

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:
DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO TIPO INSECTO CON
CONTROL DE LAZO CERRADO PARA RECORRER UNA PISTA CON
OBSTÁCULOS**

**AUTORES:
GEOVANNI JAVIER LOZADA TONATO
JONATHAN FABRICIO VILLACRÉS DURAN**

**TUTOR:
WILLIAM PAUL OÑATE AMAGUAÑA**

Quito, septiembre del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Geovanni Javier Lozada Tonato, con documento de identificación N°1721362927 y Jonathan Fabricio Villacres Duran, con documento de identificación N°1718122425, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO TIPO INSECTO CON CONTROL DE LAZO CERRADO PARA RECORRER UNA PISTA CON OBSTÁCULOS”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIEROS ELECTRÓNICOS, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

.....
Geovanni Javier Lozada Tonato
C.I. 1721362927

.....
Jonathan Fabricio Villacres Durán
C.I. 1718122425

Quito, septiembre del 2020.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ROBÓTICO TIPO INSECTO CON CONTROL DE LAZO CERRADO PARA RECORRER UNA PISTA CON OBSTÁCULOS” realizado por Geovanni Javier Lozada Tonato y Jonathan Fabricio Villacrés Durán, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre del 2020



.....

William Paul Oñate Amaguaña

C.I. 1715580500

ÍNDICE GENERAL

ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN	x
CAPÍTULO 1	1
ANTECEDENTES	1
1.1 Problema de estudio.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Propuesta de solución	3
CAPÍTULO 2	4
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1 Tipos de robots insectos con patas	5
2.2 Locomoción de los insectos	8
2.2.1 Introducción	8
2.2.2 Desplazamiento terrestre.....	9
2.3 Locomoción de Robots tipo insecto	10
2.4 Articulaciones y patas del robot tipo insecto	12
2.5 Robot con patas	13
2.5.1 Cinemática.....	13
2.5.2 Dinámica	15
2.6 Tipos de Control utilizados en Robot Insectos	16
2.6.1 Controlador Proporcional	17
2.6.2 Controlador Integral.....	18
2.6.3 Controlador Proporcional- Derivativo	18
2.6.4 Controlador Proporcional- Integral.....	19
2.7 Microcontrolador.....	20

2.7.1 Características de un Microcontrolador	20
2.8 Arduino	21
2.9 Sensores	22
2.9.1 Sensor Ultrasónico	22
2.9.2 Sensor Sharp	24
2.10 Servos	26
2.10.1 Servomotor	26
2.10.2 Motor Paso a Paso	27
2.11 Mecanismo Theo Jansen	31
CAPÍTULO 3	34
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	34
3.1 Generalidades	34
3.1.1 Patrón de marcha de varios insectos	34
3.1.2 Materiales para la construcción de prototipos robóticos	37
3.2 Esqueleto y estructura dinámica del robot	40
3.3 Placa del controlador	42
3.4 Estudio de las características del Servomotor	43
3.4.1 Estudio del funcionamiento del Servomotor	44
3.5 Sensor	47
3.6 Fuente de alimentación para el control principal	50
3.7 Arquitectura del sistema	53
3.8 Desarrollo del algoritmo para detectar objetos	53
3.8.1 Diagrama de flujo	56
CAPÍTULO 4	57
PRUEBAS Y RESULTADOS	57
4.1. Pruebas de funcionamiento de los servos motores	57
4.2. Pruebas del algoritmo en la detección de objetos	58
4.3. Pruebas en pista	58

CAPÍTULO 5	61
5.1 Conclusiones	61
5.2 Recomendaciones	62
REFERENCIAS	63
ANEXOS.....	67
Anexo 1. Planos del Prototipo robótico tipo insecto.....	67
Anexo 2. Código de programación	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Robot Insecto Palo	5
Figura 2. 2 Robot tipo hormiga	6
Figura 2. 3 Robot Araña diseñada por Festo	7
Figura 2. 4 Robot esquivando obstáculos mediante cámara	8
Figura 2. 5 Movimiento de un insecto hexápodo	9
Figura 2. 6 Ilustración de hexápodo en superficies no planas.....	10
Figura 2. 7 Articulación de un robot Hexápodo	11
Figura 2. 8 Simulación de robot con patas	13
Figura 2. 9 Cinemática de robot con patas comunes	13
Figura 2. 10 Cinemática de pata robótica.....	14
Figura 2. 11 Tipos de robots con patas	16
Figura 2. 12 Controlador proporcional	17
Figura 2. 13 Controlador integral	18
Figura 2. 14 Controlador proporcional-Derivativo.....	19
Figura 2. 15 Controlador Proporcional-Integral.....	20
Figura 2. 16 Funcionamiento ultrasonico.....	23
Figura 2. 17 Sensor Sharp GP2Y0A21F.....	25
Figura 2. 18 Curva característica de voltaje-distancia Sensor sharp	26
Figura 2. 19 Servomotor	26

Figura 2. 20 Servomotor Sg90.....	27
Figura 2. 21 Sensor a pasos	28
Figura 2. 22 Esquema interno motor a pasos	29
Figura 2. 23 Control de un motor unipolar.....	29
Figura 2. 24 Secuencia motor bipolar	30
Figura 2. 25 Control motor bipolar	31
Figura 2. 26 Control motor reluctancia variable.....	32
Figura 2. 27 Analisis del mecanismo Theo Jansen	32
Figura 2. 28 Articulación de un mecanismo Theo Jansen	33
Figura 2. 29 Posición de la articulación.....	34
Figura 3. 1 Marcha tripode clásica de un insecto	36
Figura 3. 2 Estructura final del robottipo insecto	43
Figura 3. 3 Curva carasterística de los servomotores	46
Figura 3. 4 Coordenadas para la cinemática directa de una pata.....	47
Figura 3. 5 Curva del sensor Sharp.....	50
Figura 3. 6 Circuito de regulación de voltaje	52
Figura 3. 7 Batería Turnigy Tipo LIPO 1.0.....	53
Figura 3. 8 Arquitectura del sistema	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Matriz Denavit-Hartenbergs	11
Tabla 2. 2 Arduinos usados en componentes de robótica	22
Tabla 2. 3 Comparación entre sensores ultrasónicos investigados.....	244
Tabla 3. 1 Tipo de movimiento según el numero de patas.....	36
Tabla 3. 2 Materiales más usados en prototipos robóticos.....	39
Tabla 3. 3 Piezas a utilizar en el prototipo robótico tipo insecto.....	41
Tabla 3. 4 Limitaciones sobre corriente y voltaje en la placa Arduino nano	41
Tabla 3. 5 Características del sensor Sharp GP2Y0A21	49
Tabla 3. 6 Corriente de consumo de los elementos electrónicos a usar.....	51
Tabla 4. 1 Pruebas de funcionamiento para servomotores.....	58
Tabla 4. 2 Pruebas de funcionamiento del sensor.....	59
Tabla 4. 3 Pruebas de funcionamiento en pista	60
Tabla 4. 4 Pruebas de comparación	60

RESUMEN

En este apartado se describe el diseño, construcción y las características técnicas del funcionamiento y control, empleados en el robot tipo insecto para que recorra la pista con obstáculos. Se ha comenzado con un estudio teórico para conocer los diferentes tipos de locomoción de los hexápodos (insectos artrópodos de 6 patas) para así realizar un simulado del movimiento de los insectos en el mecanismo del robot, logrando así un movimiento natural y rápido. Este estudio se centra en la forma de locomoción de cada insecto artrópodo. Tras este estudio, se ha propuesto el diseño a implementar, desde el movimiento y las condiciones aplicadas en cada pata. Teniendo en cuenta los grados de libertad que posee cada articulación, implementándolo en el mecanismo de control del robot tipo insecto. Respetando las dimensiones que requiere el “CER” (Concurso Ecuatoriano de Robótica). Y así el prototipo podrá competir en las categorías de robot tipo insecto. Se ubicó los elementos electrónicos de manera que el robot tenga un centro de gravedad equilibrado. El hardware se diseñó con la ayuda del software “AutoCAD” implementándolo en madera tríples para las piezas móviles y acoples. Se realizó las respectivas pruebas de funcionamiento, de cada elemento electrónico para su colocación final.

ABSTRACT

This section describes the design, construction and technical characteristics of the operation and control used in the insect-type robot to travel the obstacle course. It has begun with a theoretical study to know the different types of locomotion of insects. The study on the optimal mechanism for the robot to move quickly avoiding obstacles is also presented. This study focuses on the locomotion form of each arthropod insect. After this study, the design to be implemented has been proposed, from the movement and the conditions applied, taking into account the degrees of freedom of each joint to the control mechanism of the insect-type robot. The robot has been built with a design through the rules of the “CER” robotic competition (Ecuadorian Robotics Contest). The electronic elements were placed so that the robot has a balanced center of gravity. The hardware was designed with the help of the “AutoCAD” software, implementing it in triplex wood for moving parts and couplings. The respective functional tests of each electronic element were performed for final placement.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de robots va evolucionando. Al principio fueron los robots móviles por ruedas que proporcionaban varios beneficios, luego investigadores de Honda y Sony (Pioneros en la tecnología robótica) vieron problemas que generaban éstos robots móviles, optaron por incluir extremidades para que sus robots puedan movilizarse por diferentes terrenos, y así evadir obstáculos de mayor dificultad. (Julio Lira Segura, 2018)

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de un prototipo robótico tipo insecto que evite obstáculos mediante un control en lazo cerrado. El robot debe pasar una pista con obstáculos, lo más rápido posible. Para ello se ha realizado investigaciones bibliográficas de robots bioinspirados para el desarrollo básico del prototipo. (Angelica L. Torres Zúñiga. Adrian Romero Vargas, Diseño, construcción y control de un insecto robot, 2006)

El problema de estudio con su justificación se encuentra en el Capítulo 1, en conjunto con los objetivos generales y específicos.

Teniendo en cuenta las investigaciones realizadas como se describe en el Capítulo 2, se procede a diseñar el robot tipo insecto. Eligiendo la estructura que tendrá, así como el material con el cual se integrarán los diferentes elementos electrónicos.

El desarrollo del prototipo se encuentra en el Capítulo 3, el cual detalla la forma y medidas aptas para un robot tipo insecto de competencia, detallando los actuadores y controladores utilizados, en conjunto con la regulación de voltaje para el funcionamiento de cada uno de los elementos electrónicos, así como la programación para que realice el lazo cerrado con realimentación del sensor de distancia.

Las pruebas realizadas junto con los mecanismos de movilizaciones utilizados se presentan en el Capítulo 4. Con el diseño del prototipo se consiguió los movimientos deseados en cada articulación y cumpliendo con los objetivos propuestos.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Problema de estudio

Es un hecho, que en la actualidad los robots se los encuentra en diferentes áreas de estudio, los cuales interactúan con las personas. Han tomado gran ventaja en varios sectores tanto industriales, farmacéuticos, estudiantiles, etc. Con esto los robots cumplen la meta de facilitar nuestra vida y labores cotidianas. (Ortega, A, 2014)

En los dos últimos años, varias empresas y laboratorios universitarios han impulsado el desarrollo de los robots insectos, con la finalidad de resolver problemas como el acceso a zonas remotas o destruidas por catástrofes, o bien apoyar en las tareas de polinización en zonas de cultivos extensos y sensibles. (Diego Ortiz, 2019)

La disciplina de la robótica cada vez sigue evolucionando, y con ello la inspiración para crear nuevas máquinas que proporcionen una gran ayuda al ser humano va en aumento. Al principio fueron los robots móviles por ruedas que proporcionaban varios beneficios, luego los investigadores vieron los problemas que se generaban y optaron por incluir las habilidades de los insectos, los cuales se mueven por todo el terreno, evitando obstáculos y así seguir por su trayectoria. (Julio Lira Segura, 2018)

1.2 Justificación

Los insectos son base fundamental en el estudio de la robótica reactiva, ya que estos poseen características biológicas y motrices que son de interés para ser implementadas en robots bioinspirados, teniendo en cuenta el desempeño de éstos en diferentes áreas. Por otra parte, los animales hexápodos (grupo de animales que cuentan con más de 1 millón de especies) poseen omnidireccionalidad y estabilidad, debido a la formación del trípode de apoyo, el cual se crea en sus patas al dar un paso, permitiéndoles sobrepasar diferentes obstáculos con facilidad y velocidad constante. (Peña-Giraldo, Vladimir, 2015)

Los diversos experimentos de implementación en diseños de robots, tratan de aplicar teorías de control en el desarrollo de un estudio de funcionamiento para el cumplimiento de metas propuestas. Para el desarrollo se incluyen modificaciones tanto en hardware y software al igual que la elección del microcontrolador adecuado para el sistema de control a realizar en el robot. (Agüero Marcos, 2015)

El control implica un sistema de “Control en Lazo Cerrado” para realizar una función específica, dependiendo de las perturbaciones presentes en el funcionamiento del robot. Lo que se busca es diseñar un robot que siga una pista con obstáculos y tenga la capacidad de detectarlos, para tomar una decisión en tiempo real dependiendo del tipo de obstáculo. A diferencia de este tipo de proyectos, la mayoría simula solo los movimientos de los insectos, nuestro proyecto busca implementar un algoritmo de control que realice los movimientos óptimos, dependiendo los requerimientos de la pista. (Agüero Marcos, 2015)

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un prototipo robótico tipo insecto mediante control en lazo cerrado para recorrer una pista con obstáculos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar una investigación bibliográfica sobre los diferentes robots tipo insectos para el desarrollo del prototipo requerido.
- Diseñar un prototipo con las características establecidas en los reglamentos para las diferentes competencias de robótica.
- Programar un algoritmo para la detección de objetos en la pista de obstáculos mediante un control en lazo cerrado.

- Implementar el prototipo robótico tipo insecto para que recorra la pista con obstáculos.
- Comparar diferentes tamaños de obstáculos para la adquisición de errores.

1.4 Propuesta de solución

Desarrollar un prototipo robótico tipo insecto terrestre con un número determinado de articulaciones para su desplazamiento en superficies, el cual determinará si un obstáculo está presente en la trayectoria por medio de la lectura de sensores, los cuales identificarán la distancia del obstáculo presente en la pista, y mediante el control en lazo cerrado realizará una respectiva función para lograr llegar a la meta, cumpliendo con el reglamento de las competencias de robótica en la categoría “Carrera de Insectos”.

El prototipo se compondrá de 3 etapas, la primera etapa se encargará de la alimentación tanto de los sensores, actuadores y el microcontrolador, la segunda etapa cumplirá la función de detectar la distancia a la cual se encuentra el obstáculo, y la tercera etapa realiza el control en lazo cerrado para terminar la trayectoria de carrera en el menor tiempo posible.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se analiza los datos obtenidos por medio de la investigación realizada sobre el desplazamiento y articulaciones de “insectos” artrópodo (Se desplazan con sus 6 articulaciones) (Angelica L. Torres Zúñiga. Adrian Romero Vargas, 2016), con estos datos recogidos fue posible experimentar y diseñar un robot tipo insecto con 6 articulaciones. Es así que tomando en cuenta los aspectos fundamentales que conlleva el desplazamiento de este tipo de robots insectos (Deisy Y. Forero, 2015), se ha diseñado un prototipo para concursar en competencias de robótica en la categoría de robots insectos.

