



INAOE

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

REPORTE TÉCNICO

No. 648

COORDINACION DE ELECTRÓNICA

Diseño Y Construcción De Un Brazo Robótico De 4 Grados De Libertad.

Autor:

Emilio Eduardo Gómez López

Supervisores:

Dr. Israel Cruz Vega

Dr. José Martínez Carranza

09 Junio 2017

© INAOE 2017

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir copias de este reporte técnico en su totalidad o en partes mencionando la fuente.



AGRADECIMIENTOS

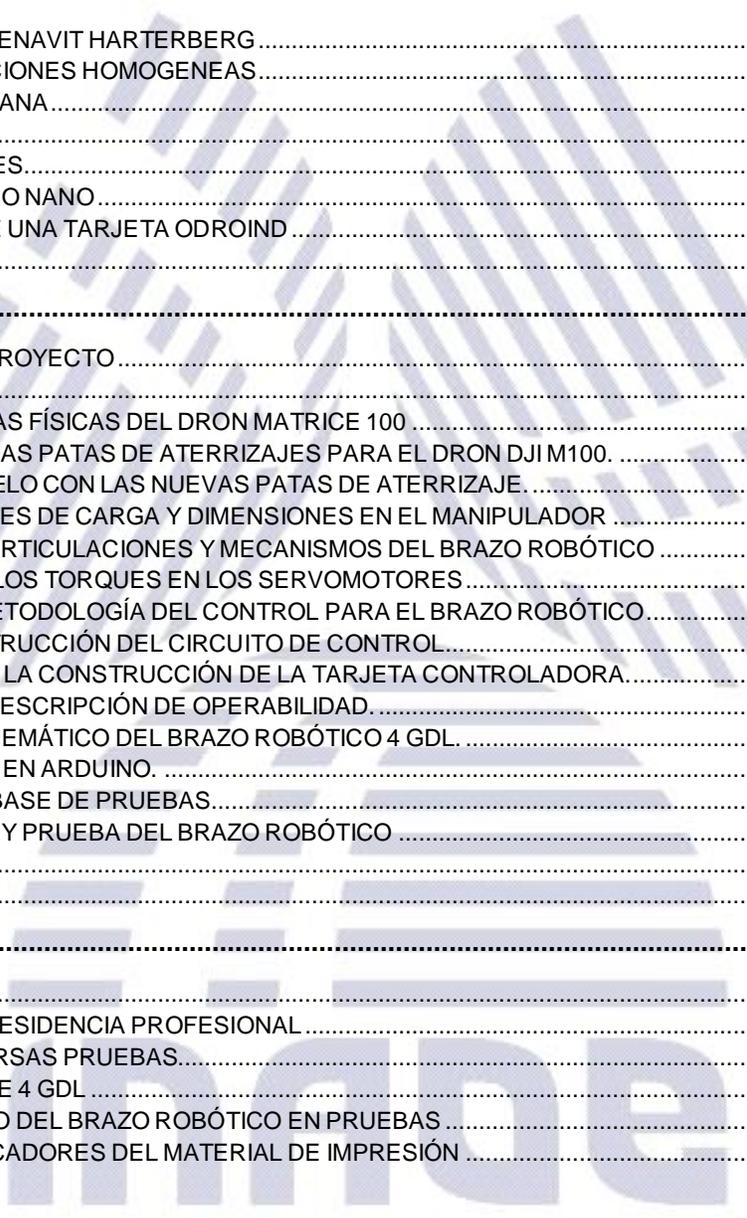
Primeramente agradezco a Dios por la vida prestada, a mis padres, hermanas y a mi familia en general por su apoyo incondicional, a la universidad (ITSC), por haberme abierto sus puertas, para formar parte de una generación más, dedicada a la investigación, al progreso y la Tecnología así mismo agradezco a mi asesor, el Ing. José Luis Gómez Lázaro por su paciencia y la dedicación de su tiempo. Finalmente Agradezco Al Dr. Israel Cruz Vega y al Dr. José Martínez Carranza, por su comprensión en todo momento y su apoyo de igual manera. Durante todo mi periodo de residencia. También al Instituto Nacional De Astrofísica Óptica Y Electrónica, por abrirme sus puertas para esta gran experiencia de mi vida que formara parte siempre de mi crecimiento profesional en el área de la investigación y el desarrollo tecnológico.

Se agradece a todas las personas que siempre estuvieron brindándome de su apoyo y compartiéndome de su conocimiento, así como a una personita muy especial (Deysi Córdova Domínguez) quien estuvo siempre apoyándome y animando a seguir y a cada una de las personas que estuvieron siempre apoyándome para lograr este objetivo y a cada uno de mis compañeros quienes me brindaron su apoyo en todo momento.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
CAPITULO 1.....	6
ÁREA DESIGNADA PARA EL PROYECTO	6
CARACTERIZACION DEL AREA DE PARTICIPACIÓN	7
1.0 ANTECEDENTES Y GENERALIDADES DE LA EMPRESA.....	8
1.1 MISIÓN	10
1.2 VISIÓN	10
1.3 FACULTADES.....	10
1.4 BIENES O SERVICIOS QUE FABRICA O COMERCIALIZA	11
1.5 ORGANIGRAMA	11
1.6 DESCRIPCION DEL AREA DONDE SE REALIZÓ LA RESIDENCIA PROFESIONAL.....	12
1.6.1 ACTUALMENTE LA COORDINACIÓN DE CIENCIAS COMPUTACIONALES	12
1.7 LABORATORIO DE ROBÓTICA	12
1.7.1 ACTIVIDADES PRINCIPALES.....	13
1.8 INVESTIGADOR RESPONSABLE	13
1.9 CONTACTO Y UBICACIÓN	13
1.9.1 UBICACIÓN DEL AREA DE RESIDENCIA.....	14
1.9.2 MAPA DE ACCESO	14
1.9.3 MAPA DE LAS INSTALACIONES	15
CAPITULO 2.....	16
ANTECEDENTES Y DEFINICION DEL PROYECTO	16
INTRODUCCIÓN	17
2.1 DEFINICION DEL PROBLEMA	23
2.2 JUSTIFICACION	23
2.3 OBJETIVOS GENERALES	24
2.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS	24
2.5 ALCANCES DEL PROYECTO	25
2.6 LIMITACIONES	25
CAPITULO 3.....	26
FUNDAMENTO TEORICO.....	26
INTRODUCCION.....	27
3.1 DEFINICION DE AVIONES NO TRIPULADOS	28
3.2 CLASIFICACION DE LOS AUV	28
3.2.1 APLICACIONES DE LOS AVIONES NO TRIPULADOS.....	29
3.2.2 CONCEPTO DE DRON	30
3.2.3 CARACTERISTICAS DE UN DRON.....	30
3.3.0 CONTROLADOR DE UN DRON	32
3.3.1 SISTEMAS DE VUELO	34
3.3.2 DRON DJI MATRICE 100	37
3.3.3 CARACTERISTICAS DEL DRON DJI MATRICE 100.....	38
3.3.4 MEDIDAS Y ESPECIFICACIONES FISICAS DE UN DRON DJI M100.....	41
3.3.5 DESCRIPCION DEL SISTEMA GUIDANCE DEL DJI M100	42
3.3.6 DESCRIPCION DE INTERFAZ CONTROLADORA DEL DJI M100.....	43
3.4.0 INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA.....	44
3.4.1 FUNCIONAMIENTO Y APLICACIONES DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS	47
3.4.2 APLICACIONES DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS	47
3.4.3 GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT.....	48
3.4.4 CINEMATICA DIRECTA.....	49
3.4.5 CINEMATICA INVERSA.....	50

3.4.6 TEOREMA DE DENAVIT HARTERBERG	53
3.4.7 TRANSFORMACIONES HOMOGENEAS	54
3.4.8 MATRIZ JACOBIANA	56
3.5 ACTUADORES	58
3.5.1 SERVOMOTORES	58
3.6 TARJETA ARDUINO NANO	61
3.7 DESCRIPCIÓN DE UNA TARJETA ODROIND	63
3.8 BATERIAS LIPO	64
CAPÍTULO 4.....	67
DESARROLLO DEL PROYECTO	67
INTRODUCCIÓN	68
4.0 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL DRON MATRICE 100	69
4.1 DISEÑO DE NUEVAS PATAS DE ATERRIZAJES PARA EL DRON DJI M100.	71
4.2 PRUEBAS DE VUELO CON LAS NUEVAS PATAS DE ATERRIZAJE.	74
4.3 CONSIDERACIONES DE CARGA Y DIMENSIONES EN EL MANIPULADOR	77
4.4 DISEÑO DE LAS ARTICULACIONES Y MECANISMOS DEL BRAZO ROBÓTICO	78
4.4.1 CÁLCULOS DE LOS TORQUES EN LOS SERVOMOTORES	94
4.5 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DEL CONTROL PARA EL BRAZO ROBÓTICO	101
4.6 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL	103
4.7 RESULTADOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA TARJETA CONTROLADORA.	109
4.8 ENSAMBLAJE Y DESCRIPCIÓN DE OPERABILIDAD.	113
4.8.1 MODELADO CINEMÁTICO DEL BRAZO ROBÓTICO 4 GDL	119
4.9 PROGRAMACIÓN EN ARDUINO.	122
4.9.1 CREACIÓN DE BASE DE PRUEBAS	125
4.9.2 ARMADO FINAL Y PRUEBA DEL BRAZO ROBÓTICO	127
TRABAJO FUTURO	131
CONCLUSIONES	132
ANEXOS.....	136
PLAN DE TRABAJO.....	137
CRONOGRAMA DE RESIDENCIA PROFESIONAL	138
FOTOS DE LAS DIVERSAS PRUEBAS.....	139
BRAZO ROBOTICO DE 4 GDL	140
CÓDIGO DE ARDUINO DEL BRAZO ROBÓTICO EN PRUEBAS	141
TABLA DE ESPECIFICADORES DEL MATERIAL DE IMPRESIÓN	143



Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica

INTRODUCCIÓN

En la actualidad a nacido una creciente curiosidad científica y de investigación en base a las aeronaves no tripuladas, como lo es el caso de nuestro proyecto realizado por parte del coordinación de ciencias computacionales del Instituto Nacional De Astrofísica Óptica Y Electrónica. Donde se planteó la problemática que existen entre el sector de trabajo en limpieza de edificio por su parte exterior, es decir la limpieza de ventanas o vidrios.

Se ha considerado el uso de un dron de la marca DJI Matrice 100, el cual es un prototipo desarrollado por dicha marca para la investigación en el área y el control. Donde se planteó el diseño de un manipulador con “n” grados de libertad capaz de satisfacer las tareas de limpiezas tales como las limpiezas de ventanas de edificios verticales así como la limpieza de diversas superficies, proponiendo para ello el uso de un manipulador de 4 grados de libertad de tipo antropomórfico.

Primero se introdujo al concepto de drones con brazos manipuladores haciendo una revisión del estado del arte de algunos trabajos de investigación en ese campo, haciendo un análisis de los resultados obtenidos hasta el actual día de hoy en cuanto a sus modelos matemáticos. Posterior a ello se observó los avances más relevantes en cuanto al diseño de manipuladores así como las tareas designadas en estos artículos.

Para el diseño del brazo robótico de 4 grados de libertad se utilizó el programa de diseño asistido por computadora el (CAD), solidworks2013 con el cual se realizó el diseño y simulación de su operabilidad en cuestión mecánica, también se hizo un análisis mecánico del brazo robótico considerando las cargas empleadas en cada uno de los elemento mecánicos del mismo y de igual manera se exportaron las pieza diseñadas en SolidWorks 2013 a un formato llamado (.STL), para llevar acabo su proceso de fabricación que en este caso fueron impresas con una impresora 3D, la impresora 3d utilizada para la impresión de la piezas es de nueva tecnología, por lo cual su impresión fue relativamente más rápida y con

una mejor calidad. Por lo siguiente el trabajo describe paso a paso el diseño de cada pieza del brazo así como la construcción de una tarjeta de control, para cada uno de los actuadores del brazo robótico. Y el rediseño de las patas de aterrizaje del dron Matrice 100 debido a su poca altura física, se pudo observar que cualquier tipo de brazo robótico no sería tan viable de sujetar bajo el dron Matrice 100, es por ello que se optó por la modificación de las patas de aterrizajes, para su diseño se utilizó SolidWorks como herramienta de diseño mecánico y las patas de aterrizajes fueron fabricadas en aluminio de $\frac{3}{4}$ de pulgadas en los laboratorios del INAOE, y las piezas impresas fueron en el laboratorio de análisis dimensional de impresiones 3D. También se realizó un análisis de operabilidad del brazo propuesto por los asesores encargados del trabajo en donde se hace un control basado en la cinemática inversa y el modelado del control del manipulador, para realizar la tarea de limpieza y así dar una posible solución a esta problemática y del mismo modo profundizando el campo a la investigación de la robótica aérea con manipuladores.

en las conclusiones se puede encontrar las observaciones encontradas en cada una de la pruebas experimentales del control, así como en la parte de los anexos se puede encontrar imágenes e información más detallada del tipo de material utilizado para las impresiones 3D así como el tiempo de duración de cada una de las actividades propuestas y realizadas.

INAOE
**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**

Palabras Claves; Arduino, Diseño, SolidWorks, impresión 3D, Dron, Matrice 100, Cinemática Inversa, Servomotores.



CAPITULO 1

ÁREA DESIGNADA PARA EL PROYECTO.



INAOE

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**

CARACTERIZACION DEL AREA DE PARTICIPACIÓN

Ciencias Computacionales es la coordinación en el INAOE de más reciente creación. A finales de 1997 se desarrollan y aprueban los programas de Maestría y Doctorado en Ciencias Computacionales, los cuales inician en agosto de 1998. En 1999, el Consejo Consultivo Interno del INAOE decide crear el Programa en Ciencias Computacionales, donde se ubica a los investigadores en Computación. En el 2001 se decide que el Programa pase a ser Coordinación de Ciencias Computacionales ante el crecimiento en investigadores y estudiantes del programa.

La CCC tiene como misión contribuir al avance de la ciencia en México en el área de ciencias computacionales y tecnológicas de información, a través de las siguientes metas:

- 1) Realizar investigación básica de vanguardia en las áreas de especialidad que la caracterizan.
- 2) Formar maestros y doctores en ciencias capaces de resolver problemas científicos y tecnológicos de alta relevancia en el campo de las ciencias computacionales en las áreas en las cuales se especializa y
- 3) Llevar a cabo investigación aplicada orientada a satisfacer necesidades planteadas por el sector productivo y de servicios del país. [1]

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**

1.0 ANTECEDENTES Y GENERALIDADES DE LA EMPRESA

El Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) fue creado por decreto presidencial el 11 de noviembre de 1971 como un organismo descentralizado, de interés público, con personalidad jurídica y patrimonio propio, ubicado en Tonantzintla, Puebla, con los siguientes objetivos:

Preparar investigadores, profesores especializados, expertos y técnicos en astrofísica, óptica y electrónica.

Procurar la solución de problemas científicos y tecnológicos relacionados con las citadas disciplinas. [1]

Orientar sus actividades de investigación y docencia hacia la superación de las condiciones y resolución de los problemas del país.

Con este decreto el INAOE tiene la facultad de impartir cursos y otorgar grados de maestría y doctorado en las diversas disciplinas que en él se desarrollan.

EL INAOE es heredero de una gran tradición científica que data de 1942, cuando Luis Enrique Erro fundó el Observatorio Astrofísico Nacional de Tonantzintla. En aquel entonces, Tonantzintla se escogió como el lugar idóneo para la instalación del Observatorio, el cual cumplía con las exigentes normas de calidad como noches despejadas y en cantidad por año, así como altura geográfica y mínima incidencia luminosa de poblaciones cercanas, ya que en la capital de la República no era posible instalar un moderno Observatorio. [1]

Con la Cámara Schmidt de Tonantzintla se inauguró este Observatorio, abriéndose las puertas a la astronomía moderna en México y Latinoamérica. La importancia del Observatorio Astrofísico de Tonantzintla traspasó las fronteras de México, siendo reconocida la labor realizada por astrónomos reconocidos internacionalmente, entre los que figuraron el mismo fundador Luis Enrique Erro; el Dr. Guillermo Haro, el Prof. Luis Rivera Terrazas, el Dr. Luis Munch y el astrónomo Enrique Chavira, entre otros.

El INAOE posee una colección de alrededor de 15 mil placas astro-fotográficas obtenidas en la Cámara Schmidt de diversas regiones de la bóveda celeste, principalmente de las constelaciones de Orión, el Toro, Cáncer, Escorpio, Sagitario, Osa Mayor, Osa Mayor, entre otras. Con esta Cámara se hicieron diversos descubrimientos, siendo el principal el de los objetos Herbig-Haro, considerados como los indicadores del inicio de la formación estelar. También se descubrieron estrellas novas y supernovas, galaxias azules e innumerables estrellas ráfaga, así como el cometa Haro-Chavira, descubierto en 1954 en la región del Toro. Erro fue sustituido en la dirección del Observatorio por el doctor Guillermo Haro, bajo cuya dirección se convirtió en uno de los centros más importantes de América Latina por la calidad del trabajo científico que en él se llevaba a cabo. El mismo Haro se dio cuenta de la importancia para el país de la óptica y la electrónica, por lo que en 1971 decidió fundar el INAOE. En 1972 se fundó el Departamento de Óptica, y dos años después inició sus actividades el Departamento de Electrónica. Desde su creación uno de los principales objetivos del INAOE ha sido la preparación de investigadores jóvenes, capaces de identificar y resolver problemas científicos y tecnológicos en astrofísica, óptica, electrónica y áreas afines. En 1972 se iniciaron los estudios de maestría en Óptica y en 1974 los de Electrónica. En 1984 se inició el programa de doctorado en Óptica, y en 1993 los programas de doctorado en Electrónica; así como la maestría y doctorado en Astrofísica. Finalmente, en agosto de 1998 se inició el programa de maestría y doctorado en Ciencias Computacionales. [1]

Para lograr que los estudiantes se encuentren en un ambiente de trabajo adecuado y desarrollen al máximo sus capacidades, se exige de ellos una dedicación de tiempo completo.

El INAOE por su parte les proporciona áreas de trabajo, laboratorios y equipo de cómputo, así como apoyo para conseguir becas e instituciones nacionales y extranjeras. [1]

1.1 MISIÓN

Contribuir como centro público de investigación a la generación, avance y difusión del conocimiento para el desarrollo del país y de la humanidad, por medio de la identificación y solución de problemas científicos y tecnológicos y de la formación de especialistas en las áreas de Astrofísica, Óptica, Electrónica, Ciencias Computacionales y áreas afines. [1]

1.2 VISIÓN

El INAOE será un centro público de investigación con un alto liderazgo a nivel internacional en el ámbito de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la formación de recursos humanos dentro de las áreas de Astrofísica, Óptica, Electrónica, Ciencias Computacionales y áreas afines, comprometido con el desarrollo nacional a través de la promoción de valores sociales de solidaridad, creatividad y alta competitividad. [1]

1.3 FACULTADES

- Desarrollar investigaciones e impartir enseñanzas para la consecución de los objetivos previstos.
- Organizar sus planes de investigación y enseñanza.
- Adoptar métodos adecuados para evaluar sus actividades de investigación y enseñanza.
- Conceder grados y otorgar diplomas.

1.4 BIENES O SERVICIOS QUE FABRICA O COMERCIALIZA

- 1) El Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica es un centro de investigación ubicado en el pueblo de Tonantzintla, municipio de San Andrés Cholula, en el estado de Puebla

1.5 ORGANIGRAMA



Ilustración 1. Organigrama del INAOE

1.6 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DONDE SE REALIZÓ LA RESIDENCIA PROFESIONAL.

Laboratorios De La Coordinación De Ciencias Computacionales:

A través de los años que lleva la Coordinación de Ciencias Computacionales, se ha visto la importancia que tiene que los alumnos lleven a la práctica, todos los conocimientos adquiridos en las aulas. Es por ello que con el esfuerzo coordinado de los investigadores, se han ido creando diferentes laboratorios de acuerdo a las necesidades de cada área de investigación. En ellos, tanto investigadores como alumnos, experimentan, crean e implementan nuevas tecnologías capaces de ser utilizadas en diferentes ramas de la ciencia o la industria. [1]

1.6.1 ACTUALMENTE LA COORDINACIÓN DE CIENCIAS COMPUTACIONALES

CUENTA CON 6 LABORATORIOS:

- * Tecnologías del Lenguaje (LABTL)
- * Cómputo Reconfigurable y de Alto Rendimiento (FPGAS)
- * Visión
- * **Robótica**
- * Redes
- * Aprendizaje Automático y Reconocimiento de Patrones (MLPR)
- * Procesamiento de Bioseñales y Computación Médica

1.7 LABORATORIO DE ROBÓTICA

LOS OBJETIVOS DE ESTA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN SON:

Realizar investigación básica y aplicada en robots móviles autónomos e inteligentes
Coadyuvar a la transferencia de Tecnología para la solución de problemas reales.

Formar Estudiantes de maestría y doctorado en el Área de Robótica

ENTRE LOS PRINCIPALES TEMAS ABORDADOS SE ENCUENTRAN:

Robótica Colectiva

Robótica Probabilística

Aprendizaje en Robótica

Robots de Servicio

Aplicaciones Médicas

Diseños de Prototipos

1.7.1 ACTIVIDADES PRINCIPALES

En el Laboratorio de Robótica del INAOE se realiza investigación en diversos aspectos de la robótica móvil, como son:

- (a) Locomoción, incluyendo robots acuáticos, hexápodos y ápodos,
- (b) Construcción de mapas, navegación y localización en ambientes interiores,
- (c) Control y coordinación de robots basado en teoría de decisiones,
- (d) Aprendizaje para robots mediante diversos enfoques.
- (e) Robots que colaboran en diversas formas, e Interacción humano-robot.

1.8 INVESTIGADOR RESPONSABLE

Investigador responsable: Dra. Angélica Muñoz Meléndez de la Coordinación de Ciencias Computacionales del Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.

1.9 CONTACTO Y UBICACIÓN

Luis Enrique Erro No. 1

CP.72840 Santa María Tonantzintla, Puebla. México

Tel. +52 (222) 266.31.00 ext. 7015

1.9.1 UBICACIÓN DEL AREA DE RESIDENCIA

Laboratorio de Robótica (Sala Braulio Iriarte)

Coordinación de Ciencias Computacionales – Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica

1.9.2 MAPA DE ACCESO

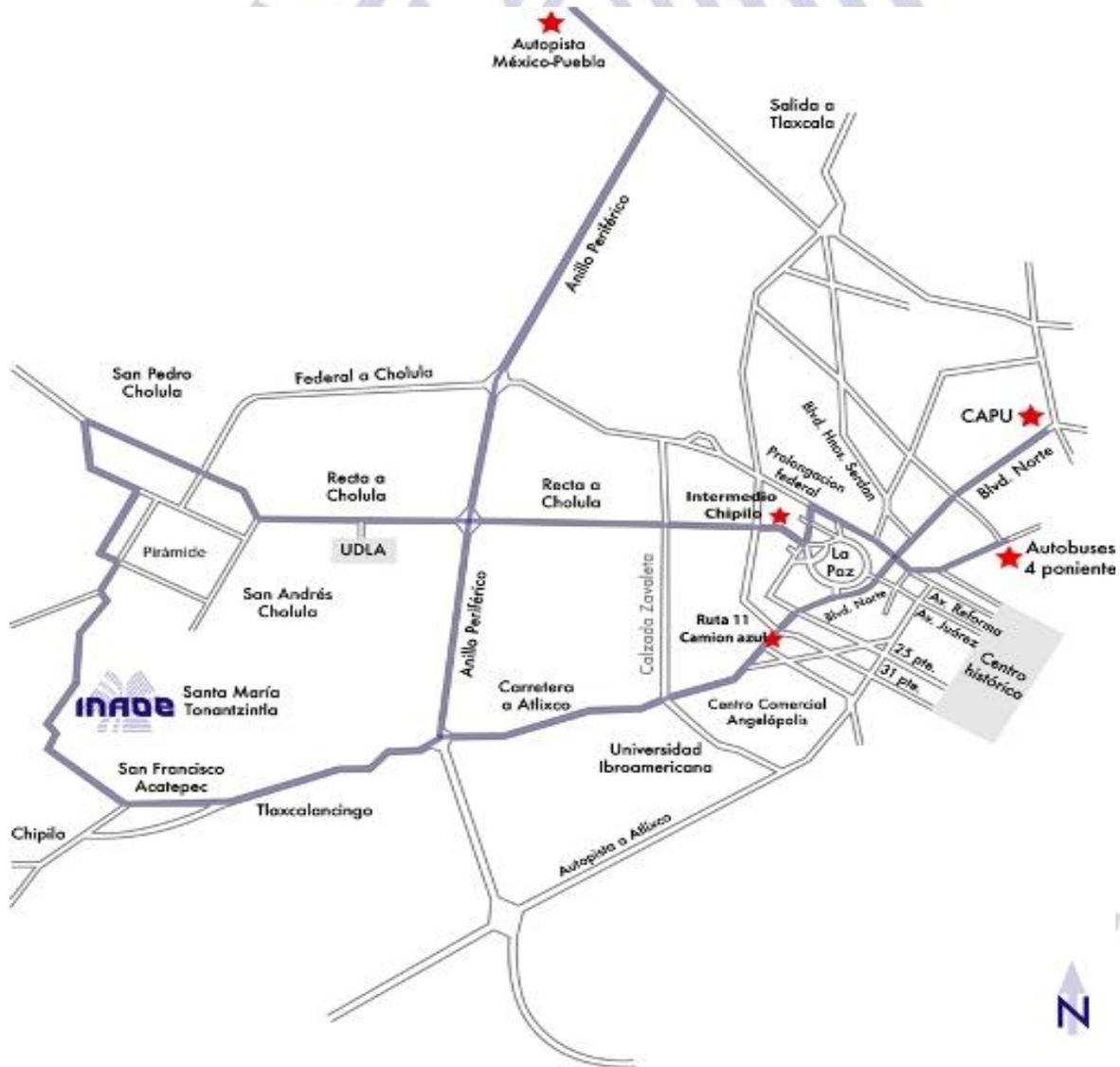


Ilustración 2. Mapa de puebla, ilustrando las diferentes rutas posibles para llegar A Instituto Nacional De Astrofísica Óptica Y Electrónica [1]

1.9.3 MAPA DE LAS INSTALACIONES



- 1. Zona Habitacional
 - A. Cabaña
 - B. Bungalows (1-6)
 - C. Bungalows (7-24)
 - D. Bungalows (25-37)
- 2. Comedor
- 3. Bodega
- 4. Estacionamiento General

- 5. Edificio Docente
 - 1. Dirección de Formación Académica
 - 2. Cubículos de Estudiantes
 - 3. Sala de Usos Múltiples
- 6. Centro de Información
 - 1. Auditorio
 - 2. Biblioteca

6A. Anexo Biblioteca

- 7. Caseta de Vigilancia/Entrada Principal
- 8. Estacionamiento Oficial
- 9. Archivo Histórico
- 10. Edificio de Administración
 - Dirección de Administración y Finanzas
 - Dirección de Desarrollo Tecnológico
 - Dirección de Investigación
 - Dirección General

- 11. Coordinaciones Académicas
 - ♦ Astrofísica
 - ♦ Óptica
 - ♦ Electrónica
- 12. Auditorio Docente
- 13. Laboratorios de Óptica
- 14. Vestidores
- 15. Alberca
- 16. Bungalow 5
 - ♦ Sala Braulio Iriarte
 - ♦ Difusión Científica
 - ♦ Laboratorio de Robótica
- 17. Cámara Schmidt

- 18. Edificio de Ciencias Computacionales
 - ♦ Administración General de Cómputo
 - ♦ Cubículos de Investigadores
 - ♦ Coordinación de C. Computacionales
 - ♦ Salón de Usos Múltiples
- 19. Bungalow 3 (Dirección General)
- 20. Edificio de Nanoelectrónica
- 21. Bungalows 1-2
 - ♦ Departamento de Logística
 - ♦ SUTINAOE
 - ♦ Enfermería
 - ♦ Sala de Eventos
- 22. Edificio GTM
- 23. Bungalow 4

- 24. Edificio Enrique Chavira
 - ♦ Sala de Placas
 - ♦ Cubículos de Estudiantes
- 25. Bungalows 6-7
- 26. Edificio de Microelectrónica
- 27. Lab. de Instrumentación (Visión por Computadora)
- 28. Taller de Mantenimiento
- 29. Almacén General
- 30. Taller Mecánico
- 31. Lab. de Superficies Asféricas
- 32. Edificio de Desarrollo Tecnológico
 - ♦ Centro de Ingeniería
 - ♦ Taller de Diseño Mecánico
- 33. Taller de Óptica
- 34. Telescopio Solar
- 35. Caseta de Astrofísica
- 36. Oficina de Mantenimiento

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica

Ilustración 3: Mapa de las instalaciones
Del Instituto Nacional De Astrofísica
Óptica Y Electrónica [1]



CAPITULO 2

ANTECEDENTES Y DEFINICION DEL PROYECTO

INAOE

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**

INTRODUCCIÓN

En el sector de la limpieza e higiene profesional, existe una serie de riesgos laborales específicos o que se dan con más asiduidad. [2] Lo cual es importante a considerar para limpiezas de superficies como ventanas, vidrios de edificios o superficies de formas verticales de grandes alturas. Debido a la causa dolencias o incomodidades e incluso enfermedades degenerativas al realizar estas tareas de limpieza.

Gran parte de estas enfermedades o dolencias se pueden evitar con una formación adecuada y con la utilización de los equipos de protección necesarios. Pero, en primer lugar, es importante identificar los riesgos específicos del sector profesional de la limpieza, para lo que hay que basarse en el análisis del puesto de trabajo, de sus herramientas y de los locales en los que se desarrolla la actividad. [2] Analizando las herramientas empleadas y el tipo de la actividad de limpieza, se puede observar la creciente necesidad por desarrollar nuevas tecnologías en el ámbito de limpieza.



Ilustración 4: Limpieza de Vidrios en las Alturas [2]

necesario tomar todos los recaudos posibles, de acuerdo a procedimientos claros y previamente establecidos. [3]. Con lo cual se hace el servicio de limpieza más costoso, y en términos laborables poco llamativo.

Debido a las necesidades propias de limpieza en edificios y las medidas de seguridad que se requieren al ser considerado como un trabajo de alto riesgo, y la falta de normas, son factores que obligan a cada una de las empresas que ofrecen la limpieza de altura a tomar todas las acciones necesarias para que el servicio sea de calidad, y no implique ningún riesgo para el trabajador. En este sentido, la seguridad de los operarios siempre es lo primordial, y para ello es

La problemática a la que se enfrentan los servicios de limpieza como bien antes se ha mencionado es el tener a una persona a una gran altura y en condiciones poco saludables, tales como la mala posición física y muscular, tanto la posibilidad de una caída que puede provocar la muerte, es por ello que se ha pensado en el uso de la tecnología de aviones no tripulados. Como una respuesta a esta problemática, surge la idea debido a su versatilidad y sus avances tecnológicos. Siendo los drones un sistema más viable para limpieza de superficies forma verticales, tomando en cuenta las diversas características del Dron DJI M100, tales como su tamaño y cantidad de carga ya que es posible llevar una cantidad de peso adicional a su peso de estructura y a todos demás aspectos, por el cual se ha visto en la mejor propuesta el Dron DJI Matrice 100.

Breve Revisión del estado del arte en aviones no tripulados

Vehículo controlado a distancia conocido como el “el volante de cuatro rotores” (VTOL)- X4-Flyer Inspección
2005 en ambientes peligrosos o incómodos. Resultados finales: buena estabilización en ambientes extremos como observación una alta vibración en partes mecánicas. [4]



Helicóptero genérico basado en un sistema de carga colgante [2] El helicóptero es capaz de llevar
2006 Cargas de hasta 4 kg usando uno o dos puntos de suspensión [5]



El UAV, considera explícitamente la interacción con el medio ambiente
El sistema tiene que interactuar con superficies fijas horizontales.

