesqueleto y el brazo robótico se utilizó un plano con ángulos marcados y se tomó capturas al realizar cada movimiento como se muestran en las figuras 54 a la 58, se analizó el punto final del brazo y exoesqueleto así como la orientación que tiene este, debe ser acorde entre exoesqueleto y brazo robótico.

Se determina que la relación de movimiento entre el exoesqueleto y el brazo puede tener hasta una variación de 5 grados en cada articulación, esto se debe al sistema de control que para eliminar el ruido compara valores dentro de un rango.

Tabla 9. Tabla de relación de movimiento.

Pruebas de relación de movimiento				
Movimientos	Angulo desfasado			Promedio (Grados)
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
Abducción	6	4	5	5,0
Flexión Hombro	4	4	5	4,3
Rotación	3	5	5	4,3
Flexión codo	6	4	4	4,7
Pronación	2	5	2	3,0
Flexión muñeca	4	4	3	3,7

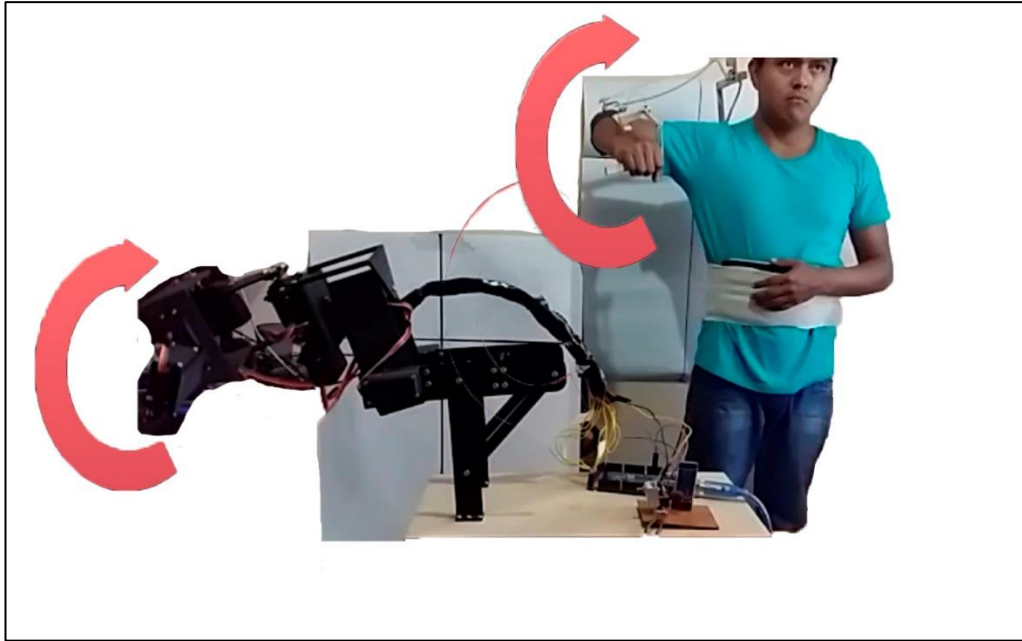


Figura 54. Prueba en abducción

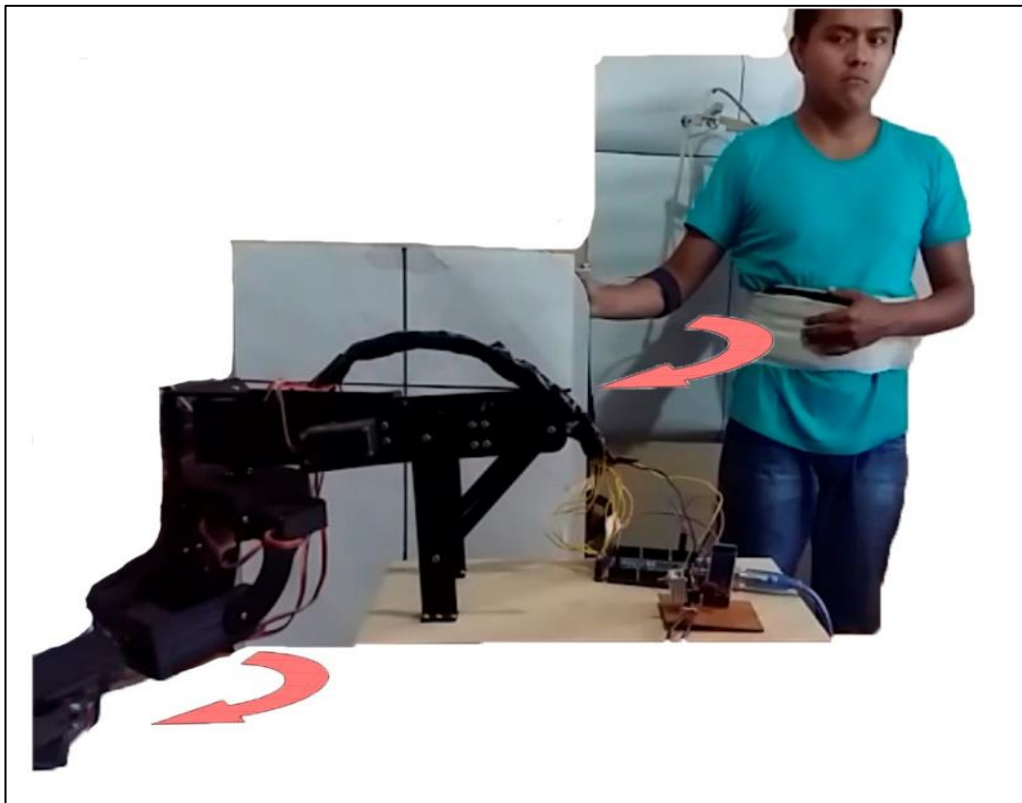


Figura 55. Prueba en rotación



Figura 56. Pruebas en flexión del codo

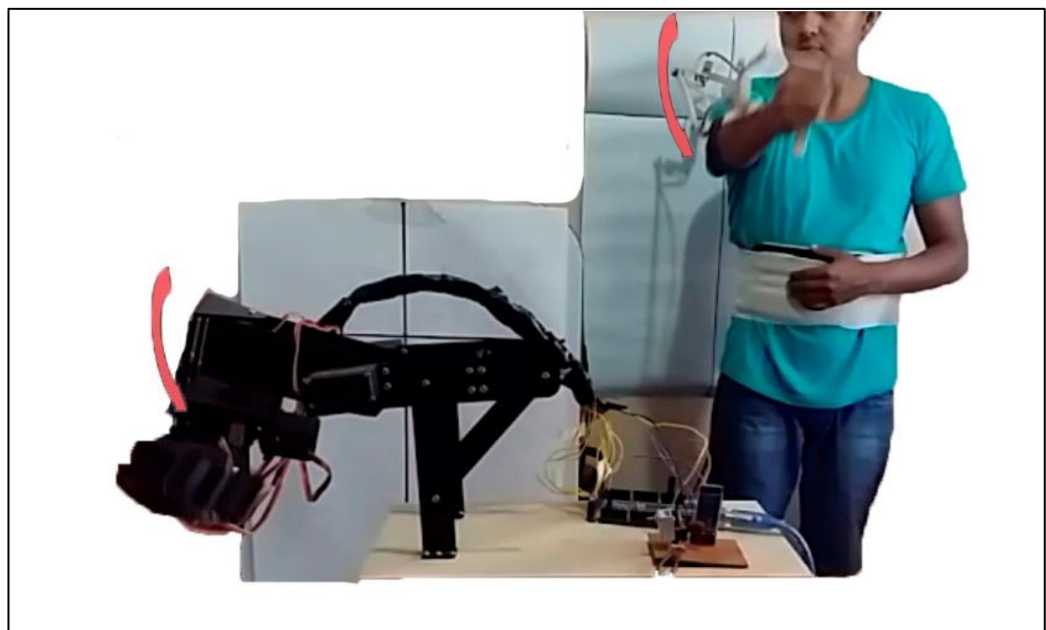


Figura 57. Pruebas en flexión del hombro

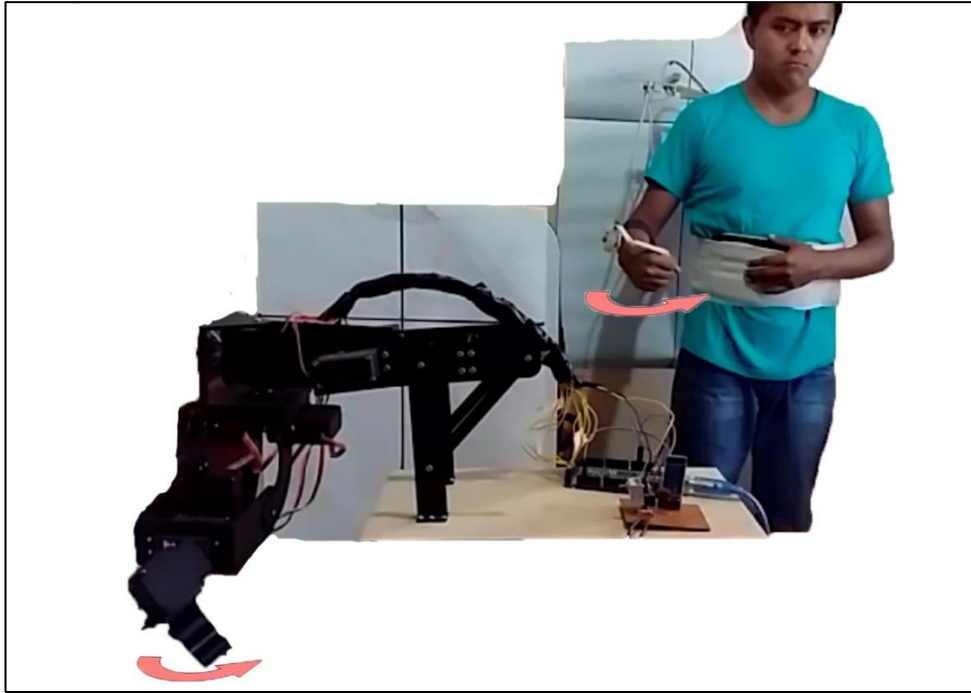


Figura 58. Pruebas en movimientos de muñeca

4.3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De las pruebas realizadas se obtuvo las siguientes características del brazo robot.