La estructura del cuerpo de los insectos es una parte primordial al momento de plantear un diseño robótico, esto se debe a que cada insecto posee su forma y estructura dada por historia de años de evolución, los insectos terrestres se han ido adaptando para desplazarse por las superficies que necesita recorrer empleando el movimiento y sincronismo de cada articulación que poseen, atravesando obstáculos presentes en su trayecto, un insecto entre mayores articulaciones posea tiene alto grado de estabilidad en las superficies. (Ramos J. P.-M., 2015)

Las diferentes formas de desplazamiento que existen en el mundo de los insectos artrópodos también son de suma importancia al momento de plantear un diseño robótico, debido a que los insectos artrópodos tienen un movimiento muy particular cuando se encuentran frente a un obstáculo. (Angelica L. Torres Zúñiga. Adrian Romero Vargas, Diseño, construcción y control de un insecto robot, 2006) También se toma en cuenta los prototipos robóticos ya implementados en la actualidad, obteniendo información del diseño y desplazamiento usado en cada prototipo robótico. (Ramos J. P.-M., 2015)

2.1 Tipos de robots insectos con patas

Robot Insecto Palo – Héctor

Después de una investigación por parte de la Universidad Alemana de Bielefeld se desarrolla un prototipo basado en el insecto palo, tal como se observa en la Figura 2.1, siendo un prototipo hexápodo posee movimientos independientes en cada articulación, además cuenta con diferentes sensores los cuales le ayudan a reaccionar ante varios eventos que se presenten en su entorno, sus investigadores afirman que el diseño que se realizó les permite analizar varias teorías sobre el movimiento de los insectos logrando con ello enriquecer esas teorías y plasmar nuevas ideas para los mismo propósitos. La estructura del robot insecto Héctor es hecha por fibra de carbono obteniendo un peso de 12 Kilos, el hecho de que este prototipo posea movimiento independiente en cada articulación permite que se adapte a varias superficies e incluso esquivar obstáculos presentes en su destino cuya función es impulsada por los sensores que posee. Y aunque Héctor es un prototipo para la investigación, sus creadores tienen como meta usar a Héctor en misiones de rescate y transporte. (Hi-Tech, 2015)

Figura 2. 1 Robot Insecto Palo



Héctor el robot insecto palo el cual posee sensores en cada articulación. Fuente: (Hi-Tech, 2015)

Robot Insecto Tipo Hormiga

El robot bautizado AntBot, desarrollado por un equipo de científicos franceses del Instituto de Ciencias del Movimiento Étienne Jules Marey (ISM) mostrado en la Figura 2.2, reproduce las capacidades de navegación de una hormiga del desierto conocida como Cataglyphis, esta hormiga tiene la capacidad de recorrer varios cientos de metros en pleno desierto y volver a su hormiguero al cabo del día. (Sebastian, 2019)

Este prototipo de insecto logra mantener su dirección por medio de una brújula óptica, esta brújula percibe la luz de forma diferenciada, además el prototipo posee sensores en la estructura para detectar diferentes objetos presentes en el trayecto que realiza, todo esto para simular el comportamiento de la hormiga. El robot hormiga tiene la capacidad de calcular el espacio que recorre por medio de un captor, entonces con estos elementos el prototipo demostró tener la capacidad de realizar un recorrido de 14 metros y regresar al punto de inicio logrando un margen de error de un centímetro. (Sebastián, 2019)

Figura 2. 2 Robot tipo hormiga



Robot hormiga dirigido por una brújula óptica. Fuente: (Sebastián, 2019)

Robot Insecto Tipo Araña

Festo presenta un prototipo de robot insecto, basando su desarrollo en una araña, este diseño copia los movimientos de la araña flic flac (araña gimnasta), el prototipo posee 8 articulaciones, 6 articulaciones para el movimiento y 2 para impulsarse a gran velocidad, las 6 articulaciones permite el movimiento visto en arañas normales, pero el plus de este insecto es que puede adaptar sus articulaciones para formar una especie de circunferencia para rodar por el trayecto y alcanzar mayor velocidad impulsándose por las otras 2 articulaciones mencionadas anteriormente, este prototipo también posee la habilidad de saltar logrando pasar todo tipo de obstáculos presentes en su trayecto. En la Figura 2.3 se muestra el prototipo. (Pascual, 2018)

Figura 2. 3 Robot Araña diseñada por Festo



BionicWheelBot Robot araña con capacidades de saltar y rodar en sus desplazamientos. Fuente: (Pascual, 2018)

Robot esquivador de obstáculos

Es un robot que puede ser autónomo o controlado de forma remota, en el cual, cuando el prototipo es autónomo no requiere que el ser humano lo guíe, muy útil como robots de supervisión, laberintos y educativos. Para ello se requiere de sensores los cuales corrigen la posición a la cual el robot se mueve, determinando su correcta trayectoria. En la Figura 2.4 se muestra un prototipo que posee una cámara y sensores que miden distancia para esquivar los obstáculos presentes. Cuando el prototipo es controlado de forma remota usa

la cámara y por medio de una pantalla de visualización el operador puede controlar el movimiento del prototipo. (Roberto Fernando Ramirez Rivera, 2015)

Figura 2. 4 Robot esquivo obstáculos mediante cámara



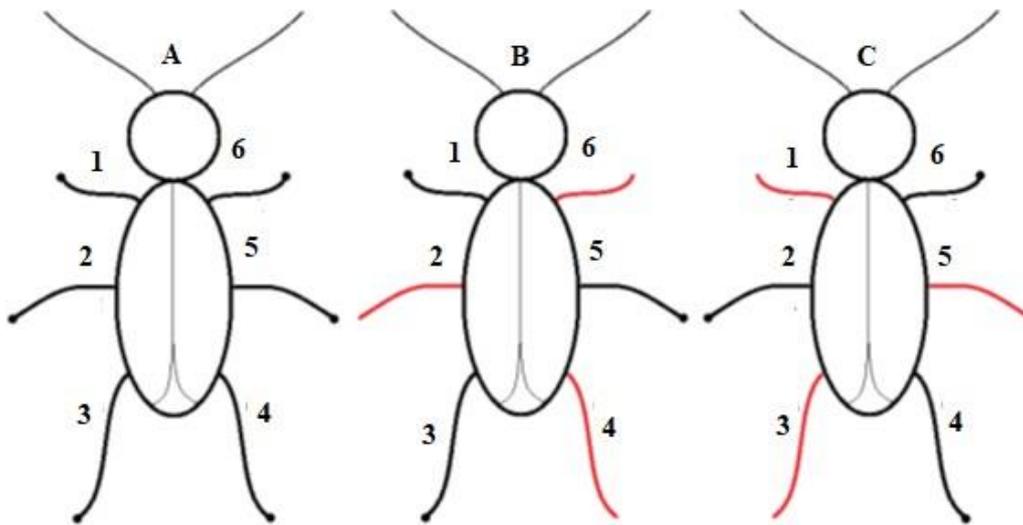
Robot esquivo obstáculos. Fuente: (Roberto Fernando Ramirez Rivera, 2015)

2.2 Locomoción de los insectos

2.2.1 Introducción

El nombre de artrópodo se origina del griego y significa pie articulado. Las articulaciones de los artrópodos desempeñan distintas funciones, pero para nuestro interés importa el movimiento (locomoción) de cada insecto. (Peredo, 2017). Los insectos artrópodos realizan su movimiento de desplazamiento, entre estos casos sea para buscar alimentación o hallar un nuevo hogar, depende de su locomoción (Coordinación de las extremidades de su cuerpo), la locomoción es la base de su supervivencia, cuando los insectos se trasladan no siempre lo hacen con la misma velocidad, es decir cuando se sienten acechados necesitan escapar o esconderse, por ende aumentan su velocidad de desplazamiento y con ello el uso de energía, entonces la locomoción es una característica principal que combina energía con la coordinación de articulaciones, el análisis de esta característica es usada para el desarrollo de prototipos robóticos de insectos. (Peredo, 2017)

Figura 2. 5 Movimiento de un insecto hexápodo



Pasos según el apoyo para el movimiento de un insecto. (A) estado en equilibrio, (B) primero movimiento, (C) segundo movimiento. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

En la Figura 2.5 en la parte (A) se puede observar que el insecto se mantiene estático, manteniendo todas las articulaciones en la superficie, ejerciendo la misma fuerza, con esto evita el cansancio y ahorra energía. Para realizar el movimiento el insecto apoya tres de sus articulaciones (6,2 y 4) en la superficie, mientras que las otras tres articulaciones (1,5 y 3) se elevan realizando un movimiento para avanzar, tal como se observa en la parte (B). Según (Deisy Y. Forero, 2015) menciona que la articulación 2 es la que ejerce mayor fuerza de apoyo y es así que el insecto repite periódicamente este paso alternando de sus extremidades tal como se puede observar en la parte (C) de la gráfica y en este caso, la articulación 5 de apoyo es la pata que realiza mayor fuerza sobre la superficie.

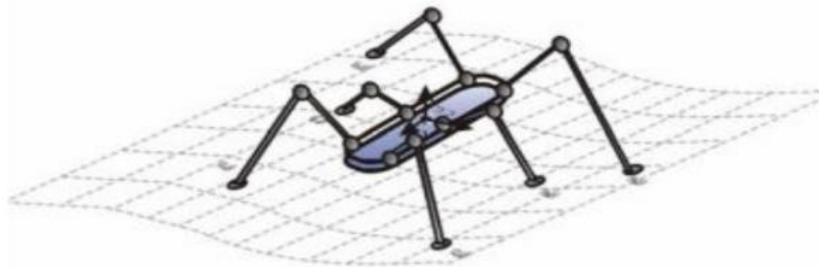
2.2.2 Desplazamiento terrestre

Los insectos terrestres tienen diversas maneras de desplazarse, ya sean arrastrándose o por movimiento de sus articulaciones. En la locomoción terrestre por articulación estos insectos logran su movimiento de una manera coordinada, desplazando al insecto, tomando en cuenta su velocidad y posición mientras mantienen su equilibrio. (Deisy Y. Forero, 2011)

Se ha tomado como referencia del desplazamiento de las hormigas plateadas del Sahara, conocidas en el mundo de la robótica como “Las hormigas más rápidas del mundo”,

llegando a alcanzar una velocidad de 0.855 m/s, esta asombrosa velocidad la consiguen por la coordinación que existe en la locomoción que posee, por ende se ha desarrollado diversos estudios en este insecto llevando a realizar prototipos de 6 articulaciones para simular la velocidad de esta hormiga, la Figura 2.6 muestra la posición de un robot hexápodo en una superficie no plana. (Español, 2015)

Figura 2. 6 Ilustración de hexápodo en superficies no planas



Representación de un hexápodo en una superficie irregular. Fuente: (López, 2016)

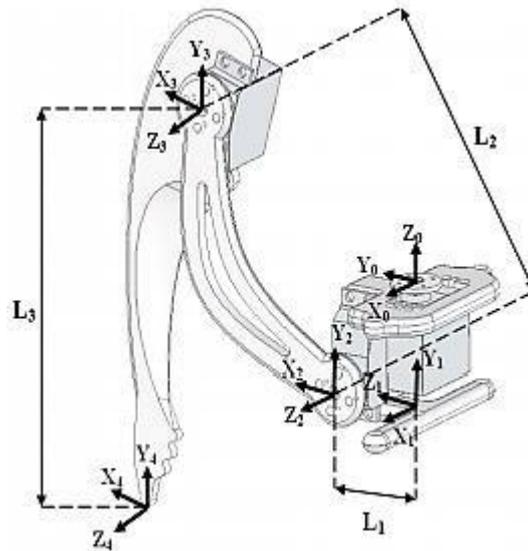
2.3 Locomoción de Robots tipo insecto

La tecnología en la robótica ha ido evolucionando, llevando al estudio, análisis y simulación de características principales de diferentes insectos. En estos estudios se diseñan prototipos tipo insecto para que pueda realizar su movimiento de diferentes formas con el objetivo de imitar al insecto, en estos movimientos se puede ejecutar cambios de posiciones, deformación de sus articulaciones y por medio de la lectura de sensores incluso evitar obstáculos. El interés que mantiene los científicos enfocado al tema de los insectos se proyecta básicamente en su movimiento. (Ramos J. P.-M., 2015)

Los insectos son base fundamental en el estudio de la robótica reactiva, ya que estos poseen características biológicas y motrices que son de interés para ser implementadas en robots bioinspirados, teniendo en cuenta el desempeño de éstos en diferentes áreas. Por otra parte, los animales hexápodos (grupo de animales que cuentan con 6 articulaciones) poseen omnidireccionalidad y estabilidad, debido a la formación del trípode de apoyo, el cual se crea en sus patas al dar un paso, permitiéndoles superar diferentes obstáculos

con facilidad a velocidad constante, en la Figura 2.7 se muestra el dimensionamiento con sus variables de una de las articulaciones del prototipo. (Ramos J. P.-M., 2015)

Figura 2. 7 Articulación de un Robot Hexapodo.



Análisis de los grados de libertad de la articulación por el método Denavit-Hartenberg. Fuente: (Ramos J. P.-M., 2015)

En la Tabla 2.1 se muestra una matriz de las variables involucradas en la articulación, utilizando el método de análisis Denavit-Hartenberg se obtiene las ecuaciones de cinemática directa de cada articulación, con ello se logra tener una representación de la posición y orientación de cada uno de los elementos que conforman la articulación del prototipo robótico.

Tabla 2. 1 Matriz Denavit-Hartenberg

articulaciones	θ	D	a	α
1	θ_1	0	0	90
2	90	l_1	0	-90
3	θ_2	0	l_2	0
4	θ_3	0	l_3	0

Variables usadas para la obtención de las ecuaciones de los grados de libertad de un prototipo hexápodo

Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

La cinemática directa me permite analizar el punto final con respecto al sistema de coordenadas fijo X_0 , Y_0 y Z_0 , las Ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 representan esos puntos finales que se necesita encontrar con respecto al movimiento de la articulación. Las variables l_1 es la distancia a lo largo del eje Z la cual se mide desde el eje X_0 hasta X_1 l_2 y l_3 es la distancia a lo largo del eje X medida desde Z_0 hasta Z_1 , los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 son los ángulos de rotación en el eje XY entorno a z. (Ramos J. P.-M., 2015)

$$x = [1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \cos(\theta_3 - 90)] \sin \theta_1 \quad \text{Ec. (2.1)}$$

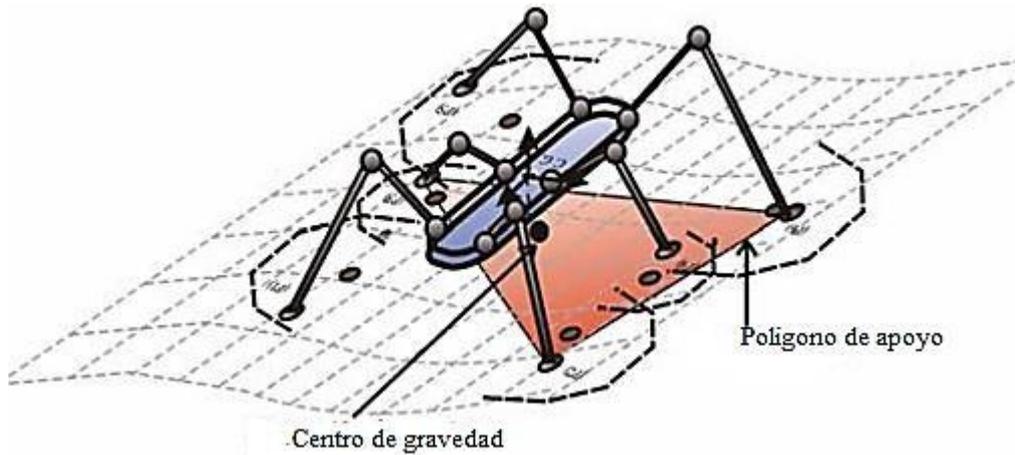
$$y = l_3 \sin(\theta_3 - 90) - l_2 \cos \theta_2 \quad \text{Ec. (2.2)}$$

$$z = [1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \cos(\theta_3 - 90)] \cos \theta_1 \quad \text{Ec. (2.3)}$$

2.4 Articulaciones y patas del robot tipo insecto

Generalmente para los concursos de robótica se han ido usando prototipos de 4 y 6 articulaciones, entre las cuales los prototipos de 6 articulaciones han tomado ventaja sobre los otros por su estabilidad y equilibrio al poseer 2 articulaciones extra para apoyo, cuando un robot de 4 articulaciones pasa por obstáculos o superficies corre el riesgo que las 4 articulaciones queden atoradas o atascadas, en cambio en un robot de 6 articulaciones esas 2 articulaciones extra sirven de impulso para que el robot insecto no quede atrapado y poder seguir su recorrido. Los robots hexápodos para ejercer su desplazamiento realizan un trípode, forman un triángulo de apoyo al igual que para su movimiento, a continuación, en la Figura 2.8 se muestra la simulación de un prototipo hexápodo. Además, mencionar que, cuando se trata de prototipo de varias articulaciones, la relación existente entre consumo de energía y número de articulaciones es directamente proporcional. (Angelica L. Torres Zúñiga. Adrian Romero Vargas, 2016)

Figura 2. 8 Simulación de robot con patas



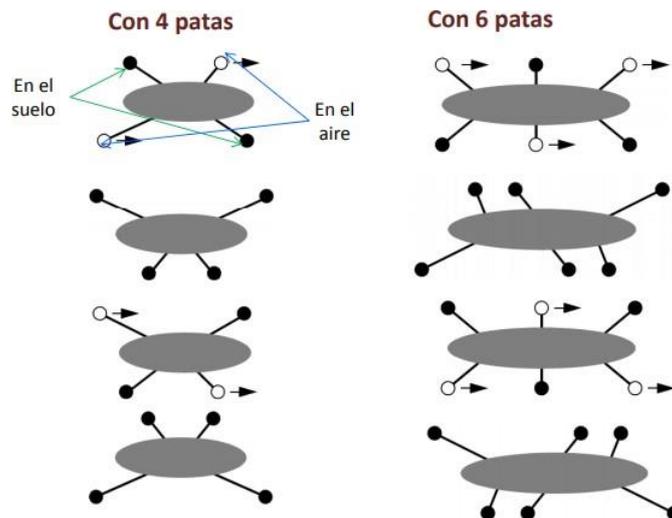
Diseño de robot hexápodo. Fuente: (Angelica L. Torres Zúñiga. Adrian Romero Vargas, Diseño, construcción y control de un insecto robot, 2006)

En la Figura 2.8 se observa la distribución de articulaciones del prototipo, si se toma como referencia a las articulaciones de la parte intermedia, la función que poseen es dar equilibrio cuando el prototipo no se encuentre en superficies plenamente planas. (Angelica L. Torres Zúñiga. Adrian Romero Vargas, Diseño, construcción y control de un insecto robot, 2006)

2.5 Robot con patas

2.5.1 Cinemática

Figura 2. 9 Cinemática de robot con patas comunes

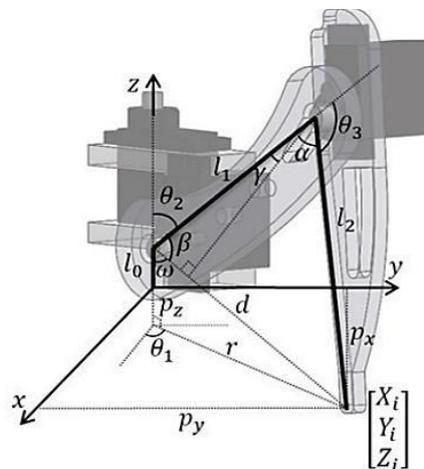


Movimiento según el número de patas. Fuente: (Ramos O. , 2017)

En la Figura 2.9 se puede observar la cinemática de los robots con 4 y 6 patas, el prototipo robótico que se use debe mantener el equilibrio a diferentes adversidades que presente el terreno en el cual se encuentren, la distribución de las articulaciones es la base al momento de realizar el funcionamiento del prototipo. Además, mencionar que el punto de equilibrio está definido según las dimensiones de la estructura y el número de articulaciones. (Ramos O. , 2017)