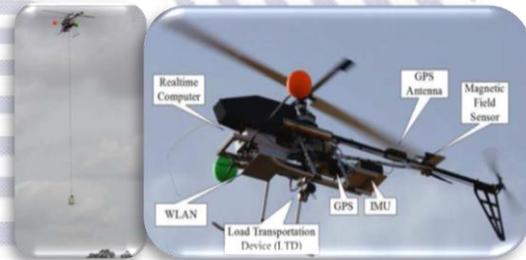
2008

La segunda incluye todas las situaciones posibles en las que. Puede entrar en contacto con superficies fijas verticales. [6]



Helicóptero no tripulados de tamaño pequeño y el enfoque está en el control y en el movimiento de la cuerda a los helicópteros con la carga [7]

2009

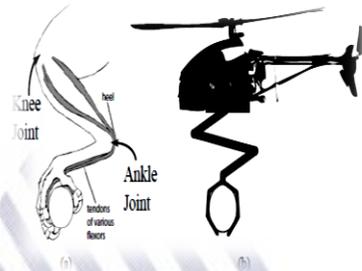


Manipulador, de 2 DoF. El vehículo debe mantener la posición de vuelo del helicóptero sobre el objetivo con precisión suficiente para la captura con un efector final [8]

2010



2011 Aeronave diseñada con un actuador tipo Garra o gripper, para la sujeción o agarre en el aterrizaje [9]



2012 El control de un Quadrotor, equipado con un brazo robótico de 3 DoF y sujeto a fuerzas de contacto y perturbaciones externas que actúan en el algunos puntos del objeto [8]



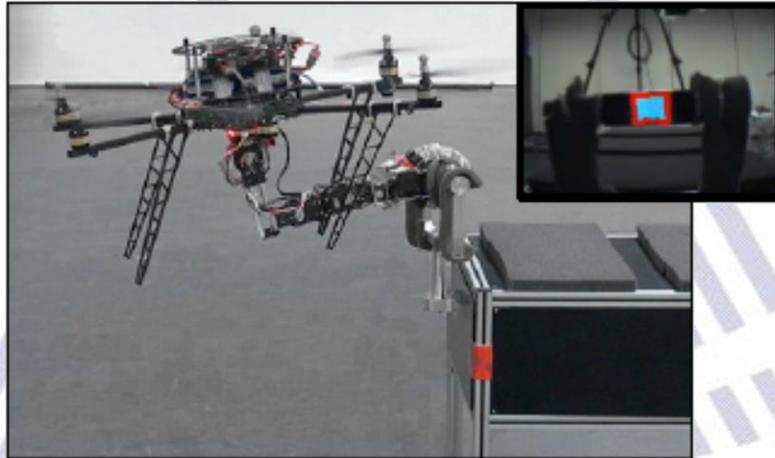
2013 Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) son prometedores para Manipulación debido a su movilidad superior que permite Una amplia gama de acceso en el espacio de trabajo tridimensional. [10]



2014 Quadrotor equipado con un simple manipulador Se emplea para demostrar la Técnicas. [11]

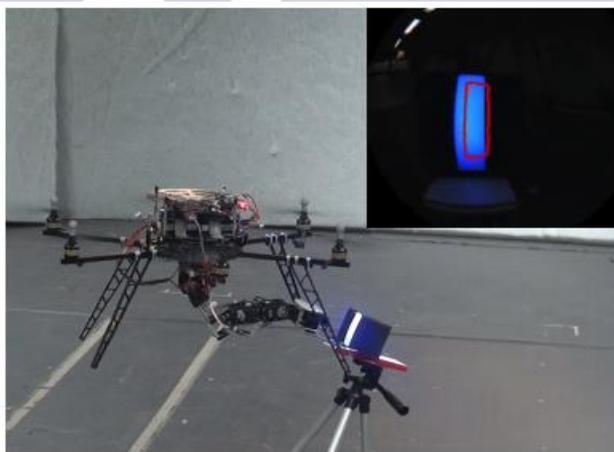


Aplicación: abrir y cerrar un cajón mediante un manipulador con un manipulador de 3 DoF.



Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) son prometedores para Manipulación debido a su movilidad superior que permite Una amplia gama de acceso en el espacio de trabajo tridimensional. [2015] [12]

Aplicación: Este documento presenta un enfoque de orientación de la visión Utilizando un servo visual basado en imágenes (IBVS) para un manipulador aéreo Combinando un multitorre con un brazo robótico multi-DOF. A



Vehículos aéreos no tripulados (UAV),
Basados en imágenes



(a) CAD model



(b) Prototype

MM-UAV con dos brazos Robóticos. [40][GAUI 330 Quadrotor (2013)

Los drones más actuales de acuerdo con las investigaciones ya se está tratando el tema de drones con dos o más manipuladores con n grados de libertad, de acuerdo a nuestra revisión y a lo planteado anteriormente se decide la investigación y creación de un prototipo de investigación basado en una tarea específica para resolver las problemáticas en el ámbito de la limpieza de edificio y superficies verticales



Manipulación aérea utilizando un quadricoptero con un brazo robótico de 2DOF - (2013)

2.1 DEFINICION DEL PROBLEMA

Debido al interés de reducir la problemática en limpiezas de dichas áreas, se ha propuesto ser parte de la solución de esta problemática, desarrollando un prototipo de investigación con el cual se pretende explorar el campo de limpieza aérea y no tripulada, dándole como aplicación la limpieza de superficies mediante vehículos aéreos no tripulados. Diseñando y construyendo un nuevo prototipo para la investigación en dicho campo.

2.2 JUSTIFICACION



Ilustración 5: Valldoreix Greenpower sistema de limpieza de inmuebles [4]

En el siglo XXI será el de los drones, esos robots capaces de desplazarse por el aire gracias a un conjunto de hélices. Sus aplicaciones aún son muy incipientes y a nivel doméstico están muy vinculadas con el ocio, pero hay empresas que han sabido ver más allá y detectar una gran oportunidad de mercado a partir de las necesidades actuales y futuras del hombre. [13].

La empresa Valldoreix Greenpower supo hacer este ejercicio. Dedicada al desarrollo de sistemas fotovoltaicos de concentración, se encontró ante la cuestión de cómo poder limpiar los paneles solares de manera no invasiva para su superficie y más eficiente. Fue entonces cuando empezaron a trabajar en un proyecto que se acabó constituyendo en empresa propia, bautizada como Cleandrone. [13].

El enfoque dado a esta rama de la robótica aérea, nos permitió dar la pauta para esta investigación, en la cual se contribuirá al avanza de los robots de limpieza aérea en aviones no tripulados (Drones).

2.3 OBJETIVOS GENERALES

Introducirse al concepto de los vehículos aéreos no tripulados (AUV), así como adentrarse en el estado del Arte de aviones no tripulados, con el uso de manipuladores, como pinzas o elementos de sujeción, para la manipulación de un objeto o la realización de una tarea en específica. Para llegar a un diseño y la misma construcción del brazo Robótico de 4 grados de libertad el cual llevará el Dron DJI Matrice 100 en su parte inferior.

2.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1 Estudio del estado de arte de brazos robóticos o manipuladores en drones, para definir grados de libertad de un nuevo diseño para tareas de limpieza, así como los tipos de efectores finales.
- 2 Proponer un diseño de un brazo robótico para una tarea específica (limpieza de superficies verticales y horizontales)
- 3 Realizar diseño en computadora, es decir nuestro diseño en SolidWorks y las simulaciones de operabilidad, en Matlab.
- 4 Hacer uso de máquina de impresión 3D para el brazo robótico y armar el prototipo para la experimentación y muestra de operatividad.
- 5 Presentar resultados y conclusiones del proyecto, como los posibles trabajos a futuro.

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**

2.5 ALCANCES DEL PROYECTO

El brazo robótico será diseñado con 4 Grados de Libertad con el propósito de ser utilizado para la herramienta de un Escurreidor pequeño (normal), como elemento final, y sus grados de libertad están definidos, por los requerimientos de físicos del Dron DJI Matrice 100, el cual no permite una altura máxima de 17cm en la parte inferior del AUV. Para nuestro proyecto cabe señalar la importancia de mostrar que se utilizara un Dron DJI Matrice 100 modificado (se modificó las patas del dron o “base”).

Para las simulaciones en SolidWorks se utilizó modelos y las secuencias de cinemática inversa ha si como el uso de Arduino para las pruebas de su correcto funcionamiento en su base de pruebas.

2.6 LIMITACIONES

En este trabajo se encuentra todo lo relacionado con el diseño y la construcción a que el prototipo se diseñó de acuerdo a la necesidad de la tarea de limpieza de superficies verticales, siendo la limpieza de ventanas o vidrios su tarea principal se utilizó el modelo matemático. Tomados como un solo sistema y que en algunas descripciones no se hará un profundo análisis de ecuaciones o parte del modelo, puesto que ya son conocidos.

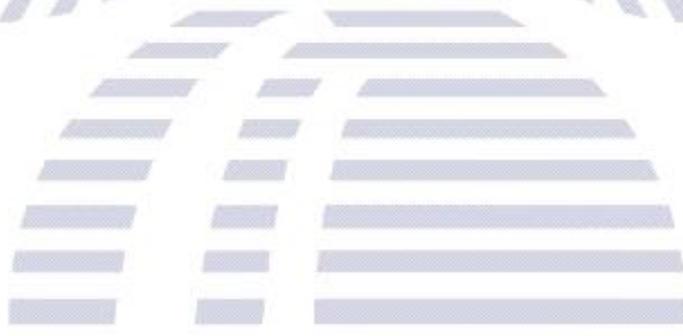
Por el brazo solo será probado en su base en tierra ya que para llevarlo a la tarea planeada se necesita programar un modelo matemático con mayor control capaz de eliminar las perturbaciones del brazo y del Dron Matrice 100.

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**



CAPITULO 3

FUNDAMENTO TEORICO



INAOE

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**

INTRODUCCION

El avión no tripulado más antiguo fue desarrollado después de la Primera Guerra Mundial, y se emplearon durante la Segunda Guerra Mundial para entrenar a los operarios de los cañones antiaéreos. No fue sino hasta finales del siglo XX cuando los “drones” comenzaron a ser operados mediante radio control, con todas las características de autonomía. Existe una amplia variedad de formas, tamaños, configuraciones y características en el diseño de los UAV. [14]



Ilustración 6 :UAV MQ-1 *Predator*

La autonomía en su totalidad comenzó a fines del siglo pasado. Desde entonces se les ha añadido distintas configuraciones y características según el destino al que fueran orientados. Algunos son controlados de manera remota, y otros vuelan de manera automática según planes de vuelo pre programados en sus sistemas.

En países como Argentina, los primeros prototipos de aviones no tripulados fueron pensados para aplicaciones civiles como la lucha contra incendios, la seguridad civil o la vigilancia de oleoductos. [15]. En el caso de los EEUU y la OTAN el modelo usado fue el "Predator MQ-9 Reaper". Tiene una velocidad de 220 km/h, soporta una carga útil de 1700 kilos y tiene un rendimiento de 726 km. Está equipado con cámaras infrarrojas, bombas teledirigidas y misiles Hellfire. En 2002 la Fuerza Aérea estadounidense ya había utilizado 60 de estas aeronaves en territorio afgano.

- Fulmar, fabricado por Aero visión, durante un vuelo de reconocimiento.
- MUAV Stardust II, desarrollado utilizando normas sUAS ARC FAA

3.1 DEFINICION DE AVIONES NO TRIPULADOS

Un vehículo aéreo no tripulado, (UAV por siglas en inglés) también conocido como VANT, es una aeronave que vuela sin tripulación humana a bordo. Son usados mayoritariamente en aplicaciones militares. Para distinguir los UAV de los misiles, un UAV se define como un vehículo sin tripulación reutilizable, capaz de mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión o de reacción. [14]

También llamados “drones”, los vehículos aéreos no tripulados que se han establecido como una de las armas especiales de los ejércitos más modernos de la actualidad. [14]

3.2 CLASIFICACION DE LOS AUV

Los UAV dependiendo su misión principal suelen ser clasificados en 6 tipos:

- ✓ De blanco - sirven para simular aviones o ataques enemigos en los sistemas de defensa de tierra o aire
- ✓ Reconocimiento - enviando información militar. Entre estos destacan los MUAVs (Micro Unmanned Aerial Vehicle)
- ✓ Combate (UCAV) - Combatiendo y llevando a cabo misiones que suelen ser muy peligrosas.
- ✓ Logística - Diseñados para llevar carga.
- ✓ Investigación y desarrollo - En ellos se prueban e investigan los sistemas en desarrollo.
- ✓ Uav comerciales y civiles - Son diseñados para propósitos civiles.
- ✓ También pueden ser categorizados dependiendo de su techo y alcance máximo:
 - ✓ Handheld: unos 2000 pies de altitud, unos 2 km de alcance
 - ✓ Close: unos 5000 pies de altitud, hasta 10 km de alcance.
 - ✓ NATO: unos 10.000 pies de altitud, hasta 50 km de alcance.
 - ✓ Tactical: unos 18000 pies de altitud, hasta 160 km de alcance.
 - ✓

- ✓ MALE (medium altitude, long endurance) hasta 30000 pies de altitud y un alcance de unos 200 km
- ✓ HALE (high altitude, long endurance) sobre 30.000 pies de techo y alcance indeterminado
- ✓ HYPERSONIC alta velocidad, supersónico (Mach 1-5) o hipersónico (Mach 5+) unos 50000 pies de altitud o altitud suborbital, alcance de 200km
- ✓ ORBITAL en orbitas bajas terrestres (Mach 25+)
- ✓ CIS Lunar viaja entre la Luna y la Tierra. [15]

3.2.1 APLICACIONES DE LOS AVIONES NO TRIPULADOS

Son usados mayoritariamente en aplicaciones militares. Para distinguir los UAV de los misiles, un UAV se define como un vehículo sin tripulación reutilizable, capaz de mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión o de reacción. Por tanto, los misiles de crucero no son considerados UAVs porque, como la mayoría de los misiles, el propio vehículo es un arma que no se puede reutilizar, a pesar de que también es no tripulado y en algunos casos guiado remotamente. [15]

- Búsqueda de personas desaparecidas
- Fotografía, Vídeo y Cartografía Aérea
- Prevención y control de incendios
- Seguridad y Aplicaciones Militares
- Construcción e inspecciones: Inspección de obras desde el aire. Estimación de impacto visual de grandes obras.
- Control y análisis de multitudes: Manifestaciones, conciertos, etc.
- Investigación de una escena de un crimen desde el aire: Accidentes de tráfico.
- Exploración de lugares de difícil acceso: Cuevas, precipicios, etc.
- Movilidad y Tráfico: Grabación y monitorización de la situación del tráfico, etc.

3.2.2 CONCEPTO DE DRON

Un dron es un vehículo aéreo que vuela sin tripulación. Su nombre se deriva del inglés drone, que en español significa “abeja macho”. Existen drones de diversos tamaños y con diferentes finalidades. Sin embargo, es importante indicar que este tipo de máquinas existen desde hace mucho tiempo, pese a que su fabricación resultaba un tanto costosa y que tampoco se contaban con las características que poseen actualmente. [16]

La característica más resaltante de un dron es que su vuelo es controlado por control remoto, aunque existen algunos que son conducidos mediante la intervención de un software y no de manera directa por un piloto desde tierra. Los drones pueden ser de dos tipos: los que se asemejan a un avión y los que se parecen a un helicóptero, los cuales pueden mantenerse de manera estática en el aire. [16]

3.2.3 CARACTERISTICAS DE UN DRON

Algunos tienen sistema GPS que les permite volver al punto donde inició de su vuelo. En el futuro se espera que los drones vuelen solos, tomando sus propias decisiones, evitando chocar contra las personas y poder evitar los objetos.

La mayoría de los drones se manejan con radio control, pero pueden ser también manejados y programados mediante una Tablet o un Smartphone. [17]

Los drones se caracterizan por ser controlados a distancias, es decir tele-operados o bien de igual manera traen consigo un control de vuelo totalmente autónomo, el cual utiliza para su estabilización en todo momento.

Dentro de las características podemos denotar tipos de Drones. La clasificación es muy amplia, pero la primera clasificación podría ser en función del tipo de alas. [17]

TIPOS DE DRONES

ALAS FIJAS



Ilustración 7: ilustración de Dron de Ala fija. [17]

que con la configuración adecuada, puede permanecer bastante tiempo sin necesidad de utilizar el motor gracias al planeo. Por otra parte, el hecho de poder planear hace que sea una plataforma mucho más segura, ya que en un supuesto fallo de motor puede planear hasta llegar al punto de aterrizaje. [18]

El ala fija es el claro ganador en lo que a autonomía se refiere. Según esté equipado con motor eléctrico o de explosión, puede permanecer en el aire varias horas. Es la plataforma perfecta para trabajos que abarquen una gran extensión de terreno. Por otra parte, es el más eficiente aerodinámicamente hablando, ya

MULTIRROTORES



Ilustración 8: Ilustración de Dron multirrotor [18]

giroscopios y estabilizadores, lo que es perfecto para sacar fotos y grabar vídeos. Es importante destacar que pese a las muchas ventajas que ofrece un multirrotor, nos encontramos con una desventaja nada despreciable, la autonomía. Un multirrotor, de media no suele superar los 15 minutos de vuelo, lo que representa un gran impedimento para muchas operaciones. [18]

Drones MultiRotor: Suelen ser cuadricópteros (4 rotores con hélices) aunque los hay que tienen 6 (hexacópteros) o incluso 8 hélices. Dos hélices giran en el sentido de las agujas del reloj y las otras dos en el otro sentido, creando así la fuerza de empuje necesario para llevar al dron hacia arriba. Se pueden mantener en el mismo sitio sin variar la posición, gracias a sus

Luego muchas empresas europeas, algunas de ellas fabricantes de drones militares, comenzaron a fabricar modelos de menor tamaño para usos comerciales y de patrullaje de fronteras y zonas “calientes” en ciudades como Londres.

Paulatinamente estas tecnologías se fueron aplicando en el área del aeromodelismo y FPV(first person view), donde un multicoptero equipado con una mini-cámara y un transmisor de micro-ondas, envía la imagen a la base, convirtiéndose el piloto en un observador privilegiado desde las alturas.

¿Cómo son actualmente los controladores de vuelo?

Hay muchos tipos de controladores en cuanto a prestaciones y orígenes, pero podemos decir que los que se usan para el video aéreo, tienen un sistema computarizado de estabilización de vuelo, orientación automática, altitud barométrica, posicionamiento

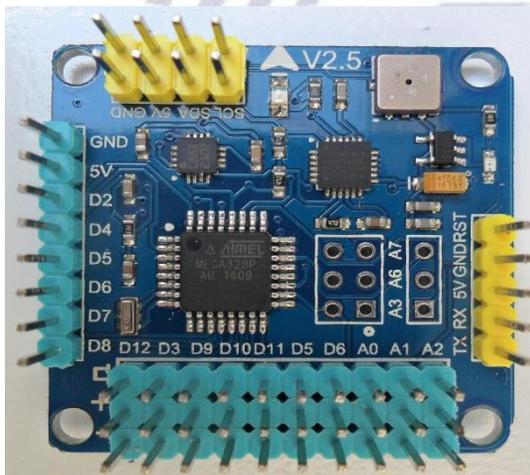


Ilustración 10: Arduino Controlador De Vuelo, Drones, Cuadricópteros con GPS o Módulos Bluetooth

Satelital (GPS), en algunos casos se puede programar el mapa de vuelo por puntos de acuerdo a Google earth, retorno automático a la base en caso de falla de la radio (RTH), motores eléctricos de última tecnología (brushless), controladores electrónicos de velocidad (ESC), baterías LIPO de poco peso y gran potencia que en algunos casos da una autonomía de vuelo de hasta 20 minutos, dependiendo de los motores y el peso que eleve (Payload).

Para el uso en fotografía y video, es indispensable que haya instalado un soporte de cámara con movimiento controlado, mínimamente de 2 ejes, lo ideal es un soporte o gimbal de 3 ejes (paneo horizontal, contrapicado vertical y rotación 360 grados).

El piloto operador observa la misma escena que el director de fotografía y se comunican vía wi-fi para no tener que estar uno al lado del otro, dado que el piloto a veces necesita ver en tiempo real que objetos pueden estar cerca del multicoptero y debe moverse en un radio mínimo. Una vez que la imagen es la adecuada, el director pulsa una llave de 3 posiciones (espera, foco y disparo). [20]



Ilustración 11: 2 Axis Brushless GoPro Session Stabilized Gimbal for TBS Discovery, Cortesia de GoPro.

3.3.1 SISTEMAS DE VUELO

La industria de los Drones en la actualidad tiene la atención de diversas áreas de la ingeniería, debido a los usos derivados de esta tecnología algunas ramas de la ingeniería que aportan sus conocimientos son: la electrónica, el aeromodelismo, la programación y la matemática debido a esta gama de áreas involucradas en su desarrollo se tienen avances en su versatilidad así como en las implementaciones de su arquitectura.

Los Cuadricópteros son sistemas de vuelo impulsados por cuatro hélices ubicadas alrededor de un cuerpo principal, la acción dinámica de las fuerzas que actúan sobre el sistema requieren de mecanismos para estabilizarlas y controlar la interacción en un equilibrio constante. [21]

Cada hélice que proporciona un empuje tiene un sentido, un par gira en sentido horario mientras dos giran en sentido anti horario, este movimiento es controlado por sistemas electrónicos denominado ESC (Control de velocidad electrónico). [21]

La implementación del control PID para el manejo de las fuerzas que actúan sobre el vuelo se han dividido en 3:

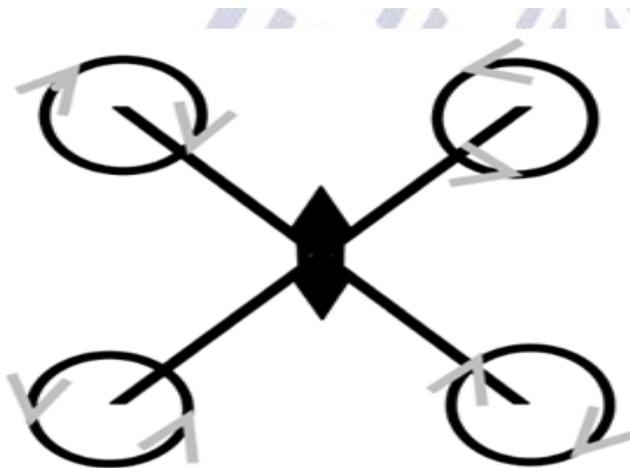


Ilustración 12: Movimiento de la hélices frame X.
Cortesía de REAXION

1. **Control PID Roll** o control de giro horizontal el equilibrio del dron se centra en este eje con lo que el control PID es crítico para evitar que el dron gire, a su vez tiene en cuenta que la libertad de maniobra tiene que ser la suficiente como para poder realizar piruetas en 360°.

2. **Control PID Yaw** o control de giro vertical evita que las fuerzas de movimiento de giro de las hélices hagan que el sistema gire sobre su propio eje, pero deja suficiente libertad para poder orientar la acción de maniobra izquierda y derecha.

3. **Control PID pitch** o control de elevación mantiene el control de avance o retroceso del sistema dejando la libertad necesaria para acelerar o disminuir la velocidad si las maniobras lo requieren.

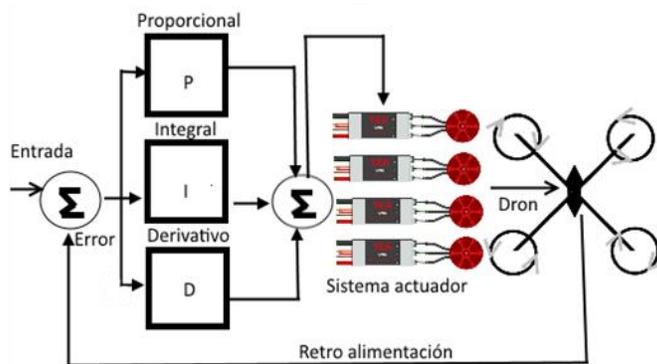


Ilustración 13: Diagrama de bloques control PID para Dron.

El diagrama muestra la interacción de la entrada o señal de los sensores de aceleración y giroscopio del dron con el algoritmo para poder estabilizar los 3 ejes enviando la corrección a los actuadores. Estas señales gracias a la tecnología actual, pueden ser analizadas por micro controladores, que mediante

algoritmos analizan las entradas procesando datos y evaluando su corrección con un tiempo de respuesta adecuado. El algoritmo de corrección se basa en la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad [21]$$

Donde $u(t)$ es la entrada de control de proceso, $e(t)$ el error de la señal. K_p es la ganancia proporcional, T_i es la constante de tiempo integral, T_d la constante de tiempo derivada. [21]

Los sistemas de vuelos más conocidos en los drones o UAV'S, son aquellos que principalmente están contruidos por modelos de un controlador PID, también existen aeronaves no tripuladas con sistemas basados en controladores de FLC (Logia Difusa). La tarea primordial de un controlador es mantener al dron en un punto de estabilización requerido, tomando como punto de consigna el estado al cual el dron presentara la mayor estabilidad, cada vez los controladores son compuestos por modelos matemáticos más complejos, por lo cual cada vez los controles de vuelos son más estables y pueden compensar una perturbación con una mayor respuesta de estabilidad.

3.3.2 DRON DJI MATRICE 100

El Matrice 100 (M100) como lo denomina el gigante DJI es un cuadróptero desarrollado para testar nuevos desarrollos, tanto de hardware como de software. El complemento perfecto del SDK (software development kit) de DJI.

El Matrice 100 se caracteriza por la multiplicidad de puertos y su modularidad. Es una plataforma de vuelo completamente escalable a la que se pueden conectar todo tipo de sistemas o periféricos, desde sensores a sistemas comunicación, sistemas de toma de imagen e incluso baterías auxiliares que, por ejemplo, permiten ampliar la autonomía de 20 a 40 minutos con una carga de pago de 1 Kg. [22]



Ilustración 14: Componentes del Dron DJI M100: cortesía de DJI.

La nueva plataforma incorpora el sistema de transmisión de video que ya popularizó el Inspire 1, el Sistema Lightbridge, que permitirá la transmisión en streaming de cualquier tipo de imagen incluyendo imágenes infrarrojas o térmicas. A todo esto hay que añadir que el M100 es completamente programable, por lo tanto la adecuación a las necesidades de cada usuario es prácticamente total. DJI también presentó esta semana el Sistema Guidance, primer sense&avoid de la compañía china. Basado en un sistema de sensores ultrasónicos y de cámaras estéreo, Guidance permite detectar un obstáculo dentro de un rango de 20 metros manteniendo una distancia mínima del mismo (distancia que es programable). [22]

3.3.3 CARACTERISTICAS DEL DRON DJI MATRICE 100

El DJI Matrice 100 cuenta con bahías adicionales de expansión que permiten añadir componentes, personalizar la carga útil, y volar con cualquier dispositivo que desee. Coloca cámaras, sensores, placas de computación, herramientas de comunicación y más en el cielo. Reúne datos al completar trabajos complejos desde una vista panorámica en las alturas.

Conecta y vuela con casi cualquier dispositivo, transmite datos a través de los puertos de la CAN y la UART dual del Matrice 100. Hay dos en cada puerto de la plataforma, lo que le permite montar y construir un sistema que se ajuste a sus necesidades. [23]

Añade un compartimiento de la batería adicional para lograr un máximo de 40 minutos de tiempo de vuelo. Esto le da mayor poder tanto a su plataforma como a los dispositivos adicionales o accesorios con los que desees volar.

* Los tiempos de vuelo varían en función de las condiciones de carga útil y de vuelo

Logra un equilibrio perfecto y una experiencia de vuelo ideal deslizando la batería y otros compartimentos alrededor del cuerpo del Matrice 100. Coloca tus componentes exactamente donde quieras, y obtén el máximo rendimiento de su sistema.

Brazo flexible para satisfacer tus necesidades de vuelo, ajustando el ángulo del brazo de cada uno de los 4 brazos, es rápido y fácil. Logra una mayor respuesta para la inclinación de los brazos a un ángulo de 3 grados.

Para reducir las vibraciones, aumentar la rigidez, y ofrecer una fiabilidad sin igual, el Matrice 100 está hecho de fibra de carbono fuerte y ligero.

Cada uno de los brazos contiene materiales que absorben la vibración lo que prácticamente elimina la retroalimentación de los motores potentes, manteniendo los componentes críticos estables y permitiendo una precisión sin precedentes.

Pistas de aterrizaje innovadoras se instalan en la base de cada brazo para proteger su Matrice 100 al aterrizar. Estas pastillas reducen en gran medida el impacto, garantizando la protección de su sistema y eliminando la posibilidad de que su plataforma despegue del suelo sin tu consentimiento.



Ilustración 15: Ángulo de brazo ajustable para mayor torque

Toma el control de tu plataforma con el mando a distancia personalizable, de largo alcance que se incluye con el Matrice 100. Con un alcance operativo de hasta 1,2 millas (2 km), una batería recargable, controles totalmente ajustables, y salidas para conectar a su dispositivo móvil, esta es la herramienta perfecta para controlar el sistema en el aire.

Alcance máximo a prueba en áreas abiertas libres de interferencia y puede variar dependiendo de las regulaciones locales.

Vuela con la aplicación DJI Go, rica en características o crea tu propia aplicación con el SDK DJI. Obtén una vista en vivo, controla tus dispositivos, accede a un mapa en tiempo real, y mucho más con sólo conectar tu tableta o teléfono inteligente.

GPS mejorado con una montura plegable que ayuda a realizar un seguimiento de la posición de tu Matrice 100 en tiempo real, al tiempo que permite la adquisición de señales de satélites más rápido, obtén una posición más precisa y una mejor planificación del vuelo.

Nuevo controlador de vuelo N1 del DJI que mantiene tu Matrice 100 estable y sensible a tus órdenes en todo vuelo. La transmisión de datos te otorga una vista en vivo de alta definición

(Cuando se utiliza la cámara X3 de DJI y Gimbal), mientras que los DJI Lightbridge incluidos aumenta tu rango de vuelo de 1,2 millas * (2km).

Alcance máximo a prueba en áreas abiertas libres de interferencia y puede variar dependiendo de las regulaciones locales.



Una versión mejorada de los respetados DJI E800 de propulsión eléctrica empodera el sistema de tu Matrice 100 y lo mantiene en vuelo. Cuatro potentes motores sin escobillas y cuatro controladores de velocidad "Lightning Fast" están integrados en la plataforma, que le da un control completo durante el vuelo. Con el aumento de la fuerza y la capacidad de carga útil, usted tiene la flexibilidad para crear el sistema que

Ilustración 16: Matrice 100 con todos sus accesorios montados necesita.

El Matrice 100 es compatible con una amplia gama de accesorios DJI incluyendo:

- Guidance: Kit de sensor revolucionario de DJI que ayuda a su plataforma a ver su entorno y reconocer cuando existan obstáculos u otros objetos estén cerca.
- Cámara X3 y Gimbal: Dispara estabilizado de video 4K y capturar 12 imágenes megapíxel desde el cielo con DJI, Cámara integrada y 3 ejes del sistema de cardán.
- Batería adicional: Amplíe su tiempo de vuelo, volando con la batería de Vuelo Inteligente adicional de DJI.

- Bahías de expansión: un uso más bahías de expansión para poner todos los dispositivos que desees en tu Matrice 100 y crear una plataforma personalizada verdaderamente única. [23]

3.3.4 MEDIDAS Y ESPECIFICACIONES FISICAS DE UN DRON DJI M100

Características del Dron DJI M100: [23]

- Distancia diagonal entre ejes 650 mm
- Peso (con batería TB47D) 2355 g
- Peso (con batería TB48D) 2431 g
- Max. peso de despegue 3400 g
- Expansión de bahías Peso 45 g
- Compartimiento de la batería Peso 160 g
- Zenmuse X3 Gimbal con la cámara Peso 247 g
- Precisión (P-Mode) Vertical: 0,5 m, horizontal: 2,5 m
- Max. Velocidad Angular Pitch: $300^\circ / s$, guiñada: $150^\circ / s$
- Max. Ángulo de inclinación de 35°
- Max. Velocidad de Ascenso 5 m / s
- Max. Velocidad de descenso 4 m / s
- Max. Resistencia del viento de 10 m / s
- 22 m / s (modo ATT, sin carga, sin viento) 17 m / s (modo GPS, sin carga, sin viento)
- Autonomía: 22 min; 500g de carga útil: 17 min; 1 kg de carga útil: 13 min
- Autonomía: 28 min; 500g de carga útil: 20 min; 1 kg de carga útil: 16 min
- Autonomía: 33 min
- Autonomía: 40 min
- Autonomía: 19 min
- Autonomía: 23 min

El tiempo de vuelo estacionario se basa en vuelos a 10 metros sobre el nivel del mar en un entorno sin viento y un aterrizaje con el nivel de la batería 10%.

- Motor Modelo DJI 3510
- 1345s hélice Modelo DJI
- ESC Modelo DJI SERIE E 620D
- Modelo N1
- Temperatura de funcionamiento -10 a 40 ° C
- Nombre C1
 - ~ 5.825 GHz
- Frecuencia de operación 922.7MHz ~ 927.7 MHz (Japón) 2.400 ~ 2.483 GHz (Lightbridge)
- Distancia de transmisión de 2 km (al aire libre y sin obstáculos)
- PIRE 10dBm @ 900m; 13dBm@5.8G; 20dBm@2.4G
- Salida video USB, Mini-HDMI

3.3.5 DESCRIPCION DEL SISTEMA GUIDANCE DEL DJI M100



Ilustración 17: Sistema Guidance del Drone DJI M100

Guidance es el primer sistema de prevención de impactos para plataformas aéreas que comercializa la compañía dji. El sistema funciona con sensores de ultrasonidos y cámaras con visión binocular colocados a la derecha, la izquierda, el frontal, la parte trasera y la parte inferior del drone. El sistema es capaz de detectar objetos a 20 metros de distancia, y

evita volar cerca de ellos pudiéndose configurar la distancia mínima de seguridad entre el objeto y el aparato. El sistema también ayuda a la estabilización del drone.

Acompañando al M100 tenemos un sistema de evaluación de obstáculos bautizado como Guidance. Posiblemente sea la novedad más relevante, ya que nos encontramos con el primer sistema relativamente asequible y que podemos montar en el dron.

Funciona con el M100, pero también podrá hacerlo con aquellos que cuenten con conexiones USB/UART. Por lo pronto nos dejan verlo con el nuevo modelo, detectando obstáculos que se encuentran a menos de 20 metros de nuestro DJI.