- Capacidad de carga: la carga máxima capaz de levantar el brazo son 250 gramos.
- Velocidad de respuesta: a una velocidad leve la respuesta tiene un retraso de 0.09 segundos, mientras que al moverse a velocidades superiores el brazo robótico puede retrasarse hasta 0.42segundos.
- Relación de movimiento: el movimiento de las articulaciones del exoesqueleto y el brazo robot tienen una variación máxima de 5°.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El uso de herramientas como arduino e impresiones 3D agiliza el desarrollo del prototipo.
- Con el método de captura de datos y algoritmo del sistema se obtiene una precisión del 95%, eliminando el ruido que ocasiona movimientos erráticos y vibraciones.
- Los movimientos que es capaz de realizar del brazo robot son acorde a los del exoesqueleto, para esto se debe tomar en cuenta que tanto brazo y exoesqueleto tienen el mismo orden de configuración en sus articulaciones, en el diseño de este sistema se eliminó los movimientos de hiperextensión e hiperflexión por lo cual estos no se pueden realizar.
- El sistema está diseñado únicamente para la réplica de movimientos por lo que no soporta grandes cargas, debido a la capacidad de los servomotores, este soporta hasta 250g, de igual manera es un sistema que no replica los reflejos es decir en movimientos a alta velocidad se obtendrá retrasos de hasta 0.42 segundos.
- Se diseñó un exoesqueleto adaptable al brazo con la ayuda del modelado CAD comprobando que no comprometa la libertad de movimiento del usuario.
- Para evitar movimientos erráticos enviar los datos únicamente cuando estos tenga una variación, no es necesario mantener una comunicación constante si no se realiza movimientos.
- Para las articulaciones con 2 actuadores se debe tomar en cuenta los movimientos de hiperextensión del brazo por lo que su punto de inicio debe estar en un punto medio de su rango de giro.

RECOMENDACIONES

- Para crear un sistema como este, de mayor potencia, se debe tomar en cuenta el consumo energético en caso de hacerlo autónomo.
- Para sistemas remotos a grandes distancias se puede utilizar módulos de mayor alcance.
- Para aumentar la precisión se puede hacer uso de mecanismos reductores y actuadores con mayor ángulo de giro para tener movimientos más precisos.
- Para tener una mayor interacción con el usuario se puede implementar la tecnología de realidad virtual, para un mejor control cuando el usuario y el robot se encuentren en lugares totalmente distintos.
- Usar actuadores de mayor potencia para reemplazar las articulaciones que tienen 2 servomotores para aumentar su velocidad de respuesta en estos puntos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Acuña, J. de. (2016). Arduino Mega 2560 revisión 3 | ardubasic. Retrieved from <https://ardubasic.wordpress.com/2014/05/04/arduino-mega-2560-revision-3/>
- Alejandro, M., Cardona, C., Spitia, F. R., & López, A. B. (2010). Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. *Revista Ingeniería Biomédica*, 4, 63–73.
- Ayala Lozano, J. F., Urriolagoitia Sosa, G., Romero Ángeles, B., Torres San-Miguel, C. R., Aguilar-Pérez, L. A., & Urriolagoitia-Calderón, G. M. (2015). Diseño mecánico de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 17(1), 79–90. <http://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.44188>
- Bergren, C. M. (2003). *Anatomy of a Robot (TAB Robotics)*. (McGraw-Hill, Ed.). Sydney.
- Burn-Callander, R. (2015). The robot chef coming to a kitchen near you. Retrieved January 21, 2016, from <http://www.telegraph.co.uk/finance/businessclub/11912085/The-robot-chef-coming-to-a-kitchen-near-you.html>
- Digi. (2014). Xbee® Multipoint RF Modules. North.
- Domínguez, S. F. (2009). REHABILITACIÓN Y MEDICINA FÍSICA. Retrieved May 17, 2016, from <http://www.rehabilitacionblog.com/2009/06/historia-y-futuro-de-la-rehabilitacion.html>
- García, E. L. J. (n.d.). El hombro. Retrieved from www.traumazaragoza.com
- Geelmid, S. (2014). Servo Motor TowerPro - MG995 Servo Motor TowerPro - MG995, 1. Retrieved from www.geelmed.com
- Gonzales, V. R. (2002). Los AEA Tecnología Productos & los Sistemas: NEATER 660 Telerobot. Retrieved May 17, 2016, from <http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/r166/r129/r129.htm>
- Hartman, M. (2014). Robotic Assisted Surgery. Retrieved May 17, 2016, from <https://www.penrosestfrancis.org/psf/specialties/minimally-invasive-robotic-assisted-surgery/>
- John Romano D'Orazio. (2011). Bluetooth Module - User Instructional Manual. HC Serial Bluetooth Products, 1–16.
- Nisbett, R. G. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de shigley*. McGraw-Hill.
- PROAÑO, M. D. M. (2016). Implementación de un brazo robótico para control de calidad de soldaduras en placas electrónicas. Universidad Internacional del Ecuador.
- Robotis. (2008). DYNAMIXEL AX - 12A. Retrieved February 2, 2017, from <http://ro-botica.com/Producto/Actuador-Dynamixel-AX-12A/>
- Robotis. (2016). DYNAMIXEL MX-28T - ROBOTIS. Retrieved February 2, 2017, from <http://www.robotis.us/dynamixel-mx-28t/>
- Rodríguez, P. (2015). Dexmo, el exoesqueleto que quiere romper las barreras entre el mundo virtual y el real. Retrieved from <http://www.xatakahome.com/ocio/dexmo-el-exoesqueleto-que-quiere->

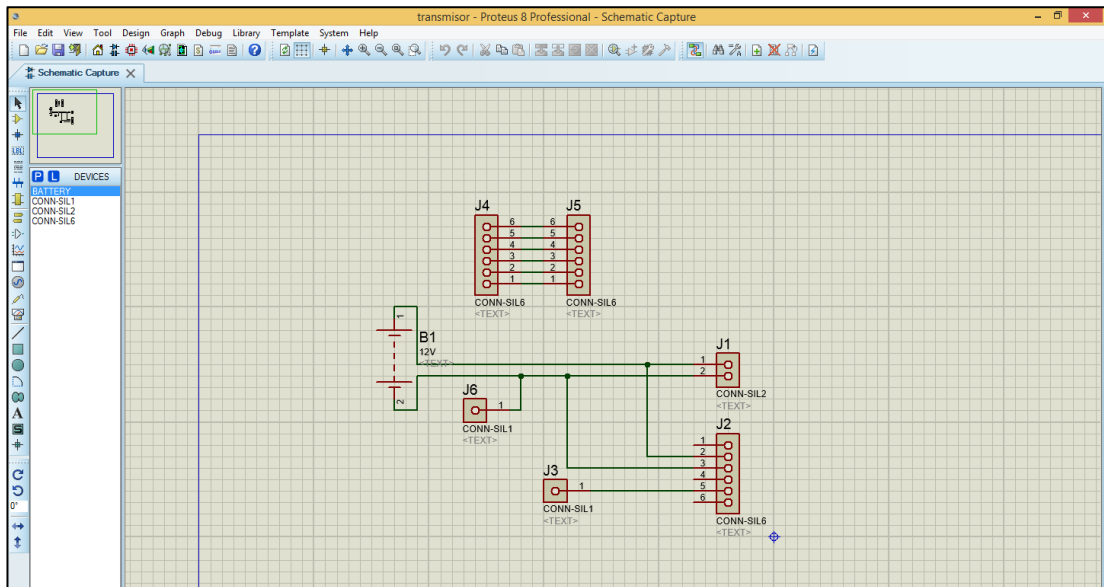
romper-las-barreras-entre-el-mundo-virtual-y-el-real

- Systems, E. (2015). ESP8266EX Datasheet. Espressif Systems Datasheet, 1–31. Retrieved from https://www.adafruit.com/images/product-files/2471/0A-ESP8266__Datasheet__EN_v4.3.pdf
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). Temas de enfermería medico-quirúrgica. (J. M. Rodríguez Prieto, Ed.), Journal of Chemical Information and Modeling (1st ed., Vol. 53). La habana. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Trujillo Laura. (2015). ANATOMIA: ARTICULACIÓN DEL HOMBRO. Retrieved from <http://anatolau.blogspot.com/2015/05/articulacion-del-hombro.html>

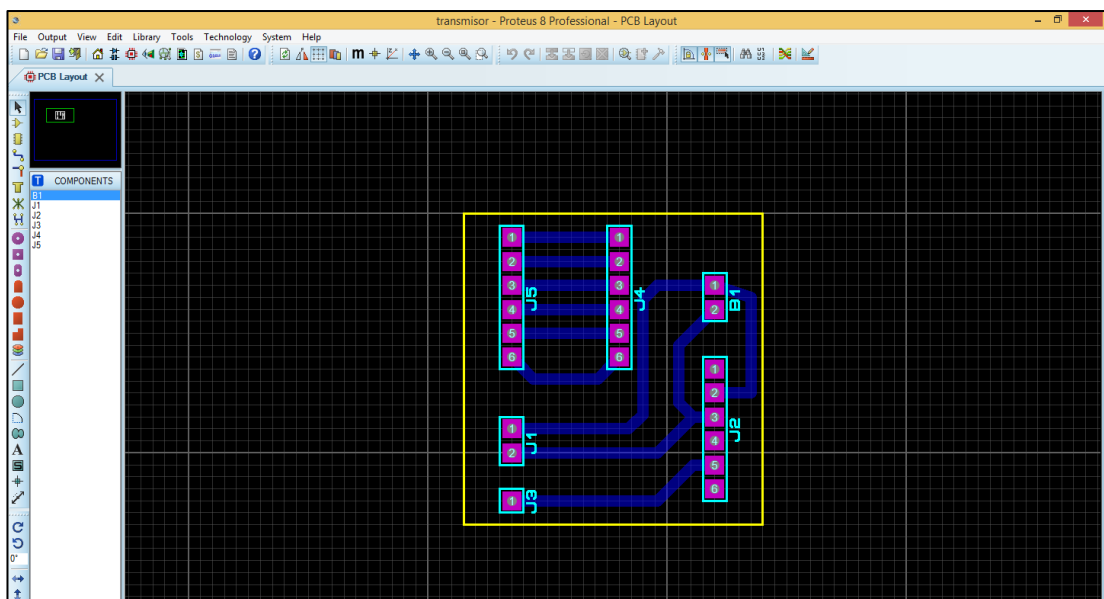
ANEXOS

Anexo 1.