El equilibrio que debe mantener un prototipo robótico se clasifica en dos: el equilibrio estático y dinámico, en el estático el prototipo debe mantener el equilibrio en todo momento, el centro de gravedad debe mantenerse en la estructura de soporte del prototipo, en este estado el consumo energético del robot es bajo porque sus actuadores no entran en funcionamiento. Por otro lado, el equilibrio dinámico debe mantener un equilibrio estable mientras se realice la locomoción del prototipo. También se menciona que, si la distribución de las articulaciones no es eficiente, el prototipo puede caer mientras realiza el movimiento. También mencionar que, si el movimiento es rápido o lento el equilibrio debe ser constante para ello el prototipo debe realizar una trípode de apoyo como se mostró en la Figura 2.5, en este equilibrio el consumo energético es alto por el funcionamiento de las articulaciones que posee el prototipo, en la Figura 2.10 se menciona el análisis de la cinemática inversa que posee un robot hexápodo. (Ramos O. , 2017)

Figura 2. 10 Cinemática de robot con patas comunes



Ejes y variables de la cinemática inversa. Fuente: (Ramos O. , 2017)

Dónde: X, Y y Z permite examinar el comportamiento de la posición del extremo de la articulación del prototipo, este comportamiento se describe en las siguientes ecuaciones, las variables se mantienen al igual que la Tabla 2.1, y las otras variables se explican en cada ecuación, este análisis se lo hace mediante la aplicación de cinemática inversa. En este caso lo que se necesita encontrar son los ángulos del movimiento de los eslabones para llegar a un punto conocido. (Ramos O. , 2017)

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

r es la distancia la cual se mide desde el eje Z inicial al punto final de la articulación.

$$d^2 = r^2 + (p_z + l_0)^2 \quad \text{Ec. (2.5)}$$

$$d = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + (p_z + l_0)^2} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

d es la distancia medida desde el punto final de la articulación al eje del servomotor 2.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{p_y}{p_x} \right) \quad \text{Ec. (2.7)}$$

$$\omega = \tan^{-1} \left(\frac{r}{l_0 + p_z} \right) \quad \text{Ec. (2.8)}$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{-l_1 + d^2 + l_2^2}{2l_1d} \right) \quad \text{Ec. (2.9)}$$

, ω , β , y γ son ángulos auxiliares para poder encontrar las incógnitas usando la cinemática inversa.

$$\theta_2 = \pi - \beta - \omega \quad \text{Ec. (2.10)}$$

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta \quad \text{Ec. (2.11)}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{l_1 \sin \beta}{l_2} \right) \quad \text{Ec. (2.12)}$$

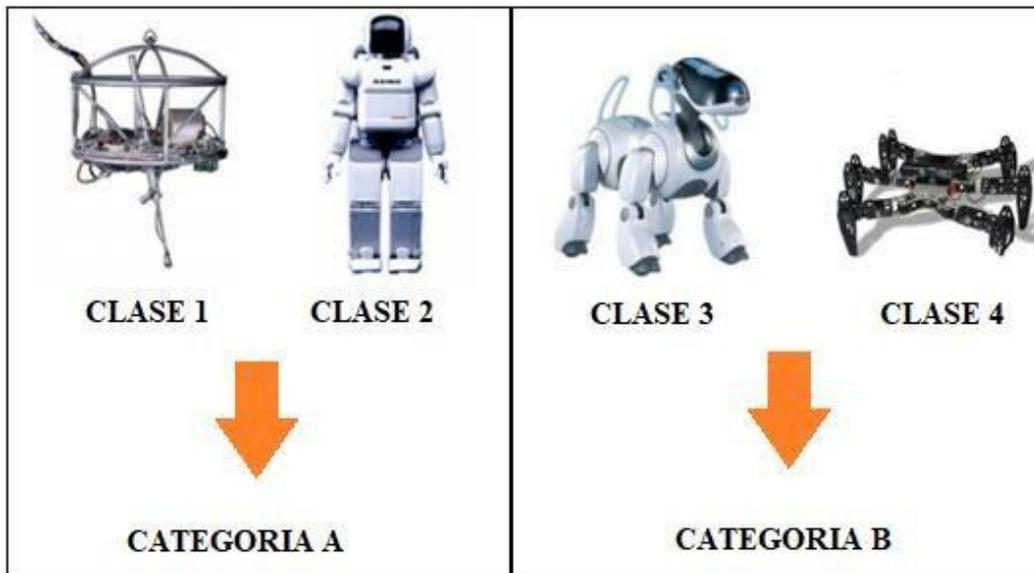
$$\theta_3 = \pi - \gamma - \alpha \quad \text{Ec. (2.13)}$$

2.5.2 Dinámica

Los diferentes prototipos robóticos que existen en la actualidad se los ha ido clasificando según el Instituto de Robótica de América (RIA), por el número de articulaciones y su nivel de estabilidad como se muestra a continuación en la Figura 2.11. Todos los prototipos han ido desde un inicio basados en diferentes formas de los seres que existen

en el mundo, pero según su desempeño en superficies irregulares se ha determinado por el estudio de seres que poseen mayor a 4 articulaciones por su estabilidad y habilidades que muestran en dichas superficies, siendo así los insectos, los seres que representan mayor desempeño y estabilidad. (Ramos O. , 2017)

Figura 2. 11 Tipos de Robots con patas



Estabilidad de las articulaciones. Fuente: (Ramos O. , 2017)

La Figura 2.11 muestra la clasificación de los prototipos robóticos, cuando los robots poseen mayor estabilidad y equilibrio se los conoce como categoría B, estos poseen mayor coordinación, y su estabilidad es eficiente, sea a baja o altas velocidades, en cambio los prototipos de clase A pierden estabilidad cuando se mueven, manteniendo el equilibrio cuando están estáticos. (Angelica L. Torres Zúñiga. Adrian Romero Vargas, Diseño, construcción y control de un insecto robot, 2016)

2.6 Tipos de Control utilizados en Robot Insectos

Al imitar el movimiento de los insectos o de cualquier animal en prototipos robóticos, el control es un elemento infalible en los mismos, su desarrollo y funcionalidad dependen del número de grados que posea cada articulación, por ende, el algoritmo para controlar estos grados de libertad es complejo, cuando se analiza insectos que atraviesan obstáculos

se necesita de varios sensores para detectar el tipo de objeto que puede estar presente en la trayectoria. (Ramos O. , 2017)

2.6.1 Controlador Proporcional

Este tipo de control posee una acción proporcional, en el que la relación existente entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t) = r(t) - y(t)$ se describe en las Ecuaciones (2.14), (2.15) a su vez se puede usar cantidades transformadas haciendo uso del método de Laplace como se describe en la Ecuación (2.16), de igual manera en la Figura 2.12 se muestra el diagrama de bloques de un controlador proporcional. En este tipo de control “ K_p ” es considerada como una ganancia proporcional, deduciendo que el controlador proporcional es un amplificador que trabaja con una ganancia ajustable (K_p). (Vargas, 2016)

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad \text{Ec. (2.14)}$$

$$u(t) = K_p e(t) \quad \text{Ec. (2.15)}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad \text{Ec. (2.16)}$$

Figura 2. 12 Controlador Proporcional

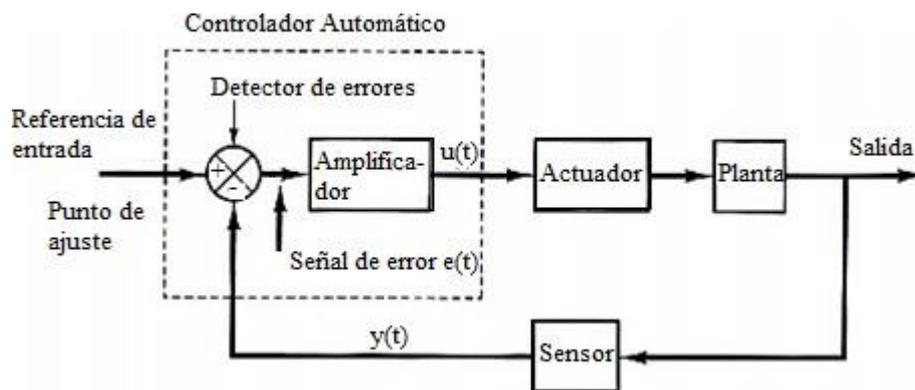


Diagrama de bloques de un controlador proporcional, usando un sensor para la corrección de la señal

Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

2.6.2 Controlador Integral

Se le conoce como controlador integral cuando cambiamos el valor de una señal de salida de un controlador $u(t)$ por una razón, la cual es proporcional a la señal de error $e(t)$, este control posee dos tipos de ecuaciones las cuales son:

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \text{Ec. (2.17)}$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ec. (2.18)}$$

En estas ecuaciones si duplicamos el valor de $e(t)$ consecuentemente el valor de $u(t)$ puede variar el doble, si se mantiene un error de cero, el valor de $e(t)$ se mantendrá en estado estacionario. A este tipo de control algunos autores como Vargas lo denominan control de reajuste. A continuación, se muestra el diagrama de bloque para este tipo de control integral en la Figura 2.13. (Vargas, 2016)

Figura 2.13 Controlador Integral

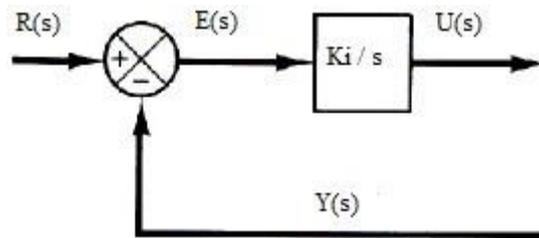


Diagrama de bloques de un controlador Integral. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

2.6.3 Controlador Proporcional- Derivativo

Un control Proporcional- Derivativo o controlador PD es la unión entre el controlador proporcional y el control derivativo, este tipo de controlador se define por medio de la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Ec. (2.19)}$$

y su función de transferencia se define como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p (1 + T_d s) \quad \text{Ec. (2.20)}$$

En este tipo de controlador K_p representa una ganancia del controlador proporcional y T_d es una constante mejor conocida como tiempo derivativo, una característica de estas variables es que son ajustables, cabe recalcar que la acción de control derivativo es una acción de control de velocidad, la variable T_d es un intervalo de tiempo que se mide cuando la acción del control derivativo hace avanzar el efecto de la acción de control proporcional. En la Figura 2.14 se muestra el diagrama de bloques para este tipo de control. (Vargas, 2016)

Figura 2. 14 Controlador Proporcional- Derivativo.

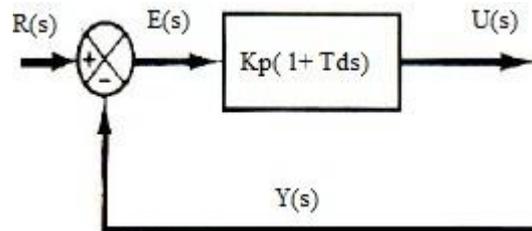


Diagrama de bloques de un controlador Proporcional- Derivativo. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

2.6.4 Controlador Proporcional- Integral

Un controlador proporcional – integral es la combinación de acciones de control integral y control proporcional, este tipo de control se define mediante dos ecuaciones, la ecuación general y la función de transferencia a continuación se muestra las dos ecuaciones:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad \text{Ec. (2.21)}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{Ec. (2.22)}$$

En este caso K_p es la ganancia del controlador proporcional y T_i es el tiempo integral, las dos variables son ajustables, para que exista el ajuste entre la acción de control integral y

proporcional dependen de la variable Ti (tiempo integral), si se analiza el inverso de este tiempo se obtiene la velocidad de reajuste, esta velocidad se lo mide por la cantidad de veces que la parte proporcional se duplica durante un minuto, y ésta es medida en repeticiones por minuto. En la Figura 2.15 se muestra el diagrama de bloques para este tipo de control. (Vargas, 2016)

Figura 2. 15 Controlador Proporcional- Integral

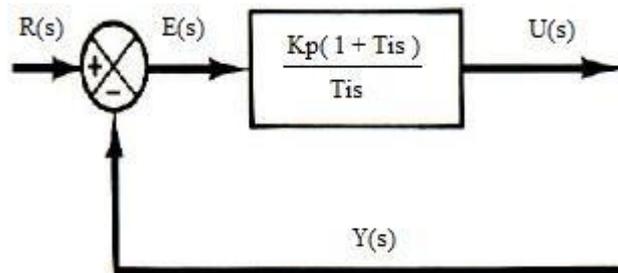


Diagrama de bloques de un controlador Proporcional - Integral. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

2.7 Microcontrolador

Un microcontrolador es un ordenador de pequeña magnitud, el cual posee en su estructura un procesador, posee memorias de procesamiento y programa al igual que puertos de entrada y salida, las características varían dependiendo de los requerimientos que se necesita para cada proyecto a realizar, cada uno de los microcontroladores poseen interfaces y software de programación diferentes según el fabricante. (Martos, 2016)

2.7.1 Características de un Microcontrolador

Los microcontroladores son diseñados para multipropósitos, poseen pines de entrada/salida conocidos como pines o “GPIO”. Los GPIO son programables según estados de niveles lógicos, cuando se configura los GPIO como entradas se utilizan para leer señales externas o señales que reciben por parte de los sensores conectados a estos pines, en configuración de salida los microcontroladores pueden manejar varios dispositivos externos comúnmente leds y motores. (Lindao, 2015)

Poseen conversores ADC (Análogo/Digital), estos pines reciben señales analógicas y la convierte en señales digitales, existen pines dedicados para PWM (Modulación por ancho

de pulso), un receptor y transmisor universal (UART), temporizadores que pueden generar interrupciones o eventos internos según el requerimiento del programador o proyecto, y Puertos seriales (SPI) para comunicación I2C. (Lindao, 2015)

2.8 Arduino

Arduino es una plataforma que maneja una programación de código abierto, su hardware contiene una placa con un controlador de la marca “ATMEL”, cuenta con entradas y salidas (analógicas y digitales), este dispositivo permite el control de sensores, alarmas, sistemas de luces y actuadores físicos, existes muchos microcontroladores y plataformas disponibles con funciones y herramientas de alta complejidad, Arduino simplifica todos los procedimientos gracias a sus amplias librerías que posee. (Corcuera, 2015)

El Lenguaje de programación el cual maneja la placa de programación de Arduino está basado principalmente en “Wiring”, este lenguaje se basa en la estructura de los lenguajes de programación C y C++. (Corcuera, 2015)

Tabla 2. 2 Arduinos usados en competencias de robótica.

Tipos de Arduino	Microcontrolador	Pines I/O Digitales	Vin	Velocidad Procesamiento	ADC
Arduino Uno	ATMega328	14	5v	16 Mhz	6
Arduino Mega	ATMega2560	16	5v	16 Mhz	16
Arduino Nano	ATMega328P	14	5v	16 Mhz	8

Características principales de cada placa de Arduino usadas en competencias de robótica

Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

En la Tabla 2.2 se muestra los Arduinos usados comúnmente en competencias de robótica según la Federación Mexicana de Robótica (FMR), en la Sección 2.7.1 se dice que un microcontrolador es multipropósito, de igual forma la placa Arduino depende de la

necesidad que tenga en el prototipo robótico a diseñar, para el prototipo insecto la velocidad de procesamiento de datos es importante y entre los cuales observamos que los 3 tipos tienen la misma velocidad de procesamiento, por ende lo siguiente a analizar son los pines que requerimos para las conexiones de articulaciones del prototipo al igual que los ADC (Convertidor analógico digital) para la lectura de los sensores a usar. (González, 2018)

2.9 Sensores

Un sensor es un dispositivo que convierte señales físicas en digitales, se las conoce en el mundo de la programación como “variables de instrumentación”, los sensores varían dependiendo de la variable que miden, pudiendo ser sensores de: distancia, presión, desplazamiento, temperatura, luz, etc. (Lindao, 2015)

2.9.1 Sensor Ultrasónico

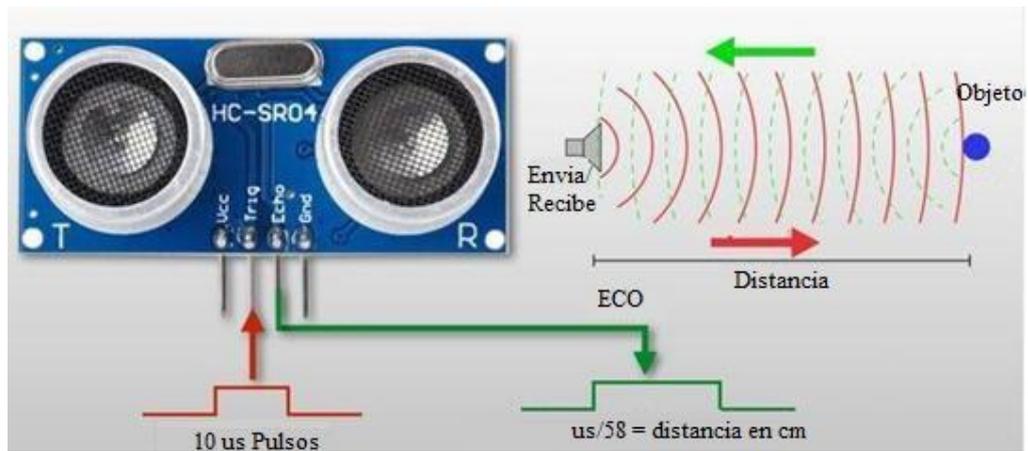
Los sensores ultrasónicos son sensores que funcionan en base al sonido, estos sonidos viajan a través del espacio o son sonidos comunes que oímos normalmente, la diferencia que los mismos trabajan a una frecuencia mayor que la máxima audible por el oído humano, ya que su frecuencia comienza desde unos 16 Hz y tiene un límite superior de aproximadamente 20 KHz, en cambio los sensores ultrasónicos trabajan a una frecuencia promedio de 40 KHz. A este tipo de sonidos es a lo que llamamos Ultrasonidos. (Perez, 2014)

Para el uso de este tipo de sensores en los prototipos de robótica se toman en cuenta varias características que poseen los mismos los cuales son:

- Rango de detección.
- Resolución.
- Frecuencia de sonido.
- Angulo eficaz.
- Consumo de corriente en operación.
- Consumo de corriente en reposo.
- Angulo de medición.
- Voltaje de alimentación.