Gracias a sensores de infrarrojos y cámaras estéreo - imagen anterior -, Guidance puede prevenir más de un accidente en vuelo, y nos permite relajarnos un poco más de cara a crear mejores composiciones con la cámara. [24]

3.3.6 DESCRIPCION DE INTERFAZ CONTROLADORA DEL DJI M100.

DJI GS PRO - MISION-VUELO CRÍTICO SIMPLIFICADO

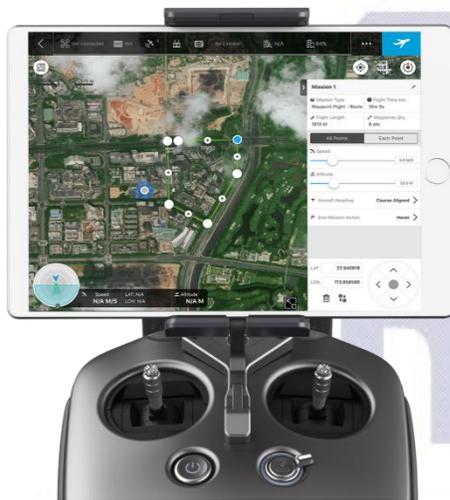


Ilustración 18: interfaz gráfica para drones de la marca DJI

GS Pro (también conocido como Ground Station Pro) es una aplicación iPad diseñada para controlar o planear vuelos automáticos para aeronaves DJI. A través de su interfaz clara y concisa, complejas misiones de vuelo pueden ser planificadas con unos cuantos grifos. GS Pro entonces automáticamente puede tomar imágenes en waypoints preestablecidos, proporcionando la precisión necesaria para el mapeo de posición. Una función de realidad virtual aumenta, facilita el uso al bloquear la

altura y la velocidad de la aeronave dentro de una zona.

Con estas características, GS Pro aumenta drásticamente la eficiencia de diversas aplicaciones industriales, incluyendo pero no limitado a, imágenes aéreas, arquitectura, agricultura de precisión, inspecciones eléctricas, búsqueda y rescate, control de seguridad, y más. [25]

3.4.0 INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA

Por siglos el ser humano ha construido máquinas que imiten las partes del cuerpo humano. Los antiguos egipcios unieron brazos mecánicos a las estatuas de sus dioses. Estos brazos fueron operados por sacerdotes, quienes clamaban que el movimiento de estos era inspiración de sus dioses. Los griegos construyeron estatuas que operaban con sistemas hidráulicas, los cuales se utilizaban para fascinar a los adoradores de los templos.

Durante los siglos XVII y XVIII en Europa fueron construidos muñecos mecánicos muy ingeniosos que tenían algunas características de robots.

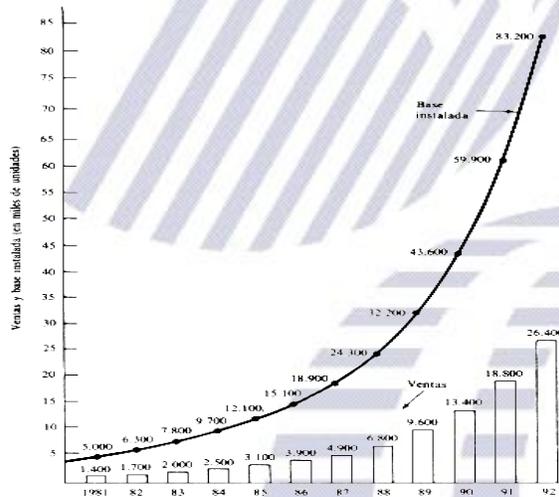
Jacques de Vaucansos construyó varios músicos de tamaño humano a mediados del siglo XVIII. Esencialmente se trataba de robots mecánicos diseñados para un propósito específico: la diversión. [26]

En 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que era capaz de hacer dibujos. Una serie de levas se utilizaban como 'el programa' para el dispositivo en el proceso de escribir y dibujar. Estas creaciones mecánicas de forma humana deben considerarse como inversiones aisladas que reflejan el genio de hombres que se anticiparon a su época. Hubo otras invenciones mecánicas durante la revolución industrial, creadas por mentes de igual genio, muchas de las cuales estaban dirigidas al sector de la producción textil. Entre ellas se puede citar la hiladora giratoria de Hargreaves (1770), la hiladora mecánica de Crompton (1779), el telar mecánico de Cartwright (1785), el telar de Jacquard (1801), y otros.

El desarrollo en la tecnología, donde se incluyen las poderosas computadoras electrónicas, los actuadores de control retroalimentados, transmisión de potencia a través de engranes, y la tecnología en sensores han contribuido a flexibilizar los mecanismos autómatas para desempeñar tareas dentro de la industria. Son varios los factores que intervienen para que se desarrollaran los primeros robots en la década de los 50's. La investigación en inteligencia artificial desarrolló maneras de emular el procesamiento de información humana con computadoras electrónicas e inventó una variedad de mecanismos para probar sus teorías.

No obstante las limitaciones de las máquinas robóticas actuales, el concepto popular de un robot es que tiene una apariencia humana y que actúa como tal. Este concepto humanoide ha sido inspirado y estimulado por varias narraciones de ciencia ficción.

Una obra checoslovaca publicada en 1917 por Karel Kapek, denominada Rossum's Universal Robots, dio lugar al término robot. La palabra checa 'Rabota' significa servidumbre o trabajador forzado, y cuando se tradujo al inglés se convirtió en el término robot.



En la actualidad el uso de los robots industriales está concentrado en operaciones muy simples, como tareas repetitivas que no requieren tanta precisión. La Fig. 3.1 refleja el hecho de que en los 80's las tareas relativamente simples como las máquinas de inspección, transferencia de materiales, pintado automotriz, y soldadura son económicamente viables para ser

Ilustración 19: Refleja el hecho de que en los 80's las tareas relativamente simples como las máquinas de inspección

robotizadas. Los análisis de mercado en cuanto a fabricación predicen que en ésta década y en las posteriores los robots industriales incrementaran su campo de aplicación, esto debido a los avances tecnológicos en sensoria, los cuales permitirán tareas más sofisticadas como el ensamble de materiales.

Como se ha observado la automatización y la robótica son dos tecnologías estrechamente relacionadas. En un contexto industrial se puede definir la automatización como una tecnología que está relacionada con el empleo de sistemas mecánicos-eléctricos basados en computadoras para la operación y control de la producción. En consecuencia la robótica es una forma de automatización industrial. [26]

Hay tres clases muy amplias de automatización industrial: automatización fija, automatización programable, y automatización flexible.

La automatización fija se utiliza cuando el volumen de producción es muy alto, y por tanto se puede justificar económicamente el alto costo del diseño de equipo especializado para procesar el producto, con un rendimiento alto y tasas de producción elevadas. Además de esto, otro inconveniente de la automatización fija es su ciclo de vida que va de acuerdo a la vigencia del producto en el mercado.

La automatización programable se emplea cuando el volumen de producción es relativamente bajo y hay una diversidad de producción a obtener. En este caso el equipo de producción es diseñado para adaptarse a las variaciones de configuración del producto; esta adaptación se realiza por medio de un programa (Software).

La automatización flexible, por su parte, es más adecuada para un rango de producción medio. Estos sistemas flexibles poseen características de la automatización fija y de la automatización programada. Los sistemas flexibles suelen estar constituidos por una serie de estaciones de trabajo interconectadas entre sí por sistemas de almacenamiento y manipulación de materiales, controlados en su conjunto por una computadora. [26]



Ilustración 20: Manipulador para

Transferencia de Artículos Programada. [26]

George C. Devol, inventor americano, al que deben atribuirse dos invenciones que llevaron al desarrollo de los robots hasta nuestros días. La primera invención consistía en un dispositivo para grabar magnéticamente señales eléctricas, y reproducirlas para controlar una máquina. La segunda invención se denominaba Transferencia de Artículos Programada. [26]

3.4.1 FUNCIONAMIENTO Y APLICACIONES DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS

Funcionamiento

Un brazo robótico común está hecho de siete segmentos unidos por seis articulaciones o juntas. El ordenador controla el robot rotando varios motores individuales (algunos brazos robot más grandes utilizan sistemas hidráulicos). A diferencia de los motores ordinarios, este tipo de motores se mueven en incrementos exactos. Esto permite al ordenador mover el brazo de una forma muy precisa, repitiendo exactamente el mismo movimiento una y otra vez. El robot usa sensores de movimiento para asegurarse de que se mueve justamente lo necesario.

3.4.2 APLICACIONES DE LOS BRAZOS ROBÓTICOS

Aplicaciones

1. Utilización en infraestructuras para mejorar la calidad de entornos abiertos. Así, por ejemplo, se aplicarían para procedimientos de limpieza en vías públicas, mantenimiento de zonas verdes, en sistemas de seguridad ciudadana, desactivación de explosivos y/o detección de los mismos, etc.

2. Utilización en entornos cerrados habitables. En este ámbito de aplicación se encuentra un amplio sector poblacional, en el que se incluyen niños, ancianos, personas con problemas cognitivos y discapacitados, susceptibles de precisar ayudas más o menos permanentes. Su papel podrá ser asistencial, de rehabilitación, de tele asistencia, etc. De esta forma, tareas como limpiarse las gafas, comer o lavarse los dientes podrán ser ejecutadas por el dispositivo robótico.

Se espera que un día sus tentáculos delgados puedan ser usados para controlar operaciones delicadas en los rincones del cerebro del ser humano.

Sirven para meterse en lugares raros.

Facilitar tareas, se usa como un brazo humano y realiza acciones parecidas.

¿Un robot industrial con seis juntas se asemeja de alguna manera a un brazo humano? tiene la equivalencia de un hombro, un codo y la muñeca. Normalmente, el hombro está montado en una base con una estructura fija en lugar de un cuerpo móvil. Este tipo de robot puede pivotar de seis maneras diferentes, lo que se suelen definir como de seis grados de libertad. En comparación, un brazo humano tiene siete grados de libertad. El trabajo del brazo es moverte mano de un sitio a otro. De forma similar, el trabajo del brazo robótico es mover un dispositivo mecánico final de un sitio a otro. Se pueden poner varios tipos de dispositivo final dependiendo de lo que se esté haciendo o realizando. [27]

3.4.3 GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT

Grados de libertad

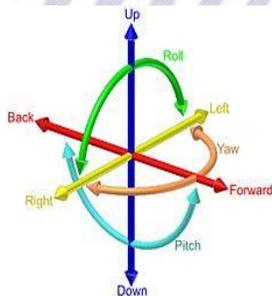


Ilustración 21: 6 Grados de Libertad; Cortesía de Wikipedia.

Se puede definir como cada una de las variables necesarias para obtener los movimientos de un cuerpo en el espacio. El máximo de variables es de 6, cuando el número de grados de libertad es mayor se denomina redundancia.

En un robot industrial se produce una redundancia cuando el número de GDL es menor al número de articulaciones. Este robot industrial tendría más utilidades de acción de los necesarios.

La suma de los grados de libertad

De cada articulación del robot industrial es igual al total de GDL del propio robot. En la práctica en robótica solo se emplean articulaciones de sólo 1GDL, (rotación y prismática) por lo tanto el número de GDL de un robot suele coincidir con el número de articulaciones que posee. [28]

3.4.4 CINEMATICA DIRECTA

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Así la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot, con los vectores que toman sus coordenadas articulares.

El problema de la cinemática directa consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot. [29]

Ejemplo de resolución del problema cinemático directo mediante la transformación homogénea:

La resolución del problema cinemático directo consiste en encontrar las relaciones que permiten conocer la localización espacial del extremo del robot a partir de los valores de sus coordenadas articulares.

Así, si se han escogido coordenadas cartesianas y ángulos de Euler para representar la posición y orientación del extremo de un robot de seis grados de libertad, la solución al problema cinemático directo vendrá dada por las relaciones:

$$x = f_x (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

$$y = f_y (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

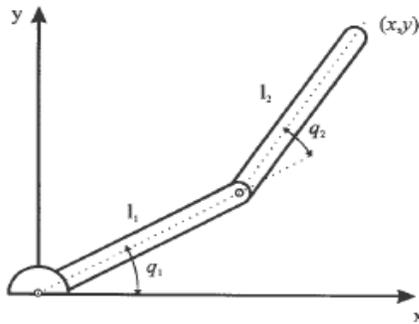
$$z = f_z (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

$$\alpha = f_\alpha (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

$$\beta = f_\beta (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

$$\gamma = f_\gamma (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$$

La obtención de estas relaciones no es en general complicada, siendo incluso en ciertos casos (robots de pocos GDL) fácil de encontrar mediante simples consideraciones geométricas. Por ejemplo, para el caso de un robot con 2 GDL (figura 22) es fácil comprobar que; [29]



$$x = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

$$y = l_1 \operatorname{sen} q_1 + l_2 \operatorname{sen}(q_1 + q_2)$$

Ilustración 22: Robot planar de 2 GDL
[29]

Para robots de más grados de libertad pueden plantearse un método sistemático basado en la utilización de las matrices de transformación Homogéneas.

3.4.5 CINEMATICA INVERSA

El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot $q = [q_1 + q_2, \dots, q_n]^T$. Para que se posiciones y se oriente según una determinada a partir de la localización espacial.

Así cómo es posible abordar el problema cinemático directo de una manera sistemática a partir de la utilización de matrices de transformación homogéneas, e independientes de la configuración del robot, no ocurre lo mismo con el problema cinemático inverso siendo el procedimiento de obtención de las ecuaciones fuertemente dependientes de la configuración del robot. Se han desarrollado algunos procedimientos genéricos susceptibles de ser programados [GOLDENBERG 85] de modo que un computador pueda, a partir del

Conocimiento de la cinemática del robot (con sus parámetros de Denavit Hartenberg, por ejemplo) obtener la n-upla de valores articulares que posicionan y orientan su extremo.

El inconveniente de estos procedimientos es que se trata de métodos numéricos iterativos, cuya velocidad de convergencia e incluso su convergencia en sí no está siempre garantizada la hora de resolver el problema cinemático inverso es mucho más adecuado encontrar una sola solución cerrada. Esto es, encontrar una relación matemática explícita de la forma:

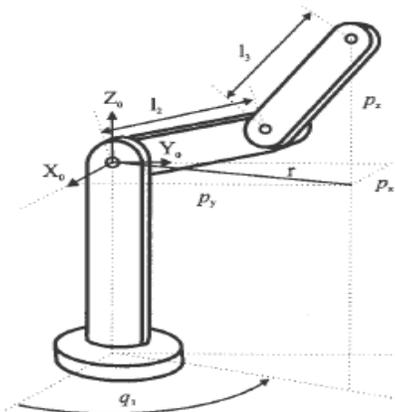
$$q_k = f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$$
$$K = 1 \dots n \quad (\text{GDL})$$

Este tipo de solución presenta, entre otras, las siguientes Ventajas:

1. En muchas aplicaciones, el problema cinemático inverso ha de resolverse en el tiempo real (por ejemplo, en el seguimiento de una determinada trayectoria). Una solución de tipo iterativo no garantiza tener la solución en el momento adecuado.
2. Al contrario de lo que ocurriría en el problema cinemático directo, con ciertas frecuencia la solución del problema cinemático inverso no es única: existiendo diferentes n-uplas $[q_1, \dots, q_n]^T$ que posicionan y orientan el extremo del robot del mismo modo. En estos casos una solución cerrada permite incluir determinadas reglas o restricciones que aseguren que la solución obtenida sea la más adecuada de entre las posibles (por ejemplo, límites en los recorridos articulares).

No obstante, a pesar de las dificultades comentadas, la mayor parte de los robots poseen cinemáticas relativas simples que facilitan en cierta medida la resolución de su problema cinemático inverso. Por ejemplo, si se considera los tres primeros grados de libertad en muchos robots, estos tienen una estructura planar, esto es, los tres primeros elementos quedan contenidos en un plano.

Esta circunstancia facilita la resolución del problema. Así mismo en muchos robots se da las circunstancias de que de los tres grados de libertad últimos, dedicados fundamentalmente a orientar al extremo del robot, corresponden a giros sobre ejes que se cortan en un punto. De nuevo esta situación facilita el cálculo de la n-upla $[q_1, \dots, q_n]^T$ correspondiente a la posición y orientación deseadas. Por lo tanto, para los casos citados y otros, es posible restablecer ciertas pautas generales que permiten planear y resolver el problema cinemático inverso de una manera sistemática. Los métodos geométricos permiten obtener normalmente los valores de las primeras variables articulares, que son las que consiguen posicionar el robot (prescindiendo de la orientación de su extremo). Para ello utilizan relaciones trigonométricas y geométricas sobre los elementos del robot. Se suele recurrir a la resolución de triángulos formados por elementos y articulaciones del robot. Como alternativa para resolver el mismo problema se puede recurrir a manipular directamente las ecuaciones correspondientes al problema cinemático directo. Es decir, puesto que este establece la relación:



$$\begin{bmatrix} n & 0 & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [t_{ij}]$$

Ilustración 23: Robot Articular

onal de Astrofísica,
Optica y Electrónica

3.4.6 TEOREMA DE DENAVIT HARTERBERG

- 1 **Numerar los eslabones:** se llamará "0" a la "tierra", o base fija donde se ancla el robot. "1" el primer eslabón móvil, etc.
- 2 **Numerar las articulaciones:** La "1" será el primer grado de libertad, y "n" el último.
- 3 **Localizar el eje de cada articulación:** Para pares de revolución, será el eje de giro. Para prismáticos será el eje a lo largo del cuál se mueve el eslabón.
- 4 **Ejes Z:** Empezamos a colocar los sistemas XYZ. Situamos los Z_{i-1} en los ejes de las articulaciones i , con $i=1, \dots, n$. Es decir, Z_0 va sobre el eje de la 1ª articulación, Z_1 va sobre el eje del 2º grado de libertad, etc.
- 5 **Sistema de coordenadas 0:** Se sitúa el punto origen en cualquier punto a lo largo de Z_0 . La orientación de X_0 e Y_0 puede ser arbitraria, siempre que se respete evidentemente que XYZ sea un sistema dextrógiro.
- 6 **Resto de sistemas:** Para el resto de sistemas $i=1, \dots, N-1$, colocar el punto origen en la intersección de Z_i con la normal común a Z_i y Z_{i+1} . En caso de cortarse los dos ejes Z, colocarlo en ese punto de corte. En caso de ser paralelos, colocarlo en algún punto de la articulación $i+1$.
- 7 **Ejes X:** Cada X_i va en la dirección de la normal común a Z_{i-1} y Z_i , en la dirección de Z_{i-1} hacia Z_i .
- 8 **Ejes Y:** Una vez situados los ejes Z y X, los Y tienen su direcciones determinadas por la restricción de formar un XYZ dextrógiro.
- 9 **Sistema del extremo del robot:** El n-ésimo sistema XYZ se coloca en el extremo del robot (herramienta), con su eje Z paralelo a Z_{n-1} y X e Y en cualquier dirección válida.
- 10 **Ángulos teta:** Cada θ_i es el ángulo desde X_{i-1} hasta X_i girando alrededor de Z_i .
- 11 **Distancias d:** Cada d_i es la distancia desde el sistema XYZ $i-1$ hasta la intersección de las normales común de Z_{i-1} hacia Z_i , a lo largo de Z_{i-1} .
- 12 **Distancias a:** Cada a_i es la longitud de dicha normal común.
- 13 **Ángulos alfa:** Ángulo que hay que rotar Z_{i-1} para llegar a Z_i , rotando alrededor de X_i .

14 **Matrices individuales:** Cada eslabón define una matriz de transformación:

$${}^{i-1}\mathbf{A}_i = \left(\begin{array}{ccc|c} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

15 **Transformación total:** La matriz de transformación total que relaciona la base del robot con su herramienta es la encadenación (multiplicación) de todas esas matrices:

$$\mathbf{T} = {}^0\mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \dots {}^{n-1}\mathbf{A}_n$$

16 Dicha matriz \mathbf{T} permite resolver completamente el problema de **cinemática directo** en robots manipuladores, ya que dando valores concretos a cada uno de los grados de libertad del robot, obtenemos la posición y orientación 3D de la herramienta en el extremo del brazo. [30]

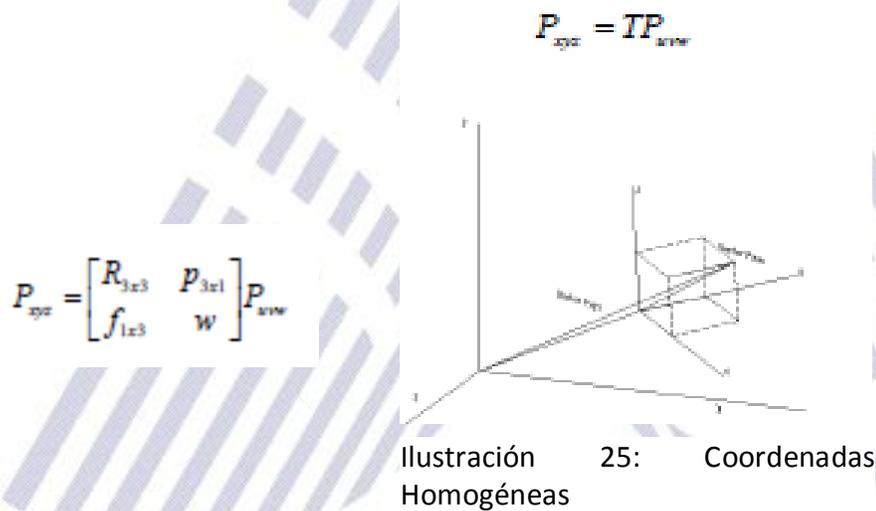
3.4.7 TRANSFORMACIONES HOMOGENEAS

Una matriz de Transformación Homogénea que transforma un vector de posición expresado en coordenadas homogéneas respecto a un sistema de coordenadas que ha sido rotado y trasladado a otro sistema de coordenadas, se define como una matriz de 4 x 4 y en general consistente de cuatro submatrices de la forma [31]. Sea un punto de coordenadas uvw P respecto al sistema UVW, cuyo origen coincide con el origen del sistema XYZ, si sobre el sistema UVW se aplican movimientos de rotación y traslación (ver figura 24) las nuevas coordenadas punto uvw P respecto al sistema fijo XYZ son obtenidas mediante el producto de una matriz de transformación y el vector uvw P

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ f_{1x3} & w \end{bmatrix}$$

Ilustración 24: Matriz de Rotación.

Expresado en coordenadas homogéneas. Nótese que el vector P_{xyz} también está expresado en coordenadas homogéneas.



La matriz de transformación permite localizar los puntos respecto al sistema fijo XYZ que definen una curva en el sistema UVW cuando este ha experimentado movimientos de rotación y traslación. Si el sistema XYZ coincide con la base de manipulador el cual posicionará el efector final sobre cada uno de estos puntos, entonces los puntos xyz P son las coordenadas deseadas del efector final. La matriz de transformación empleada en este trabajo se obtiene mediante la consideración de los siguientes movimientos [31]

- Rotación en el eje x un ángulo α
- Rotación en el eje y un ángulo ϕ
- Rotación en el eje z un ángulo θ
- Traslación en el eje x una distancia de a unidades
- Traslación en el eje y una distancia de b unidades
- Traslación en el eje z una distancia de c unidades

3.4.8 MATRIZ JACOBIANA

En cálculo vectorial, se llama jacobiano o determinante jacobiano al determinante de la matriz jacobiana. Tanto la matriz jacobiana como el determinante jacobiano reciben su nombre en honor al matemático Carl Gustav Jacobi.

La matriz jacobiana es una matriz formada por las derivadas parciales de primer orden de una función. Una de las aplicaciones más interesantes de esta matriz es la posibilidad de aproximar linealmente a la función en un punto. En este sentido, el jacobiano representa la derivada de una función multivariable. [32]

El modelo cinemático de un robot busca las relaciones entre las variables articulares y la posición (expresada normalmente en forma de coordenadas cartesianas) y orientación del extremo del robot. En esta relación no se tiene en cuenta las fuerzas o pares que actúan sobre el robot (actuadores, cargas, fricciones, etc.) Y que puedan originar el movimiento del mismo. Sin embargo, sí que debe permitir conocer, además la relación entre las coordenadas articulares y del extremo, la relación entre sus respectivas derivadas. Así, el sistema de control del robot debe establecer que velocidades debe imprimir a cada articulación (a través de sus respectivos actuadores) para conseguir que el extremo desarrolle una trayectoria temporal concreta, por ejemplo, una línea recta a velocidad constante. [30]

La relación entre ambos vectores de velocidad se obtiene a través de la denominada matriz jacobiana (Figura 26)



Ilustración 26: Matriz jacobiana directa e inversa.

$$\begin{aligned}
 x &= f_x(q_1, q_2, \dots, q_n) & y &= f_y(q_1, q_2, \dots, q_n) & z &= f_z(q_1, q_2, \dots, q_n) \\
 \alpha &= f_\alpha(q_1, q_2, \dots, q_n) & \beta &= f_\beta(q_1, q_2, \dots, q_n) & \gamma &= f_\gamma(q_1, q_2, \dots, q_n)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \sum_1^n \frac{\partial f_x}{\partial q_i} \dot{q}_i & \dot{y} &= \sum_1^n \frac{\partial f_y}{\partial q_i} \dot{q}_i & \dot{z} &= \sum_1^n \frac{\partial f_z}{\partial q_i} \dot{q}_i \\
 \dot{\alpha} &= \sum_1^n \frac{\partial f_\alpha}{\partial q_i} \dot{q}_i & \dot{\beta} &= \sum_1^n \frac{\partial f_\beta}{\partial q_i} \dot{q}_i & \dot{\gamma} &= \sum_1^n \frac{\partial f_\gamma}{\partial q_i} \dot{q}_i
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad \text{con } \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_x}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_\gamma}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_\gamma}{\partial q_n} \end{bmatrix} \Rightarrow \text{Matriz Jacobiana}$$

Ilustración 27: caculo de matriz jacobiana

INSTITUTO NACIONAL DE ASTRONOMÍA,
Optica y Electrónica

3.5 ACTUADORES

Los actuadores son dispositivos capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y de gas. Existen 3 tipos de actuadores: Los actuadores hidráulicos se emplean cuando lo que se necesita es potencia, pero es muy costosa. Los actuadores eléctricos también son muy utilizados en los aparatos mecánicos y electrónicos. Los actuadores neumáticos, los más usados en las industrias, son actuadores de posicionamiento, es decir: posicionar objetos.

Los actuadores son los dispositivos encargados de efectuar acciones físicas ordenadas por algún sistema de control. Esta acción física puede ser un movimiento lineal o un movimiento circular según sea el caso. Se le da el nombre de actuadores eléctricos cuando se usa la energía eléctrica para que se ejecuten sus movimientos. Los actuadores eléctricos se utilizan para robots de tamaño mediano, pues éstos no requieren de tanta velocidad ni potencia como los robots diseñados para funcionar con actuadores hidráulicos. Los robots que usan la energía eléctrica se caracterizan por una mayor exactitud y repetitividad. [33]

3.5.1 SERVOMOTORES



Ilustración 28: Servomotor;
Cortesía de Tower Pro Figura

Quisiera comenzar primero con definir el concepto de servomotor. Es cierto, prácticamente se utiliza la palabra "servo" para referirnos a este elemento cuando se realiza un proyecto, en específico a un servomotor. En el lenguaje común no hay ningún problema, sin embargo en un lenguaje técnico y formal es un término incompleto. Formalmente, un servomotor es un tipo de servomecanismo, y un servomecanismo es un dispositivo que tiene un sistema de corrección con retroalimentación para el control de un parámetro específico.

Los servomotores son dispositivos electromecánicos que consisten en un motor eléctrico, un juego de engranes y una tarjeta de control, todo confinado dentro de una carcasa de plástico.

La característica principal de estos motores es que la gran mayoría no están hechos para dar rotaciones continuas -algunos sí lo hacen pero se hablarán de ellos más adelante- ya que principalmente son dispositivos de posicionamiento en un intervalo de operación. En esta ocasión se tratará exclusivamente de servomotores para modelismo, excluyendo los servomotores industriales.

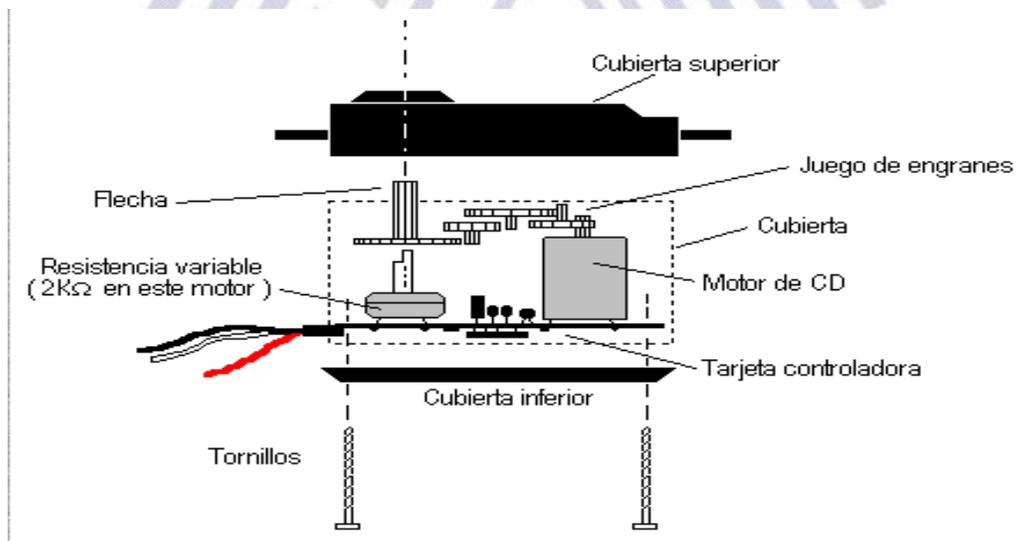


Ilustración 29: Vista Explosionado de todas las partes de un servomotor

Los servomotores funcionan por medio de modulación de ancho de pulso -pulse-width modulation (PWM)- Para los servos para modelismo, la frecuencia usada para mandar la secuencia de pulsos al servomotor es de 50 Hz -esto significa que cada ciclo dura 20 ms- Las duraciones de cada pulso se interpretan como comandos de posicionamiento del motor, mientras que los espacios entre cada pulso son despreciados.

En la mayoría de los servomotores los anchos de pulso son de 1 ms a 2 ms, que cuando son aplicados al servomotor generan un desplazamiento de -90° a $+90^\circ$ por lo que, de una

manera más sencilla, el ángulo de giro está determinado por el ancho de pulso; si el ancho de pulso fuera de 1.5 ms, el motor se posicionará en la parte central del rango – a 0°-

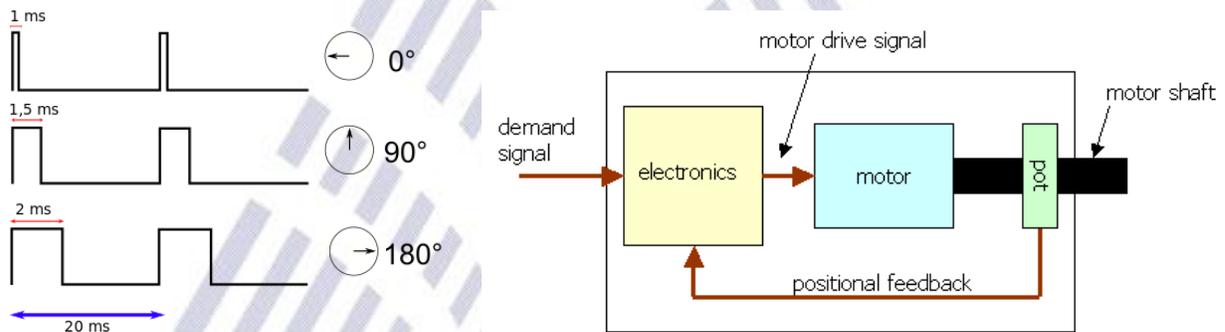


Ilustración 30: Diagramas de Funcionamiento- de un servomotor

La tarjeta electrónica dentro de la carcasa interpreta las instrucciones de un controlador externo. El código de comando especifica el ángulo de rotación deseado medido como un offset en ambos lados de la posición central del rango del motor. El motor gira rápidamente a la posición específica y se detiene en ese punto -el potenciómetro, que está acoplado al eje de salida, sirve para enviar una señal de retroalimentación que asegure la posición del motor- En tanto que la señal de comando continúe y se mantenga activado el motor, el motor se mantendrá en la misma posición, incluso si hay una fuerza que lo haga rotar y que sea menor a su torque. Si no hay alguna fuerza, el motor, que estará en una posición estacionaria, consumirá poca corriente. Dado que muchos de los microcontroladores tienen pines asignados para usar la modulación por ancho de pulso -PWM- y pueden conseguirse fácilmente, son los elementos empleados para el control de las secuencias de pulsos para los servomotores, aunque éstos pueden ser substituidos por un temporizador 555. En otros casos, pueden emplearse tarjetas controladoras que tengan conexión USB para que por medio de ella el servo pueda ser controlado a través de la computadora. [34]

3.6 TARJETA ARDUINO NANO

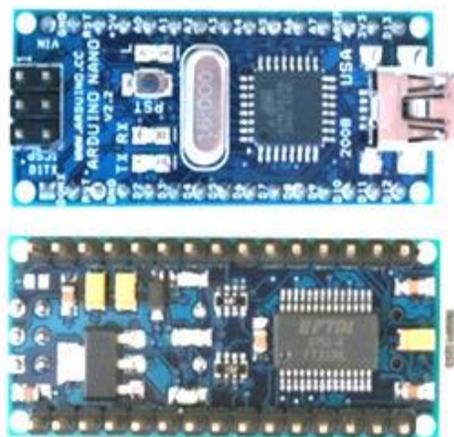


Ilustración 31: Placa Arduino Nano 328 vista por las dos caras [35]

La placa Arduino Nano es una placa de prueba pequeña y completa basada en ATmega328. Tiene funcionalidad similar al modelo Arduino Duemilanove, pero en un módulo DIP. Solo carece de jack de alimentación DC y funciona con un cable Mini-B USB en lugar de uno estándar. Las características de entrada salida son que cada uno de los 14 pines digitales del Nano pueden ser usados como entrada o salida, usando las funciones `pinMode()`, `digitalWrite()`, y `digitalRead()`. Operan a 5 voltios. Cada pin puede proveer o recibir un máximo de 40mA y poseen una resistencia de pull-up (desconectada por defecto) de 20 a 50 kOhms. Además algunos pines poseen funciones especializadas: [35]

- Serial: 0 (RX) y 1 (TX). (RX) usado para recibir y (TX) usado para transmitir datos TTL vía serie. Estos pines están conectados a los pines correspondientes del chip USB-a-TTL de FTDI.
- Interrupciones Externas: pines 2 y 3. Estos pines pueden ser configurados para activar una interrupción por paso a nivel bajo, por flanco de bajada o flanco de subida, o por un cambio de valor. Mira la función `attachInterrupt()` para más detalles.
- PWM: pines 3, 5, 6, 9, 10, y 11. Proveen de una salida PWM de 8-bits cuando se usa la función `analogWrite()`.
- SPI: pines 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Estos pines soportan la comunicación SPI, la cual, a pesar de poseer el hardware, no está actualmente soportada en el lenguaje Arduino.

