



**ITSSAT**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE  
SAN ANDRÉS TUXTLA**



**TITULACIÓN INTEGRAL**

**TESIS PROFESIONAL**

**“Aplicación de la etapa de control de un minirobot  
biomimético para inspección en instalaciones  
eléctricas en zonas de difícil acceso”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**PRESENTA  
MISAEAL COBIX GONZÁLEZ**

**ASESOR  
M.I.I BLANCA NICANDRIA RÍOS ATAXCA**

**SAN ANDRÉS TUXTLA, MARZO DE 2021**

## Formato de Liberación de Proyecto



### FORMATO DE LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA LA TITULACIÓN INTEGRAL

Lugar: San Andrés Tuxtla, Veracruz Fecha: 09/03/2021  
Asunto: Liberación de proyecto para la  
Titulación integral.

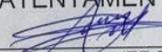
LIC. GERMÁN VENTURA TENORIO  
Jefe del Departamento de Estudios  
Profesionales del ITSSAT

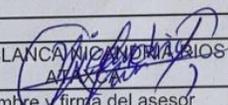
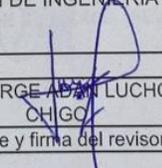
Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre del estudiante y/o egresado:	COBIX GONZALEZ MISAEAL
Carrera:	INGENIERIA ELECTROMECHANICA
No. de Control:	151U0120
Nombre del Proyecto:	APLICACION DE LA ETAPA DE CONTROL DE UN MINIROBOT BIOMIMETICO PARA INSPECCION EN INSTALACIONES ELECTRICAS EN ZONAS DE DIFICIL ACCESO.
Producto:	1.-TESIS PROFESIONAL

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

ATENTAMENTE

  
I.M. JOSUE ÁNGEL OLIVEROS GONZALEZ  
JEFE DE DIVISIÓN DE INGENIERIA ELECTROMECHANICA

 M.I.I. BLANCA NICANORA DÍAZ	 I.E. JORGE ABÁN LUCHO CHIGO	 I.E.M. COSME HERNÁNDEZ LINARES
Nombre y firma del asesor	Nombre y firma del revisor*	Nombre y firma del revisor*

\* Solo aplica para el caso de tesis o tesina.

Carr. Costera del Golfo S/N, KM 140+100  
Loc. Matcapan, Mpio, San Andrés Tuxtla, Ver.  
C.P. 95804 A.P. 110  
Tel: 01(294)9479100 ext. 131  
9479107

## Autorización de Impresión



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN ANDRÉS TUXTLA  
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS PROFESIONALES



### Autorización de Impresión para Titulación Integral

San Andrés Tuxtla, Ver. 09 de marzo del 2021

OPCION: 1.-TESIS PROFESIONAL

#### INTEGRANTES

Nombre del Estudiante	No. de Control	Carrera	Plan de Estudios
COBIX GONZALEZ MISAEAL	151U0120	INGENIERIA ELECTROMECHANICA	IEME-2010-210

De acuerdo con el Reglamento de Titulación Vigente y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo a su trabajo profesional para la obtención del título a nivel licenciatura, comunico a Usted que este departamento concede la autorización para que proceda a la impresión del proyecto denominado:

**"APLICACION DE LA ETAPA DE CONTROL DE  
UN MINIROBOT BIOMIMETICO PARA  
INSPECCION EN INSTALACIONES ELECTRICAS  
EN ZONAS DE DIFICIL ACCESO. "**

Atentamente

  
LIC. GERMAN VENTURA TENORIO  
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS PROFESIONALES

  
INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE  
SAN ANDRÉS TUXTLA  
**ESTUDIOS  
PROFESIONALES**

Carr. Costera del Golfo S/N, KM 140+100  
Loc. Matacapán, Mpio, San Andrés Tuxtla, Ver.  
C.P. 95804 A.P. 110  
Tel: 01(294) 94 79100 ext. 222  
9479107

## **Agradecimientos**

Gracias a cada una de las personas que fueron participes a lo largo del desarrollo de este proyecto que, de alguna forma, son parte de su culminación.

Gracias principalmente a mi familia y asesores, comparto mi más sincero agradecimiento y admiración por apoyar en esta etapa de mi formación académica.