- Tipo de Salida.
- $\text{Distancia} = (\text{Duración pulso recibido} * \text{velocidad del sonido} / 2)$
- $\text{Distancia simplificada} = \text{Duración pulso recibido} / 58.$
- Dimensión.

Figura 2.16 Funcionamiento ultrasónico



Un sensor ultrasónico contiene un transmisor y un receptor. Elaborado por: Giovanni Lozada y Jonathan Villacres

En la Tabla 2.3 se muestra los sensores que existen en el mercado para realizar un análisis y obtener el mejor de ellos para implementar en el prototipo, describiendo las características principales que poseen estos sensores en los que resaltan y se toma en cuenta la capacidad de corriente, la frecuencia del ultrasonido y los pines que se necesitan para su conexión con el microcontrolador.

Tabla 2. 3 Comparación entre sensores ultrasónicos investigados

Tipos De Sensores	Ultrasonido	Corriente	Alcance	Pines Necesarios	Imagen
Srf 235	235 Khz	4 mA	1.2 m	4	
Hc Sr04	40 Khz	1.5 mA	4 m	4	
Maxsonar-Ez1	24 Khz	2 mA	6.45 m	3	

Los sensores más utilizados para proyectos basados de robótica en Arduino. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

2.9.2 Sensor Sharp

Un sensor Sharp es un sensor de proximidad, el mismo que se usa para proyectos de robótica y en especial en competencias porque se necesita una medida de distancia precisa. El principio de funcionamiento del sensor Sharp de la serie GP2Y0A21F se basa en la emisión de luz infrarroja (IR), contando con 3 pines, 2 de alimentación y 1 pin para transmitir su señal al microcontrolador, es un sensor análogo el cual puede ser leído por el convertidor ADC para tomar su medida de distancia. El rango de trabajo de este sensor es de 10-80 cm, en la Figura 2.18 se muestra una gráfica de funcionamiento distancia-voltaje. (Lindao, 2015)

Características para considerar para su uso en prototipos robóticos o en proyectos.

- Rango de detección.
- Resolución.
- Frecuencia.
- Consumo de corriente en operación.
- Consumo de corriente en reposo.
- Voltaje de alimentación.
- Tipo de Salida.
- Número de pines de conexión.

- Dimensión.

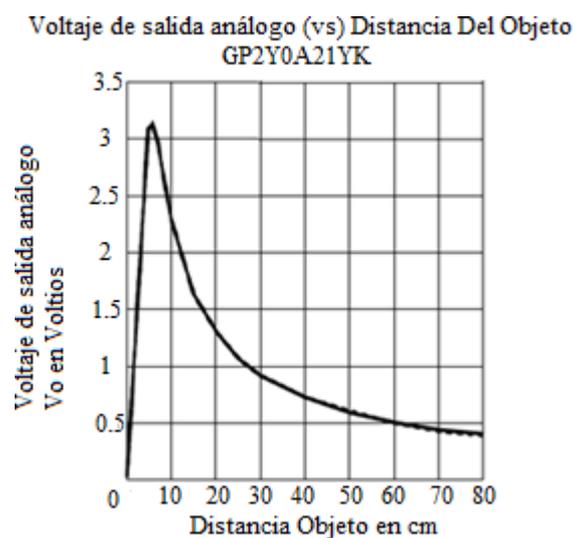
Figura 2.17 Sensor Sharp GP2Y0A21F



Sensor infrarrojo usado en competencias de robótica Fuente: (Lindao, 2015)

La gráfica de la curva característica entre voltaje-distancia de la Figura 2.18, indica las siguientes descripciones: En los primeros 10 cm y a menor distancia el voltaje de señal del sensor Sharp llegara a 3.2 voltios. Entre mayor es la distancia el voltaje ira disminuyendo, obteniéndose una relación inversamente proporcional polinómica de segundo orden Cuando el sensor detecta su máximo alcance en los 80 cm el voltaje obtenido en la señal será de 0.35 voltios. (Lindao, 2015)

Figura 2.18 Curva característica Voltaje-Distancia Sensor sharp

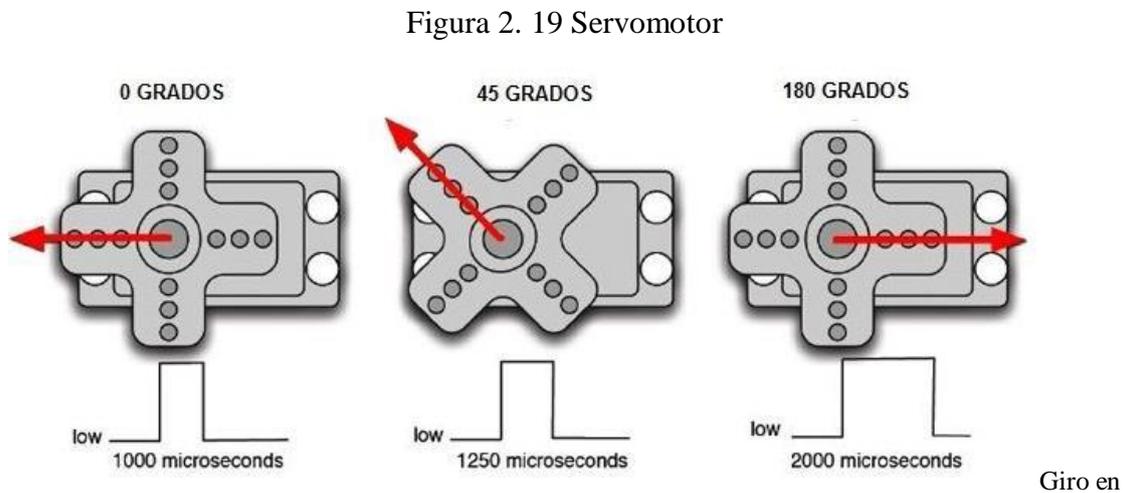


Distancia del objeto reflejado vs voltaje de salida análogo. Fuente: (Lindao, 2015)

2.10 Servos

2.10.1 Servomotor

Un servomotor es un motor eléctrico, dentro de la estructura posee engranajes con el fin de aumentar el torque y mantener una posición fija si se requiere, la principal característica de este tipo de motores eléctricos es que se los puede controlar por dos tipos de funcionamiento, la primera es por la velocidad que posee, y la segunda con la posición del eje que gira (también llamada dirección del eje o giro del rotor), en la Figura 2.19 se puede observar la posición del servomotor según el tiempo del pulso dado. (Mecafenix, 2017)



Posicionamiento del servomotor. Fuente: (Mecafenix, 2017)

Para la adaptación de servomotores a prototipos o proyectos se toman en cuenta ciertos parámetros según los requerimientos que se desea, entre estos parámetros los más importantes son:

- Velocidad.
- Par.
- Tipo de arranque.
- Tipo de frenado.
- Estructura interna.
- Tipos de control.
- Dimensiones.
- Consumo de corriente en reposo.
- Consumo de corriente en funcionamiento.

- Tipo de rotación: limitada o continua.

Figura 2. 20 Servomotor Sg90



Vista Isométrica del Servomotor Sg90. Fuente: (Electrónica, 2020)

2.10.2 Motor Paso a Paso

Es un motor eléctrico de imán permanente, la característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Su control se basa en polarizar las bobinas de manera adecuada para que giren correctamente. Son ideales para la construcción de mecanismos o prototipos que requieren movimientos precisos. (TECNOLOGÍA, 2019)

Los motores paso a paso poseen una función diferente de los motores de corriente continua “no giran libremente”, teniendo un parámetro de relación entre velocidad y torque conocido como “par motor” y “par de giro” y aparte cuentan con un torque de detención cumpliendo la función de detener firmemente la posición del motor cuando no esté girando con esto se elimina la necesidad de un mecanismo que incorpore un freno. (TECNOLOGÍA, 2019)

Figura 2.21 Motor a Pasos

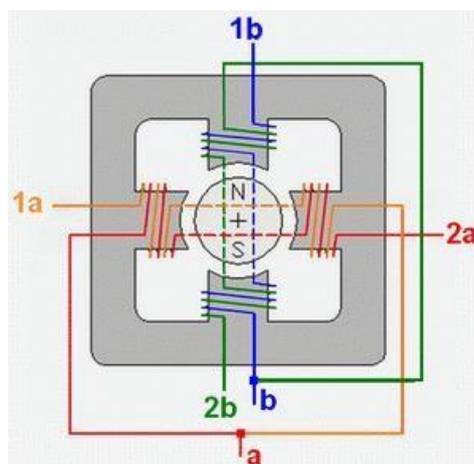


Motor controlado por pulsos, el más preciso Fuente: (TECNOLOGÍA, 2019)

2.10.2.1 Motor a paso Unipolar

Los motores a paso unipolar son usados comúnmente en proyectos de electrónica, gracias a su control siendo relativamente sencillo, poseen dos devanados, dos bobinas en cada eje del estator y se unen por los extremos opuestos de tal forma que se alimente una u otra generando un campo individual inversamente al de la otra bobina y siendo una característica principal los motores a paso unipolar nunca se energizan las bobinas juntas, en la Figura 2.22 se muestra el diagrama de distribución de un motor a pasos. (Pindado, 2018)

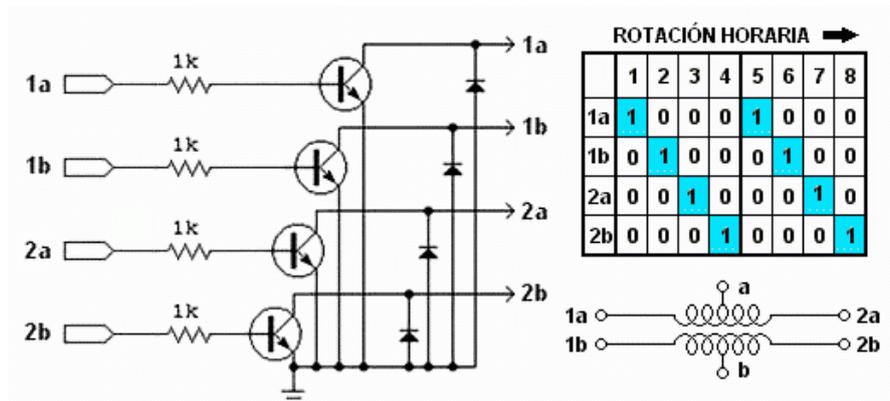
Figura 2.22 Esquema interno motor a pasos.



Distribución de los bobinados del motor a pasos, y los puntos medios de cada uno. Fuente: (Carletti, 2019)

La Figura 2.23 se muestra la configuración comúnmente encontrada en estos motores a pasos unipolares, para conexiones y prácticas con este motor los puntos medios “a” y “b” se conecta a la alimentación del motor mientras que el circuito de control se limita a conectar a masa los bobinados de manera secuencial, adicional estos motores posee entre 5 y 6 cables para su funcionamiento. (Pindado, 2018)

Figura 2.23 Control de un motor unipolar.



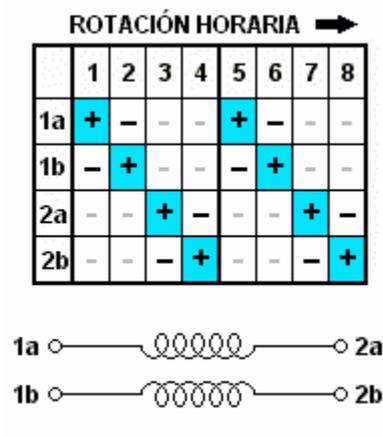
Circuito y secuencias para el funcionamiento de un motor unipolar. Fuente: (Carletti, 2019)

Este motor posee su giro de manera horaria, los pulsos dados al motor se pueden controlar por una secuencia de activación generada desde el microcontrolador usando un contador con un decodificador por medio de programación o usando circuitos integrados externos, en este caso estos motores se usan para impresoras 3d, Router CNC y brazos robóticos que requieran una precisión alta. (Pindado, 2018)

2.10.2.2 Motor a paso Bipolar

Los motores a pasos bipolares son motores de imán permanente a diferencia de los unipolares necesitan un circuito de control y potencia complejo, en la actualidad esto se reduce a circuitos integrados que reducen el nivel de complejidad, estos motores no poseen un doble bobinado como los unipolares, en este caso solo se activa una bobina mientras la otra queda desactivada, ofreciendo una mejor relación en torque. Para el funcionamiento las bobinas deben recibir corriente en ambos sentidos e implica el uso de un puente H para cada uno de los bobinados del motor, la secuencia de activación se muestra en la Figura 2.24 este tipo de motor posee 4 cables de conexión. (Pindado, 2018)

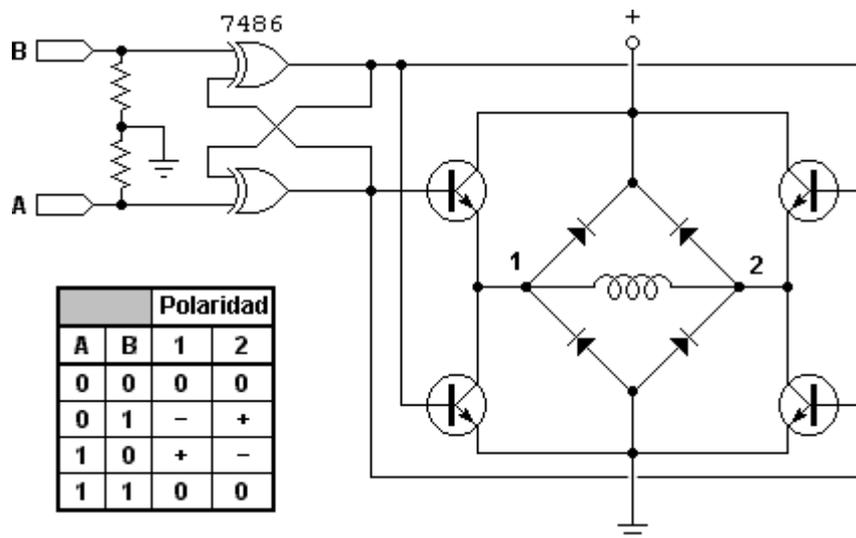
Figura 2.24 Secuencia motor bipolar.



Activación por medio de corriente en los bobinados del motor a pasos bipolar. Fuente: (Carletti, 2019)

Si se compara la secuencia de la Figura 2.23 y la Figura 2.24 la diferencia se relaciona en que un motor unipolar necesita una señal lógica para activar la secuencia, mientras el motor bipolar necesita recibir señales de corriente, si es que un prototipo necesita el control del motor completo se deben usar dos puentes H para enviar señales de activación en cada bobina. A continuación, en la Figura 2.25 se muestra un ejemplo de control para uno de los bobinados de este motor. (Pindado, 2018)

Figura 2.25 Control motor bipolar.



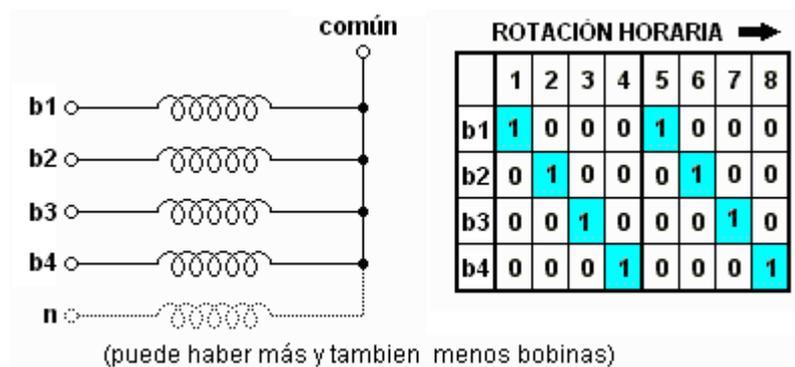
Conexiones para el control del motor a pasos bipolar usando un puente H. Fuente: (Carletti, 2019)

De igual manera estos motores a paso Bipolares se usan para las mismas funciones que un motor a pasos unipolar.