- LED: Pin 13. Existe un LED conectado al pin digital 13. Cuando el pin se encuentra en nivel alto, el LED está encendido, cuando el pin está a nivel bajo, el LED estará apagado.

El Nano posee 8 entradas analógicas, cada una de ellas provee de 10 bits de resolución (1024 valores diferentes). Por defecto miden entre 5 voltios y masa, sin embargo es posible cambiar el rango superior usando la función `analogReference()`. También, algunos de estos pines poseen funciones especiales:

- I2C: Pines 4 (SDA) y 5 (SCL). Soporta comunicación I2C (TWI) usando la librería Wire (documentación en la web Wiring).

Hay algunos otros pines en la placa:

- AREF. Tensión de referencia por las entradas analógicas. Se configura con la función `analogReference()`.
- Reset. Pon esta línea a nivel bajo para resetear el microcontrolador. Normalmente se usa para añadir un botón de reset que mantiene a nivel alto el pin reset mientras no es pulsado.

Las características más destacadas son:

- Microcontrolador ATmega328 con cargador de inicio pre programado.
- Tensión de entrada (recomendada): +7 a +12 V.
- Tensión de entrada (límites): +6 a +20 V.
- 14 pines GPIO (de los que 6 ofrecen salida PWM).
- pines de entrada analógica.
- Corriente DC por pin de E/S: 40 mA.
- Memoria Flash de 32 KB (2 KB para cargador de inicio).
- SRAM de 2 KB.
- EEPROM de 1 KB.

- Admite comunicación serie IC.
- Frecuencia de reloj: 16 MHZ.
- Dimensiones: 0,73" x 1,7".

3.7 DESCRIPCIÓN DE UNA TARJETA ODROID

Este dispositivo nos proporciona mucha más potencia y opciones que Raspberry Pi a base de hardware puro y duro.

Por ello incorpora un procesador Samsung Exynos 5422 de 8 núcleos con arquitectura big.LITTLE (4 cores ARM Cortex A15 4 ARM Cortex A7) que funcionan a una velocidad máxima de 2 Ghz e integra una GPU ARM Mali-T628 MP6 (compatible con OpenGL ES 3.0/2.0/1.1 y OpenCL 1.1), motivo por el que los creadores no han querido jugársela y han implementado en este Odroid-XU4 refrigeración activa, como bien podéis ver en la imagen de abajo.



Ilustración 32: Tarjeta ODROID;
cortesía de ODROID

Para complementar este potente procesador fabricado por Samsung, el Odroid-XU4 incorpora 2 Gb de memoria RAM LPDDR3 (PoP Stacked, integrada en el PCB) y un controlador de memoria flash eMMC 5.0 de 8 bits con conector para módulos externos de memoria eMMC, por lo que no incorpora almacenamiento integrado de serie.

No obstante, admite tanto módulos eMMC como tarjetas microSD, así que en la

Raspberry Pi se le puede instalar el sistema operativo en una tarjeta externa sin problema.

[36]

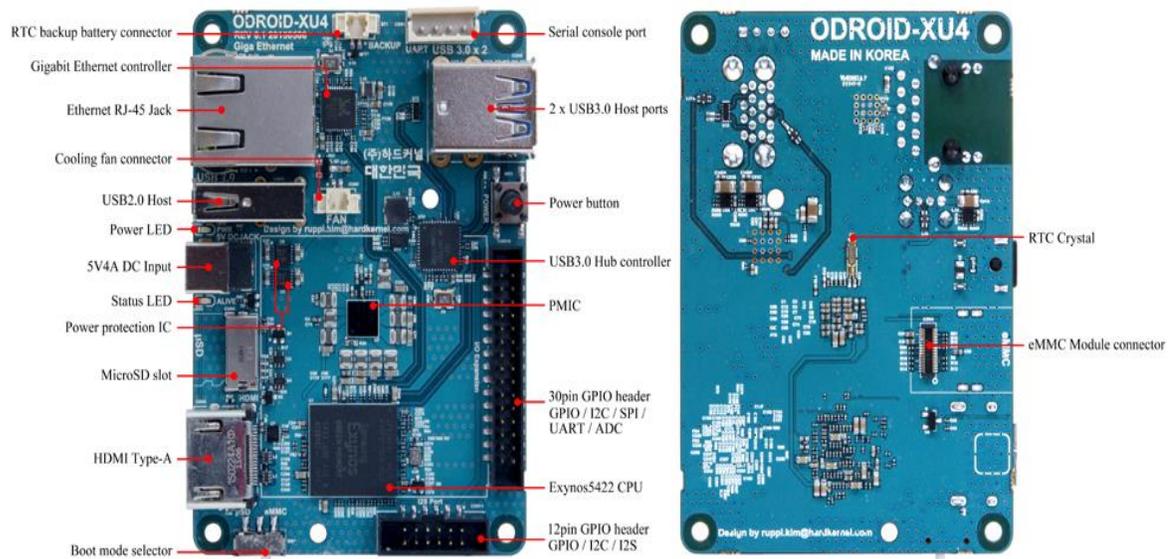


Ilustración 33: Descripción detallada de la tarjeta ODROID

3.8 BATERIAS LIPO

Una batería de Polímero de Litio, comúnmente llamadas baterías de lipo, son las baterías de última generación dentro del mundo del radio control. Son batería con una excelente relación entre capacidad, peso, volumen y tensión (voltaje).



Ilustración 34: batería Lipo

Estas baterías al ser comparadas con sus antecesoras, las de Ni Mhi o Ni Cd, ganan por goleada. Donde antes teníamos un pack del tipo 7.2v y 3000mha de Ni Mhi o Ni Cd, ahora tenemos uno de 7.4v 6.000Mha de Lipo que pesa casi la mitad y que nos da incluso una mayor descarga. Esto hace que si la nueva batería va a instalarse en un coche rc por ejemplo, tengamos un coche más ligero, más potente y que va a poder funcionar durante más tiempo.

Voltaje de una Batería de Lipo: las baterías de Lipo están formadas por elementos de 3.7v. A estos elementos también se les suele llamar células. En radio control se suelen utilizar baterías de Lipo desde 1 elemento hasta 8 elementos (pueden ser más!!!) en función del tipo

de modelo en el que va a ir instalada y las prestaciones que queramos que tenga el mismo. Lo más habitual son baterías de 1, 2 o 3 elementos. Para saber el voltaje de una batería solo tenemos que multiplicar el número de elementos por el voltaje de este, ya que se conectan en serie (2S por ejemplo). Es decir que una batería de 2 elementos tendría el voltaje de 7.4v ($3.7v \times 2 \text{ elementos} = 7.4v$).

Hay que tener en cuenta el voltaje de nuestra batería ya que el variador o regulador de nuestro avión, coche, helicóptero, lancha rc al que la conectemos, tendrá unas especificaciones máximas y mínimas y un sobre voltaje podría dañar el variador y un voltaje menor de lo necesario haría que las prestaciones no fueran las suficientes. Te recomendamos que leas atentamente las instrucciones del modelo y del variador para saber que batería necesitas.

Por otro lado el voltaje es importante ya que hoy en día los motores trifásicos o brushless dan una cantidad de revoluciones por minuto en función del voltaje de la batería. Verás que en las especificaciones de tu motor aparece un número seguido de las letras KW. Si multiplicas el número por el voltaje de tu batería el resultado son las vueltas por minuto de tu motor. Por ejemplo, si tu coche rc lleva un motor brushless que saca 3500KV y le has montado una batería de 7.4v las revoluciones totales por minuto serán, 25.900RPM. Ahora bien, si en este mismo coche resulta que tu variador admite un voltaje de hasta 14v. Por ejemplo y le montas una batería de 11.1v tendrías la friolera de 38.850RPM (una pasada) y sin aumentar apenas el peso de la batería...

- Capacidad de una Batería de Lipo: Uno de los grandes avances conseguido con las Lipo es en el tema de la capacidad y duración. Tenemos baterías más ligeras con menos volumen y con mayor capacidad que nunca.

Estas se pueden conectar unas con otras en paralelo de tal manera que la capacidad total sería la suma de las capacidades individuales. Es decir que si conectamos en paralelo 2 elementos o packs ya montados de 2.000Mha conseguiríamos uno de 4.000Mha.

-
Descarga de una Batería de Lipo: cuando tengas que comprar una batería de Lipo ten en cuenta el amperaje de descarga que especifica el fabricante del modelo donde la va a ir

Instalada. Los motores tiene un consumo en función de la potencia que desarrollan, la hélice que empujan, el tamaño y peso del modelo que tienen que propulsar, si llevan reductora o no, etc., por esto necesitarás una batería que sea capaz de cubrir estas necesidades. En las especificaciones de tu modelo de radio control tiene que aparecer especificado el consumo máximo del motor y una recomendación de qué tipo de batería sería suficiente para que este funcione sin problema. Por otro lado las Lipos a parte de la especificación de los miliamperios de la batería, también se detalla una referencia de descarga máxima que viene expresada con un número seguido de una 'C' (25C), donde C es el amperaje de la batería.

Para saber que amperaje descarga nuestra batería tenemos que multiplicar los miliamperios de esta por el número delante de la C. Por ejemplo, si tenemos una batería de 4.000Mha y 30C, la descarga máxima a la que podemos someter esta batería sería 120.000Mha (120A). Es decir que la podemos montar en un modelo RC que consuma como máximo 100 o 110A ya que siempre es necesario dejar un margen por si se produce algo que no tengamos controlado.

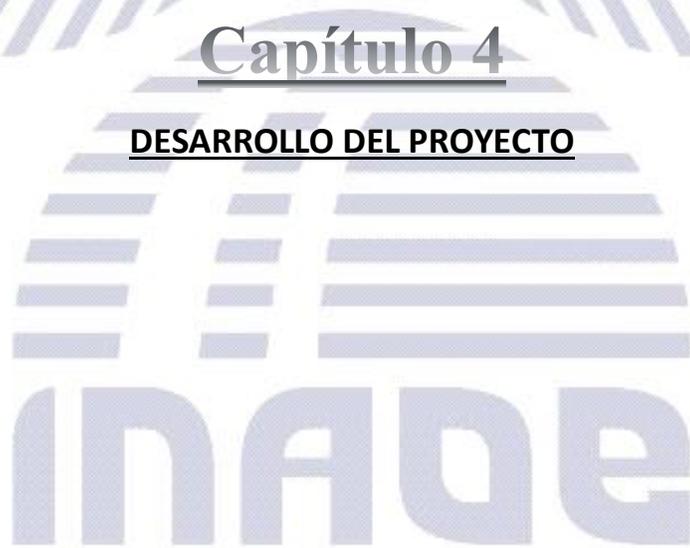
En algunas batería de Lipo, aparecen una referencia de descarga indicada por dos valores 20C-30C, esto nos indica que el fabricante está diciendo que la batería se puede descargar a 20C de manera continuada y que la batería podría darnos hasta 30C por un tiempo limitado, unos segundos (que el fabricante especificará en las instrucciones).

El descargar la batería con amperajes superiores a los indicados por el fabricante hará que tu batería se dañe y sea inestable. [37]



Capítulo 4

DESARROLLO DEL PROYECTO



**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**

INTRODUCCIÓN

En el sector de la limpieza e higiene profesional, existe una serie de riesgos laborales específicos o que se dan con más asiduidad. [38] Lo cual es importante a considerar para limpiezas de superficies como ventanas, vidrios de edificios o superficies de formas verticales de grandes alturas. De la problemática de limpieza en áreas poco accesibles, nace la idea de diseñar un sistema, totalmente autónomo en un dron con la capacidad de hacer limpiezas en dichas superficies en forma vertical con un manipulador de 4 grados de libertad. De tipo antropomórfico.

Se introdujo al concepto de los vehículos aéreos no tripulados (AUV), y se adentró en el estado del Arte de Drones con manipuladores de varios grados de libertad tanto en el control con el uso de manipuladores , como pinzas o elementos de sujeción, para la manipulación de un objeto o la realización de una tarea en específica. Para llegar a un diseño y la misma construcción del brazo Robótico de 4 grados de libertad el cual llevará el Dron DJI Matrice 100 en su parte inferior.

A continuación se explicara a detalle cada uno de los aspectos tomados en consideración para el diseño y desarrollo del brazo de 4 grados de libertad, la idea del brazo y de nuestro propio diseño nació de una larga revisión de trabajos anteriores a este proyecto con el cual se concluyó son muchos los avances y aportaciones en este campo de investigación de gran relevancia y de gran importancia por el gran desarrollo que representan a los Aviones no tripulados.

Se módico inicialmente nuestro velico aéreo debido a que sus medidas fiscas no satisfacían las necesidades de diseño en cuanto a las dimensiones de altura como se describe,

A continuación y posterior a ello se adentrara en la explicación del desarrollo de nuestro brazo Robótico de 4 Grados de Libertad.

4.0 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL DRON MATRICE 100

El dron Matrice 100 es el de la figura mostrada a continuación, es un dron diseñado y construido por la empresa DJI:



Ilustración 35. Matrice 100; Cortesía de DJI.

Una de las características principales, por el cual se eligió este dron fue el entorno de desarrollo, ya que la empresa que lo fabrica, diseño y construyo este dron como una plataforma de desarrollo a en diferentes áreas de la ciencia tales como lo es para nuestro caso en el área de la robótica.

El dron cuenta con un SDK (software development kit), es un kit de desarrollo es decir, este cuenta con una plataforma para ser programado, con la finalidad de investigar sobre su comportamiento e ir implementado diferentes tipos de controles como PID, FLC manejado por otro tipo de software. Al Diseñar un brazo robótico con grados de libertad el cual es suficientes para realizar tareas de mantenimiento y limpieza en superficies verticales y Horizontales se consideró las limitaciones en cuanto a la carga máxima que puede soportar en vuelo el dron Matrice 100.

Siendo este diseño el que resuelva los problemas de peso y dimensiones, tal como es el caso de la problemática a resolver teniendo como primer limitación un lugar para la sujeción del brazo robótico por consiguiente problemas de atura de las patas de aterrizajes.

El dron Dji Matrice 100 cuenta con una altura máxima de (13 cm) para sus patas de aterrizajes, por lo cual para nuestro diseño, fue necesario el rediseño de las patas de aterrizaje.

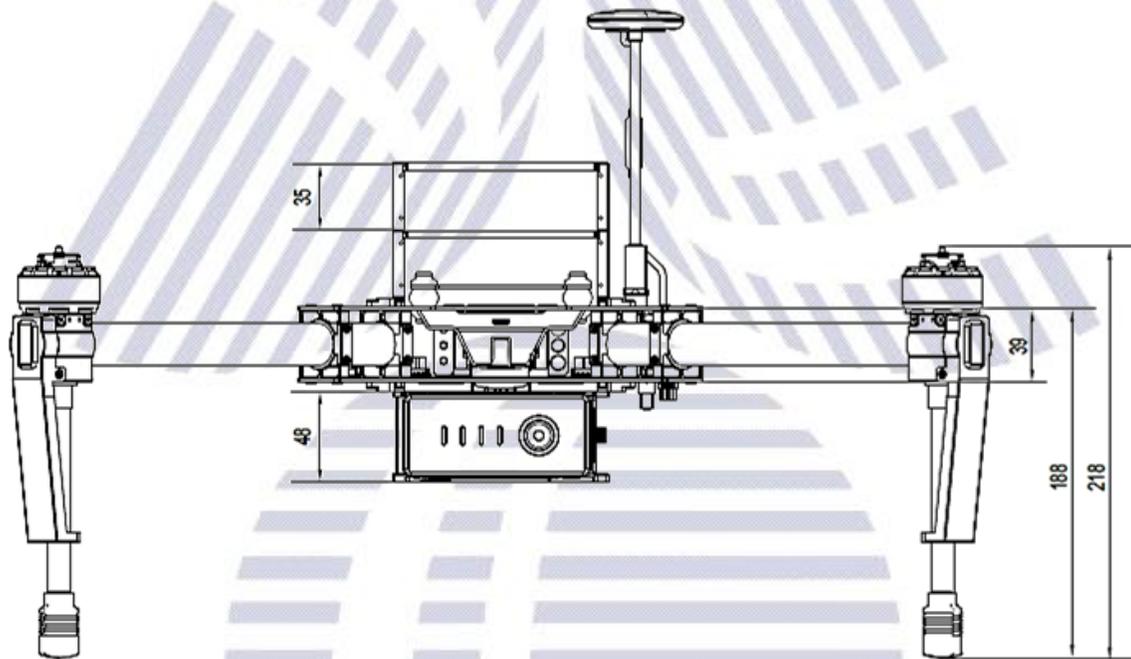


Ilustración 36. Medidas físicas de las Patas de Aterrizaje del Drone M100

Como muestra la figura 36. La dimensión de la pata de aterrizaje es de 188mm – 39mm, dando como resultado 149 mm el equivalente a 14.9 mm, medido de la parte inferior de la pata de aterrizaje, hasta donde se rosca la pata de aterrizaje original menos el espacio ocupado por la batería del Dron por lo que se optó por diseñar y construir unas nuevas patas de aterrizajes.

Cabe mencionar que las patas de aterrizajes cuentan con amortiguadores internos y sus respectivos protectores de los amortiguadores, que van en los extremos finales de las patas de aterrizajes, estos no fueron tomados en cuenta para el diseño debido a su complejidad de construcción.

4.1 DISEÑO DE NUEVAS PATAS DE ATERRIZAJES PARA EL DRON DJI M100.

El dron dji Matrice 100, fue modificado debido a sus dimensiones en cuanto a su altura de patas de aterrizaje, puesto que el diseño del brazo robótico requiere un dimensión mayor, de espacio para poder guardarlo debajo de él.



Ilustración 37. Patas de Aterrizaje del Dron Dii Matrice 100

En la figura anterior se puede mostrar las patas de aterrizaje originales del dron Matrice 100 las cuales fueron rediseñadas, tal como se mostrara a continuación:



Ilustración 38. Patas de aterrizaje Diseñadas de 35 cm

Para la parte del diseño se utilizó el programa SolidWorks 2013, en el cual se diseñó una sola pieza de la pata de aterrizaje, para crear un plano con el cual se pudiera fabricar las piezas.

Una vez analizadas las patas de aterrizajes originales, de las cuales se replicaron las siguientes observaciones. Las patas de aterrizaje se sujetan al dron mediante un roscado de tipo no estándar la cual fue uno de los aspectos tomados en cuenta, debido al costo del dron este debía ser manejado con mucho cuidado.

El diseño de las patas de aterrizajes se hizo en dos piezas, para finalmente tener una sola pieza de unión en nuestro ensamblaje final. Las primeras piezas maquinadas fueron las cuatro roscas en un tubo hueco de 12 mm, en diámetro externo con la respectiva rosca estándar M12x1.75 tal como se ilustra en la figura 39.

Como pieza final del ensamble se diseñó la parte las extensiones de las patas de aterrizajes considerando, como material una varilla de aluminio de 12mm el cual llevo un vaciado de “8 mm”, con el fin de quitarle peso a la estructura de las patas de aterrizajes del dron.

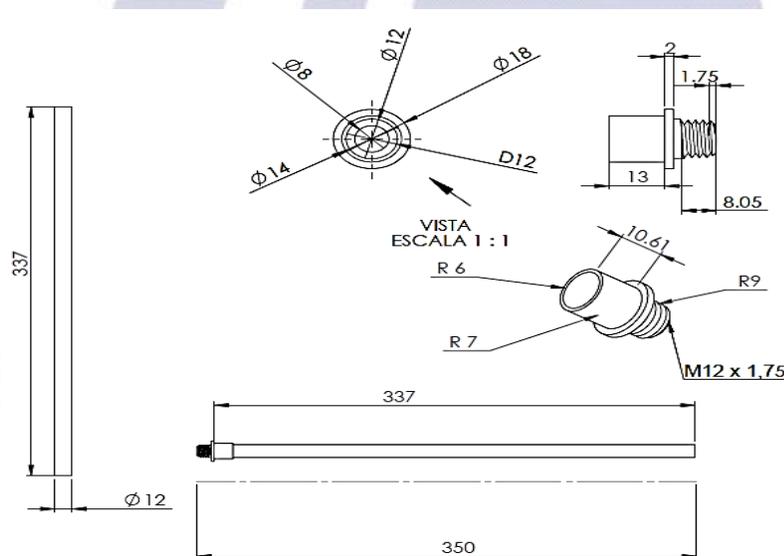


Ilustración 39. Plano de especificaciones para el maquinado de piezas en

El tipo de varilla o barra para las nuevas patas del Dron fue de Aluminio estándar de $\frac{3}{4}$ de pulgada con el cual se maquino a una medida milimétrica de 12mm de diámetro, se hizo un vaciado antes mencionado quedando el tubo de aluminio con un espesor de 1.2 mm, el cual fue hecho de esa manera debido a las consideraciones del peso que se añadió a cada pata de aterrizaje debido a la densidad del material (Aluminio).

La primera pieza que se fabrico fue el roscado de la pata de aterrizaje, esta se inserta dentro del brazo del Dron M100, para sujetarse del dron y así poder tener un agarre mayor de sujeción a cada brazo del dron M100. La rosca fue estándar con un corrido de cuerdas de 10 .61 mm las cuales fueron necesarias debido a diseño de las cuerdas tipo hembra donde se inserta dentro de los brazos del dron.



Ilustración 40. Dron Matrice 100 con patas de aterrizaje Modificado

En la ilustración anterior se muestra el Dron Matrice 100, con las modificaciones de sus patas de aterrizaje. Es necesario mencionar la diferencia de pesos por cada pata de aterrizaje original de 9l Dron, dado que las patas de aterrizaje originales tienen un peso máximo de 5 veces el valor del peso específico original.

4.2 PRUEBAS DE VUELO CON LAS NUEVAS PATAS DE ATERRIZAJE.

Para la validación de las nuevas patas de aterrizajes que se diseñaron para el dron Matrice 100, se planteó un vuelo con las precauciones de acuerdo a las especificaciones del manual de DJI del Matrice 100, la cual nos especifica, que las condiciones de vuelo normal para el Dron Matrice 100 son las siguientes;

1. No volar el dron bajo la lluvia.
2. Asegurarse que todas las partes de la estructura, así como los actuadores se encuentren en buen estado.
3. Verificar las condiciones de las hélices de cada brazo del dron, en caso de daño repara o cambiarla.
4. Verificar que cada motor este instalado de forma correcta en cada vuelo.
5. Asegurarse que cada cable este correctamente asegurado en cada vuelo.
6. Mantener contacto visual de la aeronave, para evitar contacto con edificios, líneas de alto voltaje, arboles altos o líneas de vuelo comercial.

Estas son las precauciones tomadas para esta prueba de vuelo.

El Dron M100 hizo un vuelo de 15 minutos en condiciones normales, con las precauciones antes descritas y su vuelo no supero la altura de 15 metros, con lo cual se pudo observar, una correcta estabilización del Dron con las nuevas patas de aterrizaje.

Una de las observaciones más importantes fue que el peso fue considerable como se ha mencionado en el tema anterior. Y el centro de masa del dron no se modio ni provoco una perturbación al controlador de vuelo.

El dron se mantuvo estable durante 5 minutos en una sola posición y posterior a ello se movió de izquierda a derecha acelerando y desacelerando su velocidad, para observar el comportamiento, con lo cual la respuesta fue satisfactoria para nuestro rediseño de las patas de aterrizajes.



Ilustración 41. Área de despegue del Dron M100

En la figura 41. Se puede apreciar el área de despegue en el cual se realizó el vuelo del dron M100, mostrando una superficie plana en pasto natural, para la realización de un despegue normal y sin perturbaciones.



Ilustración 42. Despegue del Dron



Ilustración 43. Movimiento de izquierda a derecha

En la primera figura 42. Se muestra al Dron a una altura de 3 metros aproximadamente, volando con el control automático, con una buena estabilidad de vuelo. Y para la figura 43.

Ubicada en la parte derecha, se muestra el vuelo de controlado de izquierda a derecha el cual fue de igual manera muy estable

A continuación se muestra la vista de Dron a una altura de 15 Metros aproximadamente, vista desde la parte inferior del Dron y con un vuelo totalmente autónomo, con una respuesta de estabilidad visual muy buena.



Ilustración 44. Vuelo a 15 Metros de altura



Ilustración 45. Aterrizaje final de las pruebas de observaciones

En la figura 45. Se muestra el aterrizaje del M100 con buena estabilidad, en el cual son despreciables las perturbaciones, debido a lo poco observable en sus movimientos, cabe mencionar que para terrenos con pasto u otro tipo de base de aterrizaje blanda, no es notorio la ausencia de amortiguadores, estos como ya antes mencionado no fueron diseñadas.

4.3 CONSIDERACIONES DE CARGA Y DIMENSIONES EN EL MANIPULADOR

El Dron Matrice 100, en su manual diseñado por la propia empresa DJI advierte de las precauciones de vuelo y características físicas tanto como mecánicas para las cuales fue diseñado este dron. Una de las principales consideraciones al diseñar y proponer un modelo del brazo robótico fue, las consideraciones de peso:

El peso máximo propuesto por la marca DJI para el dron Matrice 100 es de 1.2Kg tal como nos dice en un apartado de pesos y medidas, debido a que a este se le suma los pesos del dron considerando un peso máximo de 3.5kg el cual es el máximo peso soportado por los motores y el máximo torque generado por las hélices para el despegue y vuelo de la aeronave. Dicho lo anterior el peso que se tiene para diseñar el brazo robótico es de 1kg, contando la electrónica que por electrónica se entiende por la tarjeta controladora de los actuadores.

Otro punto importante es la dimensión necesaria que debe cubrir el brazo robótico en su espacio de trabajo. El brazo robótico debe operar en un espacio de 1.20 metros.

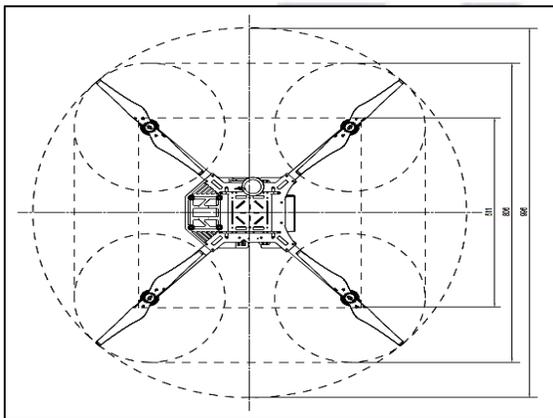


Ilustración 46. Medidas exterior e Interior del Dron M100

En la figura 46. Se muestra la medida exterior necesaria que debe superar para poder limpiar una superficie vertical, para la cual es la propuesta de diseño y su tarea en específico del brazo robótico y sobre todo uno de los factores más importantes es la distancia necesaria a la cual se debe volar el Dron Matrice 100.

La distancia necesaria es de 1 metro para volar el dron cerca de superficies verticales o cualquier superficie que genere un efecto de remolino con respecto al aire que generan las 4 hélices del dron. Ya que este efecto causa severas perturbaciones en un vuelo constante.

4.4 DISEÑO DE LAS ARTICULACIONES Y MECANISMOS DEL BRAZO ROBÓTICO

Las articulaciones para el brazo robótico fueron diseñadas en SolidWorks 2013, estas fueron diseñadas para ser impresas con impresoras 3D en el material ABS, se escogió este tipo de materiales por su versatilidad y su resistencia mecánica, en cuanto a versatilidad nos referimos a que es un material común en el área de impresiones 3D, ya que existen otros tipos de materiales, como el PLA o el Z-ultra.

El material ABS tiene como ventaja su peso, ya que este es una materia que tiene un compuesto de filamentos orgánicos que lo hace más ligero y resistente al mismo tiempo.

Otro punto importante es su resistencia mecánica como antes sea mencionado, este tipo de materia en común no es más resistente que el PLA, pero si es más ligero, que el anterior, y para el esfuerzo mecánico al que estarán nuestra piezas, el material entra en el rango del esfuerzo al que someteremos nuestras piezas del robot, seguidamente se mostrara y explicaran las piezas diseñadas y posterior a ello se hará un análisis de esfuerzo mecánico.

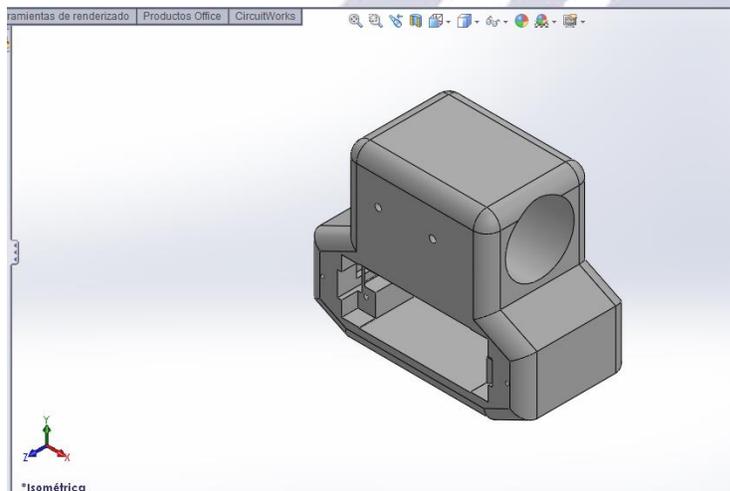


Ilustración 47. Pieza 1 para las articulaciones

La primera pieza tal como se muestra en la figura ##, es una conexión de una de las articulaciones que conformaran cada una de nuestras revolutas.

en esta imagen se puede apreciar la forma de nuestra primera articulación, hay que mencionar que esta articulación es la misma que llevara en cada

una de las uniones que conformaran cada una de sus articulaciones y estas a su vez están compuestas de dos piezas que conforman la articulación final, en donde lleva cada uno de los actuadores(servomotores).

Para la unión entre nuestros actuadores y nuestros eslabones se diseñó la pieza anterior tal como se puede observar en su exterior, esta tiene acabados en su alrededor para hacer más ergonómico su diseño y en su interior contiene cavidades hechas con operaciones de extrusión y cortes en SolidWorks, con las cuales se aseguró que los servomotores a utilizar tuvieran las medidas necesarias para ser sujetadas por nuestra pieza.

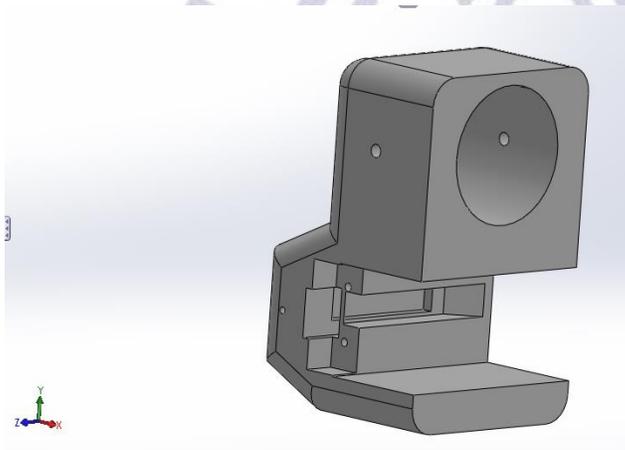


Ilustración 48. Pieza 1 seccionada a la mitad.

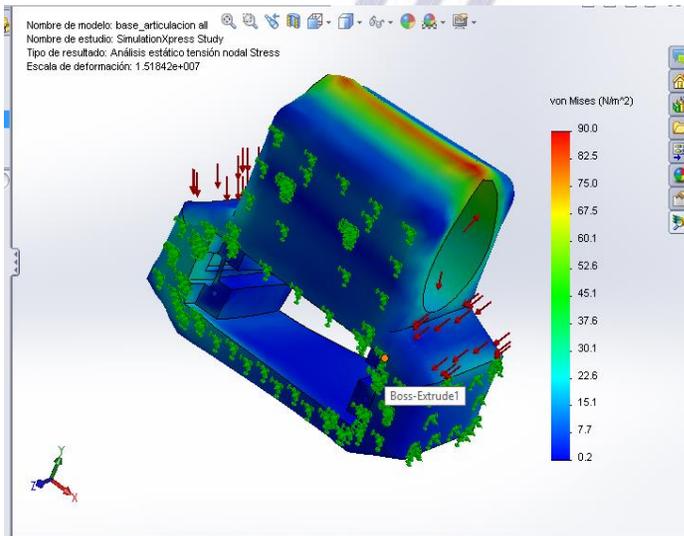
A continuación se muestran las operaciones de SolidWorks hechas en la pieza, el rectángulo en su interior, tal como lo muestra la figura 47, es para que entre el servomotor en su interior y en la figura 48, se muestran otras operaciones, en forma de rectángulo y cortes hechos a la pieza en su interior, las cuales fueron para los cables del

servomotor y molduras para sujetar adecuadamente nuestro actuador.

El servomotor es un MG999 de plástico en su exterior y en su interior es metálico (engranes), por lo que fue necesario considerar sus tolerancias, debido a que este componente no puede entrar fatigado en nuestra pieza, para ello se dejó una tolerancia de +0.5mm de cada uno de sus costados.