## Índice

Formato de Liberación de Proyecto .....	I
Autorización de Impresión.....	II
Agradecimientos .....	III
Índice.....	IV
Lista de Figuras.....	VI
Lista de Tablas .....	VIII
Resumen.....	IX
Abstract.....	X
Introducción .....	1
Capítulo I Generalidades del proyecto.....	2
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Planteamiento del problema .....	2
1.3 Formulación de Hipótesis.....	3
1.4 Objetivos .....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos .....	3
1.4 Justificación.....	3
Capítulo II Fundamentos teóricos .....	5
2.1 Antecedentes históricos.....	5
2.2 Marco teórico .....	8
Salamandra Robótica.....	9
Pleurobot.....	12
2.3 Marco conceptual .....	14
Biomimética.....	14
Locomoción Biológica .....	15
Sistemas de control .....	18
Generadores Centrales de Patrones (CPGs) .....	20
Actuadores para Locomoción Biológica .....	21
Activación de Sistemas de Locomoción.....	27
Impresión 3d.....	33
Capítulo III Metodología .....	35

3.1 Diseño Mecánico.....	35
Módulo Central.....	37
Extremidades .....	38
Mecanismo Cámara .....	39
3.2 Manufactura .....	41
3.3 Diseño electrónico.....	43
Componentes Electrónicos .....	43
Sistema de activación de espina dorsal y extremidades .....	47
3.4 Ensamble .....	50
3.5 Programación .....	52
Capítulo IV Presentación, análisis e interpretación de resultados .....	55
4.1 Descripción de los resultados del trabajo .....	55
4.2 Resultados .....	56
4.3 Conclusiones .....	60
Recomendaciones .....	61
Referencias bibliográficas.....	62
Anexos .....	64
Anexo A. Nylon: Parámetros Físicos .....	64
Anexo B. Arduino Nano Pin Layout.....	65
Anexo C. Impresión 3d en TPU .....	66
Anexo D. Transceptor nRF24L01: Dimensiones .....	67
Anexo E. Diagrama de conexión de actuadores y microcontrolador .....	68
Anexo F. Código de programación IDE Arduino .....	70

## Lista de Figuras

Figura 1 Robot de Inspección de Tuberías ROVVER Fuente: EnviroSight .....	5
Figura 2 Micro-Magnetic Casing Crawler. Fuente: ULC Pipeline Robotics.....	6
Figura 3 LineScout Fuente: Hydro-Québec .....	7
Figura 4 Robugtix Z6 Fuente: Robugtix.....	7
Figura 5 Robot Swarm Fuente: Rolls-Royce .....	8
Figura 6 Coordinación de las extremidades y flexión de la espalda.....	9
Figura 7 a) Salamandra robótica II b) AmphiBot I.....	10
Figura 8 Vista interna de los módulos a) Cuerpo y b) Extremidades .....	10
Figura 9 Red CPG de Salamandra robótica II .....	11
Figura 10 Pleurobot.....	14
Figura 11 Robots biomiméticos (a) Pleurobot y ( b)Flappy .....	15
Figura 12 (a) Ondulación lateral (b) Locomoción concertina .....	17
Figura 13 Subsistemas en un sistema de control de lazo abierto .....	18
Figura 14 Subsistemas en un sistema de control de lazo cerrado .....	18
Figura 15 Diagrama de bloques de controlador PID .....	19
Figura 16 Diagrama de controlador basado en CPG para un robot de 3 DOF Fuente: [21].....	20
Figura 17 Motor de CD Fuente: Zuendo.....	21
Figura 18 Representación del circuito de un controlador Puente H .....	22
Figura 19 Micro motorreductor 100:1 Fuente: Pololu Robotics & Electronics.....	22
Figura 20 Servomotor Fuente: Tower Pro .....	23
Figura 21 Posicionamiento de un servomotor .....	23
Figura 22 Motor de pasos Fuente: National Instruments.....	24
Figura 23 Motor de pasos unipolar de 5 y 6 conexiones .....	24
Figura 24 Secuencia y polaridad aplicada sobre las bobinas A-A y B-B para realizar un progresión de giro paso a paso.....	25
Figura 25 Musculo de McKibben .....	25
Figura 26 Comparación de actuadores basado en proporción de peso y potencia de salida. ....	27
Figura 27 (a) Arduino Nano (b) Arduino Mega Fuente: Arduino Store.....	28
Figura 28 Estructura del código de programación Arduino.....	29
Figura 29 Microcontrolador PIC 16F877 Fuente: Microchip.....	30
Figura 30 Proceso de programación PIC .....	30
Figura 31 Raspberry Pi 3 A+ Fuente: Raspberry Pi .....	31
Figura 32 Escritorio de Raspbian en la Raspberry PI.....	32
Figura 33 Ejecución de Python en Raspbian .....	32
Figura 34 Plano CAD primer prototipo propuesto .....	35
Figura 35 Plano CAD segundo prototipo propuesto.....	36
Figura 36 Partes de los Módulos.....	37
Figura 37 Medidas del módulo en milímetros .....	37
Figura 38 Vista Isométrica del modulo central.....	38
Figura 39 Ensamble extremidad .....	38
Figura 40 Ensamble mecanismo de cámara.....	39