2.10.2.3 Motor a paso de Reluctancia Variable

Un motor a pasos de Reluctancia Variable son motores que no necesitan de un sistema de control complejo, la secuencia de funcionamiento consiste en activar las bobinas internas como lo indica la Figura 2.26, posee una reluctancia variable (resistencia que se opone al paso del flujo magnético), este motor tiene un rotor multi polar y un estator laminado, el principio de funcionamiento de este motor es que rota cuando los dientes del rotor son atraídos al estator por el campo magnético que se produce al energizar el motor. La inercia del rotor es pequeña y la respuesta es muy rápida, generalmente el paso es de 15 grados. (Pindado, 2018)

Figura 2.26 Control motor reluctancia variable

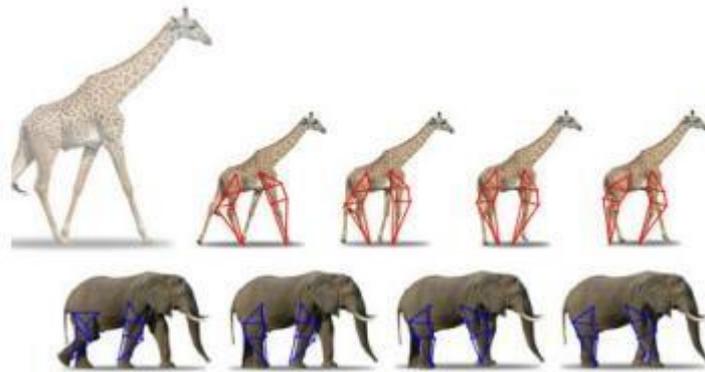


Conexiones para el control del motor a pasos de reluctancia variable. Fuente: (Carletti, 2019)

2.11 Mecanismo Theo Jansen

Theo Jansen, estudió Su mayor atribución es la obra que estudia el movimiento de los animales imitados por mecanismos, llamada “StrandBeest” o conocido como “Animal de Playa”, consiste en una estructura cinética que se desliza por la arena de la playa con el empuje del viento, su diseño se basa en varias articulaciones que simulan el movimiento de animales. (Johansson, 2019)

Figura 2. 27 Análisis del mecanismo Theo Jansen.



Simulación de mecanismo Theo Jansen con animales. Fuente (Herrera, 2016)

Theo Jansen tiene proporciones establecidas, originando en el mecanismo un mejor rendimiento, posee una pequeña tolerancia para realizar cambios si algún modelo lo necesitara, las medidas establecidas por Theo Jansen se muestran en la Figura 2.28 (a). (Johansson, 2019)

Figura 2. 28 Articulación de un mecanismo Theo Jansen

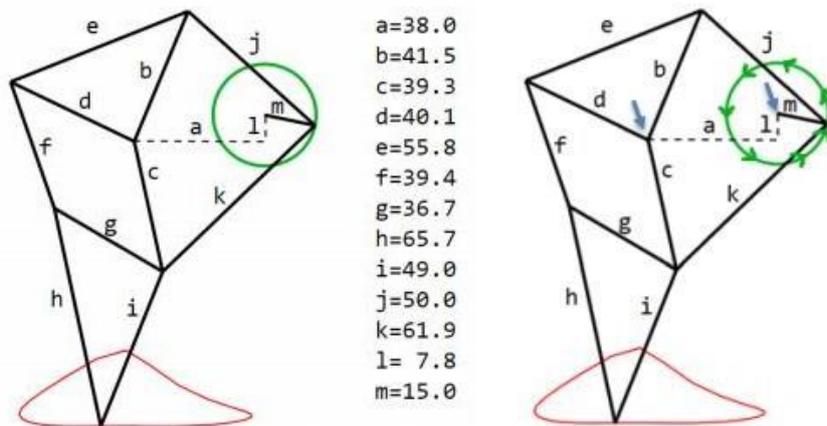


Figura 2.28 (a), Proporciones

Figura 2. 28 (b) Movimiento cigüeñal.

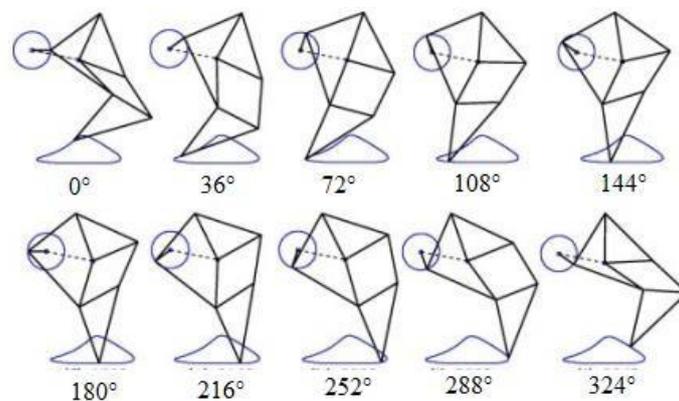
Proporciones establecidas para un mecanismo Theo Jansen Fuente: (Mohsenizadeh, 2015)

El cigüeñal se representa por la barra m que se puede observar en la Figura 2.28 (b), donde: i e y h representan parte del mecanismo que estará en contacto con la superficie en la que se encuentre el mecanismo, así mismo observamos una línea roja la cual indica la trayectoria que marca cada pata, estos mecanismos poseen una trayectoria lineal y con

un retorno que se alza por lo que se considera ideal para superar obstáculos. El movimiento generado por cada articulación se realiza de forma circular que es transmitido por el cigüeñal con esto se puede acoplar un motor para realizar el movimiento. (Johansson, 2019)

En el movimiento de la articulación la articulación se encontrará en una posición diferente dependiendo del grado angular del recorrido.

Figura 2. 29 Posiciones de la articulación.



Diferentes posiciones que presenta la articulación en la trayectoria del mecanismo. Elaborado por:
Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

En la Figura 2.29 se observa las diferentes posiciones que puede tener una articulación de un mecanismo Theo Jansen, entre 0° y 350° se obtienen una elevación máxima de la articulación, en el punto de 75° y 280° la articulación estará en contacto con la superficie, dependiendo del número de articulaciones que requiera el mecanismo cada articulación tendrá un desfase de 180°. (Johansson, 2019)

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

3.1 Generalidades

Para el diseño e implementación de un prototipo robótico, es necesario, conocer toda la información que lo abarca, sea cual sea el objetivo a cumplir, para este proyecto, por ejemplo, se necesita saber la definición de un prototipo robótico, número de extremidades, los tipos de materiales que se utilizan, los actuadores y controladores, con el propósito de establecer las restricciones para el diseño.

Las características esenciales que se debe valorar en los prototipos robóticos son el tipo de material, la durabilidad, los elementos electrónicos necesarios, la estética, el coste, entre otros. En el caso de un prototipo robótico tipo insecto, las características más importantes son el tipo de movimiento que realiza, el número de articulaciones, el material del cual está hecho, las dimensiones y los elementos electrónicos a usar.

3.1.1 Patrón de marcha de varios insectos

Es necesario conocer la forma real del caminar de algunos insectos para así elaborar un prototipo robótico que simule el movimiento de los insectos y pueda recorrer una pista con obstáculos. Ya que no todos los insectos tienen la misma forma de caminar, debido al número de patas y la sincronización del movimiento.

Se estudiará varios patrones de trayectoria en los insectos y se escogerá el más idóneo para que el prototipo robótico realice una carrera rápida con su debida sincronización de movimiento al de un insecto. Para esto se ha recurrido al estudio realizado por (Ramdya, 2017), el cual demostró que los robots son modelos de estudio en el comportamiento de los animales y que la marcha del trípede es una alternativa más rápida de marcha de insectos, existiendo cambios discontinuos en la coordinación de las piernas, minimizando el consumo de energía al cambiar el número relativo de las piernas en movimiento. (Ramdya, 2017)

En la Tabla 3.1 se presenta los casos de estudio por el tipo de movimiento de las patas, obteniendo las características más relevantes.

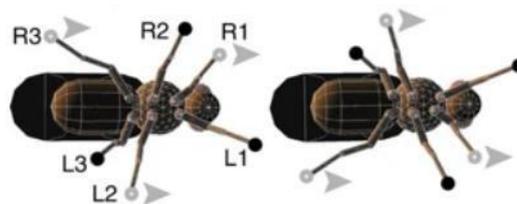
Tabla 3. 1 Tipo de movimiento según el número de patas

Tipos de movimiento	Características
Bípedo	Tiene el centro de gravedad muy por delante de sus pies, encontrándose en una posición muy inestable al momento de su locomoción.
Cuadrúpedo	Mantiene dos patas en el suelo, y dos para adelantar el siguiente paso. Tienden a inclinarse y posiblemente llegar a caerse hacia adelante o hacia los lados.
Trípode	Mantiene siempre tres patas en el suelo, estas se mueven hacia atrás para tomar impulso hacia adelante, mejorando así la estabilidad.

Características más relevantes del estudio según el movimiento de las patas. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

Por lo tanto, en movimientos rápidos, los bípedos, como los cuadrúpedos tienen cortos periodos de inestabilidad, mientras que en el movimiento trípode mantiene una mejor estabilidad, añadiendo también que, durante la locomoción de trípode, las patas delanteras y traseras de un lado del cuerpo se mueven sincrónicamente con la pata media del otro lado, manteniendo fijo su centro de masa Figura 3.1. (Ramdya, 2017)

Figura 3. 1 Marcha trípode clásica de un insecto



Movimiento sincrónico de un insecto a base de la marcha trípode. Fuente: (Ramdya, 2017)

En la Figura 3.1 se puede observar la marcha trípode clásica, la cual tiene dos golpes de potencia por ciclo locomotor, eso quiere decir que tres patas están en la superficie (fase de postura, círculos negros, L1-R2-L3), mientras que las otras tres patas están fuera de la superficie (fase de oscilación, círculos grises, R1-L2-R3). Las puntas de flecha grises

apuntan en la dirección del movimiento. Este tipo de marcha produce una propulsión notable al momento de competir con otro insecto, llegando a ser elegido por muchos simuladores y diseñadores de prototipos robóticos, optando por una locomoción rápida y equilibrada.

(Ramdya, 2017) menciona que la marcha trípede es favorable al momento de competir con otros insectos, calculando por ejemplo la fuerza de fricción Ecuación (3.1), la fuerza de arrastre Ecuación (3.2), la optimización de la velocidad de avance en ciertos tiempos (3.3) y (3.4), entre otros.

$$F_R = \mu F_N \sim \mu mg \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Donde el coeficiente de fricción $\mu=0.1$, la masa de la pierna de su prototipo es $m = 1,42 \cdot 10^{-7}kg$ y la aceleración gravitacional $g=9.81m s^{-2}$, obteniendo un valor de $1.4 \cdot 10^{-7}N$, el cual quiere decir que es un valor muy aceptable ya que la fricción de la superficie es la principal fuerza de interacción del robot con el suelo, provocando tener un contacto antideslizante.

También se tiene la fuerza de arrastre de cada pierna de acuerdo a la Ecuación (3.2):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Dónde: La densidad del aire ρ es $1.225kgm^{-3}$, el coeficiente de arrastre para el cubo C_D es 1.05. La velocidad v es $2\pi fL = 0.0628 ms^{-1}$, misma que fue calculada al conocer la frecuencia de movimiento $f=20Hz$ y la longitud de cada pierna $L=0.0005m$, finalmente el área de la pierna $A = d \cdot L = 5 \cdot 10^{-8} m^2$, donde $d=100\mu m$, obteniendo así una fuerza de arrastre de $2.8563 \cdot 10^{-10}$, la cual es menor en tres veces a la fuerza de fricción antes calculada, indicando un mejor agarre en cada pisada.

Además, se midió la velocidad de avance sobre los 0.5 segundos de tiempo, obteniendo pasos más eficientes y así optimizando la locomoción directa, según (Ramdya, 2017). A continuación, se muestra el ajuste de las Ecuaciones (3.3) y (3.4):

$$V_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(p_{b,i}^t - x_i^t) + c_2r_2(p_{n,i}^t - x_i^t) \quad \text{Ec. (3.3)}$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^t \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Donde V_i^{t+1} es la velocidad en t+1 de la partícula i; v_i^t es la velocidad actual de la partícula; x_i^t es la posición actual de la partícula; $p_{b,i}^t$ es la posición de la mejor solución personal de la partícula i; $p_{n,i}^t$ es la posición de la mejor solución cercana; r_1 y r_2 son los números aleatorios en el rango [0,1]; los coeficientes: w (peso de inercia); c_1 (tasa cognitiva) y c_2 (tasa social) son fijos. Permittedose realizar cambios para obtener una mejor velocidad, ya sea en programación o en el modelo físico del robot.

Por ende, se puede decir que el número de extremidades más idónea para realizar un prototipo robótico tipo insecto, es de seis patas, generándole al prototipo una alternativa más eficiente en marcha y en equilibrio. Logrando garantizar que la marcha trípode es favorable sobre las alternativas más rápidas de locomoción de insectos.

3.1.2 Materiales para la construcción de prototipos robóticos

Los prototipos robóticos son indispensables para mejorar la calidad de vida de las personas y para realizar estudios industriales, tecnológicos y de educación, así que el material de cómo están diseñados influye en su efectividad física y su tiempo de vida útil. La mayoría de prototipos robóticos son construidos específicamente para las competencias a nivel educativo, demandando complejidad, efectividad y costos dependiendo de la aplicación. (Vargas, 2016)

El uso de materiales con una baja densidad y una alta resistencia es considerado una buena elección, esto se debe a que los materiales con una baja densidad permiten disminuir el peso del prototipo, ya que en muchas ocasiones se necesita la implementación de varios elementos electrónicos pesados como son las baterías, motores, sensores, etc. Una alta resistencia del material ayuda a obtener una rigidez suficiente, asegurando al diseño de bruscos golpes y desgaste del prototipo, consiguiendo también un aporte para la colocación de dispositivos electrónicos de control entrada-salida, manteniéndolos estables y homogéneos.

Considerando también el precio de los materiales y las propiedades necesarias, se platea en la Tabla 3.2 los tipos de materiales más frecuentes en prototipos robóticos ofertados en el mercado nacional.

Tabla 3. 2 Materiales más usados en prototipos robóticos

Material	Costo	Características
Acero/ Chatarra	0.14 \$ / kg	El acero de 6mm de diámetro pesa 0.22 kg/m, No es flexible, por ende es dificultoso al momento de manipularlo. Posee gran resistencia. Tiene una densidad de 7.19 g/cm ³
Aluminio	1.43 \$ / Kg	Pesa un tercio de lo que pesa el acero. Es conductor de electricidad. Posee gran resistencia. Con una densidad de 2.71 g/cm ³
Fibra de carbono vinil	12 \$ rollo	Usado en impresiones 3D. Tiene alta flexibilidad. Tiene alta resistencia. Es liviano. Tolerante a altas temperaturas. Tiene una densidad de 1.750 kg/m ³
Madera triplex	2.50 \$ m ²	Tiene una alta dureza. Es de peso ligero. Posee gran flexión.

		Tiene una densidad de 1.56 kg/m ³
MDF (Fibropanel de densidad media)	14 \$ 120x240x6mm	Posee una superficie suave. Es ligero. Tiene gran dureza. Es fácil para perfilar. Posee una densidad entre 800-550 kg/m ³
Plástico	0.55 \$ / kg	Es moldeable. Es impermeable. Es ligero. Tiene muy poca dureza. Es un aislante eléctrico. Posee una densidad entre 0.895 y 0.92 g/cm ³

Características más relevantes y precios actualizados en el mercado nacional de los materiales más utilizados en prototipos robóticos. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

Se requiere de dos características necesarias del material para la construcción de la estructura del prototipo robótico tipo insecto, las cuales son:

-Gran resistencia, debido a que, el robot tipo insecto va a soportar el peso de todos los elementos electrónicos necesarios, como son: batería, motores, sensores, placas electrónicas, entre otros y estos deben ser fijos a la estructura manteniéndolos estables.

-Tener un peso ligero, por ende, una baja densidad del material, debido a que la cantidad de componentes electrónicos supera los veinte elementos, el prototipo va a tener un peso considerable, es por eso que el material para la construcción de la estructura debe ser ligero y así obtener un buen equilibrio del prototipo.

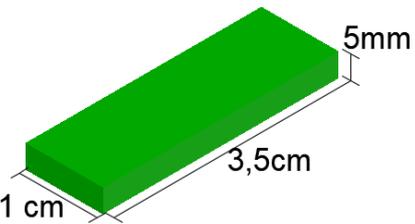
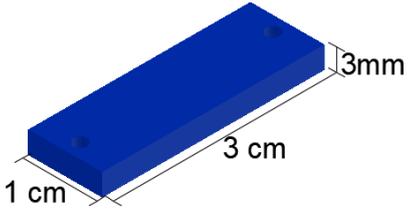
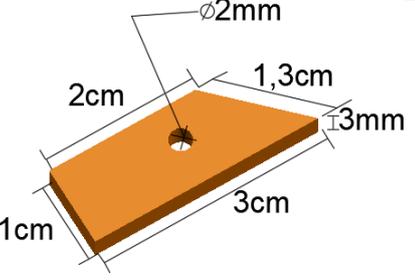
Los materiales que cumplen con las características son el aluminio, MDF, fibra de carbono vinil (impresión en 3d), y madera trípex. Descartando así el aluminio debido a que posee una gran densidad afectando al peso total del prototipo, quedando el MDF, la fibra de carbono vinil y la madera trípex, para ello se ha considerado también el costo del material, su facilidad de perfilar y cortar, eligiendo finalmente la madera trípex, debido a que cumple con las características necesarias de construcción, su facilidad para formar cualquier diseño y por su bajo costo.