Los lugares que soportan los actuadores fueron analizados mecánicamente y para ello se hizo uso de una herramienta en SolidWorks que nos provee de las herramientas para analizar mecánicamente la estructura y su resistencia mecánica las cuales se fueron aplicadas en cada una de las piezas diseñadas para nuestro brazo robótico.

En la figura 49, se puede apreciar el análisis de nuestra pieza anterior en la cual se muestra el análisis de Von mises simulado en SolidWorks, este que configurado para FSD: 1 (factor de seguridad).



Como antes se ha mencionado el FSD fue de 1 con un peso añadido de 1kg, el cual fue el peso máximo que cada una de nuestras articulaciones tendrán que soportar sin entrar en fatiga mecánica, debido a que este tipo de material no presenta una deformación elástica considerable como otros materiales.

Ilustración 49. Análisis de Von Mises

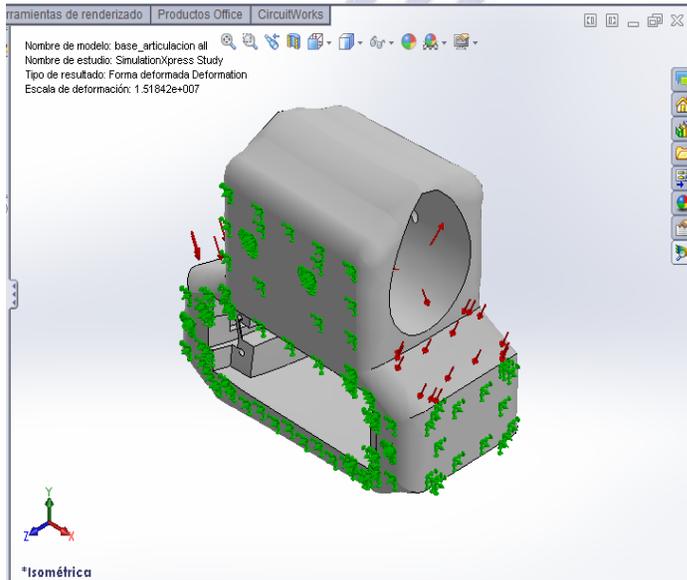
Este material al superar su esfuerzo

máximo de deformación, el material comienza a ceder es decir se fractura provocando el daño de la pieza. Es por ello que nos hemos dado a la tarea de prever cualquier tipo de fallo mecánico por fatiga o esfuerzos de deformación.

En la figura 49, se muestra las partes de la pieza 1 de la articulación que pueden llegar a un esfuerzo máximo de deformación y pasar a punto de fatiga hasta romperse como es el caso de las partes azules que pintan la pieza esas regiones son las que están sometidas a menos esfuerzos a ellas le siguen las regiones verdes y como puntos de interés y amarillo y rojo para puntos de la pieza en donde la fatiga superada a este peso provocara la ruptura de dicha área.

El máximo peso soportado en estos puntos son para 4kg y 5kg en la parte que sujetara los eslabones y otras cargas axiales que fueron indicadas debido a que la pieza estará en tensión por el peso del actuador hacia abajo y por tensión de igual manera por el eslabón quien ejercerá fuerza sobre el a medida que el peso total aumente en cada una de las piezas siguientes.

Las fuerzas a compresión para la pieza están dentro de la pieza justo donde se sitúa el actuador y otras fuerzas se pueden encontrar en la parte donde se insertara el eslabón cilíndrico.

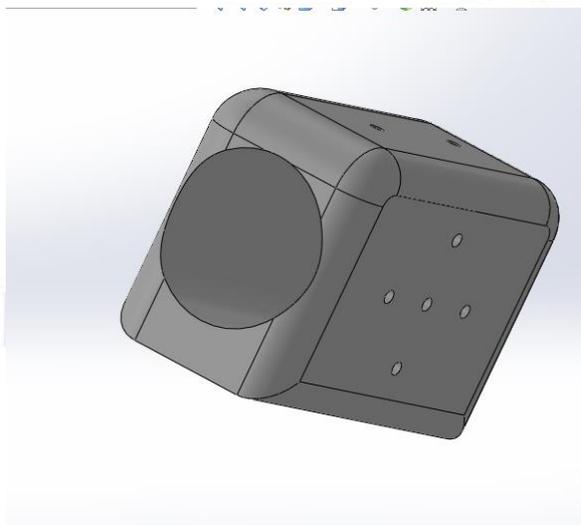


El peso máximo añadido para el análisis de desplazamiento en sus costados fue de 10kg, superando la carga máxima a la que el brazo esta propuesto en su carga máxima final. La pieza 1 tiene un peso de 100.41gramos con un volumen de 9.38 cm³.

Esta articulación es repetida 3 veces ya que como antes se ha mencionado formara parte de cada

Ilustración 50. Puntos de fuerza a tensión y una de las articulaciones de nuestro brazo robótico, a pieza 2 para la articulación completa de cada uno de nuestros grados de libertad en el brazo se explicará a continuación.

mencionado formara parte de cada



En la figura 51. Se muestra la Pieza 2, que forma parte de las articulaciones del brazo robótico. Aquí se puede observar varias perforaciones que nuestra pieza 2 tiene, las cuales son para sujetar los eslabones que van dentro de la pieza y a un costado de la pieza tiene 5 perforaciones más en forma de cruz una en el centro los cuales fueron puestos ahí para sujetar la parte del extremo final de nuestro actuador.

Ilustración 51. Pieza 2 de la articulación

La pieza 2 también se analizó mecánicamente mediante el análisis de von mises con el análisis de esfuerzos y desplazamientos tal como se muestra en la figura 52.

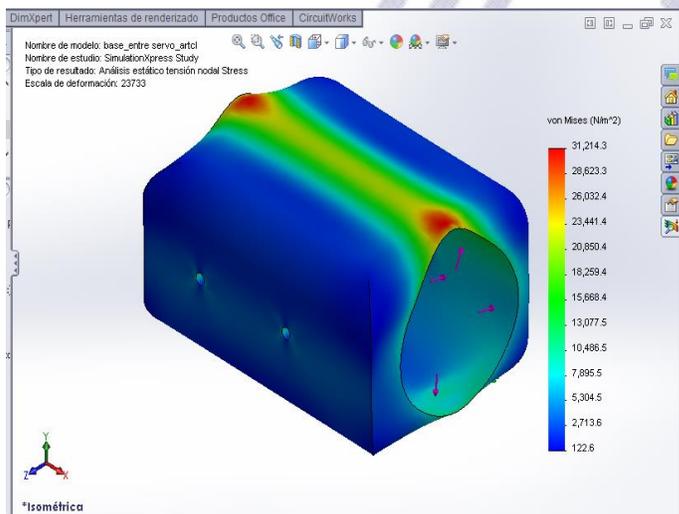


Ilustración 52. Análisis de Von Mises en pieza 2

El análisis de von mises fue aplicado para las tensiones internas y las compresiones que podría sufrir la pieza al tener fatiga en algunas áreas por exceso de peso añadido.

Esta articulación es para cada eslabón y debido a ello el conjunto de piezas que conforman la articulación completa, se calculó

con un valor de esfuerzo máximo al peso total de del brazo robótico y esta pieza también fue con un FSD: 1.

En la figura 53, se muestra el análisis de desplazamiento el cual consiste en aplicar una fuerza

en el punto donde más presión

tendrá nuestra pieza 2 debido al

peso máximo de la carga, con lo que

nuestro análisis de desplazamiento

no muestra el punto más crítico de

la pieza debido al peso excesivo, con

respecto a estas dos articulaciones,

cabe mencionar que conforma el

sistema articulado de cada uno de

los 3 grados de libertad del robot y

el 4° es otro tipo de articulación.

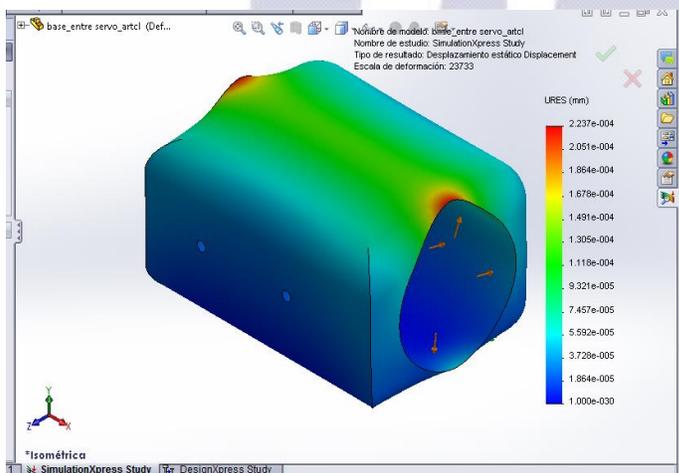


Ilustración 53. Análisis de la Pieza 2

La figura 54, muestra la articulación que se repetirá en tres eslabones seguidos al primer grado de libertad que se ha diseñado con otro mecanismo, para el ensamblaje final de la articulación del brazo antropomórfico fue necesario un actuador y el correcto ensamble tal como se muestra;

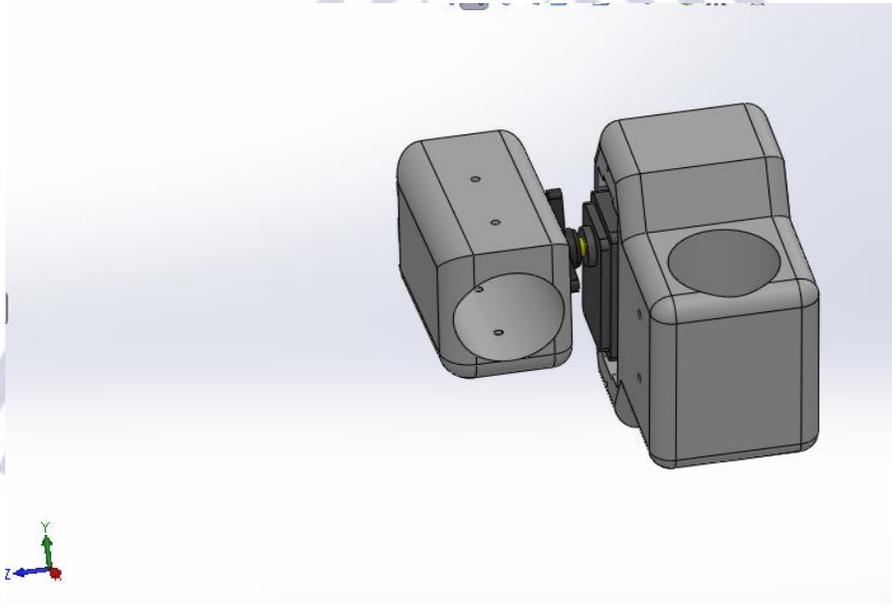


Ilustración 54. Articulación final con Actuador

Seguido del ensamble de cada una de las piezas de nuestra primera articulación, se han creado los eslabones que a continuación se muestran.

Hay que destacar que los eslabones también fueron diseñados para ser impresos con impresoras 3D y que originalmente el tamaño de cada eslabón fue uno de los factores de importancia, debido a que cada uno de estos eslabones tienen como longitud 470 mm y para ello fue necesaria una impresora 3D con esas dimensiones de impresión.

Otro factor importante es la forma de impresión de nuestro eslabón ya que por su dimensión y por características de la impresora 3D utilizada el eslabón no podría ser demasiado delgado para que la impresora 3D pudiera realizar la pieza.

En el diseño el eslabón fue diseñado en forma cilíndrica, con un diámetro exterior de 2.54mm y un diámetro interior de 24 mm, haciendo un relleno de la pieza por regla de la impresora 3D, ya que nuestra pieza fue impresa a una resolución de 16 micras.

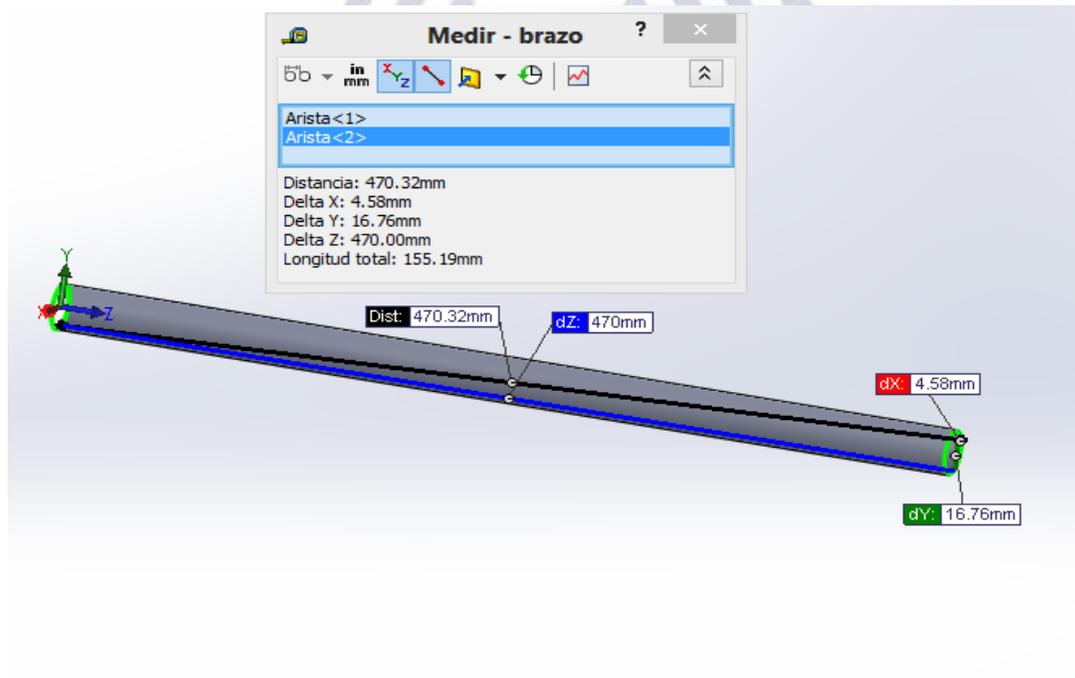


Ilustración 55. Eslabón en forma cilíndrica

En la figura 56, se puede ver el eslabón de 74 cm de largo, el cual fue diseñada para cada una de las articulaciones, el eslabón es solo uno diseño y es utilizado para la segunda, tercera y cuarta articulación.

Esta pieza debes soportar cada vez una articulación y por ello fue diseñada para un esfuerzo máximo de tensión a 10kg. A continuación se muestran resultados del análisis de nuestro eslabón, usando el análisis de von mises para esfuerzos y el análisis de desplazamientos para darle un factor de seguridad de 1 a nuestro eslabón, con el cual se garantiza que nuestro eslabón soportara hasta la última carga del extremo final del brazo robótico y sus tensiones adicionales, es decir las fuerzas añadidas por la tarea que el brazo robótico hará, estas sumaran un peso que estará comprendido entre 2 a 10kg.

El análisis de von mises nos dio como resultado el máximo pesos soportado de nuestro eslabón el cual para todo el eslabón fue el mismo, esto se debe a que como bien se puede apreciar en la figura 57, el eslabón es totalmente uniforme y regular, es decir es de una forma cilíndrica sin ningún otro elemento agregado a la pieza.

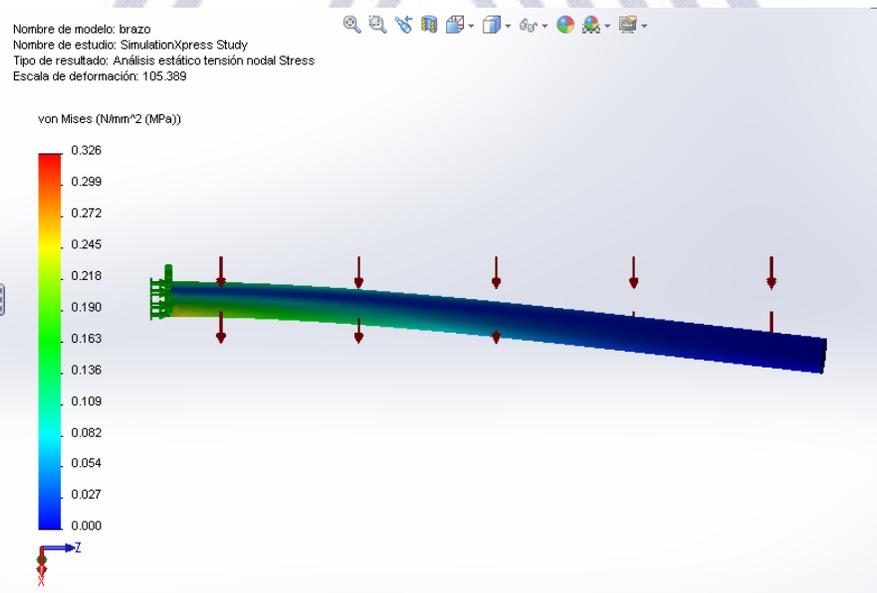


Ilustración 56. Análisis de Von Mises en el eslabón

El eslabón fue simulado con un punto estático debido a que se considera cada una de las articulaciones anteriores, como el punto de partida para el siguiente eslabón y como anteriormente se ha descrito que los electos diseñados siempre están considerados en este diseño para el esfuerzo máximo y el peso específico al cual se someterán, prácticamente el punto estático al cual se sujeta el eslabón está dentro del soporte permisible para nuestra pieza.

El diseño del eslabón fue basado para impresión en 3D donde se tomaron en consideración cada una de las especificaciones de piezas y materiales, debido a ello se puede observar en la figura 58, se muestra la articulación completa con la unión entre los eslabones y el actuador como parte esencial del brazo robótico.

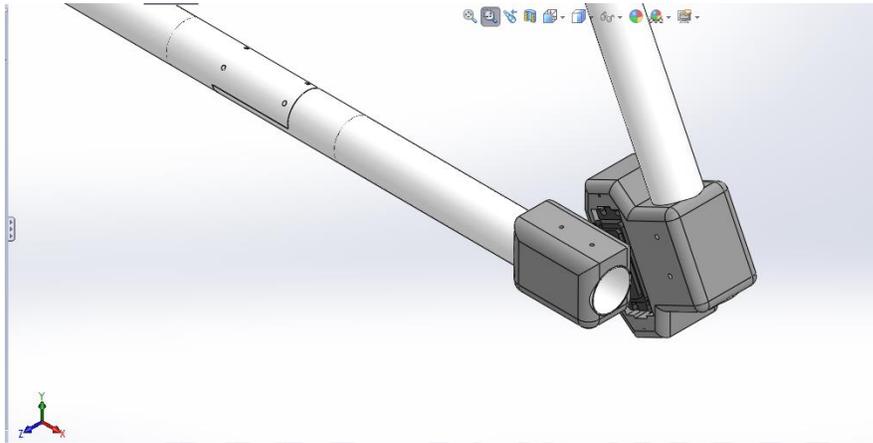


Ilustración 57. Muestra la articulación con dos de los eslabones

El ensamblaje de la figura 58, se repite dos veces más debido a que esta articulación forma parte de tres grados de libertad del brazo robótico y de acuerdo con nuestro diseño el brazo robótico llevara la misma articulación como se muestra a continuación;

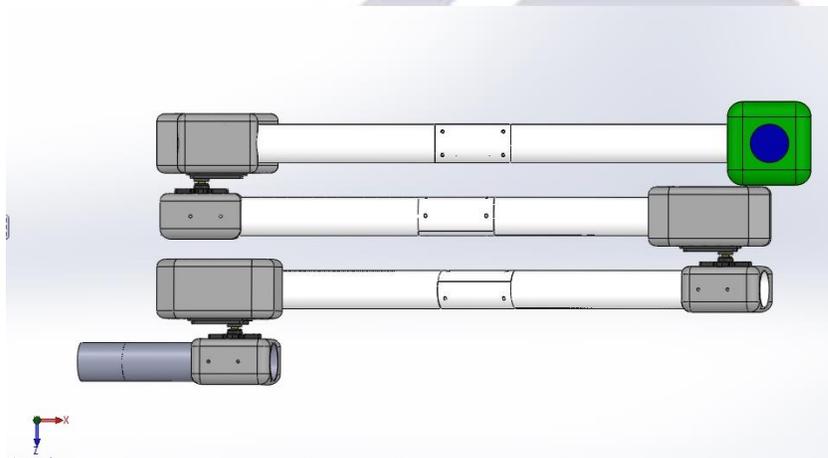


Ilustración 58. Articulaciones de Brazo

Para las tres articulaciones que se muestran en la figura, también se ha utilizado el mismo eslabón diseñado para la primera articulación. En SolidWorks se creó una animación con las funciones de un estudio de movimiento que es parte de una de las herramientas en SolidWorks 2013, en este estudio de movimiento se programaron los servomotores de cada una de nuestras primeras articulaciones.

En la figura 59, se puede observar las articulaciones y en el extremo superior se muestra una pieza la cual tiene por función ser una pieza de sujeción entre parte de la base que va sujeta al Dron M100 y al mecanismo que forma parte de 4° grado de Libertad del brazo Robótico.

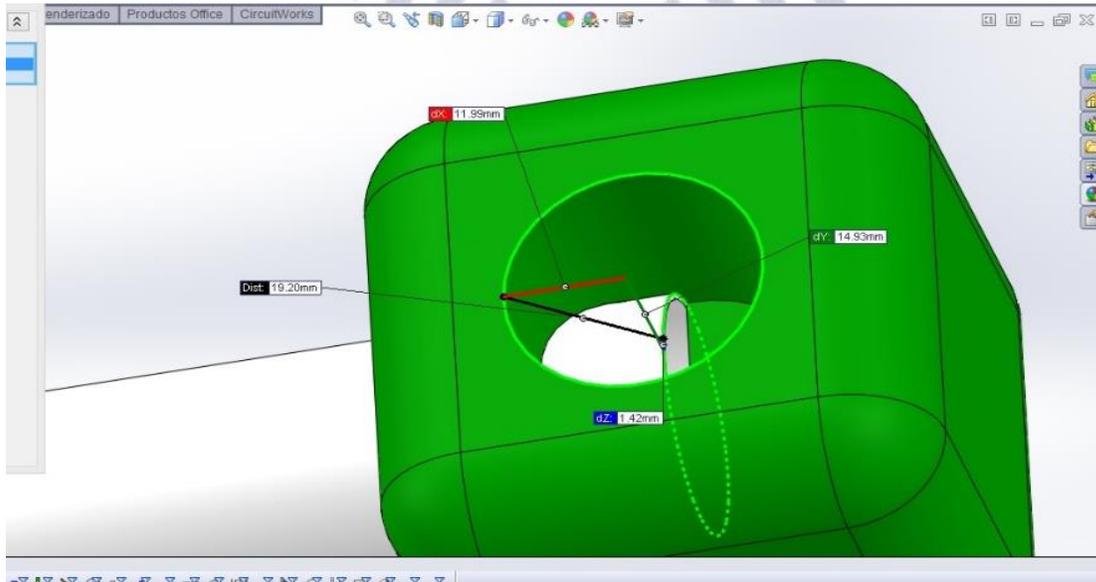


Ilustración 59. Codo del Brazo

Como bien se puede ver en la figura 59, la pieza nombrada como codo en nuestro brazo Robótico está formada por una figura primitiva conocida, la cual es un cubo que contiene dos huecos en forma cilíndrica de 2.54cm de diámetro y una profundidad de 10.50mm, diseñados para sujetar un eslabón de 470mm en forma perpendicular al otro agujero el cual fue diseñado para el acople del sistema que corresponde al 4° grado de libertad que se explica a continuación.

Uno de los grados de libertad del brazo robótico está formado por un sistema mecánico de engranes rectos con una relación de 11:20, el engrane recto de 11 dientes va acoplado al servomotor sujeto a la base que soportara todos los elementos del brazo en el dron M100. Para transmitir el torque del servomotor se usa el engrane recto con 20 dientes, el cual es prácticamente el doble de este primer engrane y que va acoplado al eje principal de la base.

Este eje es otra pieza diseñada, la cual consta de pequeños rodamientos esférico en parte superior de tal forma que le permite al brazo desplazarse en forma circular sin tener un coeficiente de fricción mecánico considerable, es decir para no desplazarse de manera correcta.

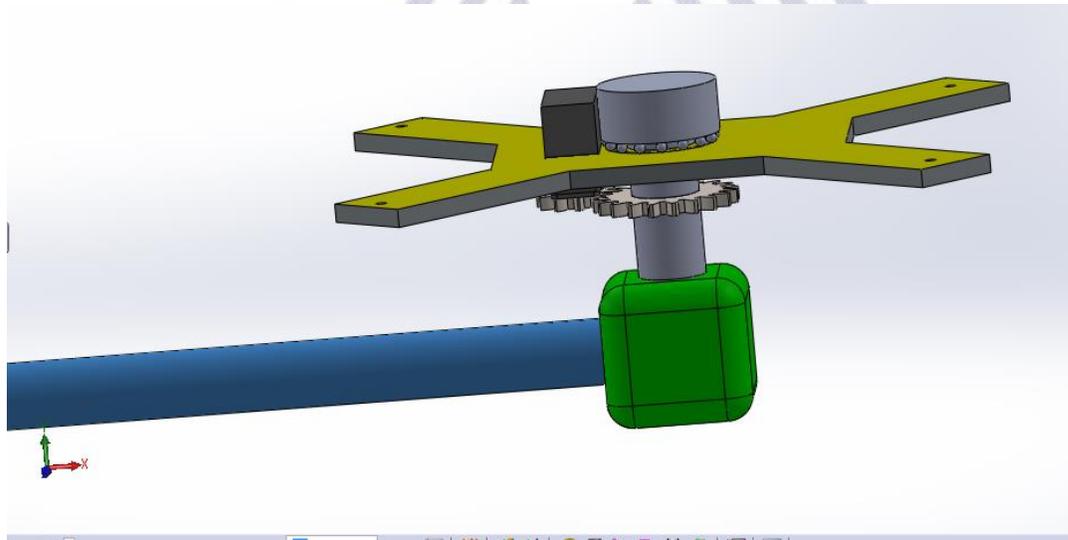


Ilustración 60. Mecanismo para el primer grado de libertad

La figura 60, muestra el primer grado de libertad para nuestro brazo robótico y a continuación se muestra el brazo robótico de cuatro grados de libertad

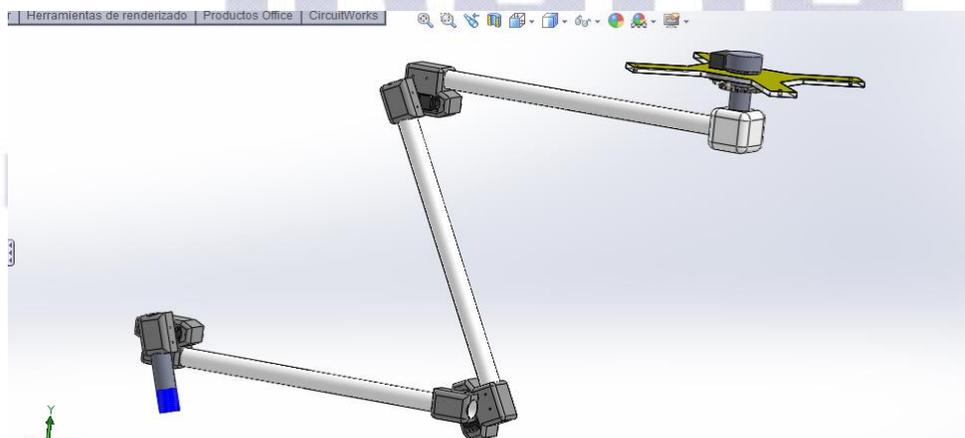


Ilustración 61. Ensamblado de los 4 Grados de Libertad.

En la figura 61, en la cual se ilustra el brazo robótico con sus 4 articulaciones en el extremo final del brazo robótico está el elemento final el cual fue nuestro soporte para sujetar el elemento final de limpieza para ventanas o la tarea en cuestión. Para el diseño del elemento final se propuso un sistema adaptable mecánicamente, ya que la pieza consisten en una extensión en forma de eslabón con un roscado a extremo final para insertar esponjas, fibras e incluso un escurrido de agua convencional, cabe mencionar que su tarea seria de forma experimental , pues se deseaba investigar y diseñar un control capaz de mitigar los parámetros indeseados por el ambiente que entraban hacia nuestro control o las propias vibraciones mecánicas de brazo robótico así como la fricción y movimientos ocasionados por el contacto de área de limpieza del brazo robótico.

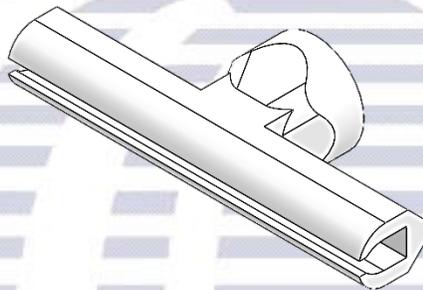


Ilustración 62. Elemento Final

Como antes se ha explicado antes el elemento final del brazo robótico es un eslabón cilíndrico con una longitud de 13 cm con un diámetro exterior de 2.54 cm el equivalente a una pulgada. Esto fue propuesto debido a que la mayoría de limpiadores, tiene como estándar dicha medida, también a esta se le ha diseñado una cuerda estándar para enroscar los elementos a utilizar para la limpieza.

Para sujetar la base del brazo con la base del dron se ha propuesto un sistema colgante basado en 4 tonillos enroscado en la parte superior del dron M100 y en el brazo robótico sujetado en los brazos que corresponden a cada una de las marcas que previamente se dejado para sujetar la base del brazo con el dron.

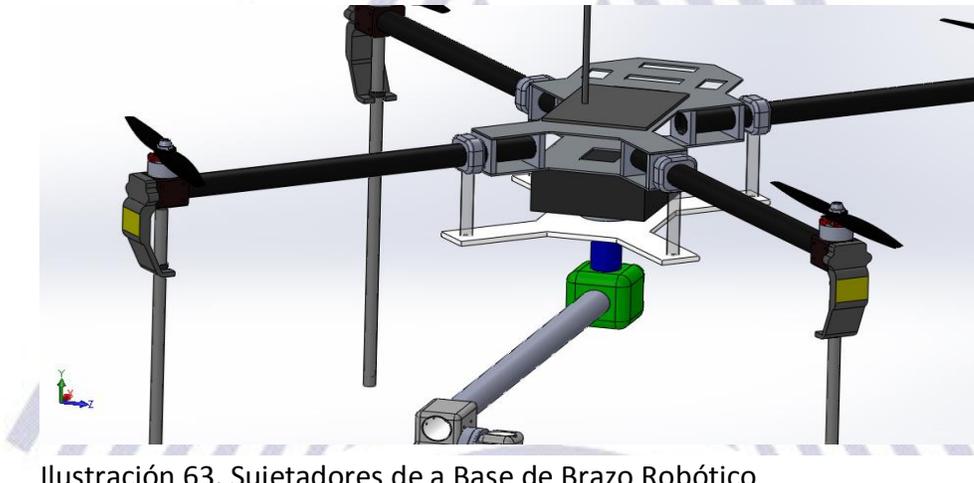


Ilustración 63. Sujetadores de a Base de Brazo Robótico

En la siguiente imagen se muestra el brazo robótico completo, ilustra la dimensión original del brazo con respecto al Dron. Las articulaciones de último grados de libertad, y para el segundo y tercer grado más adelante se mostrarán las articulaciones diseñadas.



Ilustración 64. Brazo completo con 4 articulaciones.

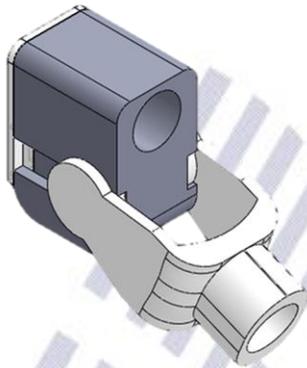


Ilustración 65. Articulación 2

requerida en cada actuador pues es reflejada por cada centímetro de los eslabones y va incrementado con respecto a la distancia a la que se encuentran cada uno de los servomotores.

La articulación 2 fueron rediseñada para un servo de 53.1 kg el cual fue el torque necesario y calculado para mover las extremidades posteriores a cada una de las articulaciones del brazo robótico, considerando el peso y una fuerza extra de 1 kg para la tarea designada por el efector final, ya que esta fuerza que ejercerá el efector final también será parte de la fuerza

En la siguiente figura se muestra la articulación correspondiente al 3 grado de libertad y para esta articulación se utilizó un servomotor con un torque de 30kg el necesario para mover el último eslabón que cargara con el peso de la articulación final del efector final.

El acople entre las dos piezas que conforman cada una de las dos articulaciones anteriores funcionan de forma simétrica proporcionando una mayor estabilidad del torque con respecto al punto de aplicación del torque.

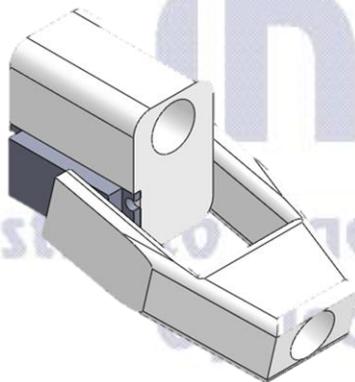


Ilustración 66. Articulación 3

Por último que para estas dos articulaciones 2 y 3 cabe mencionar que son diseñadas para impresión en FDM, con material ABS_PC ya que su cantidad de peso con respecto a otros materiales causaría un daño o ruptura.

La articulación está compuesta por 4 piezas y un sistema de rodamientos, dispuestos en las piezas para provocar un deslizamiento entre las dos caras de las articulaciones tal como se muestra en la figura 67.