Esquemático de la placa de control del exoesqueleto.

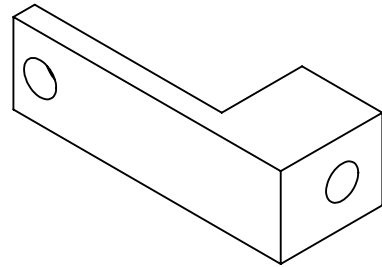
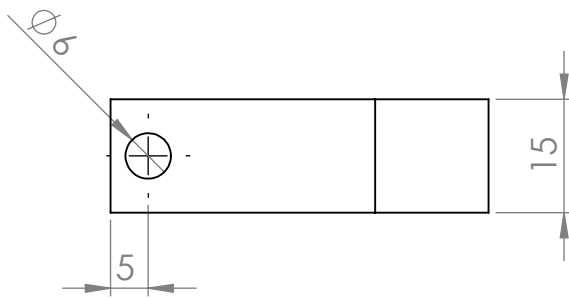
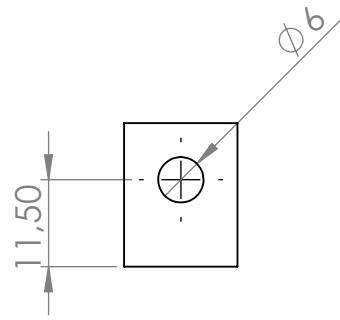
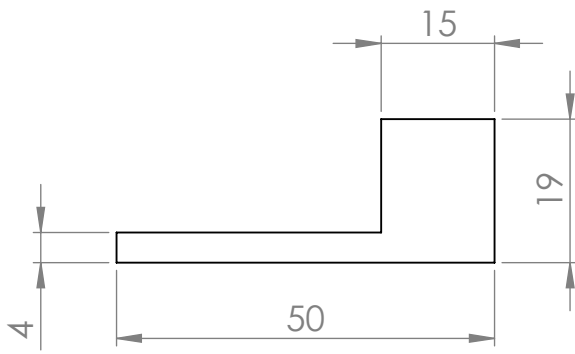


Layout de placa de control del exoesqueleto.



Anexo 2.

Planos del sistema mecánico del exoesqueleto.



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

N.º DE DIBUJO

rotacion

A4

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

F
E
D
C
B
A

F
E
D
C
B
A

4 3 2 1

4 3 2 1

4

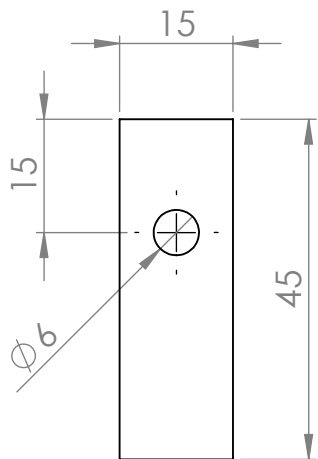
3

2

1

F

F

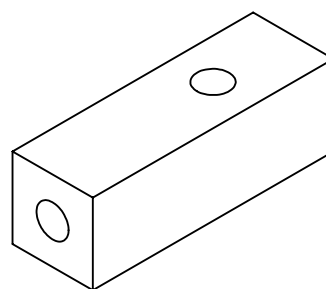


E

E

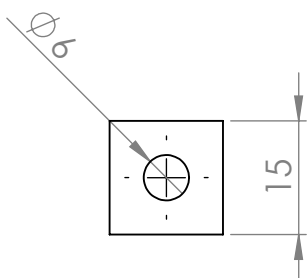
D

D



C

C



B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

pronacion

A4

PESO:

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

4

3

2

1

A

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

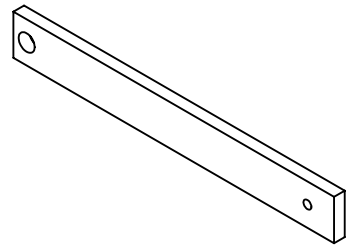
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.		VERIF.		APROB.		N.º DE DIBUJO			
FABR.		CALID.		MATERIAL:					
PESO:		ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1		muñeca			
A4									

4

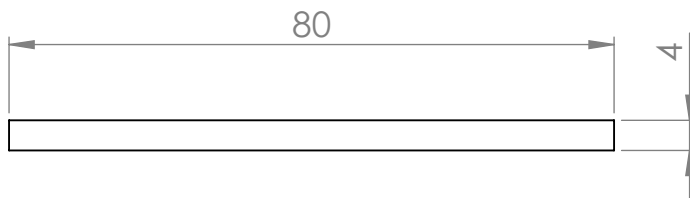
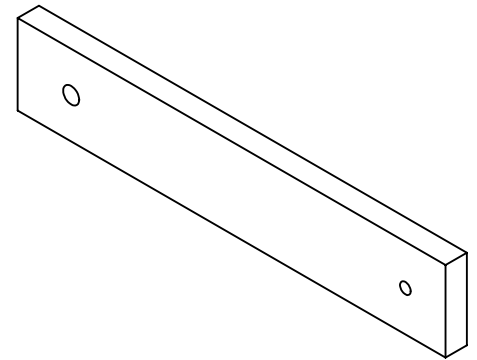
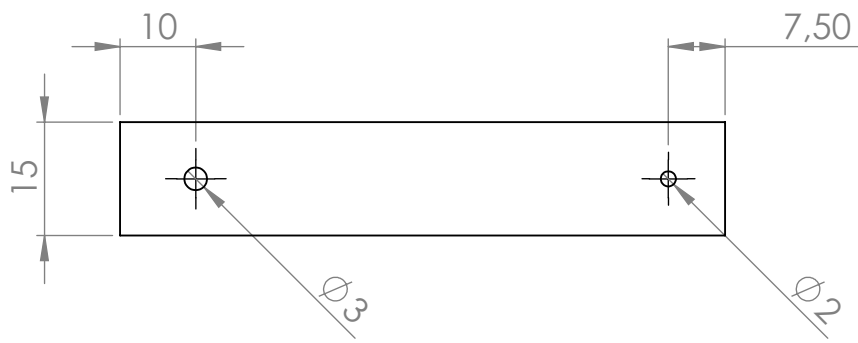
3

2

1

A

A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.				N.º DE DIBUJO	
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.			MATERIAL:	A4	
			PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

mecanismo muñeca

4 3 2 1

F

F

E

E

D

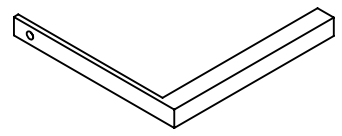
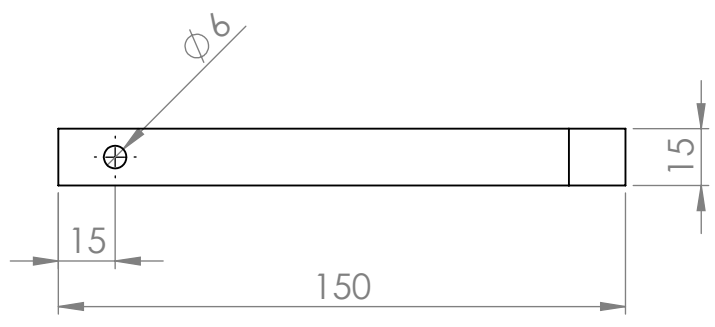
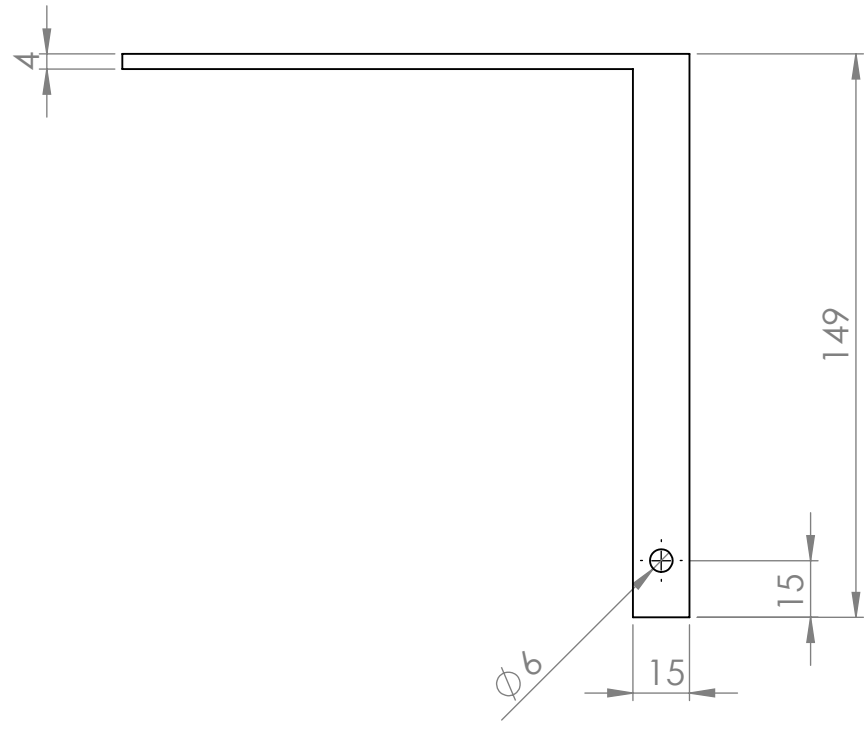
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

 REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

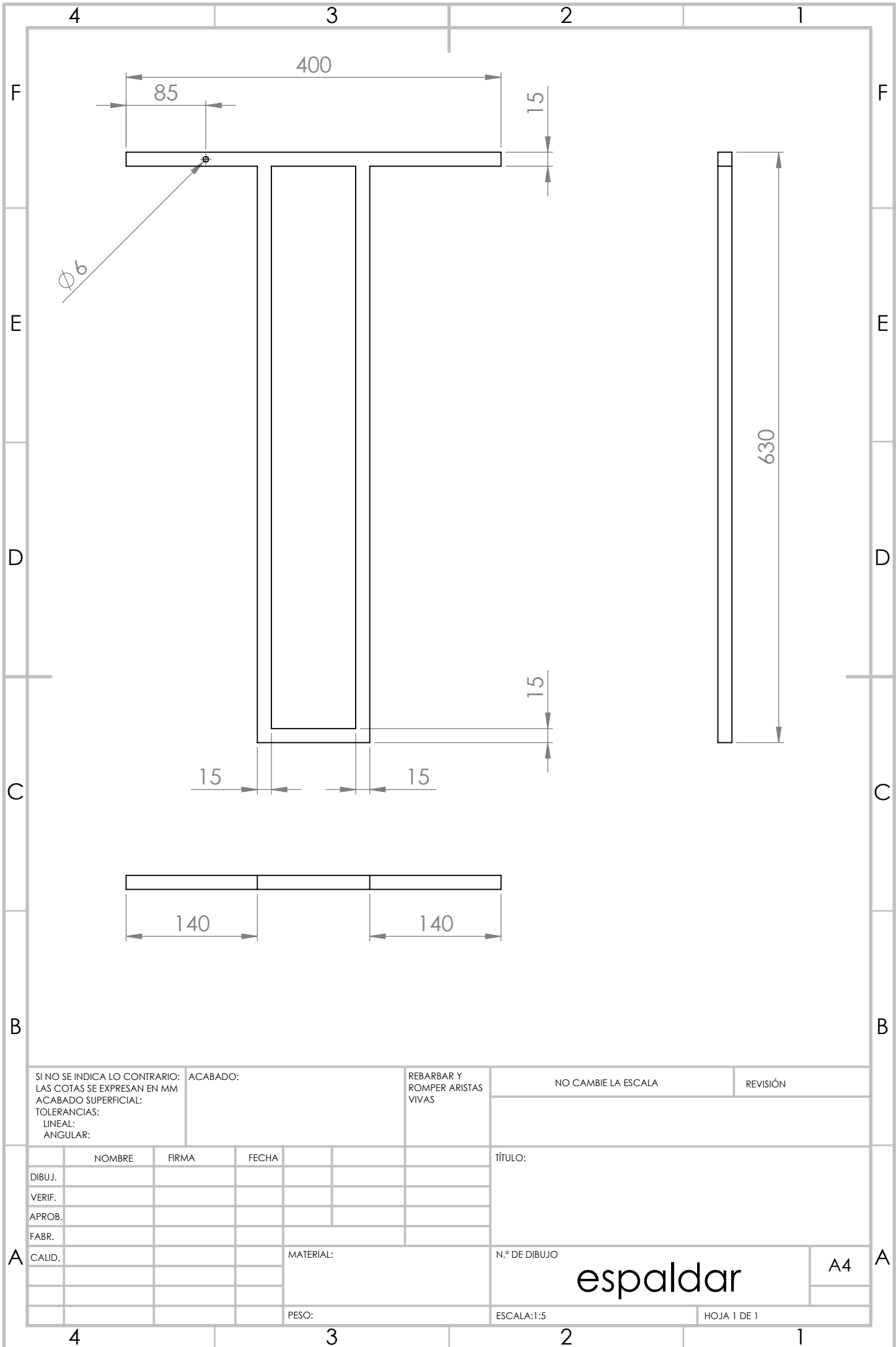
TÍTULO:

 N.º DE DIBUJO
hombro
 A4
 ESCALA:1:5
 HOJA 1 DE 1

A

A

4 3 2 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:

N.º DE DIBUJO

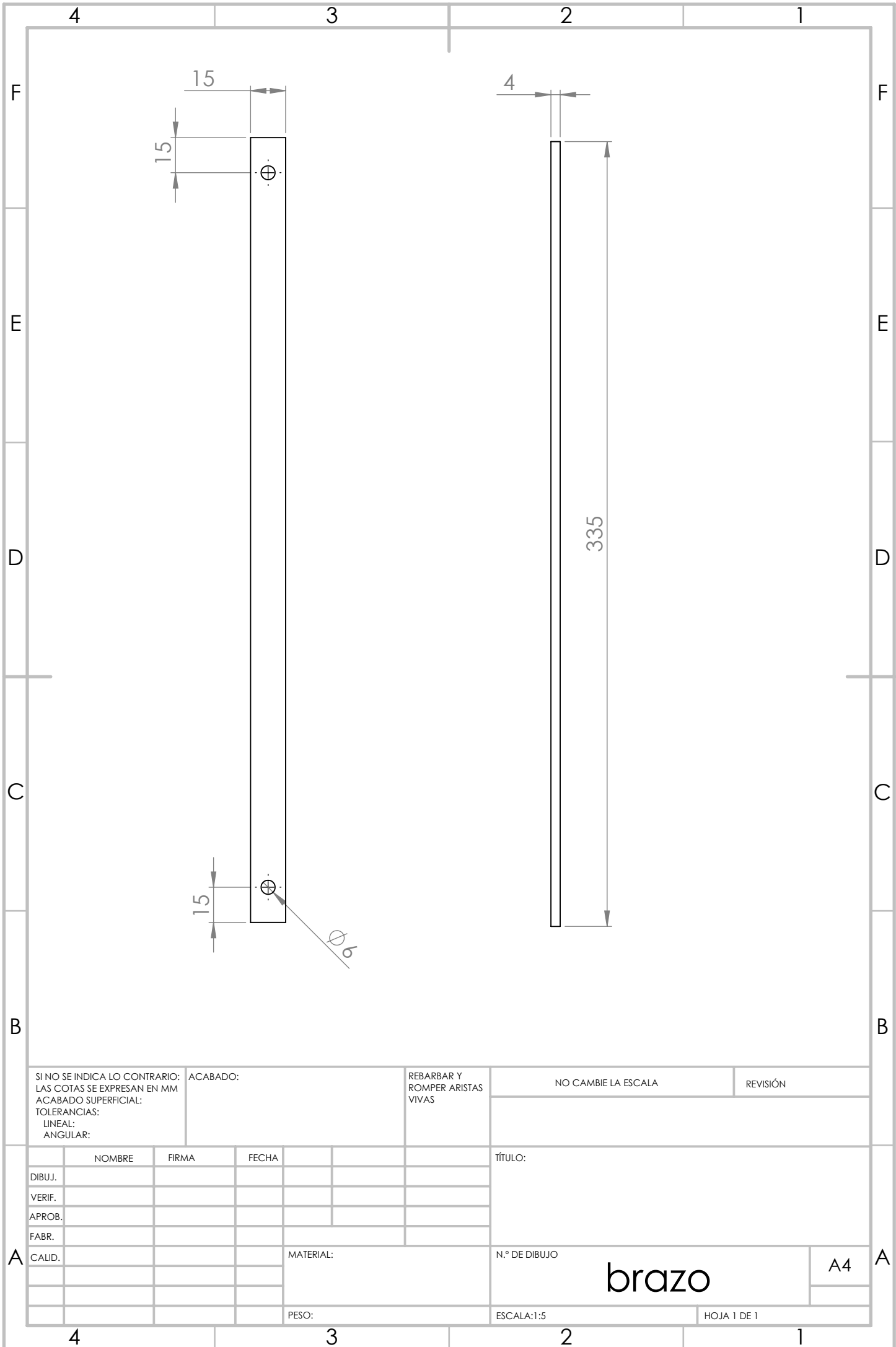
espaldar

A4

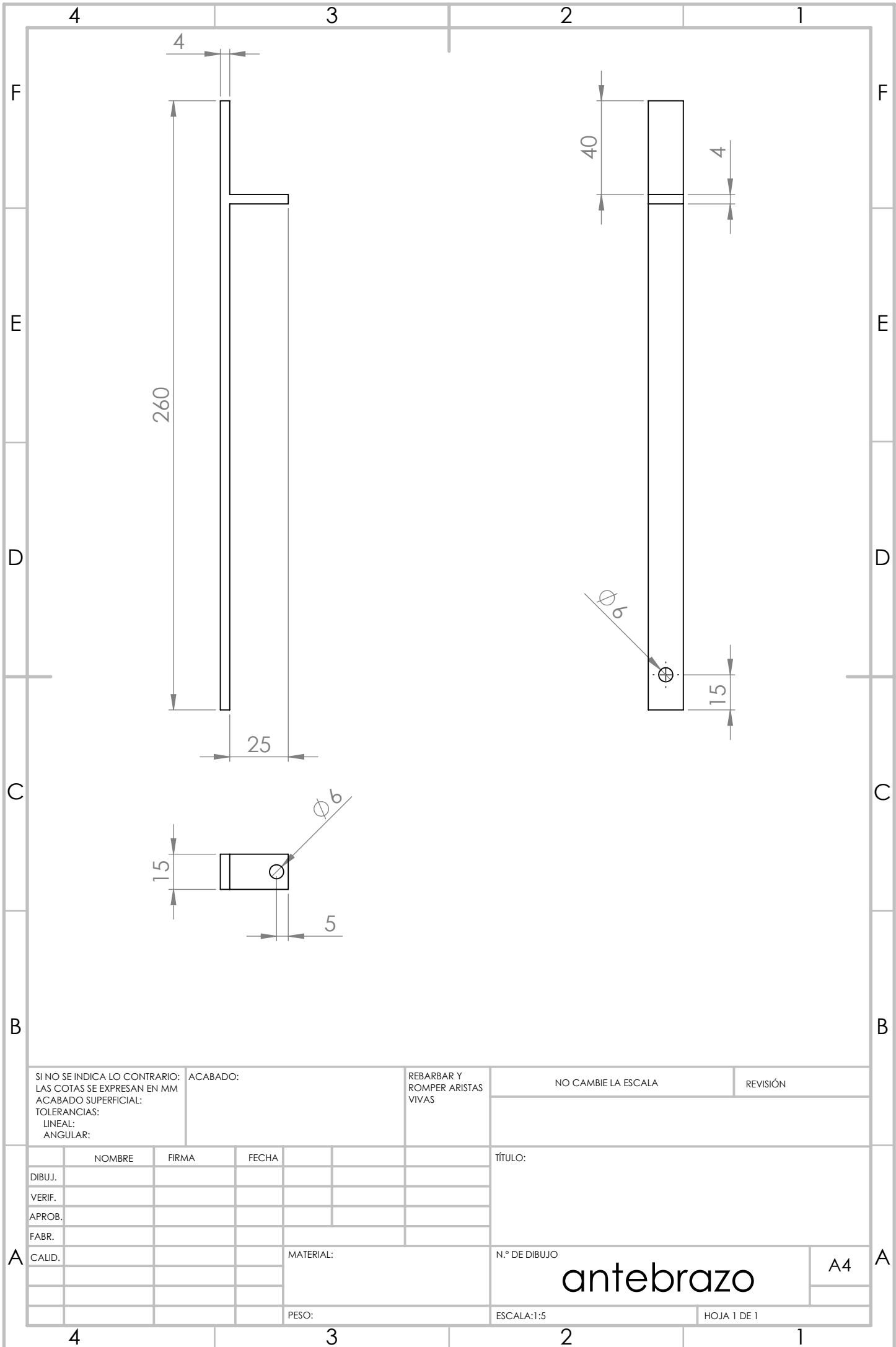
PESO:

ESCALA:1:5

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DIBUJ.		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
VERIF.						<div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">brazo</div>			
APROB.									
FABR.									
CALID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
				PESO:		ESCALA:1:5		HOJA 1 DE 1	



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.									
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
				PESO:		ESCALA:1:5		HOJA 1 DE 1	

antebrazo

4

3

2

1

F

F

E

E

D

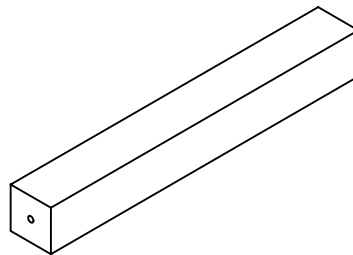
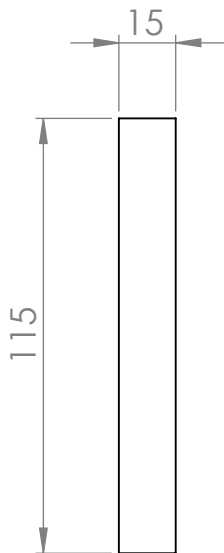
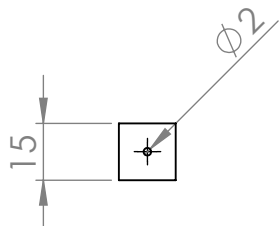
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:

N.º DE DIBUJO

acople mano

A4

PESO:

ESCALA:1:2

HOJA 1 DE 1

4

3

2

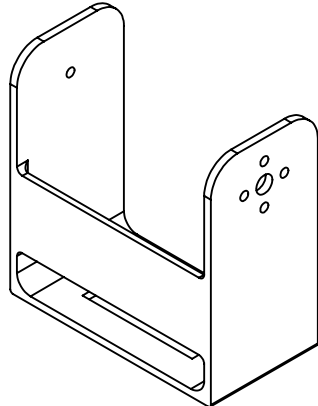
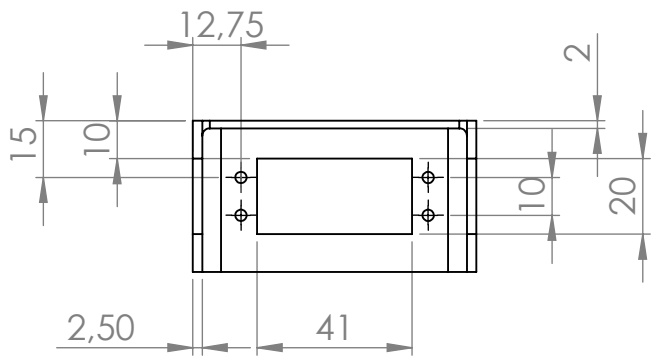
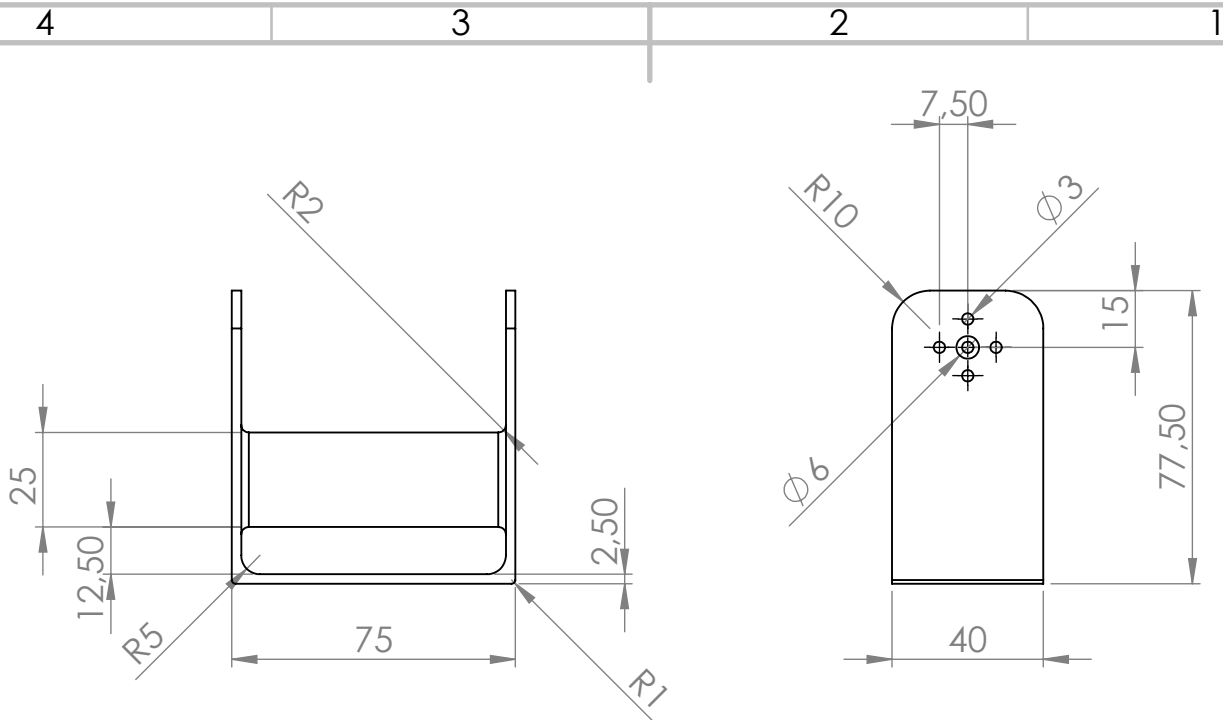
1

A

A

Anexo 3.

Planos del sistema mecánico del brazo robótico.



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

 REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

N.º DE DIBUJO

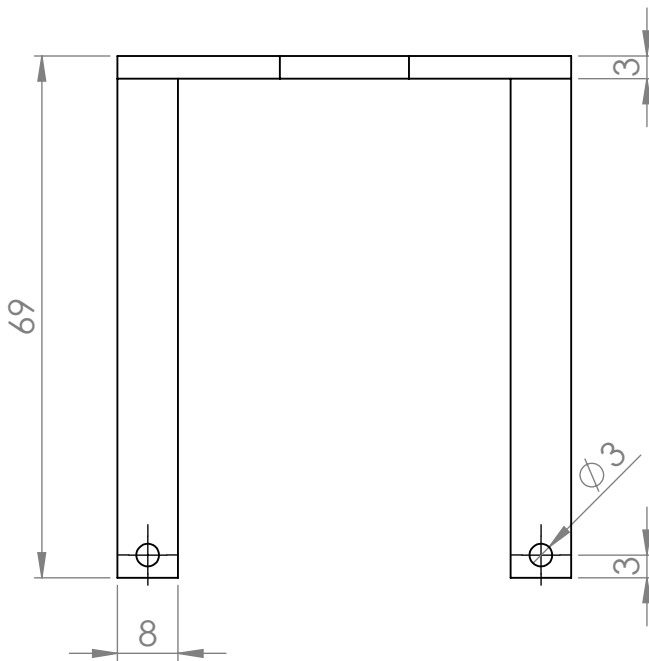
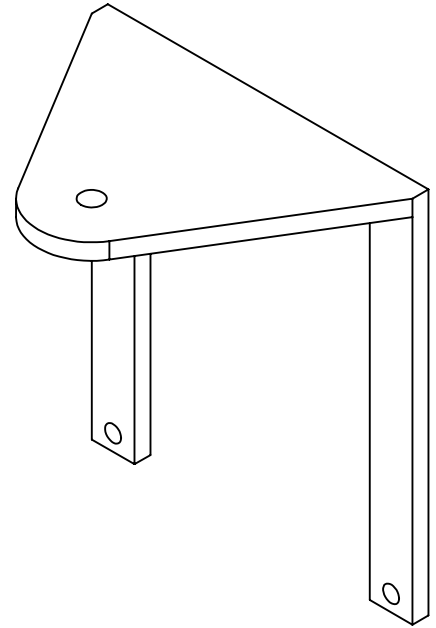
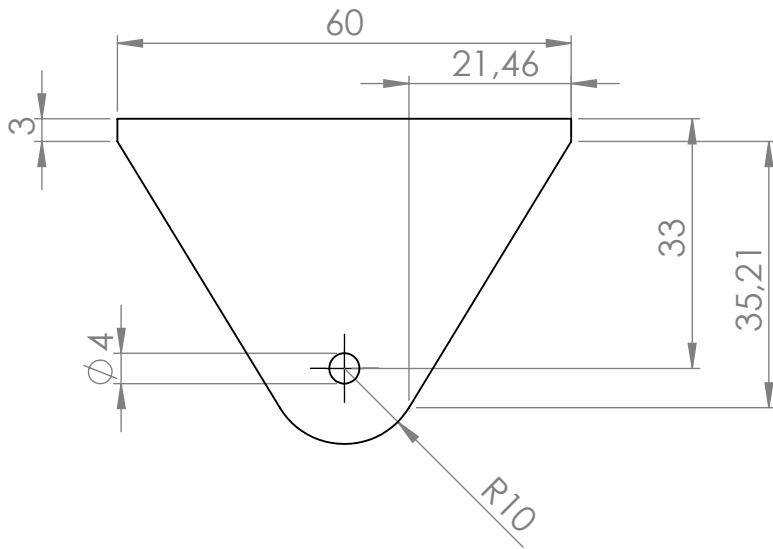
soppron