Figura 41 Partes de mecanismo para cámara .....	39
Figura 42 Dimensiones del robot completo en milímetros .....	40
Figura 43 Vista Isométrica del robot .....	40
Figura 44 Pieza impresa empleando la boquilla de titanio .....	41
Figura 45 Piezas de Nylon impresas correctamente .....	43
Figura 46 Medidas servomotor SG90 .....	44
Figura 47 Transceptor NRF24L01 Fuente: Electrotek Mega .....	45
Figura 48 Videocámara .....	45
Figura 49 Baterías LiPo .....	46
Figura 50 Distribución de servomotores .....	47
Figura 51 Sistema de energía del robot .....	48
Figura 52 Diagrama de conexión de Arduino y NRF24L01 .....	49
Figura 53 Reemplazo de cables de los servomotores .....	50
Figura 54 Adición de rosquillas para sujeción .....	50
Figura 55 Módulo ensamblado con extremidades .....	51
Figura 56 Vista interior del robot .....	51
Figura 57 Prototipos propuestos .....	52
Figura 58 Librería Servo en IDE Arduino .....	52
Figura 59 Declaración de servos a la librería .....	52
Figura 60 Nombramiento de pines de Arduino .....	53
Figura 61 Void setup del código .....	53
Figura 62 Void loop del código .....	53
Figura 63 Simulación del diseño mecánico del dispositivo .....	57
Figura 64 Prototipo realizado .....	57
Figura 65 Representación de desplazamiento del prototipo .....	58
Figura 66 Representación de puntos de oscilación en la estructura mecánica .....	58

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Tabla comparativa microcontroladores</i> .....	33
<b>Tabla 2</b> <i>Características del Nylon</i> .....	34
<b>Tabla 3</b> <i>Pines de conexión actuadores y microcontrolador</i> .....	48

## Resumen

La presente tesis describe el diseño mecánico y la activación de un robot para inspección de instalaciones eléctricas en zonas de difícil acceso inspirado en los movimientos de la salamandra.

El proyecto consiste en un diseño mecánico compuesto por módulos que nos permiten simular los movimientos de la espina dorsal y un sistema de control que permite efectuar el desplazamiento del prototipo.

Se desarrollaron dos propuestas de diseño mecánico, optando por la más viable y eficiente para cumplir los objetivos de esta tesis. El robot cuenta con cinco módulos, de los cuales cuatro generan los movimientos axiales en la espina dorsal del robot, y solo dos de ellos llevan instaladas las extremidades para efectuar el desplazamiento del dispositivo. El módulo restante, es el módulo central donde se instalaron los componentes de control y sistema de videocámara para realizar las tareas de inspección.

La activación del robot se realizó empleando componentes electrónicos de fácil adquisición y bajo coste, un microcontrolador Arduino Nano y Servomotores de dimensiones reducidas. Los resultados se establecen por un sistema de control básico, el objetivo es desplazar el robot de manera coordinada, con la opción de implementar un mando a distancia para ser teleoperado.