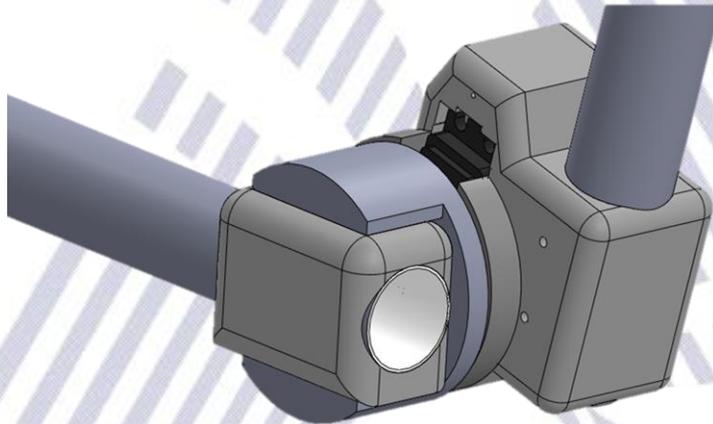


Ilustración 67. Articulación del efector final

La articulación se muestra en la imagen 65, y la forma en que fueron unidas dos de los eslabones con cada una de las articulaciones, cabe mencionar que son piezas por separadas ensambladas en una sola articulación por lo que cada soporte de las articulaciones es de fácil desensamble debido a que se considera un material de prototipo con un factor de deformación elástico, que a su vez puede provocar una fractura o incluso romperse en su totalidad las piezas que se sometan a cambios bruscos de movimientos y a compresiones o tensiones no previstas.

En la siguiente imagen se muestran imágenes del dron en una animación hecha en SolidWorks 2013 para describir el comportamiento de sus movimientos y a su vez calcular los errores por colisiones futuras. También se puede visualizar la tarea a realizar y con ello describir una mejor trayectoria para realizar las tareas de limpieza con una mayor precisión en cuanto a sus movimientos mecánicos.

Para la secuencia de la simulación en SolidWorks 2013 se hizo de acuerdo de la tarea que se deseaba realizar y para el primer caso se simuló la forma que debía tomar cada articulación para hacer un correcto despegue tal como se muestra en la imagen 68, el dron retrae el brazo para su despegue y así mismo lo retrae antes de aterrizar evitando colisiones con la superficie de despegue y aterrizaje.

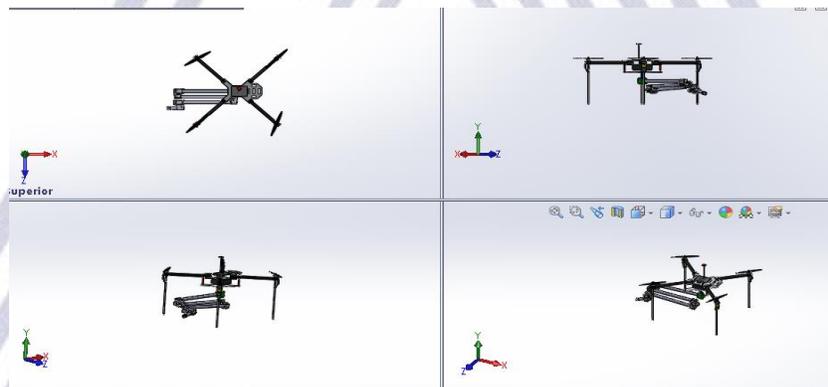


Ilustración 68. Dron en su secuencia de despegue

En la imagen 69, se muestra la secuencia simulada que se utiliza para hacer la tarea de limpieza en la que se puede visualizar el brazo robótico totalmente extendido con la longitud necesaria para llegar al punto específico de la superficie de la ventana a limpiar.

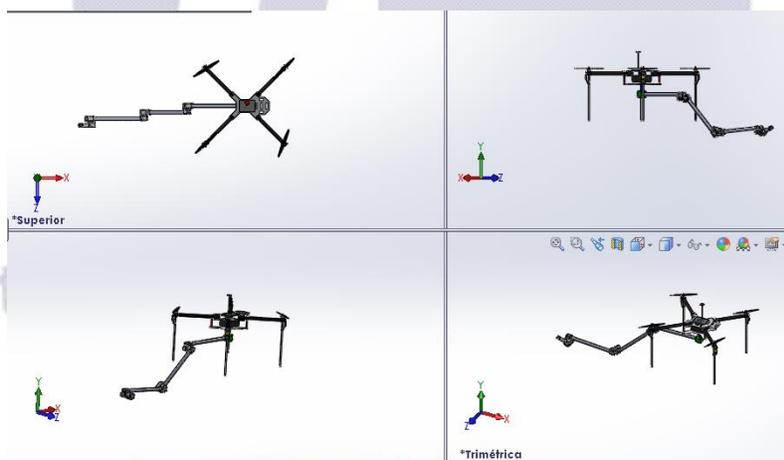


Ilustración 69. Secuencia de limpieza

4.4.1 CÁLCULOS DE LOS TORQUES EN LOS SERVOMOTORES

Calculo de torques necesarios en cada uno de los servomotores para cada articulación del brazo Robótico de 4 Grados de Libertad, el cálculo se hace mediante las siguientes ecuaciones don se calcula los momentos de torsión.

Cada uno de nuestros actuadores tendrá el torque calculado para cada eslabón y los pesos correspondientes de cada articulación

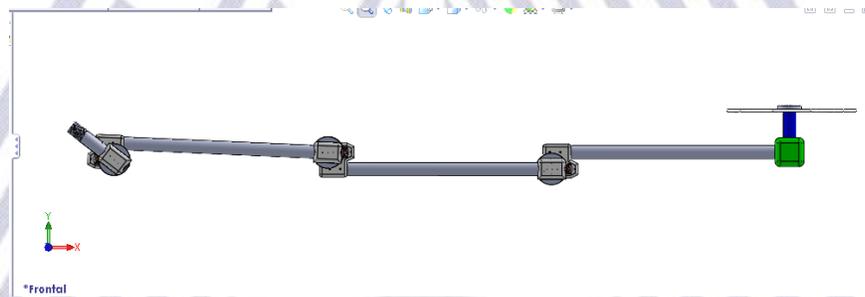


Ilustración 70. Brazo Robótico Extendido

Torque (**T**) se define como la fuerza * cm, perpendicular al punto de aplicación; se describe con la siguiente ecuación:

$$T = F * L$$

La Fuerza (F), que actúa sobre el eslabón o la longitud (L) desde el punto de pivote. En un plano vertical la fuerza que actúa sobre el objeto, causa una aceleración comprendida como gravedad ($g = 9.81\text{m/s}^2$) esto multiplicado por la masa, da como resultado la fuerza (F).

$$F = m * g$$

Como lo muestra la ecuación de arriba, la Fuerza (F), es considerada como el Peso (**W**).

$$W = m * g$$

El torque que se requiere para mover una masa con respecto al punto de pivote multiplicado por la distancia a dicho punto, se expresa como Torque (T), tal como lo ilustra la ecuación siguiente:

$$T = (m * g) * L$$

Se puede encontrar el Torque cuando la longitud del eslabón sea perpendicular al punto de aplicación de la fuerza, como se ilustra a continuación se muestra las relaciones entre la fuerza y la longitud del eslabón aplicada en un punto.



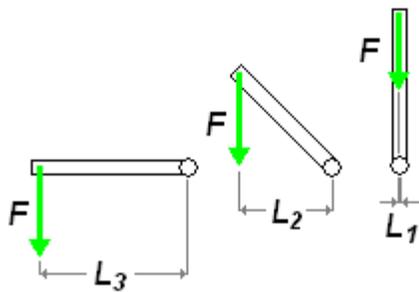
No existe torque cuando la longitud del eslabón no esté en forma perpendicular a la fuerza aplica, ya que la fuerza seria sobre la misma dirección del eslabón y la suma de torque seria "Cero", como se ilustra a continuación.

$$\sum T = 0 = F * L - T$$

Esta fuerza (F) es remplazada por el Peso (w) como se muestra en la ecuación anterior. Este método es más fácil para en contra los toques en cada una de nuestras articulaciones con respecto a nuestros eslabones con lo cual se balaceara los pesos para una correcta operación de Torque en cada uno de nuestros actuadores.

$$m * g * L = T_A$$

Para encontrar el torque en cualquier posición de nuestra articulación, se ha propuesto el peor escenario;



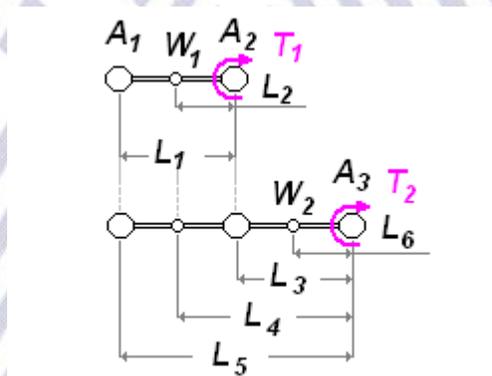
En la imagen de arriba se muestra la longitud del eslabón que es rotada en el sentido de la manecillas del reloj. Solo la componente perpendicular entre el pivote y la fuerza tomada a continuación. Nosotros podemos observar que esta distancia decrece desde L_3 hasta L_1 (donde L_1 inicia en "cero"), desde la ecuación fuerza para el torque en las múltiples longitudes por la fuerza, el valor mayor d que se puede obtener usando L_3 , sin cambiar la fuerza (F). También se pueden rotar los eslabones en el sentido contrario a las manecillas del reloj y observar el mismo efecto.

Puede ser seguro asumir que los actuadores en el brazo serán sometidos al par más alto cuando el brazo es estirado horizontalmente. Aunque su robot nunca puede ser diseñado para enfrentar este escenario, no debe fallar bajo su propio peso si se estira horizontalmente sin carga. El peso del objeto (la "carga") que se mantiene (A_1 en el diagrama), multiplicado por la distancia entre su centro de masa y el pivote, da el par requerido en el pivote. La herramienta tiene en cuenta que los eslabones pueden tener un peso significativo (W_1, W_2 ..) y asume que su centro de masa está situado aproximadamente en el centro de su longitud. Hay que sumar los torques causados por estas diferentes masas:

$$T_1 = L_1 * A_1 + \frac{1}{2} L_1 * W_1$$

Nota: no confunda 'A' (el peso del actuador o carga) con 'a' (aceleración).

Puede observar que el peso del actuador A2, como se muestra en el diagrama siguiente, no se incluye al calcular el par en ese punto. Esto se debe a que la longitud entre su centro de masa y el punto de giro es cero. De forma similar, al calcular el par requerido por el actuador A3, no se considera su propia masa. El par de torsión requerido en la segunda junta debe ser recalculado con nuevas longitudes, como se muestra a continuación (torque aplicado mostrado en rosa):



$$T2 = L5 * A1 + L4 * W1 + L3 * A2 + L6 * W2$$

Sabiendo que el peso del enlace (W1, W2) está situado en el centro (medio) de las longitudes, y la distancia entre los actuadores (L1 y L3 como en el diagrama anterior) reescribimos la ecuación como:

$$T2 = (L1 + L3) * A1 + \left(\frac{1}{2}L1 + L3\right) * W1 + (L3) * A2 + \left(\frac{1}{2}L3\right) * W2$$

La herramienta sólo requiere que el usuario introduzca las longitudes de cada enlace, que sería L1 y L3 por encima de modo que la ecuación se muestra en consecuencia. Los pares de torsión en cada junta subsiguiente se pueden encontrar de manera similar, recalculando las longitudes entre cada peso y cada nuevo punto de pivote. Nota: si alguna de las juntas tiene dos o más motores, comparten el par requerido uniformemente.

Debido a que la base del brazo está sometida al par más alto, a menudo se utilizan dos actuadores en lugar de uno.

Las ecuaciones anteriores sólo se ocupan del caso en el que el brazo del robot se mantiene horizontal (no en movimiento). Este no es necesariamente el escenario de "peor caso". Para que el brazo se mueva desde una posición de reposo, se requiere una aceleración. Para resolver este par de apriete se sabe que la suma de los pares que actúan en un punto de giro es igual al momento de inercia (I) multiplicado por la aceleración angular (alfa)

$$T = I * \alpha$$

Para calcular el par adicional requerido para moverse (es decir, crear una aceleración angular) calcularías el momento de inercia de la parte desde el extremo hasta el pivote usando la ecuación (o una ecuación similar a):

$$I = \frac{m * r^2}{2}$$

Obsérvese que esta ecuación calcula el momento de inercia sobre el centro de masa. En el caso de un brazo robótico, el momento de inercia debe tener en cuenta que la pieza se está girando alrededor de un punto de pivote situado a una distancia del centro de masa y un segundo término (+ MR²) necesita ser añadido. Para cada unión, el momento de inercia se calcula sumando los productos de cada masa individual (m_i) por el cuadrado de su respectiva longitud desde el pivote (r_i). Obsérvese que la ecuación para calcular el momento de inercia a considerar para el actuador N omite la masa del actuador en el punto de pivote (N-1):

$$I_N = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{m_i r_i^2}{2}$$

Nota: La ecuación utilizada para calcular el momento de inercia anterior (en este caso multiplicado por un valor constante de 1/2) no es universal, sino que varía de una parte a otra (hueco frente a barra sólida, cilíndrica frente a sección rectangular Etc.).

En todos los casos considerados aquí, 'r' representa la distancia desde el centro de masa al pivote. Dado que el momento de inercia varía enormemente de una parte a otra, la aceleración angular no se toma en consideración con la calculadora de torque de brazo robótico. En su lugar, para corregir la posible aceleración angular, se utiliza un "factor de seguridad" y se establece en 2 por defecto. Al igual que con todas las herramientas dinámicas, también deben tenerse en cuenta las ineficiencias en los actuadores y en las juntas. De esta manera, el motor en cada junta será capaz de proporcionar más que el par requerido para mantener el brazo estacionario. El par requerido para acelerar el peso que es soportado por un actuador desde una posición estática se puede calcular usando la siguiente relación:

$$\sum T_N = T_N(\text{holding}) + T_N(\text{motion}) = I * \alpha$$



Ilustración 71. Estructura del Brazo Robótico

L: longitud desde el pivote hasta el otro pivote.

M: masa de enlace

A: Masa del actuador (servo u otro)

A1: puede representar la carga que se está levantando

L: [cm]	M: [kg]	A: [kg]	T: [kg cm]
L1: 015	M1: 0.05	A1: 0.200	T1: 3.375
L2: 047	M2: 0.100	A2: 0.100	T2: 22.17
L3: 035	M3: 0.07	A3: 0.250	T3: 47.90
L4: 0	M4: 0	A4: 0	T4: 0
L5: 0	M5: 0	A5: 0	T5: 0
L6: 0	M6: 0	A6: 0	T6: 0

Tags: [Arm Calculator tools](#)

Ilustración 72. Calculadora de Torque [39]

En la imagen 72, se muestra una tabla de una herramienta de “robotshop” la cual es una calculadora diseñada para calcular el torque en n-grados de libertad para un brazo robótico.

Servo 1 de 15kg*cm

Servo 2 de 30kg*cm

Servo 3 de 53Kg*cm

4.5 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DEL CONTROL PARA EL BRAZO ROBÓTICO

Para controlar el brazo robótico de 4 grados de libertad, se ha diseñado un circuito de control utilizando el diagrama de bloques siguiente;

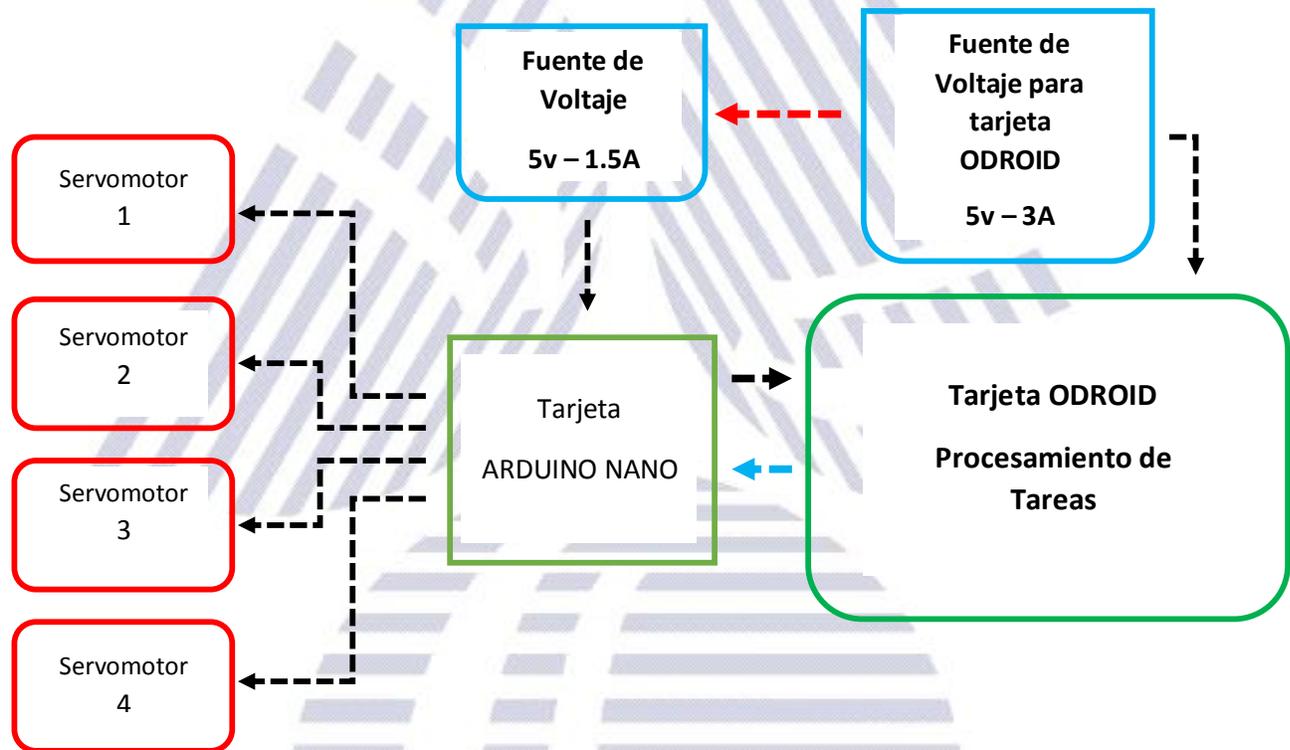


Ilustración 73. Diagrama De Bloques del circuito de control

El circuito de control consta de una fuente reguladora de voltaje y una etapa controladora de 4 servomotores MG995 los cuales son los encargados de controlar cada uno de los grados de libertad de nuestro brazo robótico, en la etapa de voltaje se puede observar que se divide en dos secciones la primera es la fuente reguladora de voltaje para la tarjeta ODROID nuestra computadora a bordo del Dron Matrice 100.

La segunda etapa reguladora de voltaje está formada por un regulador de 5Volts (LM7805), el cual regula 15V-1.5Ampere que alimenta la tarjeta ARDUINO NANO, y la fuente de 5V-3 Ampere alimenta a la tarjeta ODROID. La computadora abordo realiza el control más preciso del brazo robótico y a su vez la tarjeta ARDUINO NAANO tiene como función principal el control de los actuadores (servomotores MG995).

Dentro de la tarjeta Arduino Nano se hacen las operaciones matemáticas para el procesamiento de la cinemática inversa y un centro de tipo PID adaptado para mitigar el ruido ocasionado por los circuitos y demás elementos interconectados a la tarjeta de control, como bien se ilustra en la figura 74, se puede observar la comunicación entre la tarjeta ODROID y la tarjeta ARDUINO NANO.

La comunicación entre la tarjeta Arduino nano y la tarjeta ODROID es de forma serial, siendo una comunicación síncrona en la transmisión de datos, esto para ser el proceso de control más veloz y con mayores benéficos en cuanto al control, el ser una comunicación de forma serial permite que el brazo tenga un sistema de manera realimentado, esta realimentación cabe mencionar solo existe entre nuestra tarjeta Arduino y la tarjeta ODROID como se muestra en la figura 74.

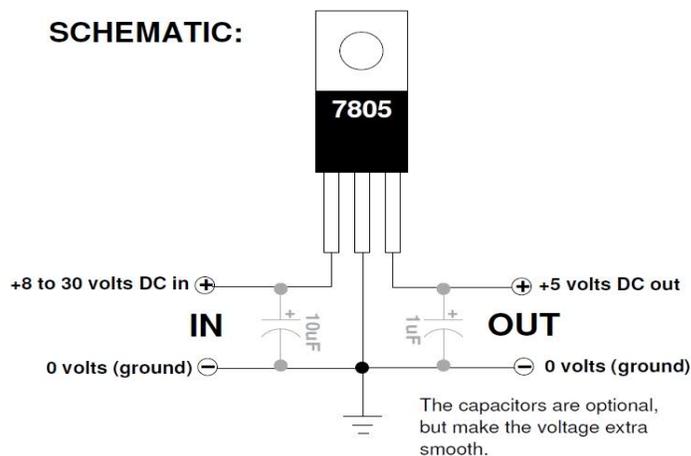


Ilustración 74. Diagrama De Bloques del circuito de control

Para realizar las tareas de limpieza que se plantearon, fue necesario contemplar en el control las perturbaciones debido a los movimientos mecánicos del brazo robótico y a las propias perturbaciones de vibraciones u otros aspectos proporcionados por el Dron M100 en vuelo.

4.6 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL

El brazo robótico como bien antes se ha mencionado es de 4 grados de libertad, y está controlado por una tarjeta Arduino. En la figura 75, se puede ver el circuito diseñado para regular la tensión de entrada de 5Volts, la cual utiliza el Arduino nano, y a su vez regula el voltaje de alimentación para los servomotores que trabajan con un voltaje de 5volts. El regulador es un circuito integrado LM7805 que permite una entrada de voltaje de 40 volts descrito en su hoja de datos y de forma comprobable trabaja en un rango de 8 a 30 volts, a continuación se muestra una imagen del funcionamiento y la conexión básica para el LM7805, este circuito fue utilizado para el acondicionamiento de voltaje de entrada y el voltaje de salida.



El primer capacitor elimina el ruido de entrada de la red y elimina los picos de las variaciones de tensión de voltajes, esto a su vez es en la entrada y seguido también el circuito de cuerdo a la hoja de datos del fabricante, el circuito regulador de voltajes requiere a su salida un capacitor que hace disminuir el rizado a la salida del voltaje.

Ilustración 75. Circuito Regulador de Voltaje

La entrada de voltaje para nuestro circuito es 7.4 volts que va a la entrada del regulador de voltaje LM7805, en nuestro circuito se puede ver dos capacitores a la entrada esto debido a que el circuito general está compuesto por 4 servomotores que revocaran en cierto modo una perturbación en el voltaje de entrada.

A la salida del regulador de voltaje también tiene un capacitor de 220uf que complementa la reducción de rizado del voltaje a su salida. Como indicador se tiene un led con el cual tiene una resistencia limitadora de corriente que se puede visualizar cuando la tarjeta está alimentada por la batería, en el diseño se ha dejado un conector de salida de voltaje de 5volts como opción a nuestro circuito.

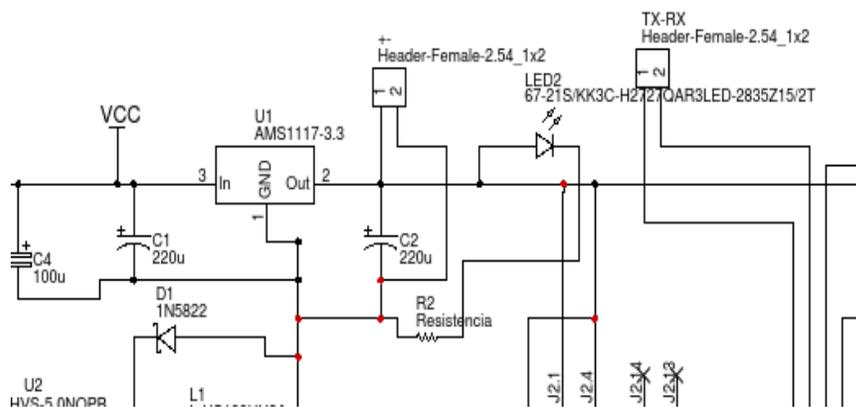


Ilustración 76. Circuito Regulador de Voltaje 5V -1.5A

Para el siguiente circuito regulador de voltaje se ha utilizado un circuito integrado LM2576HV-5, con un circuito electrónico que se encarga de acondicionar la salida del voltaje de 5 volts a 3Amperes, los componentes electrónicos adicionales a nuestro circuito electrónico como un capacitor otros elemento como conectado a la entrada del regulador y una bobina de 100uH conectada a la salida del regulador con un capacitor de 100uF en uno de sus extremos completando un circuito de realimentación con el otro extremo de la bobina que va conectado al pin de realimentación del LM2476HS-5.

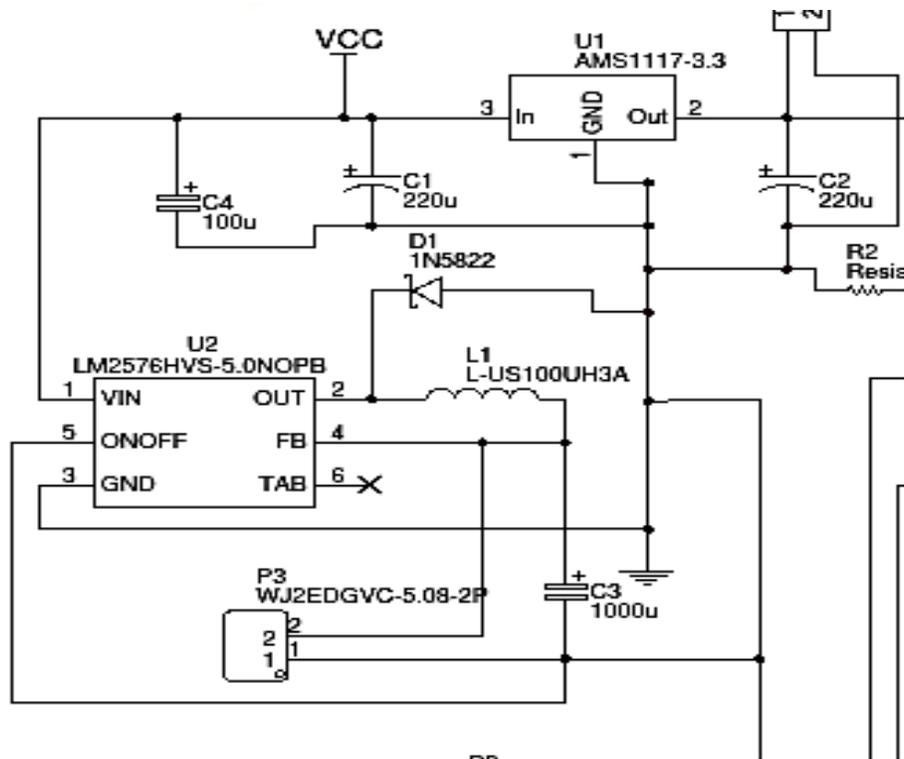


Ilustración 77. Regulador de Voltaje de 5V-3A

Como en el caso anterior a circuito regulador de voltaje de 5V-1.5A también a este circuito tiene un diodo zener en protección contra una subida de tensión entre el primer regulador y el regulador de 5V-3A se le ha dejado un conector de salida del voltaje, con el cual se alimenta la tarjeta ODROID, la tarjeta ODROID se alimenta con 5Volts a 3Amperes dado que es la computadora a bordo de Dron en la cual se procesara el control del brazo robótico.

En la siguiente imagen, figura 78, se muestra el diagrama del circuito esquemático para la conexión entre la tarjeta Arduino y los servomotores. Una vez antes explicado el diseño de nuestras fuentes de voltaje que se encargan de alimentar el circuito y los servomotores, se explica la conexión de los servomotores a la tarjeta Arduino los cuales van conectados a cada uno de los puertos designados como PWM hacia la línea de señal de cada uno de los servomotores respectivamente.

Los servomotores están alimentados a la entrada del regulador LM7805 y la tarjeta Arduino nano de igual forma está alimentada por el regulador de 5volts solo que esta alimentación es tomada de su salida con la cual protegemos nuestra tarjeta Arduino

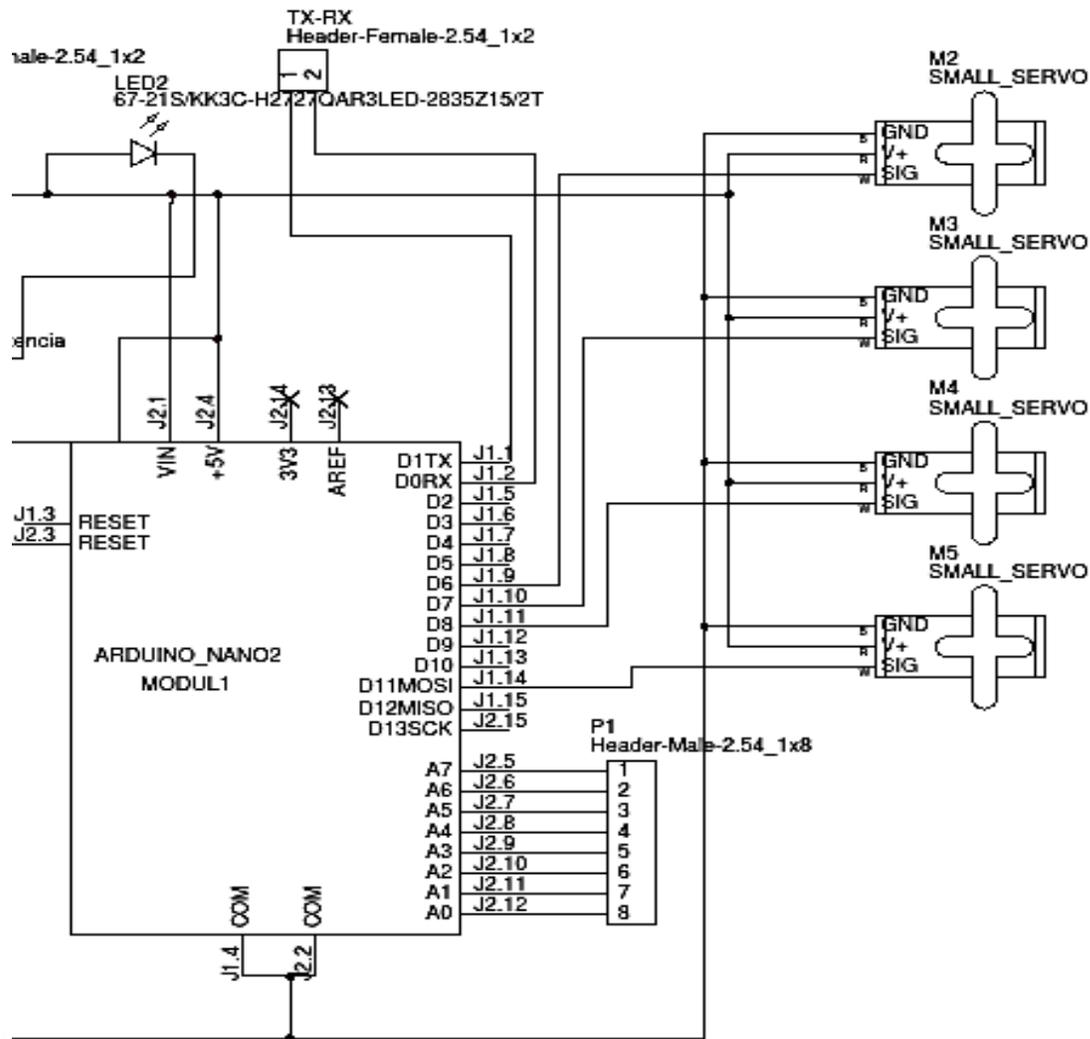


Ilustración 78. Circuito de control para los servomotores

En la tarjeta Arduino Nano está conectada a la tierra general del circuito, esto para evitar que la referencia del circuito de reguladores y la alimentación de los servomotores estén

Referenciados en caso contrario el circuito tendrá el negativo al aire lo cual provocaría un mal funcionamiento del circuito.

Finalmente se muestra el circuito final de la tarjeta controladora para el brazo de 4 grados de libertad, con cada una de las secciones explicada anteriormente.