A4

PESO:

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:	
N.º DE DIBUJO	A4
soporterot	
PESO:	ESCALA: 1:1
HOJA 1 DE 1	

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

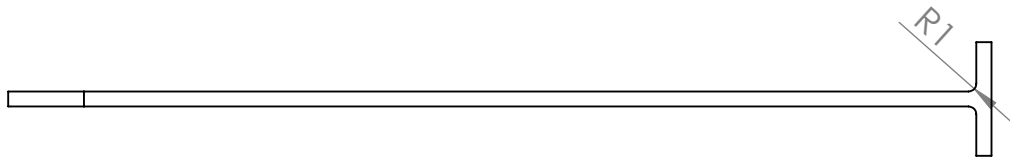
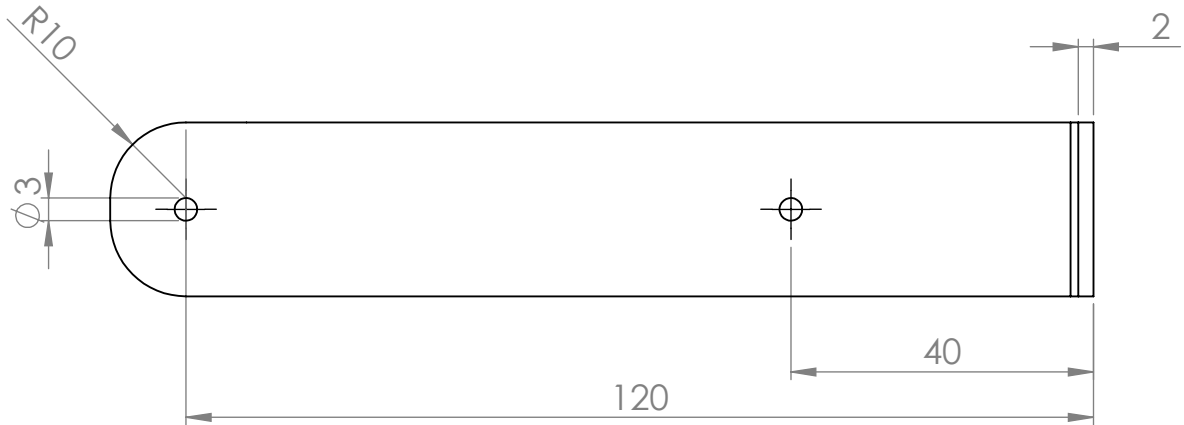
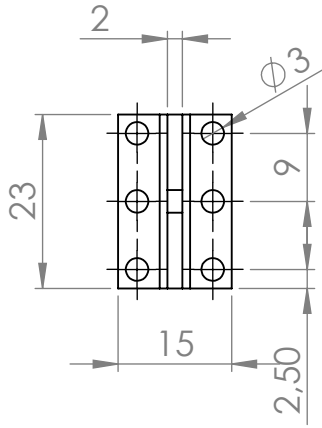
C

B

B

A

A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

sopORTE

A4

PESO:

ESCALA:1:2

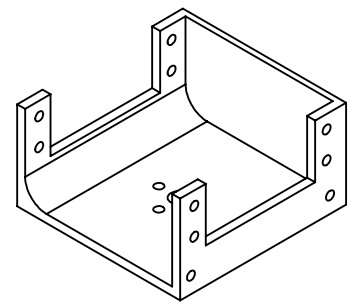
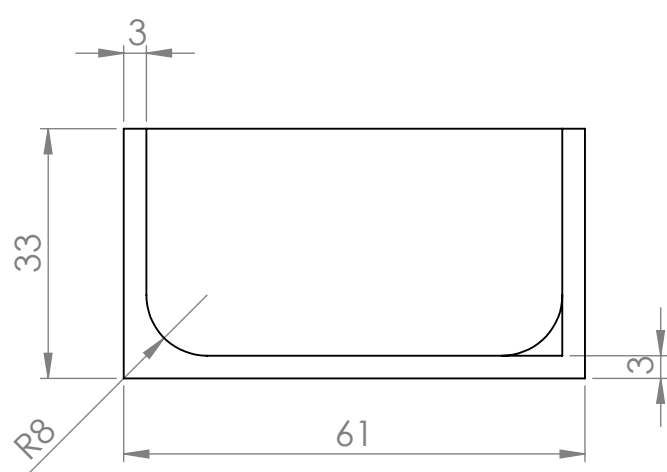
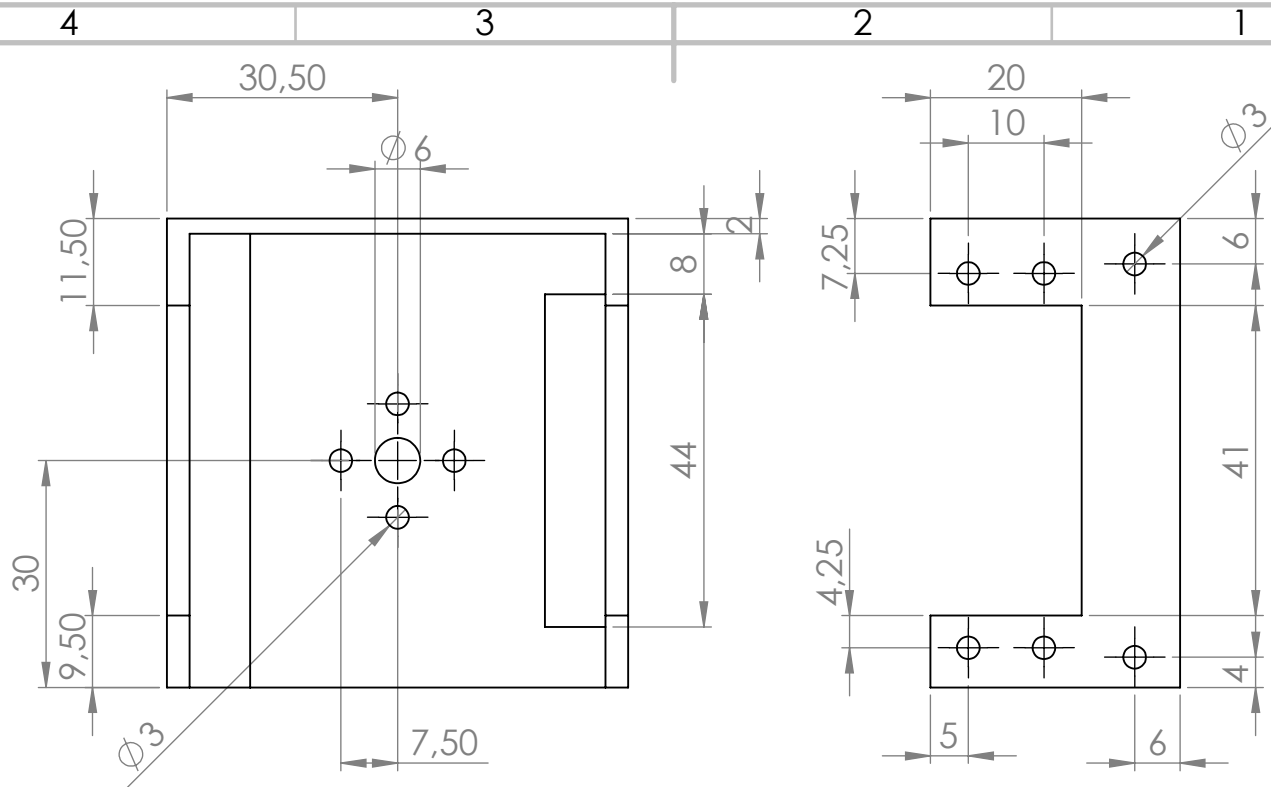
HOJA 1 DE 1

4

3

2

1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.				N.º DE DIBUJO	
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.			MATERIAL:	A4	
PESO:			ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1	

sopflex

A4

4

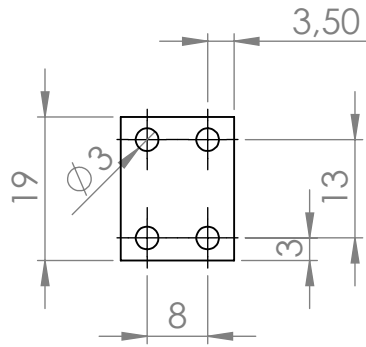
3

2

1

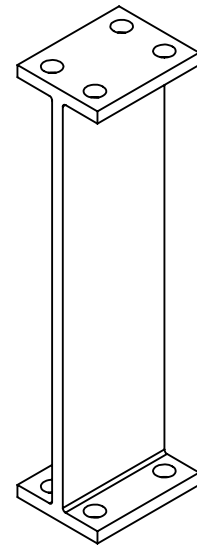
F

F



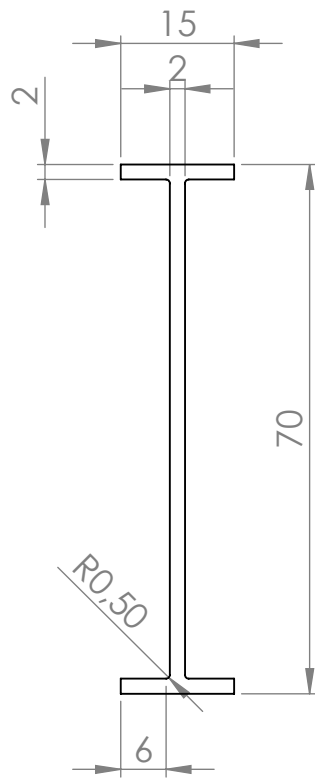
E

E



D

D



C

C

B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:	
N.º DE DIBUJO	A4
separador	
PESO:	ESCALA:1:1
HOJA 1 DE 1	