## **Abstract**

The present thesis describes the mechanical design and activation of a robot for inspecting electrical installations in areas of difficult access inspired by the movements of the salamander.

The project consists of a mechanical design composed of modules that allow us to simulate the movements of the spine and a control system that allows the displacement of the prototype.

Two proposals of mechanical design were developed, opting for the most viable and efficient to meet the objectives of this thesis. The robot has five modules, of which four generate the axial movements in the spine of the robot, and only two of them have the extremities installed to perform the displacement of the device. The remaining module is the central module where the control components and video camera system were installed to perform the inspection tasks.

The activation of the robot was carried out using electronic components of easy acquisition and low cost, a microcontroller Arduino Nano and servomotors of reduced dimensions. The results are established by a basic control system, the objective is to replace the robot in a coordinated manner, with the option of implementing a remote control to be teleoperated.

## **Introducción**

Actualmente la robótica móvil especialmente la robótica de servicio busca nuevas formas de ofrecer dispositivos capaces de realizar tareas de inspección, principalmente en tareas en las que el humano no es capaz de desarrollarlas. La naturaleza ofrece seres vivos que se desarrollan en diferentes entornos, bajo ciertas condiciones ambientales y que son capaces de adaptarse, es por ello que la ciencia estudia y analiza ciertas características para copiar e implementarlas en robots.

En la industria, en el sector de instalaciones eléctricas se presentan situaciones complejas para realizar inspecciones de condiciones físicas de los elementos propios de la instalación; son situaciones que presentan riesgo para el personal.

En el presente trabajo se describe el desarrollo del prototipo de un minirobot biomimético capaz de realizar tareas de inspección en espacios reducidos o de difícil acceso. El capítulo uno describe las generalidades, descripción del problema y la solución propuesta, en la que se indican cada uno de los objetivos con los que se deberá cumplir en el desarrollo del proyecto. Por su parte, el capítulo dos describe todos los conceptos necesarios para la elaboración del robot, también se hace mención de dispositivos existentes desarrollados para propósitos similares. En el capítulo tres se muestra el desarrollo de la fabricación del prototipo. Después, el capítulo 4 muestra los resultados obtenidos con el desarrollo de este prototipo, así como futuras modificaciones a las que estará sujeto.

## **Capítulo I**

### **Generalidades del proyecto**

#### **1.1 Descripción del problema**

La inspección y mantenimiento de instalaciones eléctricas industriales, de instituciones públicas y privadas, son tareas que en ocasiones representan un problema para el personal que debe realizarlas, se pueden presentar condiciones en las que no existe fácil acceso a los equipos o componentes a inspeccionar; o de otra forma representa un riesgo para su integridad física. Por tanto, debido a estos inconvenientes, se han empleado robots de servicio que en ocasiones no desarrollan de manera completa la labor de inspeccionar y sus altos costos los hacen inaccesibles y poco eficientes.

#### **1.2 Planteamiento del problema**

Actualmente se toma en cuenta a la naturaleza como medio de inspiración para desarrollar habilidades en nuevos dispositivos, ya sea copiar el aspecto físico de algún ser vivo o algún mecanismo que emplee para llevar a cabo una tarea.

En el ITSSAT se propone desarrollar un dispositivo que de manera autónoma sirva como apoyo al realizar tareas de inspección visualizando las condiciones de las instalaciones eléctricas en zonas de difícil acceso, de manera que pueda aplicarse en diferentes situaciones.

Con esta propuesta, surge un nuevo planteamiento, que es ¿Cómo diseñar un minirobot biomimético que permita desplazarse reproduciendo movimientos similares al de un ser vivo, que incluya un sistema de visión y transmisión para observar las instalaciones eléctricas de riesgo o difícil acceso?

### **1.3 Formulación de Hipótesis**

Las características del diseño mecánico y del sistema de activación electrónico permitirán el desplazamiento del robot biomimético para cumplir con tareas de inspección.

### **1.4 Objetivos**

#### **Objetivo General**

Aplicar un sistema de control para un prototipo de un minirobot biomimético que permita la inspección de instalaciones eléctricas en zonas de difícil acceso.