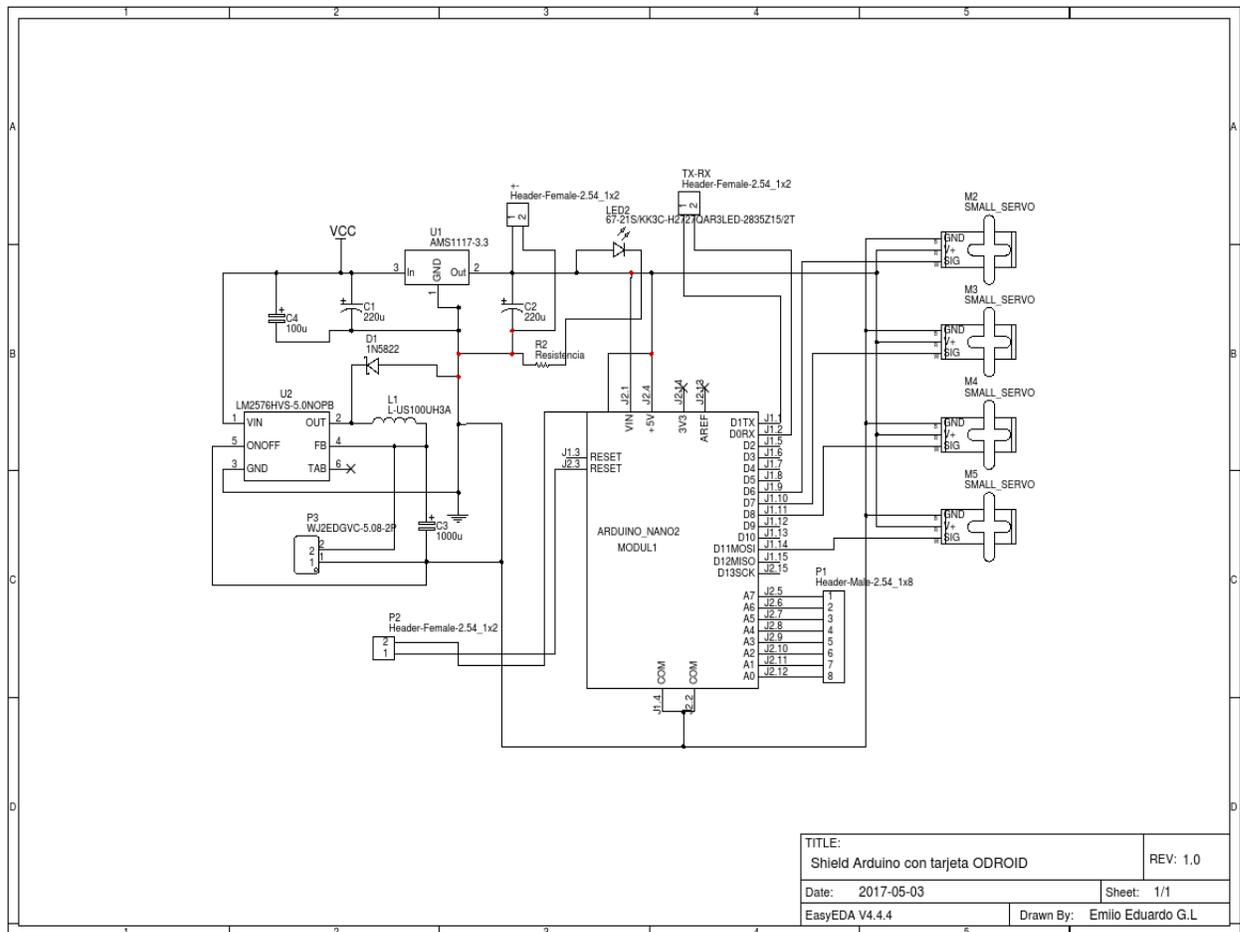


Ilustración 79. Circuito de la tarjeta Controladora

Una vez hemos diseñado nuestro circuito electrónico para nuestra tarjeta controladora en forma esquemática, se diseñó el circuito PCB (*Printed Circuit Board* la tarjeta de circuito impreso esta de igual manera que nuestro circuito esquemático fue hecha en el programa

en línea EasyEDA, hablando un poco más del software utilizado este es un programa en línea de diseño y simulación de circuitos electrónicos.

En la figura 80, se muestra el circuito PCB de 5cm x 5cm el tamaño de las pistas fue de 1.2 mm, la placa fue diseñada para una sola cara y al reverso de la cara de la tarjeta se muestra la máscara de componentes, y la ubicación de las perforaciones en la cara de cobre de la parte inferior.

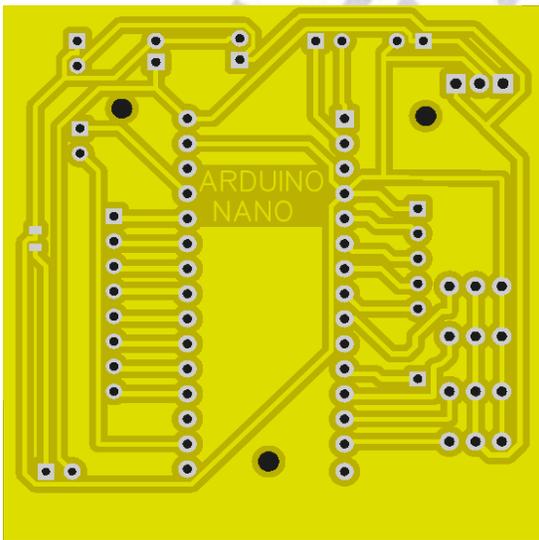


Ilustración 80. Cara de cobre (parte inferior)

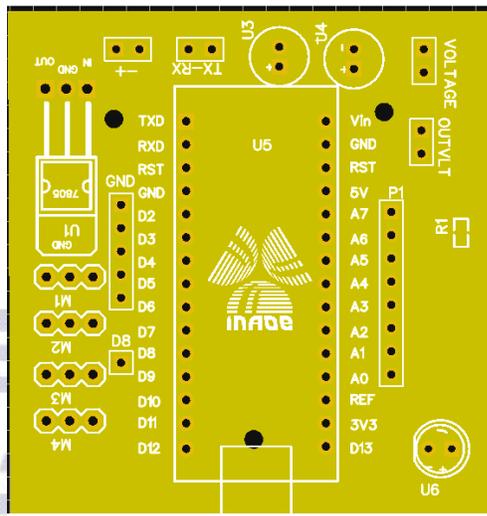


Ilustración 81. Máscara de componentes

En el diseño se ha incluido tres perforaciones, las cuales fueron creadas para sujetar la propia placa con la base del brazo Robótico, la otra cara del circuito fue utilizada solo para la máscara de componentes como se ilustra en la figura##, en ella se puede ver la posición de cada componente así como la ubicación de cada punto a perforar.

En la placa se han añadidos pines tipo rectangulares Hembra, para conectar los servomotores con sus tres pines de; voltaje, tierra y la señal de entrada Digital. También de manera opcional se han añadido pines disponibles para la conexión de las terminales de la D2-D6 en el Arduino esto como una manera de hacer más flexible nuestra tarjeta controladora así como dos pines para conexión de comunicación serial, necesarias para la comunicación entre el Arduino y la Tarjeta ODROID.

4.7 RESULTADOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA TARJETA CONTROLADORA.

La tarjeta controladora fue fabricada con un método casero, conocido como el método del planchado en el cual se realiza una plantilla del circuito electrónico en su formato de diseño para PCB. El tipo de papel utilizado para la impresión del circuito es cualquier tipo de papel brillante, una de las cualidades de los tipos de hojas brillosas será que el tóner se adhiere de manera superficial al papel.

Al adherirse de manera superficial el tóner o tinta de una impresora láser al papel brillante, nos permitirá que nuestra técnica funcione de manera más efectiva, a que el papel al someterla a una temperatura mayor a 60° la tinta que se a impregnado sobre nuestro papel se desprenderá de manera más fácil sobre nuestra placa fenólica.

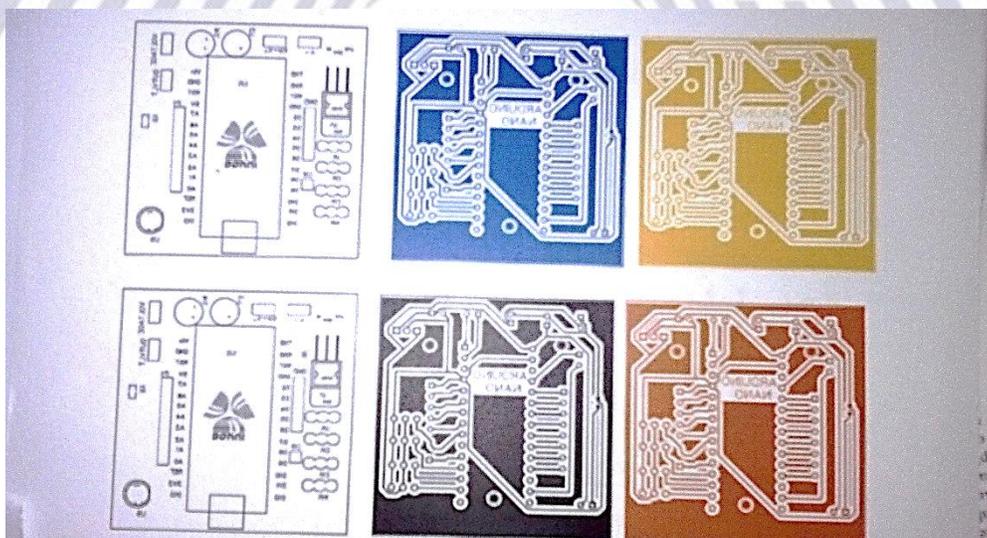


Ilustración 82. Impresión del Circuito PCB en papel Fotográfico

Para nuestro caso se utilizó papel fotográfico de manera estándar, para la impresión de nuestras caras del PCB, el circuito se ha diseñado para ser de una sola cara y en la parte superior se ha dejado la máscara de componentes, cabe mencionar que para la impresión de las máscaras de componentes en el programa debe ser girada a espejo, para que nuestro circuito coincidiera al plasmarse sobre la superficie superior de nuestra placa fenólica.

En la imagen se muestra nuestro circuito PCB a plasmar en una tarjeta virgen o placa fenólica. La placa fenólica es recubierta de cobre el cual se utilizara para plasmar nuestras pistas,



Ilustración 83. Planchado del Circuito PCB.

En la imagen anterior se puede ver la plancha utilizada para adherir nuestro circuito a la placa fenólica, esta se fija como “lana”, ya que con esa temperatura de forma experimental se observó una mayor adición a la placa en un tiempo relativamente corto.

El planchado se realiza alrededor de 5 minutos de forma uniforme, planchando las orillas del papel sobre la placa con esto se evitaba que el papel excedente de nuestro circuito impreso fuese a desprenderse.

El circuito planchado fue el revelado en color negro, ya que de manera experimental se hicieron pruebas con diferentes colores y el color al cual el tóner de la impresora láser se imprimía a mayor concentración fue ese mismo color.

El papel que se plasmó sobre la placa fenólica es retirado mediante agua sobre esa misma superficie. Para esto hay varias formas en las que se puede hacer; tal como es la del caso práctico donde se frota al circuito plasmado correcto, listo hasta retirar de manera suave las impurezas.

La siguiente forma fue la que se utilizó para asegurar el que toda nuestra impresión del papel fotográfico allá quedado de manera completa el plasmado del circuito.



Ilustración 84. Placa dentro del Cloruro férrico

Una vez que obtuvimos el planchado del circuito en nuestra placa fenólica, se degrado con cloruro Férrico, durante 15 minutos y como resultado de la degradación de la placa fenólica se tuvo el siguiente circuito impreso (PCB).

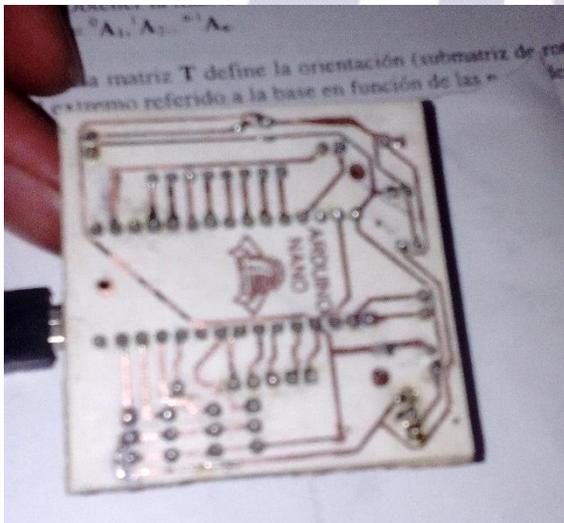


Ilustración 85. Vista de las pistas de la capa inferior

Esta vista pertenece a la capa de cobre, de su parte inferior y la que se mostrara a continuación es la vista de la placa de control final, para el montaje correcto de los componentes.

La placa PCB que contiene la máscara de componentes es la que se ve previamente perforada y lista para el montaje de los componentes.

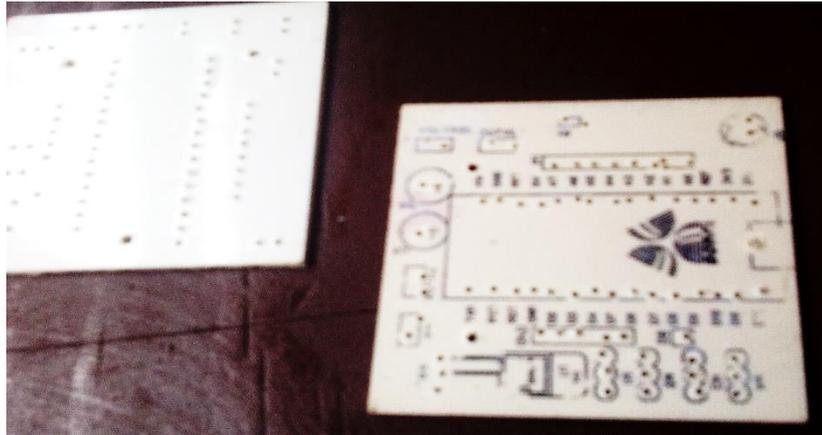


Ilustración 86. Mascara de componentes en la PCB

Una vez que se armó la tarjeta controladora de los servomotores, hizo pruebas con ella para verificar el correcto funcionamiento cargándole a la placa Arduino un programa que hacía girar un servomotor MG995 de 0° grados a 180° grados, repitiendo esta prueba por cada uno de los diferentes puertos que se predefinieron de acuerdo a sus buses de salida buscando los pines dedicados a l centro de PWM (11, 10, 9,7).

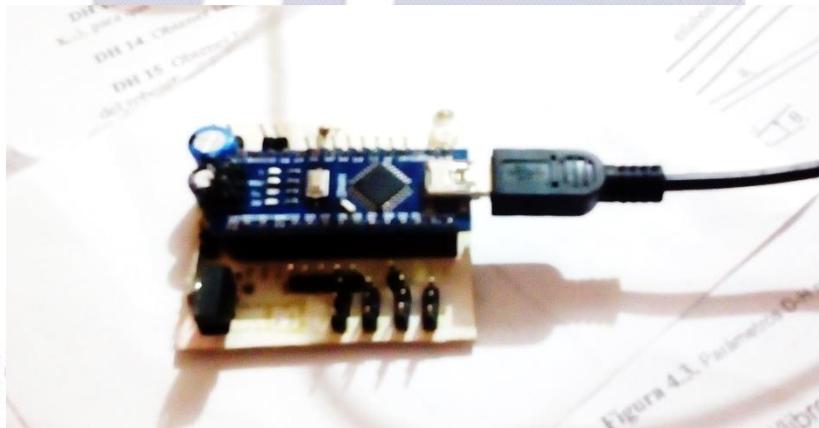


Ilustración 871. Tarjeta final

Finalmente los resultados de la placa controladora del brazo robótico fueron satisfactorios ya que cumplió con los objetivos para la cual fue diseñada.

4.8 ENSAMBLAJE Y DESCRIPCIÓN DE OPERABILIDAD.

A continuación se muestran los resultados de las piezas impresas por la 3D, y se muestra algunos diseños que fueron modificados sobre la marcha del trabajo, las modificaciones fueron necesarias debido a que la tecnología de impresión de la impresora 3D es un poco más avanzada que la tecnología de las impresoras 3D comunes, la impresora que fue utilizada es una Objet 500.



Ilustración 88. Primera parte las impresiones 3D

El principal detalle que se tuvo con respecto al diseño de las piezas, fue su peso en masa de cada una de las piezas, puesto que estas piezas son parcialmente cerradas, lo que no era del todo posible con la impresora que se muestra a continuación:

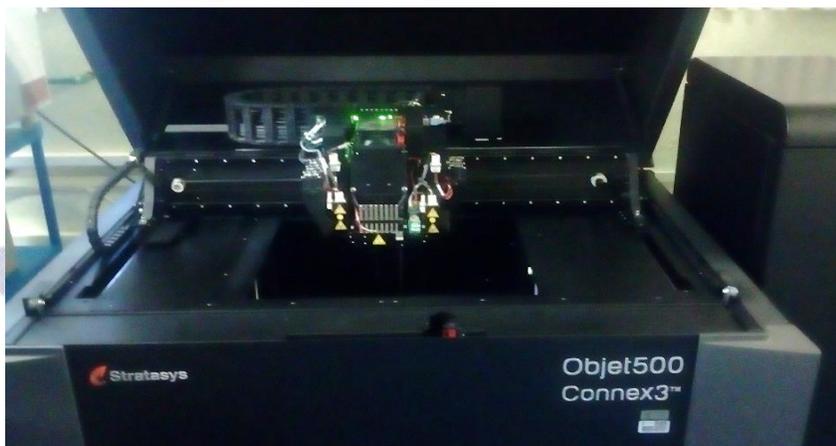


Ilustración 89. Impresora 3D; object 500

Esta impresora es una impresora es una object 500 que trabaja con una tecnología más avanzada que cualquier impresora 3D convencional, ya que tiene la capacidad de imprimir piezas y ensamblajes completos, esto es posible porque esta impresora no utiliza la tecnología FDM, es decir no imprimir por filamentos, cada una de las piezas son construidas a base de resinas líquidas, permitiendo una mayor resolución en las piezas pero con ello aumentando considerable el peso debido a que no es posible hacer piezas huecas o dejar vaciados en ellas, con los software que fueron diseñados para ellos por lo que se rediseñaron las piezas haciéndolas en dos partes cada una de las piezas con ello se obtuvo unas piezas más ligeras, pero cabe mencionar que las piezas fueron de Polipropileno VEROGRAY RDG850 (ver anexos hojas de Datos), cabe mencionar que solo la base conservo su estado sólido en su totalidad debido a que era pieza que requería tener una mayor resistencia mecánica.

La base fue construida para soportar una carga máxima de 1.5 kg a tensión y compresión, mismas que son proporcionadas por los movimientos de las articulaciones.

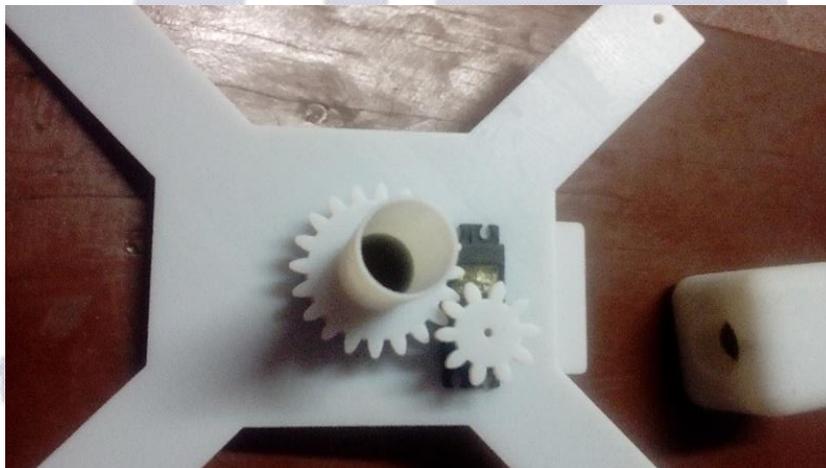


Ilustración 90. Base de la primera articulación con su sistema de engranajes

Esta base que se muestra en la figura 65 muestra el ensamble de la primera articulación del brazo robótico la cual consistió en mover de una dirección a otra el brazo robótico en un Angulo de 45 grados donde era posible maniobrar el brazo robótico sin golpear las patas de aterrizaje, ni de causar algún daño al Dron Matrice 100.

La configuración de los engranes funciona como un reductor de Angulo y eleva el torque haciendo un juego de piñón – engrane.

El piñón tiene 10 dientes con;

Módulo de 2.5.

Diámetro exterior de 33mm

Diámetro interior de 20.624mm,

El Angulo de dientes es de 20.

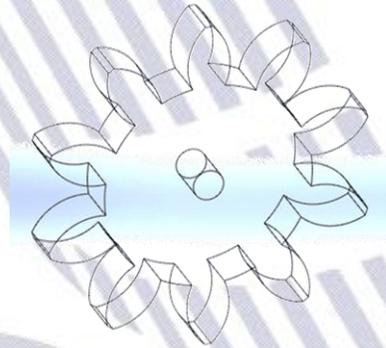


Ilustración 91. Engrane Recto Tipo piñón de 10 Dientes

Como observación se menciona que los dos engranes son engranes rectos hechos con una relación de 10:20 y tienen un espesor de 5mm.

Para el engrane recto de 20 dientes se usó;

El mismo módulo de 2.5.

El diámetro exterior de 55mm

El diámetro interior de 43.7mm

El ángulo entre dientes de 20

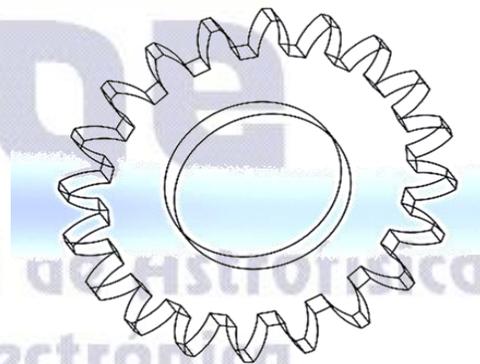


Ilustración 92. Engrane recto de 20 Dientes

Para fijar el engrane pequeño de 10 dientes que fue utilizado como Piñón en nuestro sistema se utilizó un accesorio circular del servomotor MG995 tal como si muestra en la figura 69, el accesorio se acoplo al engrane con una perforación que se hizo en su parte interior de un diámetro nominal de 7mm para meter el molde que fue acoplado al servomotor y el engrane (Piñón) fue sujetado por 2 tornillos de milimétricos de 2 x 6mm.



Ilustración 93. Armado de la base con la extensión del brazo robótico

En la imagen 93, se muestra el armado de la base diseñada para montarla al dron Matrice 100 con 4 abrazaderas, uno para cada brazo del Dron Matrice 100, como las que se muestran a continuación:



Ilustración 94. Sujetadores de la Base del Brazo

En la figura 94, se muestran las piezas diseñadas para completar la base del brazo en el dron y aparte de estas 4 piezas se pensó en el uso de de 12cm de espárragos (son tornillos de rosca corrida) para cada uno de los puntos que sujetan la base del brazo robótico.



Ilustración 95. Articulación 2 del brazo robótico

en la imagen de la izquierda se puede ver la ilustración de la articulación 2 que a su vez conforma el segundo grado de libertad de nuestro brazo robótico, está hecha de material ABS_PC esta pieza fue modificada debido a la resistencia de material y al cambio del servomotor que más adelante se explicara.



Ilustración 96. Articulación 2 con el próximo Eslabón

Para una ilustración mayor se puede ver a continuación el modo en el que el eslabón que unirá la siguiente articulación fue ensamblada, con las otras dos piezas que hacen el sistema que rotara con respecto al eje del servomotor y sirvió como a articulación completa.

Para el ensamblaje de la articulación 3 se utilizaron dos piezas crear de forma que hicieran rodamientos de las dos partes de la articulación, y un tornillo milimétrico de 1 ½ " de rosca fina para sujetar un costado de la articulación, el tornillo funciona como un prisionero que asegurar la pieza móvil con respecto a un eje que tiene la pieza principal de la articulación, dicho eje se imprimió en 3D como un juego completo de la pieza, las dos partes fueron unidas

A la articulación y así mismo se sujetó con ello el eslabón consecutivo al 4 grado de libertad del brazo robótico. Una vez armada la articulación se hicieron pruebas, con diferentes Angulo en el servomotor para ver el correcto funcionamiento de la articulación, en la siguiente imagen se muestra la articulación armada por completo con el eslabón que



Ilustración 97. Ensamblaje Final de la articulación 3

corresponde a la siguiente articulación del grado 4 grado de libertad.

Para la siguiente articulación que corresponde al último grado de libertad, que tiene una construcción diferente con respecto a las dos articulaciones anteriores, esta fue hecha con el mismo materia con el

que fueron impreso cada uno de os eslabones, esta articulación está diseñada para ser ensamblada en 4 pieza que forman la articulación completa. Como se muestra en la imagen esta articulación es la que lleva a el extremo final de su último eslabón el elemento final que también cabe mencionar este fue diseñado en SolidWorks, el elemento final se diseñó e



Ilustración 98. Articulación del 4 grado de libertad.

imprimió debido a su peso bajo era indispensable para poder mantener el peso original del diseño, ya que los limpiadores comerciales esta hechos de plásticos y otro materiales más pesados y esta fue la opción más viable en cuanto a la reducción del peso de nuestro elemento final.

4.8.1 MODELADO CINEMÁTICO DEL BRAZO ROBÓTICO 4 GDL.

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia, así la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con valores que toman sus coordenadas articulares.

Sea propuesto un modelo matemático del brazo robótico, en base a su análisis de cinemática directa, y al análisis de cinemática inversa con el que se calcula la posición del elemento final de dos formas diferentes, de manera directa e inversa y para los dos casos se usan los modelos Geométricos. Los modelos geométricos que describe el cálculo de la cinemática directa e inversa están basados en las relaciones trigonométricas de “la ley de senos y cosenos”. Una vez encontrada las relaciones trigonométricas es fácil calcular los valores desconocidos en nuestro sistema, cabe mencionar que este tipo de modelos se propone siempre para robots de pocos grados de libertad, donde la redundancia de grados de libertad ya que la complejidad para calcular muchas relaciones trigonométricas sería más complicada, para ello existen más métodos para el análisis y el cálculo de modelos cinemáticos de manera sistemáticos para n- grados de libertad, tales como:

- Teorema de Denavit Hartenberg
- Transformaciones Homogéneas
- Métodos diferenciales
- Resolución por métodos numéricos de LaGrange o newton raps son
- Modelando el sistema

Para iniciar el modelado del brazo robótico, primero se tiene que conocer algunas características físicas del robot o de las ecuaciones matemáticas que describirán al brazo robótico. Para este caso se conocen los ángulos finales al cual el efector final debe de llegar para ejecutar esa tarea, antes debe conocer dichos ángulos y desplazamientos.

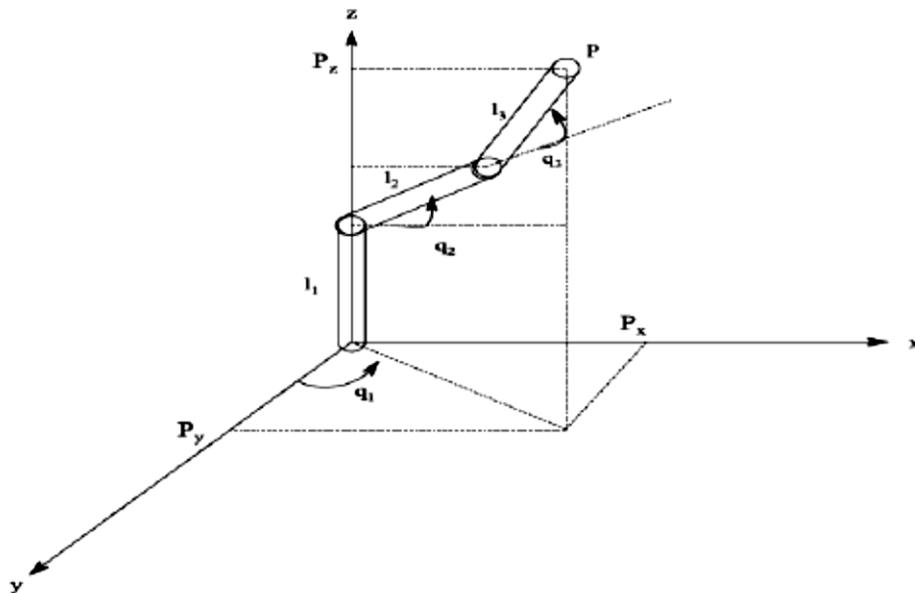


Ilustración 99. Manipulador articulado 3DOF en coordenadas esféricas para análisis cinemático directo

Si se indican las coordenadas efectoras finales del manipulador en base a los ángulos de las articulaciones, Significa la cinemática hacia adelante. En otras palabras, en la cinemática directa, las medidas de la articulación Espacio están disponibles y queremos determinar las medidas de espacio de coordenadas. En realidad, El análisis cinemático directo es un mapeo desde el espacio articular hasta el espacio coordenado. Conforme A la figura 99, la cinemática delantera del manipulador articulado 3DOF se ha determinado como abajo:

$$P_x = (l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) * \sin \theta_1$$

$$P_y = (l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) * \cos \theta_1$$

$$P_z = l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_1$$

Cinemática inversa

Invirtiendo la definición cinemática hacia adelante tenemos la definición cinemática inversa. Por estas ecuaciones podemos encontrar los ángulos apropiados para las coordenadas efectoras finales deseadas. Según las dos definiciones de cinemática, está claro que la cinemática inversa es más sofisticada que la cinemática inversa. De acuerdo con la Figura 2 tenemos:

$$\theta_1 = \text{atan2}(P_y, P_x)$$

$$r = \pm\sqrt{P_x^2 + P_y^2}$$

$$D = \pm\sqrt{(P_x - l_1)^2 + r^2}$$

$$\theta_3 = \text{acos}\left(\frac{D^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_2l_3}\right)$$

$$\theta_3 = \text{acos}\left(\frac{(P_x - l_1)^2 + P_y^2 + P_z^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_2l_3}\right)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(r, P_x - l_1) - \text{atan2}(l_2 + l_3 \cos \theta_3, l_3 \sin \theta_3)$$

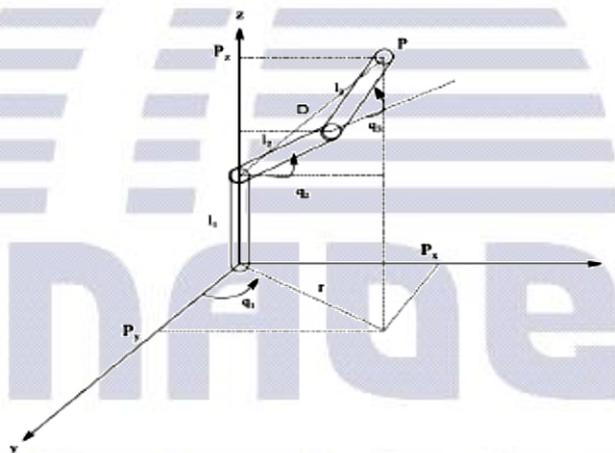


Ilustración 100. Articulaciones del brazo robótico para el análisis de cinemática

El análisis anterior se planteó solo para la programación de la cinemática inversa requerida para las pruebas finales del funcionamiento del brazo robótico de 4 grados de libertad.

4.9 PROGRAMACIÓN EN ARDUINO.

El siguiente código que se muestra a continuación se programó la cinemática inversa para probar el correcto funcionamiento de 2 grados de libertad para el brazo robótico:

```
1  #include <math.h>
2  #include <Servo.h> // Libreria del Servo.
3
4  //conversion de radianes a grados
5  const float rad_a_grados = 180 / PI;
6
7  //maximo longitud del brazo
8  #define brazo_longitud 100
9
10 //dos objetos (actuadores para dar los angulos)
11 Servo servo1, servo2;
12
13 //define variables para almacenar la posición de X , Y deseada
14 int posX = 0, posY = 0;
15
```

Ilustración 101. Declaración de Librerías y variables

En la imagen anterior se muestra la declaración de las librerías utilizadas y también las variables globales del programa, ha si como dos constantes definidas como servo1 y servo2 que define el objeto servos para hacer llamado del motor no como pin o terminal del microcontrolador, si no como un objeto con propiedades y acciones.

También se muestran dos variables como lo es int posX y int posY que son variable en donde se guardan los valores deseados al cual se necesita posicionar el efector final, estas dos variables se denominan enteras pues el valor de las posiciones de x, y son igual valores absolutos.

```
15
16 //inicializa la configuración principal del programa en el arduino
17 void setup()
18 {
19     servo1.attach(11);
20     servo2.attach(10);
21     Serial.begin(9600);
22     armTo(posX, posY);
23     delay(5000);
24
25 }
```

Ilustración 102. Configuración de inicio del programa

En la imagen 103, se muestra la configuración inicial del programa, en ella se muestra la inicialización del puerto serial a 9600 baudios en la línea: Serial. Begin (9600); esta función es muy importante para poder mandarle la coordenada deseada a nuestro código de cinemática inversa para hacer el cálculo de la posición que cada servomotor debe tomar, esta posición se imprime como un valor de ángulos en grados.

```
28 void loop()  
29 {  
30     armTo(posX, posY);  
31 }  
32  
33
```

Ilustración 103. Función principal

En la función principal solo está definido un subprograma llamado armTo(posX, posY); que ejecuta el cálculo de la posición y calcula el Angulo en para los servomotores.

```
46 //calcula los nuevos angulos de x, y deseadas  
47 void armTo(float x, float y) {  
48     float h = sqrt(square(x) + square(y));  
49     //calculates angles based on desired point  
50  
51     float a1 = (getAngle(brazo_longitud, brazo_longitud, h) + atan2(y, x));  
52     float a2 = (getAngle(h, brazo_longitud, brazo_longitud));  
53     moveServo(a1, a2);  
54 }  
55
```

Ilustración 104. Subprograma principal

Dentro del programa principal se calcula la cinemática inversa, con el método geométrico y utilizando el teorema de Pitágoras, con el cual se busca encontrar el valor de la hipotenusa y los valores de los catetos opuestos o adyacentes, con solo dos valores conocidos es posible conocer un tercer valor, que sirve para encontrar los ángulos relacionados con cada uno de los vectores. Para la comunicación del puerto serial y él envió de datos se programó una función que verificara si estaba disponible el puerto serial, y si lo está pasa toma los valores de posición para generar el cálculo de la cinemática inversa.

```

--
36 // verifica si esta disponible el puerto serial.
37 void serialEvent()
38 {
39   if (Serial.available())
40   {
41     posX = Serial.parseInt();
42     posY = Serial.parseInt();
43   }
44 }
45

```

Ilustración 105. Disponibilidad del puerto serial

El subprograma que se muestra en la siguiente imagen convierte los grados de radianes a grados sexagesimales, esto es porque los servomotores utilizados como actuadores para mover cada una de nuestras articulaciones reciben un pulso en forma de escalón unitario que depende del tiempo y de la amplitud del pulso cada uno de los grados del servomotor, la librería de Arduino prácticamente le envía al de forma codificada cada uno de estos pulsos que posicionan al servomotor en la posición deseada

```

55
56 void moveServo(float a1, float a2) {
57   //int deg1 = 180-constrain((PI - a1) * radTodegree, 0, 180);
58   int deg1 = 180-constrain((PI - a1) * rad_a_grados, 0, 180);
59
60   //int deg2 = constrain(a2 * radTodegree, 0, 180);
61   int deg2 = constrain(a2 * rad_a_grados, 0, 180);
62   //180-deg so servo moves from right to left
63
64   servo1.write(deg1);
65   servo2.write(deg2);
66

```

El

Ilustración 106. Subprograma que convierte de radianes a grados

código esta comentado con la intención de ser más explícito en cuanto al significado y al funcionamiento de cada línea función utilizada, también cabe mencionar que hay partes de le código que están desactivadas y fue debido a que con estas líneas se hicieron pruebas del funcionamiento del código.