A

A

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

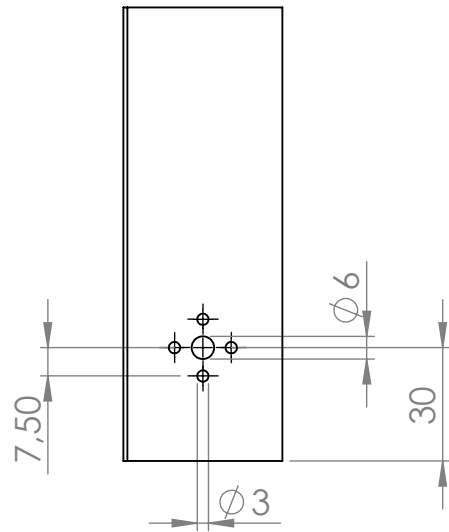
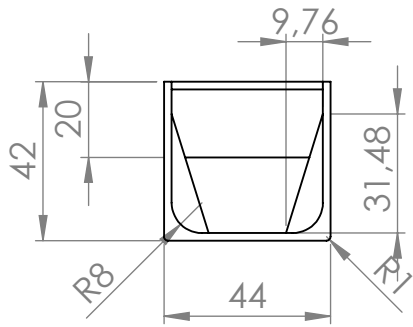
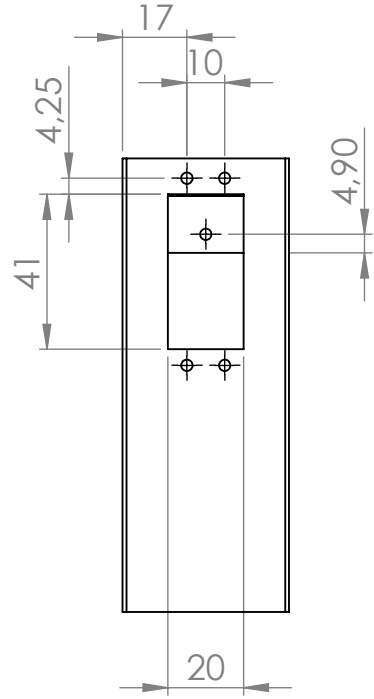
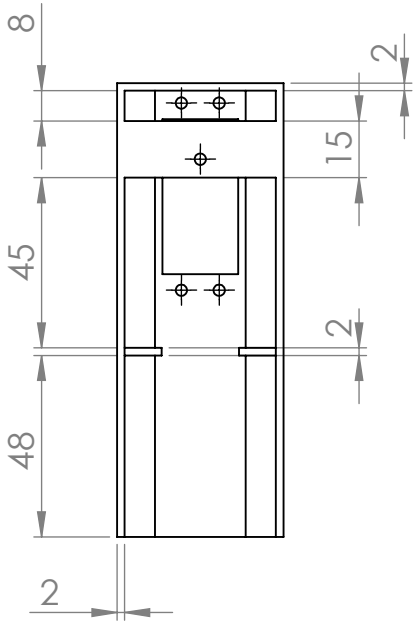
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:			
N.º DE DIBUJO	rot		
PESO:			
ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1		

A4

4

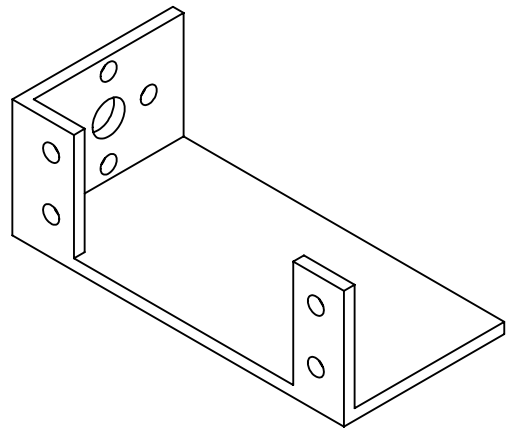
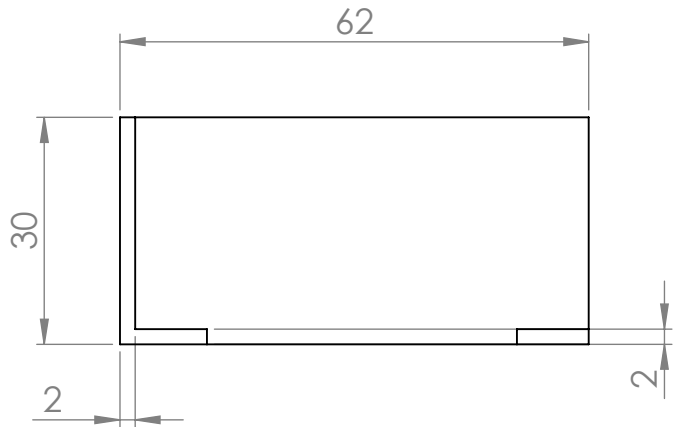
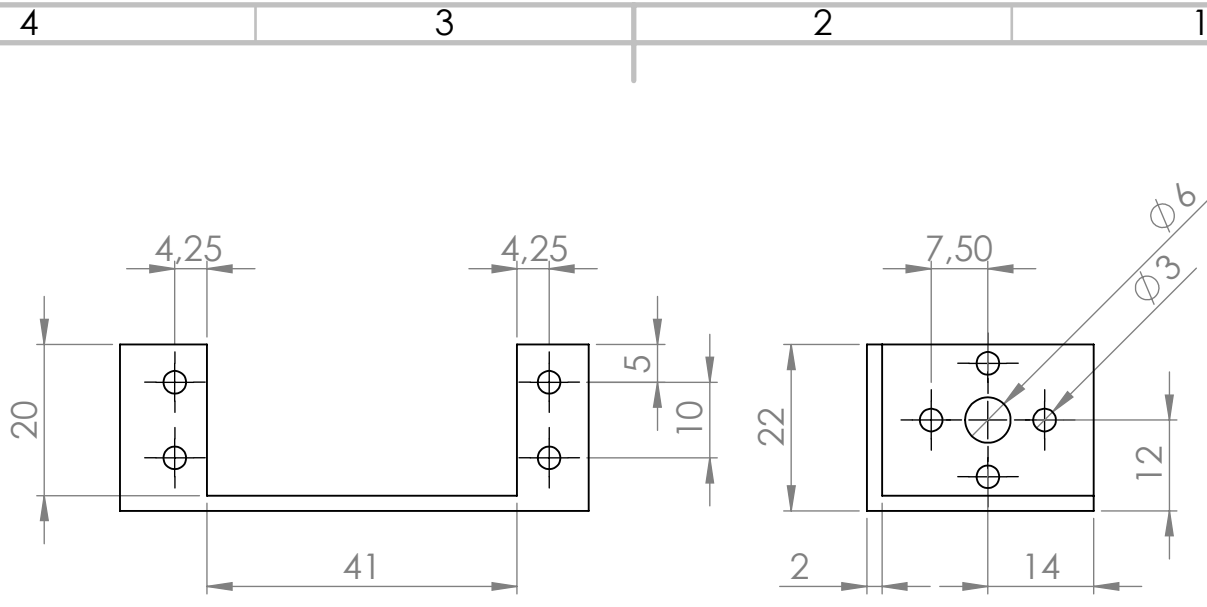
3

2

1

A

A



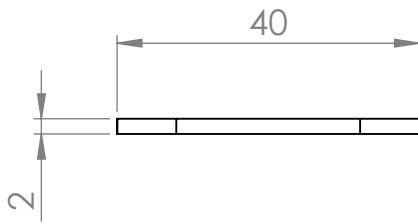
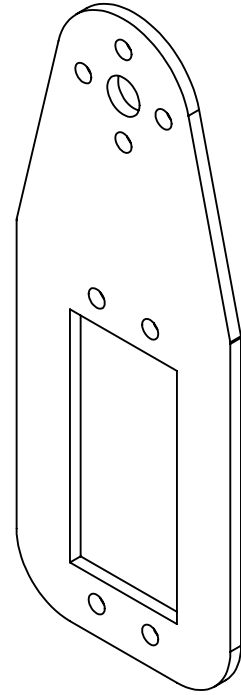
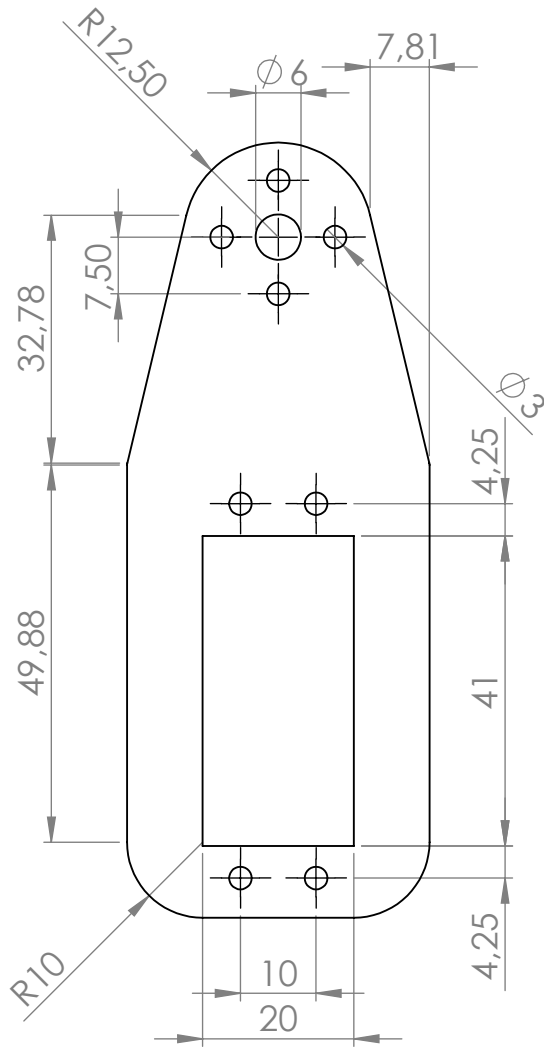
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.						N.º DE DIBUJO			
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALID.				MATERIAL:		muñeca			
				PESO:					
						ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1	