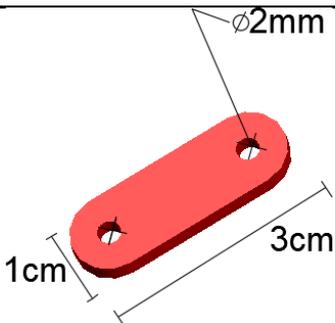
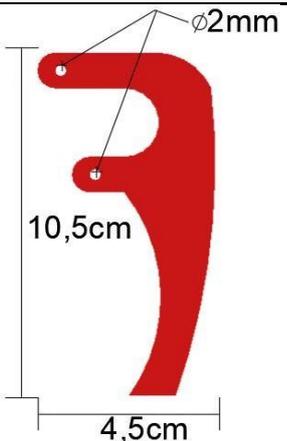
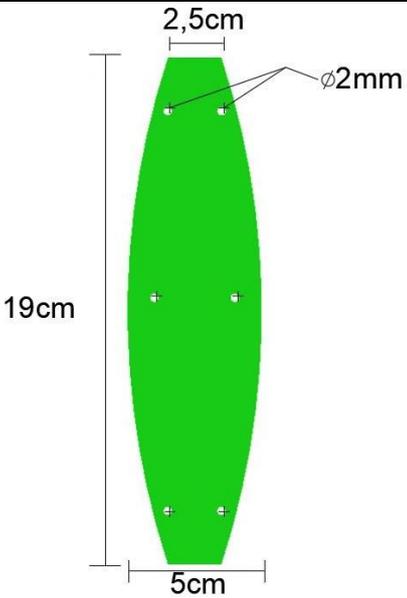
3.2 Esqueleto y estructura dinámica del robot

La estructura del prototipo robótico tipo insecto está formada por 43 piezas, ya sean las patas, eslabones, juntas y cuerpo. Todas estas piezas acopladas forman la estructura dinámica del robot, moviéndose de una manera sincronizada. Cada pieza mantiene su medida establecida para formar la estructura final, como se presenta en el Anexo1.

Con la finalidad de obtener el movimiento sincronizado y conseguir un modelo estable se realizó el diseño en el software AutoCAD, presentando así las medidas y características de cada pieza utilizada.

Tabla 3. 3 Piezas a utilizar en el prototipo robótico tipo insecto

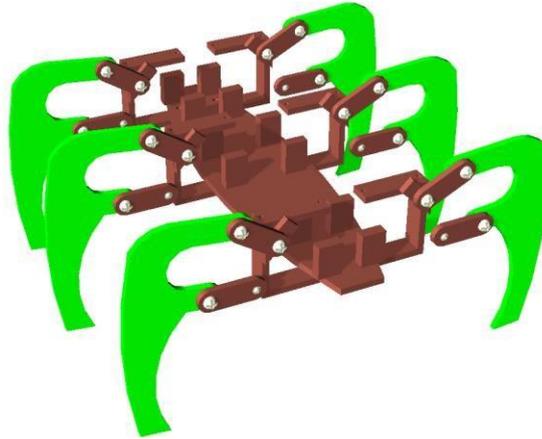
Pieza	Característica
	<ul style="list-style-type: none"> - Son seis piezas. - Sirve para el acople de los servomotores. - Su dimensión se acopla a las medidas del servomotor “Sg90”
	<ul style="list-style-type: none"> - Son 12 piezas. - Sirve para el acople de los servomotores y sujeción al cuerpo del robot.
	<ul style="list-style-type: none"> - Son 6 piezas. - Sirve para la sujeción de la parte superior de la pata. - Va unida a la base que sostiene al servomotor, dimensionado para la articulación de la esquina superior de la pata.

	<ul style="list-style-type: none"> - Son 12 piezas. - Sirve de articulación para el movimiento de las patas del robot. - Tiene una distancia lo más cercana posible entre la pata y el soporte del servomotor, ya que si se alarga la articulación, el motor necesitaría más fuerza y por lo tanto más corriente al momento de subir y bajar las patas.
	<ul style="list-style-type: none"> - Son 6 piezas. - Sirve de patas para robot. - Tienen una peculiar curvatura externa, la cual sirve para rozar las paredes si existiera un desvío del robot. - La altura de la pata está diseñada específicamente para el paso de obstáculos entre los 3 cm de alto o más y su ancho es corto ya que está más cerca al eje de propulsión de la pata, dándole mayor fuerza y rapidez al movimiento.
	<ul style="list-style-type: none"> - 1 pieza. - Sirve de cuerpo del robot. - Tiene una forma similar al abdomen de un insecto. - El largo del cuerpo está diseñado para que el ángulo de movimiento de las patas no choquen entre sí.

Características y medidas de las piezas simuladas para el prototipo robótico. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

En la Figura 3.2 se puede observar la implementación de las piezas, formando el esqueleto o estructura dinámica del prototipo robótico tipo insecto, las medidas finales se encuentran en el Anexo 1.

Figura 3. 2 Estructura final del robot tipo insecto



Piezas unidas para formar la estructura del robot tipo insecto. Elaborado por: Giovanni Lozada y Jonathan Villacres

3.3 Placa del controlador

Existen varias placas microcontroladoras y plataformas microcontroladas disponibles en el mercado, mejorando día a día sus funcionalidades y se las elige dependiendo del tipo de proyecto que se va a implementar, acogiendo así toda su funcionalidad y rendimiento.

Para el control del prototipo robótico tipo insecto se necesita de un controlador que satisfaga las necesidades en corriente, memoria, velocidad y tamaño. El Arduino nano V3.0 abarca todas las necesidades que requiere el prototipo robótico tipo insecto por ser un tablero pequeño que consume una mínima cantidad de corriente, aparte de que es completo y amigable. El Arduino nano V3.0 contiene una memoria específica obtenida del microcontrolador ATmega328, la cual cuenta con la capacidad de leer mientras escribe, haciéndolo veloz e ideal para el proyecto. La velocidad por ciclo de procesamiento al ser de 16MHz va ayudar a controlar al sistema, actuando velozmente mientras lee la información del sensor. (Arduino, 2020)

Tabla 3. 4 Limitaciones sobre corriente y voltaje en la placa Arduino nano

Placa	Límite de voltaje de entrada	Límites de corriente de salida
Arduino Nano V3.0	7-12v recomendado	Por USB: 500mA
	6-20v absoluto	Por Batería: 500mA-1A
	Pines I/O: -0.5v a +5.5v	Pines I/O: 40mA
	Pines Combinados: 200mA	

Límites recomendados para el trabajo con Arduino nano. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

De la Tabla 3.4 se identifica que en la placa Arduino nano el límite de voltaje debajo de los 6v puede causar inestabilidad en la lectura análoga del sensor, obteniendo datos inexactos al momento de utilizar el comando “analogRead()” en la programación. Por otro lado se determina que los niveles de voltajes superiores a 20v provocan daños en componentes que no soporten altos voltajes, causando sobrecalentamiento. Se identifica también que el límite entre los pines de entrada y salida, (incluidos los pines análogos del microcontrolador Atmega328) no debe exceder los 200mA ya que el microcontrolador puede dañarse. (Playground.Arduino, 2020)

3.4 Estudio de las características del Servomotor

El servomotor cuenta principalmente con un sistema de retroalimentación (encoder, conocido como decodificador, el cual convierte los giros del eje en pulsos digitales), indicándole al servo drive (controlador del servomotor) la posición a la cual se encuentra el eje del servomotor, corrigiendo así la posición deseada, enmendando los errores de posición, esto se da en tiempo real, obteniendo una alta precisión de los servomotores. (Automatización, 2017)

El servomotor tiene la capacidad de mantener un torque constante, diferenciándolos así de los motores asíncronos convencionales, los cuales necesitan recurrir a dispositivos adicionales como los frenos. Este sistema de torque conserva la posición de la carga a cero revoluciones por minuto (0 rpm) sin necesidad de otros dispositivos de frenado,

haciéndolos aplicables para el movimiento de cargas a bajas velocidades. La relación del torque (Ecuación 3.5) identifica que la aceleración de un motor es directamente proporcional al nivel de carga existente. (Automatización, 2017)

$$T = I * a \quad \text{Ec.(3.5)}$$

Siendo T el torque (Nm); I el momento de inercia (Kgm^2) y a la aceleración angular (rad/seg^2). Esta relación del torque verifica que para una mayor aceleración con el mismo nivel de carga, se definiría más torque para el movimiento de la misma carga. Los servomotores soportan un trescientos por ciento de sobrecarga, facilitándole romper la inercia con aceleraciones y desaceleraciones bruscas.

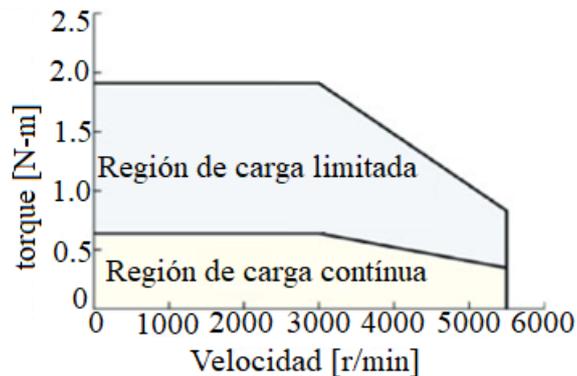
3.4.1 Estudio del funcionamiento del Servomotor

Para el estudio del funcionamiento del servomotor se debe conocer la manera de controlarlos y la forma de accionar la posición deseada, así como la velocidad, existiendo diferentes métodos de control, siendo el más común y el más utilizado el control por pulso y frecuencia. Este procedimiento consiste en interpretar los pulsos que recibe y la velocidad recibida (frecuencia).

Para controlar la posición de un servomotor se basa en la cantidad de pulsos recibidos al servo drive, para entenderlo de mejor manera se establece por ejemplo un sistema mecánico, el cual avanza diez centímetros (10cm) por cada vuelta del motor, siendo que el motor da una vuelta cada mil pulsos recibidos, por ende, si se entrega mil pulsos al servo drive, por medio de un controlador, el motor producirá que la carga avance diez centímetros. Entonces si se desea avanzar veinte centímetros (20cm), entonces se debe enviar por medio del controlador al servo drive dos mil pulsos. Controlando así la posición del servomotor.

El control de velocidad de un servomotor se basa en la modificación de la frecuencia con la que se entrega los pulsos. Por ende, si la frecuencia con la que se producen los pulsos es mayor, la velocidad aumenta, colocándose rápidamente en la posición deseada, mientras si la frecuencia de pulsos disminuye el movimiento del servomotor tardará más tiempo en conseguir dicha posición.

Figura 3. 3 Curva característica de los servomotores



Representación del torque en los servomotores. Fuente: (Automatización, 2017)

En la Figura 3.3 se puede observar que el servomotor obtiene su torque máximo y nominal a la velocidad de 3000 rpm (revoluciones por minuto), ya sea que no supere el funcionamiento normal de carga, o en el límite de carga máxima, de ahí baja el torque mientras aumenta la velocidad.

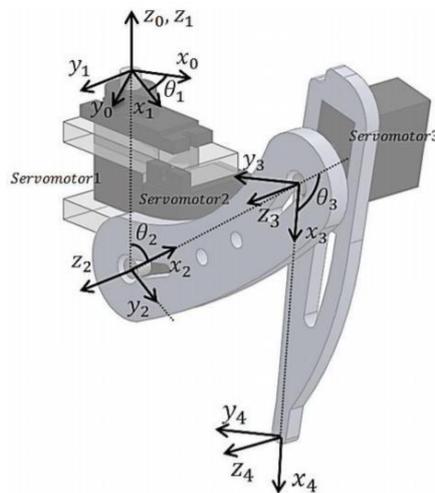
Una vez entendido el funcionamiento y características del servomotor se procede a elegir el servomotor adecuado para el proyecto, optando por servomotores que se adapten al diseño. Llegando a elegir los servomotores Sg90 por su tamaño, su efectividad de posición, y la facilidad de control, añadiendo también que tienen un peso de 9 gramos, el cual es ideal para un total de 12 motores (dos en cada pata). Debido a que cada pata tiene dos articulaciones, éstas deben ser controladas simultáneamente mediante algoritmos de regulación inspirados en el movimiento de un insecto, el cual se mueve de la siguiente manera:

Una pata se levanta, baja, adelanta y retrocede. Este sistema de movimiento es Bioinspirado en los insectos de seis patas, por ende se necesita de dos motores en cada

pata, uno para que realice el movimiento que permita subir y bajar la pata para apoyarse, mientras que el otro servomotor realiza el movimiento para adelante y para atrás.

En la siguiente Figura se puede observar las coordenadas de la cinemática del movimiento de una pata con dos servomotores, para el cual demostrar la estabilidad de animales hexápodos. (Ramos J. P.-M., 2015)

Figura 3. 4 Coordenadas para la cinemática directa de una pata



Mediante la utilización de 2 servomotores se realiza la cinemática en las articulaciones de las patas.
Fuente: (Ramos J. P.-M., 2015)

Como se observa en la Figura 3.4 el movimiento de la pata tiene ejes coordenados para realizar la implementación de los parámetros de Denavit Hartenberg (Procedimiento sistemático para describir la estructura cinemática de una cadena articulada). Estas coordenadas se analizan por medio de simulaciones en Simulink-Matlab, para verificar los parámetros de velocidad, desplazamiento angular y posición final de las patas, de igual manera se evalúa la formación del polígono de apoyo durante la caminata del insecto otorgándole estabilidad y garantizando su omnidireccionalidad dentro de la marcha. (Ramos J. P.-M., 2015)

3.5 Sensor

Para poder identificar si existe o no un objeto delante del prototipo robótico y poder pasar dicho objeto, se debe adicionar un sensor, el cual debe cumplir las siguientes características para su objetivo:

- a. El sensor debe tener un máximo de precisión y un mínimo de errores, ya que el prototipo robótico va ir corriendo, éste debe identificar lo más preciso y pronto posible para que el robot entre a otra forma de movimiento y así poder pasar el obstáculo censado.
- b. No debe afectar el material ni el color del objeto a censar, ya que si se requiere participar en competencias de robótica, los obstáculos a evitar son elementos electrónicos de todo tipo y color.
- c. Debe ser inmune a la luz, debido a que los rayos de luz que se refleja en el suelo choquen con el sensor o con el obstáculo, entregando datos incorrectos al controlador y provocando el arrastre de los obstáculos.

Mediante la información en la Sección 2.7 del Capítulo 2, sobre los tipos de sensores aptos para prototipos robóticos, se ha planteado elegir el sensor Sharp “Gp2y0A21”, una nueva tecnología apta para proyectos educativos y prototipos robóticos en competencias sobre detección de obstáculos.

Se presenta a continuación las características necesarias y principales del sensor a utilizar en el proyecto:

Tabla 3. 5 Características del sensor Sharp Gp2y0A21

Sensor:	Sharp Gp2y0A21
Precisión:	El sensor permite obtener la distancia de algún objeto dentro del rango de 10 a 80cm, medidas que se encuentran dentro del rango para evitar objetos en las competencias.
Sistema:	No afecta la reflectividad de materiales, incorpora un filtro para reducir el ruido. Su impedancia es de 100 veces respecto la impedancia del sistema electrónico de control.
Censado:	Para el censado integra tres dispositivos: Un diodo emisor de infrarrojos (IRED), un detector sensitivo de posición (PSD) y un circuito procesador de señales.

Características relevantes del sensor para que el prototipo robótico tipo insecto funcione como se espera.
Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

Para que el sensor Sharp Gp2y0A21 obtenga la distancia en centímetros se recomienda tomar como guía la gráfica voltaje vs. Distancia incluido en la Figura 3.5 en el cual muestra la variación de la señal analógica obtenida por el voltaje en función de la distancia y se ha tomado en consideración las siguientes fórmulas para el cálculo de la distancia del objeto a identificar:

$$Distancia(cm) = 27.86 * [lectura \text{ en voltios}]^{-1.15}$$

Ec. (3.6)

$$Distancia(cm) = 12343.85 * [lectura \text{ de un ADC de 10 bits}]^{-1.15}$$

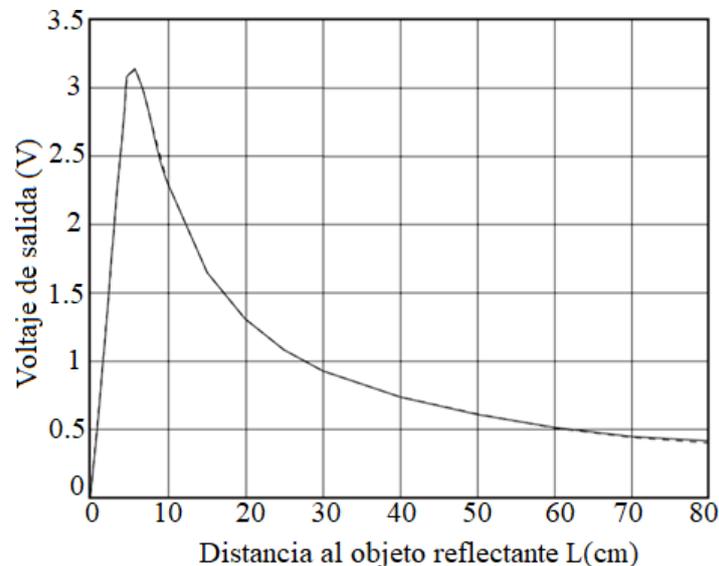
Ec. (3.7)

Ec. (3.8)

$$Distancia(cm) = 4 * 12343.85 * [lectura\ de\ un\ ADC\ de\ 8\ bits]^{-1.15}$$

La principal ventaja del sensor Sharp Gp2y0A21 muestra excelentes cualidades sobretodo en la detección de obstáculos compuestos por materiales que absorben el sonido, haciéndolos muy precisos al momento de efectuar medidas, así mismo en la rapidez de su respuesta si se comparan con los sensores de ultrasonido. (Antoni Merell Pérez, 2019)

Figura 3. 5 Curva del sensor Sharp



Grafica de la curva del sensor Sharp mediante el voltaje vs, distancia. Fuente: (Corporation, 2020)

En la gráfica se observa que los objetos que se encuentran a menos de 10 centímetros dan un mayor voltaje que aquellos situados a 70 centímetros en adelante. Mediante las pruebas de funcionamiento del sensor, se ha considerado que las medidas mayores a 10 centímetros son más exactas, demostrando que la curva del sensor Sharp es meramente ilustrativa, por lo que es imprescindible realizar varias medidas previas, a modo de calibración y establecer a partir de estas calibraciones la correspondiente función para el cálculo de la distancia propia de cada dispositivo.