#### **Objetivos Específicos**

- Identificar las características que se requieren para realizar el control de un minirobot biomimético inspirado en una salamandra.
- Analizar los diferentes sistemas de control empleados para controlar robots bioinspirados en las salamandras.
- Determinar el sistema de control a emplear, que permita al minirobot desplazarse en diferentes direcciones.
- Diseñar el circuito eléctrico de control empleando el software multisim.
- Aplicar mando a distancia empleando un joystick, para operar el minirobot y el sistema de videocámara.

### **1.4 Justificación**

En las tareas relacionadas con inspección, medición e incluso monitoreo de instalaciones eléctricas, por lo general las personas encargadas de estas actividades recurren al contacto directo con los elementos sujetos a revisión: cables, ductos, alambres, cajas de registro, switch, etc. En ocasiones no es posible el acceso a los lugares donde se encuentran dichas instalaciones es

peligroso, motivo por el cual la inspección no se realiza y la verificación del estado de las instalaciones queda inconcluso.

Dado el desarrollo de un sistema mecánico de un minirobot bioinspirado en una salamandra cuyo objetivo es realizar la inspección de instalaciones eléctricas en zonas de difícil acceso, es necesario realizar la etapa de activación empleando un sistema de control que permita manipular el desplazamiento del robot, así como controlar el sistema de videocámara para poder manipular los movimientos de Paneo (movimiento en el eje x) y Tildeo (movimiento en el eje y), y que este sea operado con un mando a distancia.

Existen pocos estudios realizados acerca de la implementación de la locomoción bioinspirada en las salamandras, la cual se centra en la coordinación del movimiento de su espina dorsal y sus extremidades. Además, el prototipo desarrolla cierto grado de innovación al implementar un sistema de videocámara para realizar tareas de inspección. El enfoque de este prototipo es viable ya que se cuenta con los dispositivos electrónicos para realizar el sistema de control, que además son de fácil adquisición y bajo costo.

La operatividad del prototipo es segura y de fácil implementación, su uso no requiere conocimientos especiales para operar el dispositivo, se planteó un diseño de control de fácil entendimiento y con poca práctica se podrá operar de una manera adecuada al realizar tareas de inspección.

## Capítulo II

### Fundamentos teóricos

#### 2.1 Antecedentes históricos

La robótica industrial se clasifica por sus diversas áreas de aplicación, una de ellas es la robótica móvil en la que evolucionamos de una estructura mecánica anclada, a permitir el desplazamiento de dispositivos en distintos terrenos usando como medio de locomoción principalmente ruedas y patas.

Los robots de servicio ejecutan de manera autónoma labores de inspección en plantas de producción de grandes dimensiones o en zonas donde se arriesgan la integridad del personal y su acceso es complicado. Estos robots supervisan el estado en el que se encuentran las instalaciones mediante dispositivos de visión para identificar elementos deteriorados, algunos son capaces de medir diferentes parámetros empleando el uso de sensores.

Existen robots que ejecutan la tarea de inspección de tuberías, como el que se observa en la Figura 1; algunos cuentan con prestaciones de adaptación a los diferentes diámetros de tuberías, transmisión y captura de imágenes, incluso cuentan con la capacidad de sumergirse en agua, por ejemplo, el Robot de Inspección de Tuberías ROVVER, cuenta con un sistema diseñado para la inspección visual de redes de saneamiento, cuenta con cámaras oscilantes con zoom y una cámara



Figura 1 Robot de Inspección de Tuberías ROVVER Fuente: EnviroSight

de visión trasera, iluminación LED para ambientes de poca visibilidad, teniendo como única desventaja no ser un sistema autónomo, depende de un cable por el cual es operado y transmite la información obtenida.

También, para aplicaciones en tuberías que conducen gas, Micro Magnetic Cased Pipe Inspection Crawler cuenta con un sistema micro-magnético que se adhiere a las paredes internas de las tuberías, es operado de manera remota y tiene la capacidad de grabar para su posterior revisión, puede medir temperatura y humedad del espacio tubular. Su tamaño reducido le permite introducirse en espacios de 1 ¼”.