F
E
D
C
B
A

F
E
D
C
B
A

4 3 2 1

4 3 2 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.	MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4
	PESO:		ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1

fcodo

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

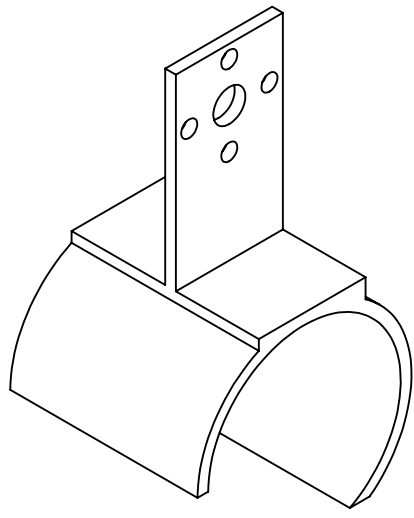
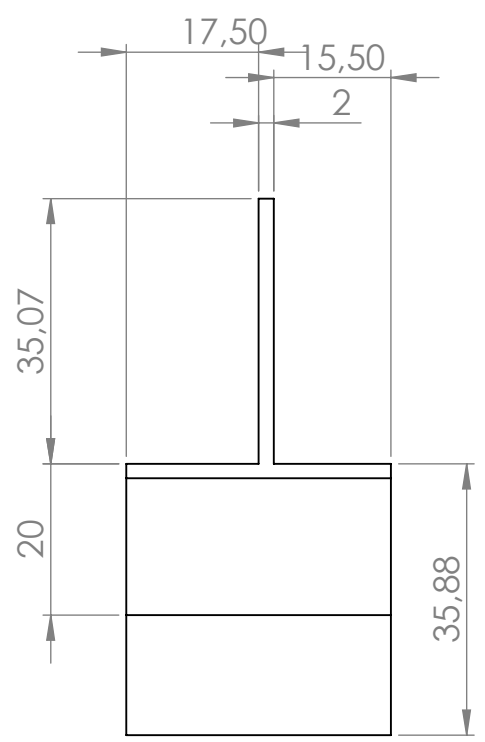
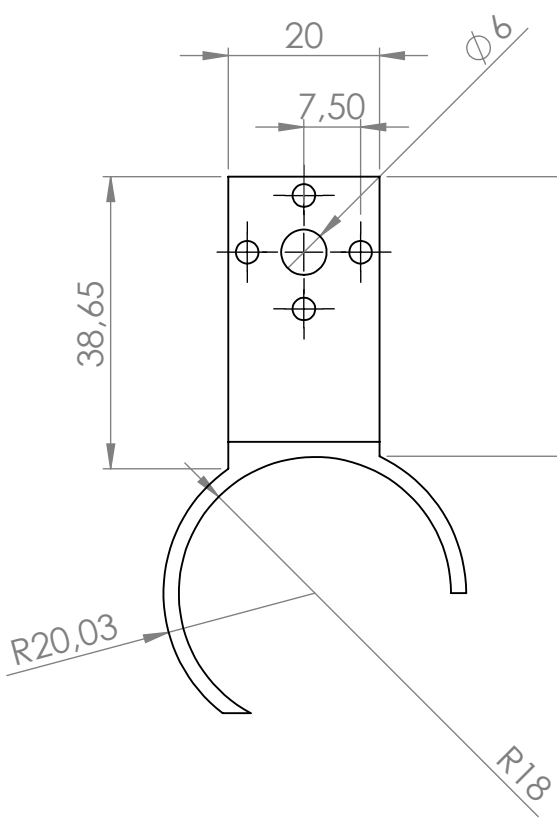
C

B

B

A

A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	
DIBUJ.				
VERIF.				
APROB.				
FABR.				
CALID.				

TÍTULO:

N.º DE DIBUJO

extremo

A4

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

R3

127,14

10

10

133,14

E

E

2

D

D

C

C

B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.				MATERIAL:	
				PESO:	

TÍTULO:	
N.º DE DIBUJO	A4
columna	
ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1

A

A

4

3

2

1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

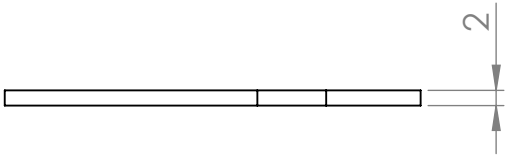
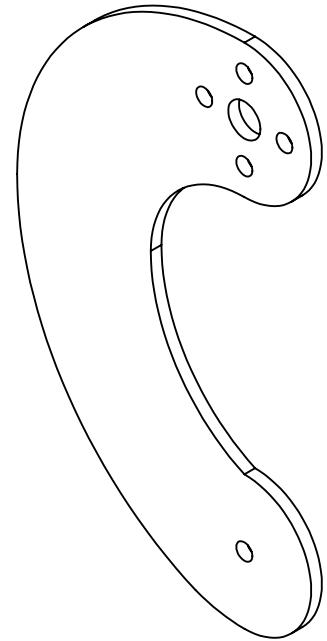
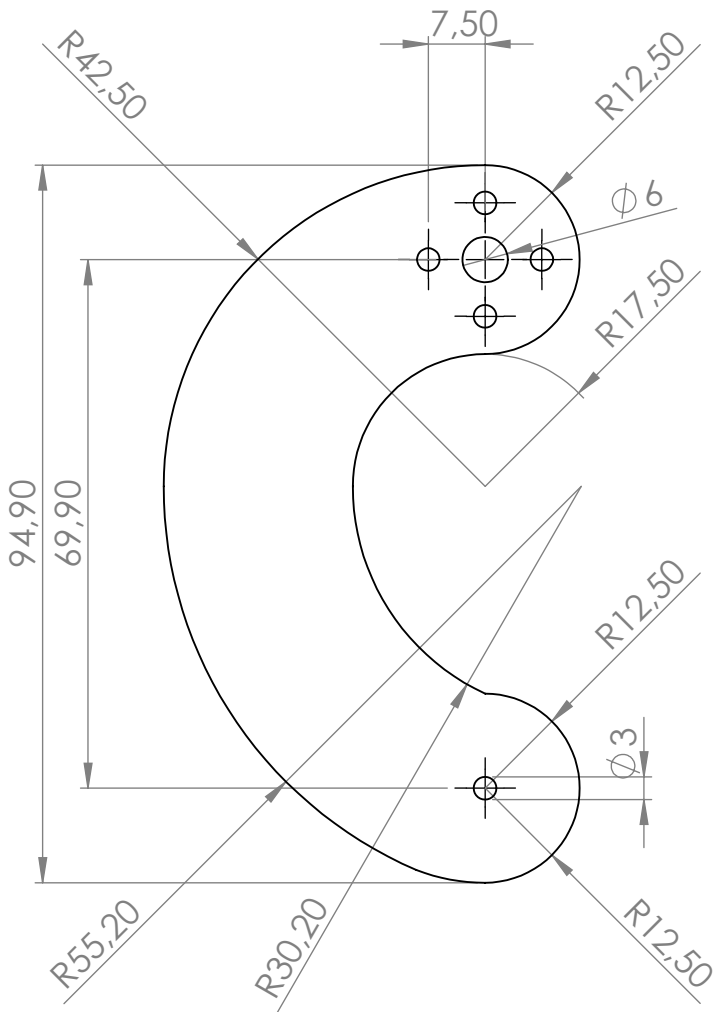
C

B

B

A

A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

 REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					

TÍTULO:

N.º DE DIBUJO

apcodo

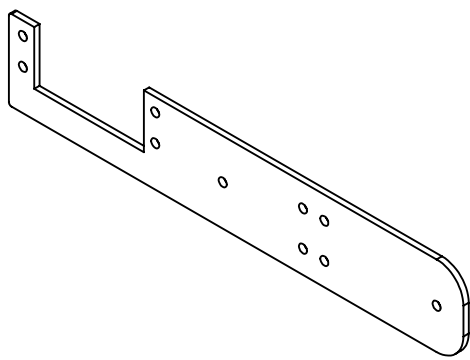
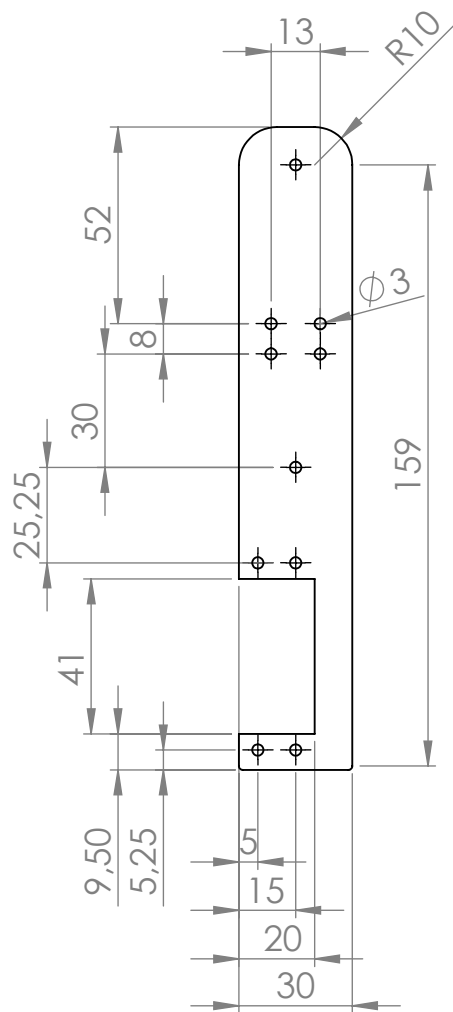
A4

PESO:

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

4 3 2 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1

abducción