3.6 Fuente de alimentación para el control principal

Los motores, sensor y controlador reciben diferentes consumos de corrientes, para ello se calcula la corriente total, para así realizar un dimensionamiento de la fuente a usar. Tomando en cuenta el máximo consumo del controlador Arduino.

A continuación, se presenta una tabla acerca de la corriente de cada elemento electrónico usado en el prototipo robótico.

Tabla 3. 6 Corriente de consumo de los elementos electrónicos a usar

Cantidad	Elemento	Corriente de consumo	Especificaciones de funcionamiento
1	Placa Arduino nano V3.0	15mA	A 16 MHz
12	Servomotor Sg90	3.96mA	A carga nominal
1	Sensor Sharp GP2Y0A21	30mA	En funcionamiento

Elementos electrónicos que más corriente consumen en el proyecto. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

De aquí se puede concluir que el consumo total de corriente del circuito será:

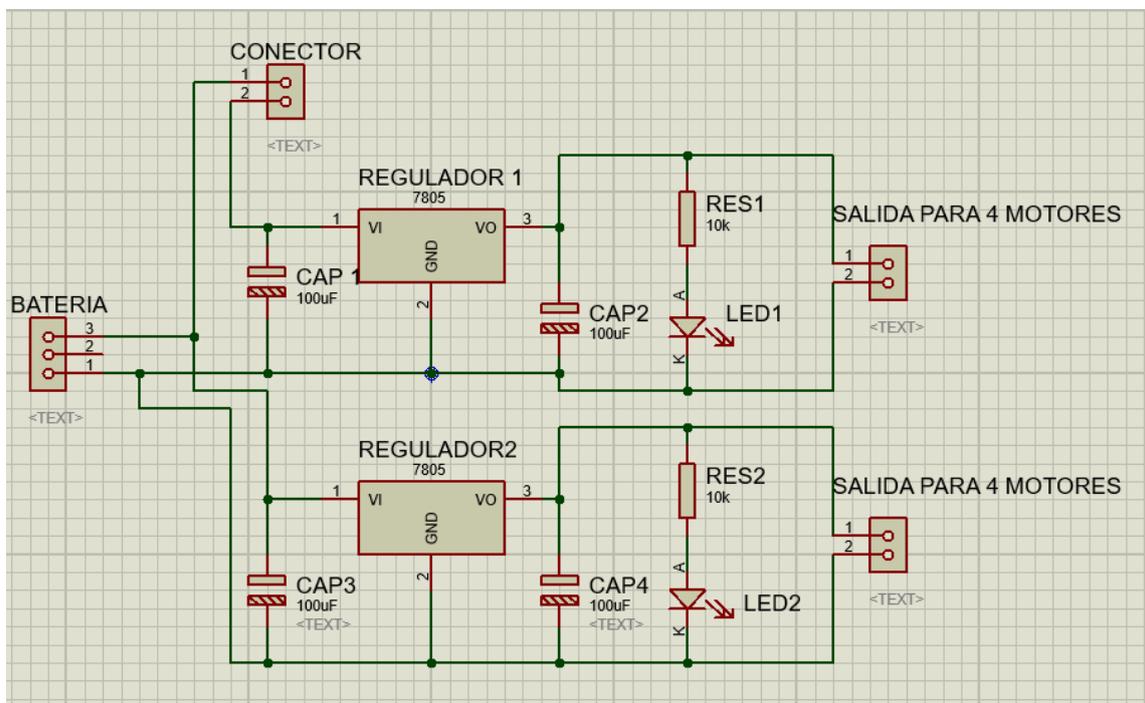
$$I_{TOTAL} = (15 + 3.96 + 30)A = 48.96mA$$

Para la fuente de alimentación, el Arduino nano V3.0 trabaja a un voltaje de operación de 5v, mientras que cada servomotor trabaja con voltajes de 4.0 a 7.2v consumiendo la mayor parte de voltaje de todo el circuito, con lo cual se deberán usar una fuente de alimentación con tres salidas de voltaje. Las tres salidas de voltajes se las obtiene mediante el uso de tres reguladores de voltaje positivo (LM7805), el cual es capaz de soportar una corriente máxima de salida de 1A, por lo cual es adecuado para esta aplicación. El voltaje de salida de los tres reguladores en cuestión es independiente para los servomotores, siendo utilizados cuatro servos por cada regulador de voltaje. Con esto el consumo de corriente

va a operar al 50% del total, permitiendo que la batería opere dentro de su capacidad y sobre la profundidad de descarga.

A continuación, se presenta el circuito de la fuente de alimentación de los ocho servomotores de la parte trasera del prototipo robótico, colocando cuatro servomotores por salida de voltaje de cada regulador.

Figura 3. 6 Circuito de regulación de voltaje



Regulación de voltaje para 8 servomotores, 4 motores en paralelo de la parte trasera y 4 motores en paralelo de la parte media del prototipo. Elaborado por: Geovanni Lozada y Jonathan Villacres

Según (PROMETEC, 2020), menciona que la energía disipada en forma de calor, en un regulador 7805, se calcula como se muestra en la Ecuación (3.9):

$$\text{Desperdicio de energía (calor)} = 1 - \frac{5}{7.4} * 100\% = 32.43\% \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Si se usa una batería de 7,4v a 1A, el regulador LM7805 desperdicia menos de la mitad de la energía en forma de calor, entonces al dividir el porcentaje para los tres reguladores

se obtiene un valor del 10.81% de energía calórica desperdiciada de los reguladores LM7805, obteniendo un porcentaje muy bajo en pérdida de energía.

Figura 3. 7 Batería Turnigy Tipo LIPO 1.0



Fuente de alimentación para el funcionamiento de los elementos electrónicos. Fuente: (ToBEM, 2020)

En el siguiente cálculo se observa el tiempo de descarga de la batería tipo LIPO, para tener una descarga estimada en la batería, considerando la corriente consumida por los elementos electrónicos a usar.

$$\text{tiempo de descarga} = \frac{\text{carga eléctrica de batería}}{\text{consumo eléctrico}} = \frac{1000\text{mA}}{48.96 \frac{\text{mA}}{\text{h}}}$$

$$\text{tiempo de descarga} = 20 \text{ horas y } 25 \text{ minutos con } 29.41 \text{ segundos}$$

Sabiendo la profundidad de descarga de las baterías lipo de 7.4v a 1000mA, se obtiene la cantidad de baterías necesarias para el prototipo, mediante el siguiente cálculo:

Profundidad de descarga: 20C

$$\frac{1}{20} = 0.05$$

$$\frac{\text{consumo de corriente}}{\text{profundidad de descarga}} = \frac{0.04896\text{Ah}}{0.05} = 0.97\text{Ah}$$

$$\frac{\text{cantidad de energía que necesito}}{\text{cantidad de energía de la batería}} = \frac{0.97}{1} = 0.97$$

Por ende, se necesita colocar una batería para el prototipo robótico tipo insecto abasteciendo la cantidad de energía necesaria.

3.7 Arquitectura del sistema

La arquitectura del robot se presenta mediante la Figura 3.8, el cual se basa en la retroalimentación del sensor Sharp GP2Y0A21 cumpliendo la función de identificar por medio de la distancia si existe o no un objeto frente al robot, esta información es enviada al controlador Arduino nano V3.0, el cual realiza la activación de los servomotores “Sg90”, dando movilidad al prototipo robótico. Este sistema está alimentado mediante la batería tipo LIPO, la cual proporciona energía eléctrica para que todos los elementos electrónicos cumplan con su función específica.

Figura 3. 8 Arquitectura del sistema mediante diagrama de bloques

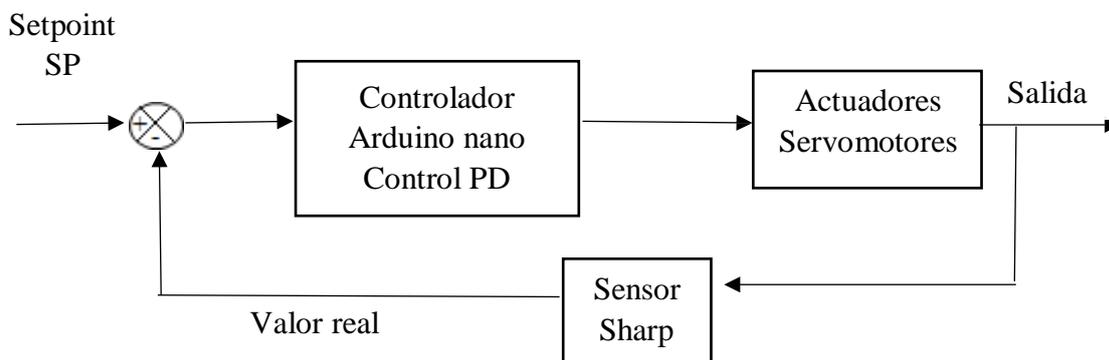


Diagrama de bloques del sistema. Fuente: Geovanni Lozada y Jonathan Villacrés

3.8 Desarrollo del algoritmo para detectar objetos

Para el desarrollo del algoritmo se cumple con el lenguaje de programación de Arduino, el cual es desarrollado mediante el uso del lenguaje de programación “Processing”. Este lenguaje de programación es un entorno de desarrollo integrado, de código abierto basado en Java, sirviendo como medio para la enseñanza y producción de proyectos educativos e interactivos. (Antoni Merell Pérez, 2019)

El algoritmo desarrollado implementa el control en lazo cerrado por medio de la retroalimentación del valor medido mediante el sensor Sharp GP2Y0A21, el cual es la parte más importante del proceso, debido a que el control se basa principalmente en el valor analógico (variable a controlar) y la cantidad de error que tenga a referencia del setpoint (variable manipulable), realizando un aumento o disminución proporcional en tiempo derivativo de velocidad frente a un objeto y con ello el cambio de movimiento del robot.

Todo el proceso de control se encuentra dentro del *void loop()* del software Arduino, siendo una función en la que el programa se ejecuta un número infinito de veces plantea la lectura constante el sensor analógico generando un control en lazo cerrado e identificando si existe o no un objeto frente a él, para aumentar la velocidad (función correr) o disminuir la velocidad (función escalar).

```
void loop() {
  analogValue = analogRead(A4);

  if (analogValue < sp){
    corredor();
  }
  else{
    escalar();
  }
}
```

La retroalimentación del sensor ayuda al controlador PD enviando una respuesta instantánea a los motores corrigiendo el error existente proporcionalmente, al ser muy pequeño el tiempo de actuación la variable de salida hacia a los motores tiene que ser muy rápidamente (control derivativo) enviada para que el programa intervenga si aumenta o disminuye la velocidad de los motores.

Los valores K_p y T_d de un control PD son parámetros regulables del sistema. En el código de programación a T_d se la llama K_{de} , un valor flotante el cual es un tiempo derivativo de compensación de la variable regulada, mientras que K_p en el código es la variable K_{pe} la constante proporcional, el cual es un valor que prolonga o acorta el rango de aceleración.

```

float Kpe = 100; // Constante Proporcional
float Kie = 5.05; //Constante de Sumatoria
float Kde = 0.007; //Constante Derivativa del Sistema

```

El error calculado en el sistema es un error relativo, debido a que el sensor lee un valor real y este valor se divide al valor que se desea obtener hasta llegar al límite del setpoint propuesto.

```

void cal(){
float er=analogValue/sp;
if(er<1.0){
if(outv>Kpe){
outv=outv-Kie;
}
}

delay(outv);
}

```

Dentro del cálculo del error el programa tiene una función llamada “*cal*” la cual identifica si se aumenta (disminuyo del delay) o disminuye (aumenta el delay) la velocidad del robot. Si el error es menor a 1 quiere decir que el robot aun no llega a un objeto por lo tanto se resta el valor constante sumatoria *Kie* y por ende disminuye el delay aumentando la velocidad en cada paso del robot. La constante proporcional *Kpe* es el umbral máximo que se desea acelerar el robot. Finalmente, la función tiene un delay del valor restado por la constante *Kie*, esto quiere decir que cada vez que se lea la función *cal* va a tener un delay, este valor se encuentra en cada paso del robot.

Finalmente, se ha incorporado dentro de la función “Escalar” un proceso el cual tiene que cargar un valor de salida del *outv*, ese valor es el doble producto de la constante del umbral máximo de velocidad más un valor proporcional, esta función quiere decir que al momento de entrar a la función “Escalar” inmediatamente vaya aumentando el delay y por ende disminuyendo la velocidad para que el robot pase el obstáculo sin problemas.

```

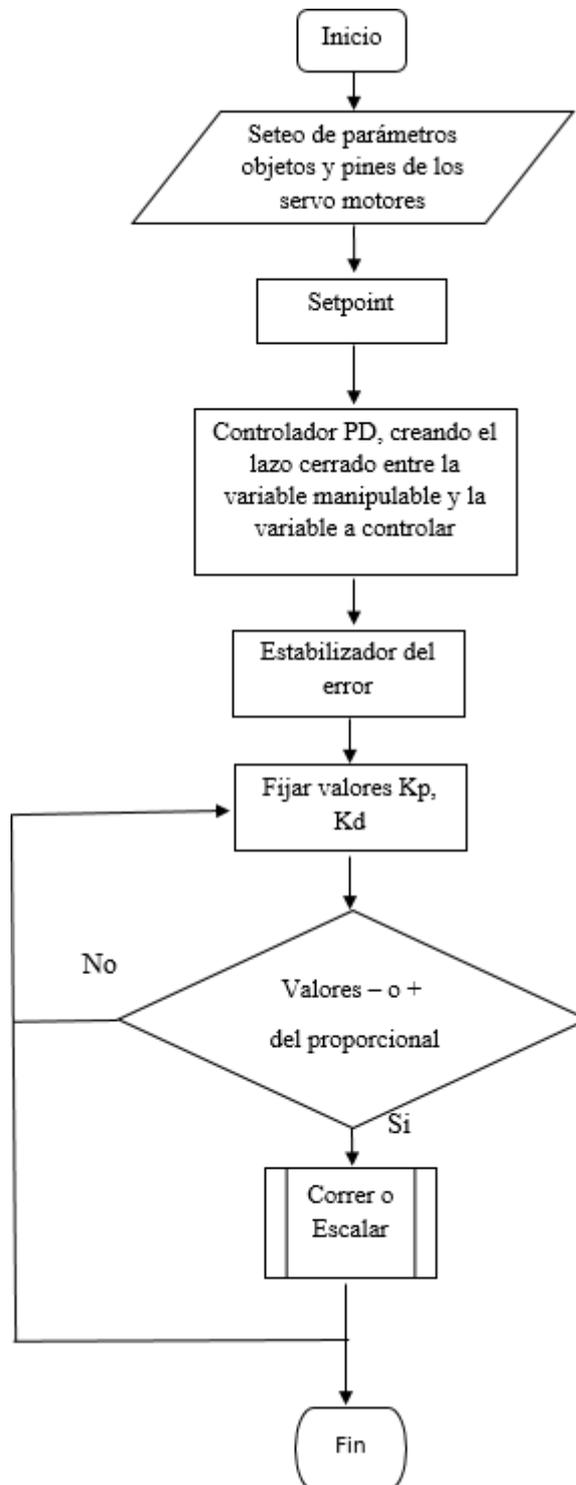
void escalar(){
outv=(2*Kpe)+Kde;
}

```

La función “Corredor” establece que el robot tenga un movimiento bastante rápido, empleando las patas no tan arriba para que tenga una rápida respuesta del adelanto y retraso de las patas. Mientras que la función “Escalar” establece un movimiento como

su nombre dice escala, por ende, las patas del robot se alzan mucho más para que pueda pasar cualquier obstáculo presente frente al robot.

3.8.1 Diagrama de flujo



CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez implementado el diseño de la estructura mecánica (ver Anexo1) y su algoritmo para detectar objetos (ver Anexo2), obteniendo así el prototipo finalizado con las características deseadas, se procede a realizar las pruebas de funcionamiento, ya sean pruebas para los servomotores, pruebas para el sensor y pruebas para el recorrido en la pista, determinado así aspectos mecánicos de cada parte del prototipo y de algoritmos básicos de programación.

4.1. Pruebas de funcionamiento de los servos motores

En primera instancia se realizó pruebas de funcionamiento de los servomotores, los ángulos y posiciones que deben tener en la carcasa del robot, verificando al momento de la puesta en marcha. Optando por lo investigado se realizó la programación necesaria en cada uno de los servos motores obteniendo así la posición para su desplazamiento.

Tabla 4. 1 Pruebas de funcionamiento para servomotores

Distancia	Trayectoria Recta	Trayectoria Derecha	Trayectoria Izquierda
1m	99%	100%	100%
2m	97%	98%	97%
TOTAL	98%	99%	98,5%

Se tomó dos distancias como referencia en las diferentes trayectorias. Elaborado por: Geovanni Lozada,
Jonathan Villacrés

En la Tabla 4.1 se muestran los porcentajes obtenidos en las pruebas según las trayectorias dadas, esta prueba fue con 100 repeticiones en: trayectoria recta, trayectoria curva hacia la derecha y trayectoria curva hacia la izquierda, de las cuales se tomó dos medidas, la primera de 1 metro y la segunda de 2 metros de distancia, observando cada repetición y anotándola en una tabla, se obtuvo un porcentaje del 98% en una trayectoria recta, logrando que el robot se desplace recto sin desviarse del camino asignado. En conclusión existe un porcentaje aceptable en dicha trayectoria. Al principio existieron errores en la

ejecución de trayectoria recta, esto es debido a la velocidad y los ángulos dados en cada servomotor junto con el peso central del robot.