4.9.1 CREACIÓN DE BASE DE PRUEBAS

Para la creación de la base de pruebas se utilizaron varias herramientas a mayoría fueron herramientas de carpintería debido a que nuestra base de pruebas fue construida de madera debido a su versatilidad en la construcción por su coste que es relativamente bajo en comparación de los metales o cualquier otro tipo de material, también otra característica fue su resistencia.

En la siguiente imagen se muestra la tabla de 50 x50 cm que fue utilizada como base para emular las mismas dimensiones que tiene las patas de aterrizajes del Dron Matrice 100, y a su vez se pudiera apreciar el funcionamiento que tendría el brazo robótico montado sobre la parte inferior del Dron, el material de la base para pruebas del Dron fue de material comprimido o también llamado FIBRACEL de 1 pulgada de espesor.



Ilustración 107. Corte de la base de pruebas

Para realizar el corte de la base de 50x50 se utilizó dos prensas manuales de 4 pulgadas (También llamada sargento), con la cual se sujetó en la mesa de trabajo la madera que se cortó y para cortarla se utilizó una sierra manual de 60 cm.

El siguiente paso para construir la base de pruebas, fue cortar 4 maderas de 1 metro de longitud con un 2 pulgadas de ancho por 1 pulgada de espesor, las cuatro maderas fueron necesarias para tomarlas como patas de la base de pruebas, y su longitud fue determinada por la longitud del brazo robótico asegurando que el brazo robótico no fuera a colisionar con parte de la base de pruebas o simplemente colisionar con el propio suelo del área de pruebas.



Ilustración 108. Corte de las patas utilizadas

Para sujetar las patas creadas para la base de pruebas se utilizaron pijas para aglomerado o material comprimido, de 2.5 pulgadas y también fueron necesarias dos tablas con las mismas dimensiones anteriores pero con la longitud de 45 cm, estos fueron

puestos en la parte inferior como un soporte de las patas de la base, pues se experimentaba una superficie muy inestable y con ayuda de los soportes anteriores se pudo corregir.



Ilustración109. Base de pruebas Armada

La corrección para la base fue satisfactoria por lo cual de esta manera quedo armada la base de pruebas para el brazo robótico, las pruebas iniciales fueron en su base y posterior a ello se planteó un sistema de pruebas con reíles para investigaciones posteriores.

4.9.2 ARMADO FINAL Y PRUEBA DEL BRAZO ROBÓTICO

Las pruebas todas fueron hechas en la base de pruebas antes mencionada y mostrada su construcción, esto debido a que este es un proyecto de investigación donde mi colaboración tenía sus alcances solo en el diseño y la construcción del brazo robótico, por tal motivo las pruebas fueron las siguientes;



Ilustración 110. Servomotor de la articulación 2

En la figura de izquierda se puede apreciar el tipo de servomotor que se utilizó para la articulación número 2, este servomotor tiene un torque de 53.1kg con lo cual se aseguró el correcto funcionamiento, de esta parte del brazo robótico.

El servomotor tiene la característica de tener dos ejes por lo que fue relativamente más fácil hacer una articulación con la cual se pudiera mover con mayor fuerza contra los extremos siguiente de los eslabones.

En la siguiente imagen se muestra el cableado de las terminales del servomotor, la longitud del cable fue de 1 metro para la segunda articulación y se le colocó un color diferente para cada cable tal como viene originalmente un servomotor, para denotar cuál de las terminales eran líneas de alimentación y cuales era la entrada de la señal de control.



Ilustración 111. Articulación 2 y su cableado

Se colocó termofit para hacer cada uno de los empalmes y no se utilizó alguna otra tipo de cinta, pues se consideró la tensión del cable a la que lo somete cada articulación en movimiento, por lo que pudiera ocasionar que se despegaran.

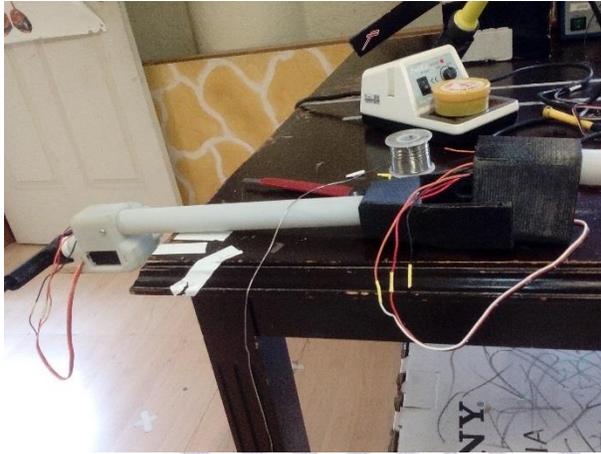


Ilustración 112. Articulación 3 con su cableado

De igual manera para la articulación 3 se usó termofit para hacer los empalmes de cada uno de los cables y el cable se metió por la parte interna de los eslabones para hacer del brazo más estético su armado y también para evitar que alguno de los cables pudiese enredarse en alguna de las articulaciones en movimiento.

En la imagen siguiente se puede apreciar la articulación final con su cableado y para esta final el cable midió 1.70 metros dando algunos centímetros de cable para dejar holgado sin restringir el funcionamiento o la rotación de cada una de las articulaciones.



Ilustración 113. Cableado de la articulación 4

Para la parte las pruebas el elemento final fue configurado en un Angulo de 90° es decir tendría aproximadamente 45° para rotar en ambos sentido, generando a si el efecto de limpieza con una secuencia.

También el limpiador que se utilizo es necesario mencionarlo, ya que este fue una goma comercial que traen los limpiadores comerciales, este se dejó tal cual si recortarlo ya que se requería una mayor superficie de limpieza en cuanto a los movimiento que efectúa en las superficie a limpiar y otra característica muy importante fue, que el

limpiador fue diseñado para ser intercambiable, por alguna esponja u otro tipo de elementó de limpieza que se deseara utilizar.

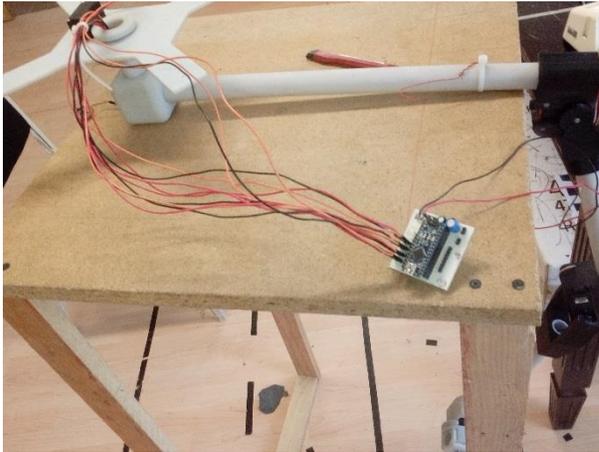


Ilustración 114. Conexión de la tarjeta Controladora.

Para la tarjeta de control y su conexión de cada uno de las terminales de los servomotores se utilizó sus propios conectores, los cuales se recorrieron hasta los extremos finales de los cables y se soldaron a ese conector, con ello se hizo más versátil las conexiones y también se hizo la tarjeta modular, es decir de fácil ensamblaje, ya que puede ser desconectada y conectada para moverla de ubicación u otras cosas.

Esta características antes mencionada fue muy útil para el momento de las pruebas y la parte de experimentación ya que cada uno de los motores se probaron por separados haciendo uso de una fuente de 3 amperes y un multímetro, el multímetro fue utilizado para medir la corriente pico y la corriente máxima de operación del brazo robótico.



Ilustración 115. Armado final del Brazo

la corriente máxima medida en operación del brazo, alcanzo los 3.5 Amperes y su corriente de pico a pico fue de 4 amperes, para lo cual se puede decir que es una corriente considerablemente alta pensando en que el brazo ha sido diseñado para ser cargado por un dron el cual la corriente máxima de salida en la batería es de 5 Amperes, pero esta corriente seria compartida entre la aeronave y el brazo.

Como observación la aeronave tendría un tiempo de vuelo reducido, siendo esta problemática una búsqueda por resolver esta situación con la adición de una batería extra.

Finalmente en las pruebas se hizo una secuencia de los movimientos de cada una de las articulaciones, y se midió las diferentes posiciones del brazo para saber cuál de las posiciones tenía una mayor longitud sin presentar movimiento o perturbaciones no deseadas a la base, ya que esto hubiese ocasionado la ruptura o el mal funcionamiento de alguna articulación.

La longitud más larga se encontró con el brazo totalmente estirado con una longitud de 95 cm liberando cualquier tipo de problemas con los rotores y las hélices del Dron Matrice 100.

En las imágenes de la figura 116 se muestra el brazo montado sobre la base de pruebas y en la imagen de la izquierda se puede ver en la parte superior el dron Matrice 100, montado sobre la base, para visualizar como quedaría prácticamente el dron con el brazo.

La primera articulación no fue utilizada en la secuencia ya que por el momento las tareas futuras que realizara el brazo solo serán con movimientos básicos y posteriormente se trabajara en futuras investigaciones en el laboratorio de robótica, con movimientos más avanzados donde se requiere un mayor control de todas las articulaciones.



Ilustración 116. Brazo en su base de pruebas

TRABAJO FUTURO

Crear un control basado en el control cinemático inverso sobre el brazo Robótico en la tarjeta ODROID la cual tiene un sistema operativo de Linux (Ubuntu14.0), para mejorar el control del brazo Robótico programada en C, corriendo abordo para hacer que el control de las tareas limpiezas sean más controladas y con poca perturbación mecánica y las perturbaciones provocadas por las fricciones de la superficie y el tipo de material de limpieza.

También se puede proponer la utilización de otro tipo de morfología de manipulador para este tipo de tareas, de acuerdo al desempeño del brazo de tipo antropomórfico se lo notar que tiene perturbaciones mecánicas debido a su estructura física, también se podría hacer la comparación con un robot paralelo o Delta que tiene la capacidad de tener una mayor precisión pero una complejidad mayor en cuanto a su control

De acuerdo con las tendencias actuales en el mundo de los Drones se tiene el panorama de una inteligencia y control avanzado en aeronaves no tripuladas, con lo cual se ha llegado a tener ciertas miras de investigación tales como la investigación de enjambres de drones o tareas colectivas, es decir que un grupo de drones no tripulados (autónomamente), tengan la capacidad de matarse en vuelo, esquivar objetos e inclusive realizar diversas tareas y manipular diversos objetos.

En la realización de diversas tareas se pretende que los drones puedan hacer tareas de limpiezas como una comunidad de drones, teniendo cada uno de ellos tareas relacionadas entre sí, para cumplir un objetivo en específico como un equipo de limpieza humano donde las tareas son divididas, estas tareas se pretenden sean divididas en gran parte por el peso limitado que no debe excederse en el dron, ya que los drones tienen una carga de transporte limitada por el torque de los motores que le dan su propulsión

CONCLUSIONES

En la etapa de pruebas se tuvieron muchas observaciones, entre las cuales esta las longitudes del brazo en diferentes posiciones y ángulos que ocasionaban esfuerzos a los motores, esto se debe a la longitud de los eslabones como antes se había mencionado, unidos entre esos sumaron a una longitud de 1 metro tal como se preveía, y también generaban un centro de masa alejado de la base de pruebas. Una de las causas de la poca viabilidad a la construir un brazo robótico de esas dimensiones, para un dron es la cantidad de peso que se le añadió al dron y como en el diseño se previó y se diseñó como tal para que este llegara a mantenerse entre un peso de 1kg, el brazo robótico físicamente alcanzo 1.170kg es decir 170 gramos no previstos.

El peso añadido fue debido al cambio de materia y a piezas modificadas tanto como a el cambio de dos motores que fueron necesarios para aumentar el torque de dos de sus eslabones. De acuerdo con los resultados obtenidos y con las diversas piezas fabricadas en diferentes tipo de materiales, se puede decir que un brazo robótico de 4 grados de libertad puede llegar a ser una problemática de diseño e implementación muy grande, ya que se tiende a entrar en un ciclo de ganar torque en motores y al mismo tiempo al aumentar el torque con los motores, estos cada vez van siendo más pesados. Otra de las observaciones fue en la parte de la tarjeta controladora, ya que esta fue diseñada para un consumo de corriente de 2 amperes como máximo y al sustituir los motores que generaban el torque necesario para levantar el brazo robótico de esas dimensiones, el consumo de corriente fue más de lo calculado para nuestra tarjeta controlador y se pensó en el peso del brazo más el peso necesario para mover las articulaciones en vuelo, que para ello se necesitaría una batería de 5 amperes por lo que el peso de la batería fue un peso extra.

Finalmente se plante la idea de buscar una mejor en el diseño del brazo robótico con otro tipo de material como la fibra de carbono que tiene propiedades de su alta resistencia, así como un peso relativamente más bajo que los peso que tienen las piezas hechas por impresoras 3D.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, «INAOE,» [En línea]. Available: <http://www.inaoep.mx/>.
- [2] M. Fuentes, «Empresa & Limpieza,» Viernes 20 Febrero 2017. [En línea]. Available: <http://empresaylimpieza.com/not/672/riesgos-laborales-especificos-del-sector-de-la-limpieza/>.
- [3] . S. Ponce, «HSEC,» Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.emb.cl/hsec/articulo.mvc?xid=522>.
- [4] N. H. T. & M. V. Guenard, «Dynamic modeling and intuitive control strategy for an " X4-flyer",» *IEEE. In Control and Automation, 2005. ICCA'05. International Conference* , vol. Vol. 1, p. 10, 2005, June.
- [5] M. I. C.-H. A. & B. J. Bisgaard, «Full state estimation for helicopter slung load system.,» *In AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit* , 2007, August.
- [6] L. N. R. & M. L. (. D. Gentili, «Modeling and control of VTOL UAVs interacting with the environment. In Decision and Control,» *Conference on (pp. 1231-1236). IEEE.*, vol. 47th IEEE , 2008. .
- [7] M. & K. K. Bernard, «Generic slung load transportation system using small size helicopters. In Robotics and Automation,» *IEEE International Conference on (pp. 3258-3264)*, vol. ICRA'09, 2009, May.
- [8] P. E. & D. A. Pounds, «Hovering stability of helicopters with elastic constraints,» *In ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference (pp. 781-788).* , 2010, January.
- [9] C. E. B. J. J. I. T. A. J. C. J. K. J. C. S. J. A. .. & M. M. A. Doyle, «Avian-inspired passive perching mechanism for robotic rotorcraft. In Intelligent Robots and Systems,» *RSJ International Conference on (pp. 4975-4980). IEEE.*, Vols. %1 de %2(IROS), 2011 IEEE, 2011, September.
- [10] M. K. C. & O. P. Orsag, «Modeling and control of MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle.,» *Journal of Intelligent & Robotic Systems* , , pp. 1-14., (2013) . .
- [11] M. Kobilarov, «Nonlinear trajectory control of multi-body aerial manipulators.,» *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 679., nº 73, pp. 1-4, (2014)..
- [12] S. M. I. H. S. M. I. Suseong Kim, «Vision-Guided Aerial Manipulation Using a Multirotor with a Robotic Arm,» *IEEE TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, p. 13, 2016.
- [13] A. Segura, «La catalana Cleandrone usará drones para limpiar edificios,» *El Periodico Economia.*, p. 1, DOMINGO, 3 ABRIL 2016 .

- [14] apr/ Con información de El Librepensador, «EL ECONOMISTA,» *¿Qué son los "drones" o aviones no tripulados?*, p. 1, 16 MARZO 2011.
- [15] EcuRed, «Vehiculo Aereo No Tripulado,» *EcuRed*, p. 2, lunes, 27 febrero 2017.
- [16] CONCEPTODEFINICION.DE, «Definicion de Dron,» *CONCEPTODEFINICION.DE*, p. 2, 30 Noviembre 2016.
- [17] TECNOLOGÍA, *area de Tecnologia*, desconocido: <http://www.areatecnologia.com>, 2017.
- [18] AERPAS, « TIPOS DE DRONES AÉREOS,» Drone Spain ®, 9 MAYO 2016. [En línea]. Available: <http://dronespain.pro>. [Último acceso: 28 FEBRERO 2017].
- [19] La Electrónica de Vuelo para una Aeronave No tripulada., «Vuelo Artificial,» [En línea]. Available: <https://vueloartificial.com/introduccion/primeros-pasos/la-electronica-de-vuelo/>. [Último acceso: 9 Febrero 2017].
- [20] Los Multicopteros o Drones, «Tele-Copter,» [En línea]. Available: <http://www.telecopter.net/que-es-un-multicoptero.php>. [Último acceso: 9 Febrero 2017].
- [21] REAXION , «ciencia y Tecnologia Universitaria,» [En línea]. Available: http://reaxion.utleon.edu.mx/Art_Calculo_de_variables_de_control_PID_para_Drones_Cuadcopter.html. [Último acceso: 10 Febrero 2017].
- [22] Javier Galera , «TODODRONE,» 13 Junio 2015. [En línea]. Available: <http://www.todrone.com/nuevo-dron-presentado-dji-matrice-100/>. [Último acceso: 14 Febrero 2017].
- [23] DRONES, «DRONESHOP,» DroneShop Es Una Unidad De Negocio De Unmanned Systems | © Unmanned Systems SAPI De CV , [En línea]. Available: <https://droneshop.mx/navigation/dji-matrice/dji-matrice-100/dji-matrice-100>. [Último acceso: 15 Febrero 2017].
- [24] XATAKA - Drones, «XATAKA,» 9 Junio 2015. [En línea]. Available: <https://www.xataka.com/drones/dji-matrice-100-es-un-dron-para-desarrolladores-con-el-se-estrena-un-sistema-capaz-de-evitar-obstaculos>. [Último acceso: 15 Febrero 2017].
- [25] DJI GPS Pro, «DJI - drones,» [En línea]. Available: <http://www.dji.com/ground-station-pro>. [Último acceso: 15 Febrero 2017].
- [26] Profesor Molina, «Historia de la Robótica,» [En línea]. Available: <http://www.profesormolina.com.ar/tecnologia/robotica/historia.htm>. [Último acceso: 15 Febrero 2017].
- [27] «Usos, funcionamiento y aplicaciones de brazos robóticos,» prezi, 29 octubre 2013. [En línea]. Available: <https://prezi.com/n-nint4jrqod/usos-funcionamiento-y-aplicaciones-de-brazos-roboticos/>. [Último acceso: 16 Febrero 2017].

- [28] MEKKAM, «Mekkam packing solution,» [En línea]. Available: <http://www.mekkam.com/robotica-industrial/grados-de-libertad-de-un-robot/>. [Último acceso: 16 Febrero 2017].
- [29] A. Barrientos , L. F. Peñín y C. Balanguer, «Fundamentos de Robótica 2da Edición,» de *Cinematica Del Robot*, Mexico, McGraw-Hill, 2007, 1 de enero de 1997, p. 512.
- [30] A. Barrientos, L.F. Peñín, C. Balaguer, R. Aracil,, “Fundamentos de robótica”, McGraw Hill, 1997.
- [31] Ing. Martínez Valdéz Armando, «APLICACIÓN DE MATRICES DE TRANSFORMACIÓN EN EL CONTROL DE POSICIÓN,» 2017.
- [32] Hugo Armando Díaz Varela, «Calculo Vectorial,» 18 Septiembre 2012. [En línea]. Available: <http://calculovector.blogspot.mx/2012/09/el-jacobiano.html>. [Último acceso: 28 Febrero 2017].
- [33] Jazmin aguirre Suarez; leticia velarde Peña, «Resumen de Actuadores Electricos y Mecanicos,» <https://es.scribd.com/doc/6291040/Resumen-de-Actuadores-Electricos-y-Mecanicos>, Puerto Vallarta, Jalisco, 2008.
- [34] Uriel Méndez, «330 OHMS,» Derechos reservados © 2017 330ohms., 14 marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.330ohms.com/blogs/blog/112837444-que-son-los-servomotores>. [Último acceso: 27 Febrero 2017].
- [35] Electrónica: teoría y práctica, «Características Arduino Nano 328,» © 2012 Electrónica: teoría y práctica, 24 Febrero 2017. [En línea]. Available: <http://electronica-teoriaypractica.com/caracteristicas-arduino-nano-328/>. [Último acceso: 28 Febrero 2017].
- [36] R. Alonso, «hardzone,» 21 Julio 2015. [En línea]. Available: <https://hardzone.es/2015/07/21/odroid-xu4-mini-pc-android-linux/>. [Último acceso: 27 Febrero 2017].
- [37] «Baterías LIPO,» 31 Diciembre 2013. [En línea]. Available: <http://blogturbohobby.blogspot.mx/2013/05/bateriaslipo.html>. [Último acceso: 28 Febrero 2017].
- [38] M. Fuentes, «Empresa & Lipieza,» Febrero 2017. [En línea]. Available: [http://empresaylimpieza.com/not/672/riesgos-laborales-especificos-del-sector-de-la-limpieza/..](http://empresaylimpieza.com/not/672/riesgos-laborales-especificos-del-sector-de-la-limpieza/) [Último acceso: 17 Febrero 2017].
- [39] RobotShop Inc., «RobotShop,» Putting robotics at your service is a trademark of RobotShop inc., 2010. [En línea]. Available: <http://www.robotshop.com/blog/en/robot-arm-torque-calculator-9712>. [Último acceso: 23 Mayo 2017].
- [40] M. O. . C. K. . P. Oh, «Modeling and Control of MM-UAV: Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicle,» *J Intell Robot Syst*, Vols. %1 de %2DOI 10.1007/s10846-012-9723-4, nº 69:227–240, p. 14, (2013) .



ANEXOS

INAOE

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**

PLAN DE TRABAJO

Plan de trabajo aceptado por el asesor; Dr. Israel Cruz Vega y el co-asesor; Dr. José Martínez Carranza.

Proyecto: Diseño y Construcción de un Brazo Robótico de 4 Grados de Libertad.

Plan de trabajo de Emilio Eduardo Gómez López.

Ubicación:

Laboratorio de Robótica de la coordinación de ciencias computacionales del INAOE.

1. Estudio del estado de arte de brazos robóticos para drones: definir grados de libertad, tareas que realizan, tipos de efectores finales.
2. Proponer un diseño de un brazo robótico para una tarea específica
3. Realizar diseño en computadora y simulaciones de operabilidad
4. Hacer uso de máquina de impresión 3D para el brazo robótico
5. Presentar resultados


Firma del Asesor
Dr. Israel Cruz Vega

Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica

CRONOGRAMA DE RESIDENCIA PROFESIONAL

Nombre: Emilio Eduardo Gómez López

No. de Control: TE120484

Carrera: Ingeniería Mecatrónica

Proyecto: Diseño y construcción de un brazo Robótico de 4 grados de libertad

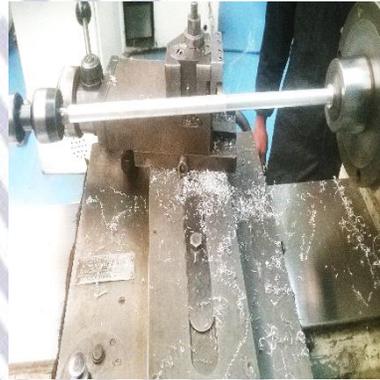
NOMBRE DE TAREAS	INICIO	FIN	2011													
			E	F	M	A	M	J	J	A						
DEFINICION DE PROYECTO	11/01/2017	17/01/2017	X													
JUSTIFICACION DEL PROYECTO	18/01/2017	20/01/2017	X													
DEFINICION DE OBJETIVOS	23/01/2017	27/01/2017	X													
Estudio del estado de arte de brazos robóticos para drones, definir grados de libertad, tareas que realizan, tipos de efectores finales.	30/02/2017	07/02/2017		X												
Proponer un diseño de un brazo robótico para una tarea específica	08/02/2017	24/02/2017		X												
ANALISIS DE CREACION Y DESARROLLO DEL PROYECTO	27/02/2017	10/03/2017			X											
Realizar diseño en computadora y simulaciones de operatividad	13/03/2017	31/03/2017			X											
Hacer uso de máquina de impresión 3D para el brazo robótico	03/04/2017	21/04/2017				X										
PRUEBAS Y RETROALIMENTACION DEL PROYECTO	24/04/2017	12/05/2017						X								
ENTREGA DEL PROYECTO	15/05/2017	09/06/2017								X						

Nota: Describir detalladamente cada una de las actividades a realizar en las tareas, agregando fechas en inicio y fin y, marcando con una X en la letra que corresponda al mes de su realización.

FOTOS DE LAS DIVERSAS PRUEBAS



Acabado de la rosca



Maquinado de las patas de aterrizaje



Peso de la primeras pesos

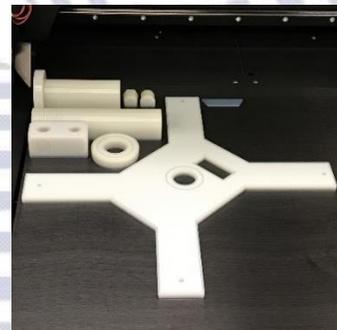
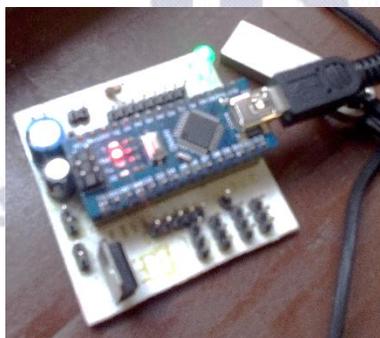


Imagen de las últimas piezas



Tarjeta de Control para servos

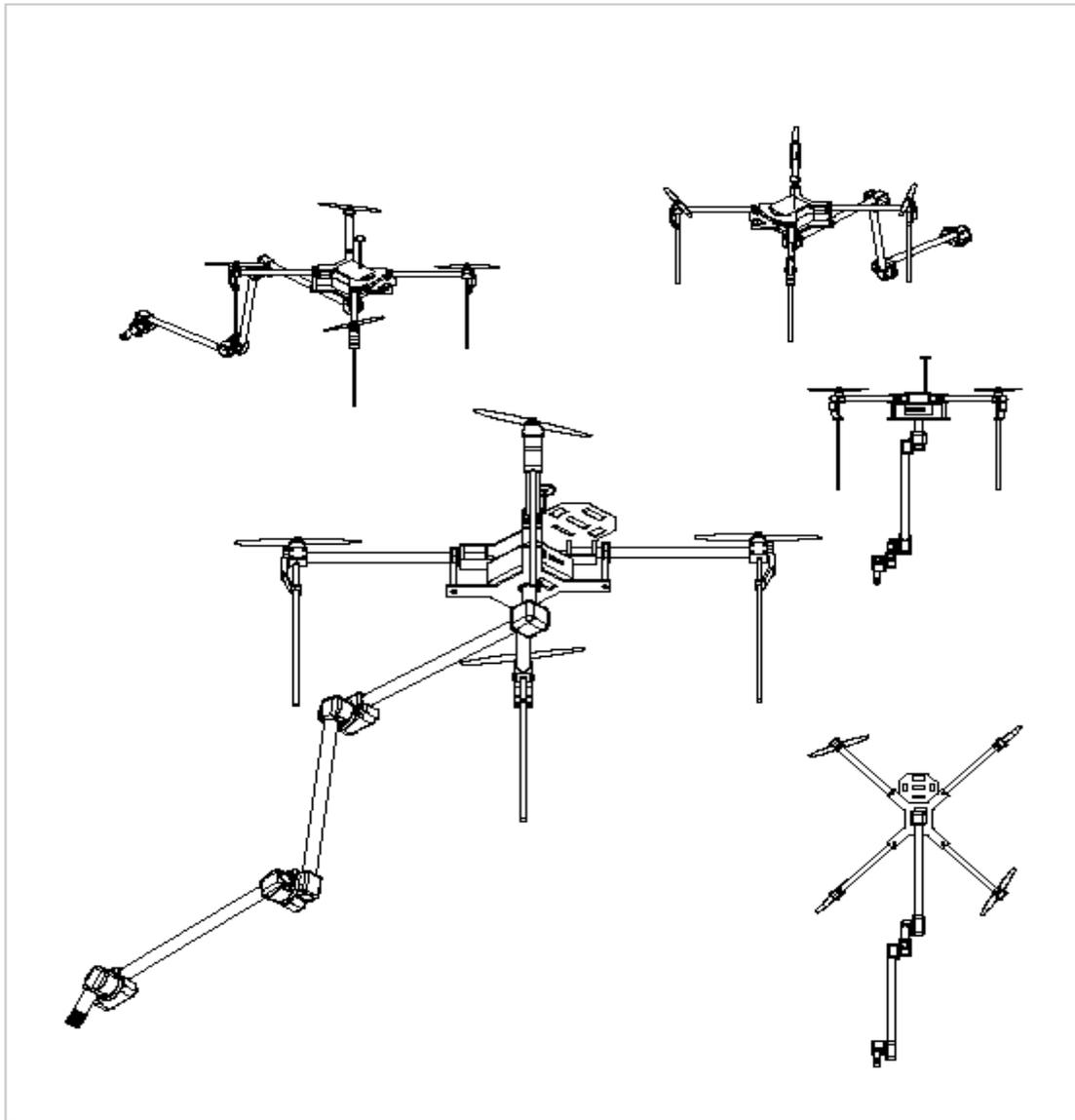


Base de pruebas experimental del brazo.

BRAZO ROBOTICO DE 4 GDL



**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO: Acabado de impresión	REBARBAS Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN: 09-06-17
				Ing. Emilio Eduardo Gómez López	INAOE
TÍTULO: Diseño de un brazo robotico de 4 GDL					
N.º DE DIBUJO Brazo Robótico 4DGL		MATERIAL: VEROGRAY RGD850		A4	
		PESO: 450 gramos		ESCALA: 1:1	
		HOJA 1 DE 1			

Optica y Electronica

CÓDIGO DE ARDUINO DEL BRAZO ROBÓTICO EN PRUEBAS

```

#include <math.h>
#include <Servo.h> // Libreria del Servo.
//conversion de radianes a grados
const float rad_a_grados = 180 / PI;
//maximo longitud del brazo
#define brazo_longitud 100
//dos objetos (actuadores para dar los angulos)
Servo servo1, servo2;
//define variables para almacenar la posición
de X , Y deseada
int posX = 0, posY = 0;
//inicializa la configuración principal del
programa en el arduino
void setup()
{
  servo1.attach(11);
  servo2.attach(10);
  Serial.begin(9600);
  armTo(posX, posY);
  delay(5000);
}
void loop()
{ armTo(posX, posY);
}
void serialEvent()
{ if (Serial.available())
  {
    posX = Serial.parseInt();
    posY = Serial.parseInt();
  }
}
//calcula los nuevos angulos de x, y deseadas
void armTo(float x, float y) {
  float h = sqrt(square(x) + square(y));
  //calculates angles based on desired point
  float a1 = (getAngle(brazo_longitud,
brazo_longitud, h) + atan2(y, x));
  float a2 = (getAngle(h, brazo_longitud,
brazo_longitud));
  moveServo(a1, a2);
}

void moveServo(float a1, float a2) {
  //int deg1 = 180-constrain((PI - a1) *
radTodegree, 0, 180);
  int deg1 = 180-constrain((PI - a1) *
rad_a_grados, 0, 180);

  //int deg2 = constrain(a2 * radTodegree, 0,
180);
  int deg2 = constrain(a2 * rad_a_grados, 0,
180);
  //180-deg so servo moves from right to left
  servo1.write(deg1);
  servo2.write(deg2);

  // Serial.print(deg1);
  // Serial.print(",");
  // Serial.println(deg2);
  //delay(10);
}

//ley de cosenos calcula angulo A donde a es el
cateto opuesto
float getAngle(float a, float b, float c)
{
  return acos((square(b) + square(c) - square(a))
/ (2 * b * c));
}

```

TABLA DE ESPECIFICADORES DEL MATERIAL DE IMPRESIÓN

RIGID OPAQUE MATERIALS						
VEROGRAY R90850, VEROBLACKPLUS R90875, VEROWHITEPLUS R90895, VEROYELLOW R90896, VEROCYAN R90841, VEROMAGENTA R90851						
	ASTM	UNITS	METRIC	UNITS	IMPERIAL	
Tensile strength	D-638-03	MPa	90-85	psi	7290-9490	
Elongation at break	D-638-03	%	10-25	%	10-25	
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-430,000	
Flexural Strength	D-790-03	MPa	75-110	psi	11000-16000	
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2200-3200	psi	320,000-460,000	
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122	
HDT, °C @ 1.02MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122	
Load Notched Impact	D-398-06	J/m	20-30	ft-lb/inch	0.375-0.968	
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.1-1.5	%	1.1-1.5	
Tg	DMA, E*	°C	52-64	°F	126-129	
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	63-66	Scale D	63-66	
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76	
Polymerized density	ASTM D792	g/cm ³	1.17-1.18			
Ash content VeroGrey, VeroWhitePlus	USP261	%	0.23-0.26	%	0.23-0.26	
Ash content VeroBlackPlus	USP261	%	0.01-0.02	%	0.01-0.02	