En los desplazamientos derecha e izquierda se obtienen porcentajes muy por encima de los resultados requeridos 99% y 98.5% respectivamente. Estos valores se dan gracias a la programación y ángulos en cada servomotor. Obteniendo así una adecuada ejecución en la trayectoria izquierda y derecha.

4.2. Pruebas del algoritmo en la detección de objetos

Tabla 4. 2 Pruebas de funcionamiento del sensor

	Objetos Pequeños (<2cm)	Objetos Grandes ($\geq 2\text{cm}$ y $\leq 3\text{cm}$)
Detecta objetos	95%	98%
Esquiva objetos	95%	98%
Distancia de detección de objetos	13,5 cm	15 cm

El algoritmo se basa dependiendo la posición del sensor y el tipo de objeto a censar. Elaborado por:
Geovanni Lozada, Jonathan Villacrés.

Por medio de los datos obtenidos de la Tabla 4.2 se verifica que existen errores en la ejecución al momento de la detección de objetos pequeños, esto es debido al tamaño de los objetos, ya que el sensor debe estar perpendicular al objeto. Mientras que en objetos grandes el censado es correcto por la adecuada ubicación del sensor, colocándolo en el rango correcto de censado de objetos y esquivando obstáculos presentes en su camino.

4.3. Pruebas en pista

La prueba final ha sido con la calibración entre la posición de los servomotores y el sensor, obteniendo un movimiento en línea recta y un correcto censado del obstáculo. Para ello se ha tomado como referencia la pista modelo de las carreras de robótica, la cual

tiene las dimensiones de 2m de largo por 20 cm de ancho, añadiendo obstáculos (elementos electrónicos, como relés, capacitores, transistores, etc.) de todas las medidas.

Tabla 4. 3 Pruebas de funcionamiento en pista

	Obstáculos Pequeños	Obstáculos Grandes	Obstáculos Combinados
Pasa el Obstáculo	100%	99%	99.5%
Tiempo	5,5 seg	6.1 seg	5,9 seg

El tamaño de los obstáculos no tiene mayor influencia cuando el robot tipo insecto pasa el obstáculo.

Elaborado por: Geovanni Lozada, Jonathan Villacrés.

De las 100 repeticiones en pista se verificó que existen variaciones no tan alejadas de los tiempos obtenidos, esto es debido a que se hizo pruebas con obstáculos pequeños ($< 2\text{cm}$) y obstáculos grandes ($\geq 2\text{cm}$ y $\leq 3\text{cm}$).

Gracias a que el robot tipo insecto tiene una estructura grande y alta para que pueda pasar obstáculos grandes las pruebas en pista son aceptables, existiendo un alto porcentaje de paso de obstáculos en un tiempo considerable.

Finalmente se realizó una comparación del robot tipo insecto con un robot Theo Jansen, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4. 4 Pruebas de comparación en pista

	Obstáculos Pequeños	Obstáculos Grandes	Obstáculos Combinados	Tiempo Seg
Robot tipo insecto	100%	99%	99.5%	5.5
Robot theo Jansen	68%	35%	54%	14

Comparación entre el robot tipo insecto y robot theo Jansen, mediante el tiempo de llegada entre los dos robots. Elaborado por: Geovanni Lozada, Jonathan Villacrés.

Observando los datos de la Tabla 4.4, se concluye que el robot tipo insecto es mucho más rápido que el robot Theo Jansen, y eso se debe a que el robot Theo Jansen tiene un mecanismo de manivela, eso quiere decir que el movimiento de las patas va acorde del giro del motor. El robot Theo Jansen también tiene la desventaja de ser un robot cuadrúpedo, el cual tiende a caerse al momento de encontrarse con un obstáculo perjudicando su trayectoria.

CAPÍTULO 5

5.1 Conclusiones

Se determinó que el paso trípode en el robot tipo insecto tiene mayor estabilidad y mejor velocidad a comparación con otro tipo de movimiento, ya que los cambios continuos en la coordinación de pasos minimizan el tiempo relativo del levantamiento de piernas, manteniendo el centro de gravedad y atravesando rápidamente obstáculos desafiantes sin caerse. Añadido a este movimiento un control proporcional permitió identificar obstáculos y así ir reduciendo gradualmente la velocidad para tener un cambio pronunciado, que sobrepase obstáculos sin caerse y sin cambio de dirección.

El grado de libertad para los prototipos robóticos es una cadena cinemática abierta, porque los eslabones se conectan mediante articulaciones permitiendo un movimiento de rotación en un solo eje en cada parte del prototipo, por medio del análisis matemático de la cinemática directa e inversa ver (Sección 2.5.1), se determinó que un mayor número de grados de libertad permite una mayor flexibilidad en los diseños.

La cinemática de un prototipo robot artrópodo tipo insecto permite analizar diversas acciones, consecuentemente del número de articulaciones y grados de libertad que posee el mismo, en este proyecto se realizó el diseño e implementación de un robot hexápodo con 2 grados de libertad en cada articulación ver (Figura 3.2), este diseño permitió que cada articulación tenga un movimiento independiente, de igual manera un movimiento vertical y horizontalmente en las 6 patas del diseño.

Este trabajo de titulación presenta un estudio en el campo de prototipos robóticos tipo insectos con sus respectivos diseños, donde se realizó una comparación de mecanismos entre un prototipo hexápodo y un mecanismo Theo Jansen, de igual manera se realizó una comparación entre actuadores y sensores que conforman el diseño, para trabajar con las mejores opciones existentes en el mercado, el cual permitirá alcanzar una inclinación máxima en prototipos robóticos tipo insectos para competencias y conocer las ventajas y eficiencia de los mismos.

En relación con lo antes expuesto del prototipo robótico tipo insecto, analizando sus comparativas en el diseño hexápodo y Theo Jansen ver (Tabla 4.4), se optó por adecuado y preciso para las competencias al robot hexápodo, concluyendo que el diseño posee mayor estabilidad, velocidad, tiempo de ejecución, adherencia y mejor respuesta al control PD (Proporcional- Derivativo), en cambio el diseño Theo Jansen presenta deficiencia de adherencia y estabilidad al igual que un mecanismo lento en relación a competencias, otro factor importante del análisis que se realizó es el porcentaje de error que presenta el sensor de objetos en cada prototipo, presentando un margen menor del 10% con objetos de diferentes tamaño en el prototipo hexápodo y un margen variable mayor del 30% en el prototipo Theo Jansen.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda utilizar visión artificial para futuros proyectos sobre detección de obstáculos, esto daría una mejora al prototipo, ayudando a identificar de mejor manera que tipo de objeto existe y cómo reaccionar frente a él.

REFERENCIAS

- Alvarez, S. (18 de mayo de 2006). *Desarrollo Web*. Obtenido de <https://desarrolloweb.com/articulos/2477.php>
- Angelica L. Torres Zúñiga. Adrian Romero Vargas, G. D. (2006). *Diseño, construcción y control de un insecto robot*. México: Pachuca de Soto.
- Angelica L. Torres Zúñiga. Adrian Romero Vargas, G. D. (2016). *Diseño, construcción y control de un insecto robot*. México: Pachuca de Soto.
- Antoni Merell Pérez, P. T. (2019). Plataforma robótica experimental. *UOC Universitat Oberta de Catalunya*, 12-13.
- Arduino, E. (2020). *elarduino.com*. Obtenido de www.elarduino.com/micro
- Argentina, G. d. (22 de Junio de 2019). *Robóts didácticos*. Obtenido de <http://robots-argentina.com.ar/didactica/>
- Automatización, M. (2017). Servomotores: Control, precisión y velocidad. *AADECa*, 22-23.
- Corcuera, P. (2015). *PROGRAMACIÓN EN ARDUINO*. Obtenido de <https://personales.unican.es/corcuerp/progucont/slides/Arduino.pdf>
- Corporation, S. (05 de 08 de 2020). *Global_Sharp*. Obtenido de https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a21yk_e.pdf
- Deisy Y. Forero, P. A. (2011). Análisis para la simulación de modelos animales tipo hexápodos. *VECTOR*, 54-62.
- Electrónica, D. d. (2020). *Imperial College London*. Obtenido de Imperial: http://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_ddatasheet.pdf
- Español, N. G. (2015). *National Geographic en Español*. Obtenido de <https://www.ngenespanol.com/animales/logran-grabar-hormigas-mas-rapidas-del-mundo/>
- Fernandez, M. A. (2005). Plataforma experimental y de entrenamiento de una fuente ininterrumpida de potencia para localidades aisladas. *SCIELO*, 5.

- González, F. J. (02 de Febrero de 2018). *Robótica y aprendizaje en competencias con arduino*. Obtenido de <https://reunir.unir.net/bitstream/handle/123456789/6486/GONZALEZ%20PEREZ%20FRANCISCO%20JAVIER.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hidalgo, W. (2015). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISIÓN DE SEÑALES BIOMÉTRICAS. Riobamba, Ecuador.
- INTPLUS. (09 de 01 de 2020). *Super Robótica*. Obtenido de <http://www.superrobotica.com/Servosrc.htm>
- INTPLUS. (Jueves de Enero de 2020). *Superrobotica*. Obtenido de <http://www.superrobotica.com/S320109.htm>
- López, P. H. (Junio de 2016). Avances de la metodología del diseño mecatrónico. *Proyecto Integrador*. Zacatecas, Zac, Mexico: Instituto Politecnico nacional.
- M. Condeña, C. C. (2018). *Prototipos de robots*. ICA-Perú: Universidad Nacional San Luis Gonzaga de ICA.
- Marticoreana, J. L. (2011). *ProfesorMolina.com*. Obtenido de <https://profesormolina2.webcindario.com/>
- MaxBotix. (2020). *Maxbotix*. Obtenido de https://www.maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf
- Mecafenix, F. (18 de Abril de 2017). *Ingeniería Mecafenix*. Obtenido de La enciclopedia de la ingeniería : <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/servomotor/>
- Medina, J. D. (02 de 03 de 2011). *El Regulador*. Obtenido de <http://practica16c11.blogspot.com/2011/03/funcionamiento-regulador.html>
- Minibots. (14 de octubre de 2013). Obtenido de Minibots Plataforma Libre: <https://minibots.wordpress.com/2013/10/14/comparacion-de-los-sensores-de-ultrasonidos-us-100-y-hc-sr04/>
- Montés, F. J. (2013). *El Universo de los Insectos*. Madrid-España: Mundi-Prensa.
- Pascuas, A. (29 de Marzo de 2018). *Computer Hoy "Robot araña es tan terrorífico como una tarántula de verdad"*.

- Peredo, E. M. (10 de abril de 2017). *medium.com*. Obtenido de <https://medium.com/@ericksirpa/robots-m%C3%A9todos-de-locomoci%C3%B3n-terrestre-2964c68a9523>
- Perez, D. (2014). *Sensores de distancia por ultrasónidos*.
- Playground.Arduino. (2020). *Playground.Arduino cc*. Obtenido de <https://playground.arduino.cc/Main/ArduinoPinCurrentLimitations/>
- PROMETEC. (2020). *PROMETEC.NET*. Obtenido de <https://www.prometec.net/consumos-arduino/>
- PROSERQUISA. (2015). *CURSO DE ARDUINO*. San Salvador.
- R.J.FulSource, T. K. (2009). *The Role of the Mechanical System in Control*. Alemania: NA.
- Ramdy, P. (2017). La escalada favorece la marcha del tripode sobre las alternativas más rápidas de marcha de insectos. *Nature Communications*, 5-20.
- Ramos, J. P.-M. (2015). Simulación de un robot Hexápodo Bioinspirado en el Tenebrio. *Lámpsakos*, 33-39.
- Ramos, O. (2017). Cinemática de Robots Móviles. En *Fundamentos de Robótica* (págs. 5-19). Perú.
- Roberto Fernando Ramirez Rivera, R. C. (2015). *Diseño e implementación de un robot autónomo móvil usando tecnología FPGA*. Guayaquil: Universidad Politecnica Salesiana .
- Rus, C. (4 de Octubre de 2018). *XATAKA "Robot 100 pies"*. Obtenido de <https://www.xataka.com>
- Sebastian, P. (2019). Robot Hexápodo Inspirado en la hormiga. *Ciencia y tecnología*, 6-9.
- Sony. (2012). *Sony*. Obtenido de sony.co.uk/support/en/hub/ERS
- Tecnología*. (2018). Obtenido de *Servomotores*: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor.html>
- TECNOLOGÍA*. (2019). Obtenido de *SERVOMOTORES*: <https://www.areatecnologia.com/electricidad/servomotor.html>

ToBEM. (2020). *teslabem*. Obtenido de <https://teslabem.com/tienda/bateria-lipo-turnigy-1ah-7-4v-1000mah-2s/>

Unicrom, E. (2016). *Unicrom*. Obtenido de Electrónica Unicrom: <https://unicrom.com/reguladores-de-voltaje-clasificacion-regulado/>

Vargas, A. R. (2016). *Diseño, Construcción y Control de un Insecto Robot*. Pachuca - México.

Veloso, C. (9 de Marzo de 2016). *ETools*. Obtenido de <https://www.electrontools.com/Home/WP/2016/03/09/regulador-de-voltaje-7805/>

ANEXOS

Anexo 1. Planos del Prototipo robótico tipo insecto

The drawing includes the following views and dimensions:

- Top View:** Shows the overall layout with a total width of 184,06 mm and a total height of 190 mm. Key dimensions include 10,15 mm, 59,84 mm, 70,01 mm, 20 mm, 30 mm, and 51,36 mm.
- Side View:** Shows the profile of the robot with a total height of 100,32 mm. Key dimensions include 29,81 mm, 35,07 mm, 20 mm, 9 mm, 11,24 mm, 86 mm, and 20,83 mm.
- Perspective View:** Shows the assembled robot with four legs.
- Detail Views:** Two detailed views of the leg assembly. The first shows a 1,5 mm dimension and a 6 mm height. The second shows a 6 mm width, a 3 mm offset, and a 12,87 mm height.

LISTA DE PIEZAS		
#	Medidas [cm]	Característica
A	19x5	Cuerpo base
B	10,5x4,5	Patas
C	3x1	Acoples del motor
D	1x3	Articulaciones
E	1x3x2x1,3	Base de la articulación
F	3,5x1	Acoples del motor
Adicionales		
G	12,87x3	Tornillo M3
H	6x1,5	Tornillo de cortical
I	∅ 2mm	Agujeros para acoples

Universidad Politécnica Salesiana

Unidad:	Nombre	Fecha
mm	Villacrés&Lozada	2/6/2020
	Revisado: Ing. William Onate	

Escala:	Tema:	N° de plano
1:1	Prototipo robótico tipo insecto	001

Anexo 2. Código de programación

```
#include <Servo.h>

Servo myservo1;

Servo myservo2;

Servo myservo3;

Servo myservo4;

Servo myservo5;

Servo myservo6;

Servo myservo7;

Servo myservo8;

Servo myservo9;

Servo myservo10;

Servo myservo11;

Servo myservo12;

int tiempo=100;

float Kpe = 100; // Constante Proporcional

float Kie = 5.05; //Constante de Sumatoria

float Kde = 0.007; //Constante Derivativa del Sistema

int sp=300;

int outv=200;

int analogValue;

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  myservo1.attach(13);

  myservo2.attach(10);
```

```

myservo3.attach(11);
myservo4.attach(12);
myservo5.attach(9);
myservo6.attach(8);
myservo7.attach(7);
myservo8.attach(6);
myservo9.attach(5);
myservo10.attach(4);
myservo11.attach(3);
myservo12.attach(2);
}
void loop() {
analogValue = analogRead(A4);
if (analogValue < sp){// no hay objetos
    corredor();
}
else{
    escalar();
} }
void cal(){
float er=analogValue/sp;
if(er<1.0){
if(outv>Kpe){
outv=outv-Kie;
} }
} }

```

```
delay(outv);  
}  
  
void corredor(){  
myservo3.write(90);  
myservo6.write(10);  
myservo11.write(0);  
myservo4.write(0);  
myservo12.write(180);  
myservo5.write(180);  
myservo2.write(100);  
myservo10.write(90);  
myservo7.write(80);  
cal();  
myservo4.write(90);  
myservo12.write(90);  
myservo5.write(100);  
cal();  
myservo3.write(20);  
myservo6.write(70);  
myservo11.write(90);  
myservo2.write(50);  
myservo10.write(20);  
myservo7.write(140);  
myservo1.write(180);  
myservo9.write(0);
```

```
myservo8.write(0);  
  
cal();  
  
myservo1.write(90);  
myservo9.write(90);  
myservo8.write(90);  
cal();  
}  
  
void escalar(){  
  
outv=(2*Kpe)+Kde;  
myservo3.write(90);  
myservo6.write(22);  
myservo11.write(0);  
myservo4.write(0);  
myservo12.write(180);  
myservo5.write(180);  
cal();  
myservo2.write(100);  
myservo10.write(74);  
myservo7.write(80);  
cal();  
myservo4.write(135);  
myservo12.write(40);  
myservo5.write(40);  
cal();  
myservo3.write(16);
```

```
myservo6.write(57);  
myservo11.write(85);  
myservo1.write(180);  
myservo9.write(0);  
myservo8.write(0);  
cal();  
myservo2.write(56);  
myservo10.write(16);  
myservo7.write(140);  
cal();  
myservo1.write(45);  
myservo9.write(140);  
myservo8.write(140);  
cal();  
}
```