Figura 2 Micro-Magnetic Casing Crawler.  
Fuente: ULC Pipeline Robotics

Actualmente existe tecnología que permite la inspección de líneas de transmisión de alta tensión, un robot llamado LineScout permite inspeccionar y reparar líneas de transmisión sin necesidad de desconectarlas. A través de la incorporación de brazos puede manipular obstáculos y conductores, avanzar a lo largo de los cables sin afectar en la operación de las transmisiones eléctricas [1].

Un proyecto desarrollado en el año 2010, Diseño de un sistema de robot aéreo tipo helicóptero para su aplicación en la inspección de líneas eléctricas, presenta a un vehículo aéreo no tripulado, que navega de forma autónoma, captura imágenes y envía información de video en tiempo real

que permite el análisis del estado físico de diversos elementos, con el objetivo de determinar si se requiere mantenimiento de los mismos [2]. Véase Figura 3.



Figura 3 LineScout Fuente: Hydro-Québec

Por otra parte, para realizar inspección en instalaciones eléctricas industriales, edificios e incluso residenciales existen muy pocos dispositivos que realicen esa tarea, principalmente por el tamaño en el que son fabricados los robots industriales que están pensados principalmente para trabajar en entornos estructurados.

El Robugtix Z6, es un robot con forma de araña, tiene la particularidad de incorporar 6 patas que pueden contraerse y conforman su cuerpo, de esta manera puede cambiar de forma para adaptarse a ciertas situaciones. El Z6 se controla mediante un mando Joystick y un monitor integrado que permite grabar video y capturar imágenes gracias a las cámaras con las que se encuentra equipado. Sus dimensiones compactas son de 20 x 23 x 13.7 cm lo cual le permite operar en espacios reducidos.



Figura 4 Robugtix Z6 Fuente: Robugtix

Un dispositivo de última generación está siendo desarrollado por la empresa británica Rolls Royce, ver Figura 5; se trata de pequeños robots inteligentes con forma de cucaracha, su objetivo es emplearlos en los motores de aviones, incorporan una cámara pequeña que proporcionan video en tiempo real al operador, lo que permite realizar una inspección visual al motor sin tener que desmontarlo de la nave.

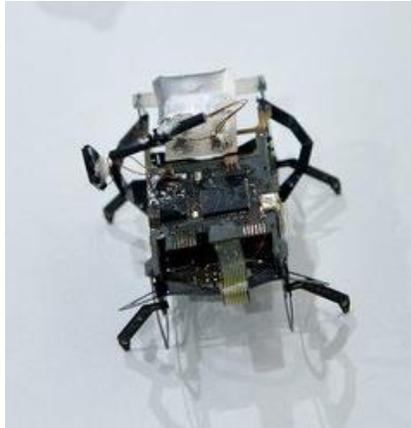


Figura 5 Robot Swarm Fuente: Rolls-Royce

Cabe mencionar que los dispositivos antes mencionados, son dispositivos que emplean tecnología de última generación para su fabricación por lo cual su costo se prevé sea elevado, ya que aun están en proceso de desarrollo.

## 2.2 Marco teórico

Actualmente, solo existen unos cuantos prototipos de robots Salamandra, es decir cuadrúpedos que se desarrollan con varios grados de libertad a través de su columna vertebral y que incorporan extremidades como apoyo para su desplazamiento en los terrenos donde interactúan.

En el trabajo denominado “Coordination of back bending and leg movements for quadrupedal locomotion” [3] se describe el modelo físico de un robot que cuenta con cuatro extremidades y cuenta con un solo grado de libertad en su espina dorsal.

Está basado principalmente en mecánica geométrica, analizando el comportamiento de las extremidades, es decir la secuencia de coordinación de flexión de la espalda con el movimiento de las piernas para obtener un giro en la cabeza y así aumentar el desplazamiento frontal. En la Figura 6 los puntos verdes identifican la cabeza y la línea azul representa la trayectoria del centro de masa. El robot fabricado en impresión 3d y servoaccionado, cuenta con cuatro patas con dos grados de libertad para controlar su posición vertical y el tamaño del paso. Una sola articulación en el medio del cuerpo controla la flexión horizontal.

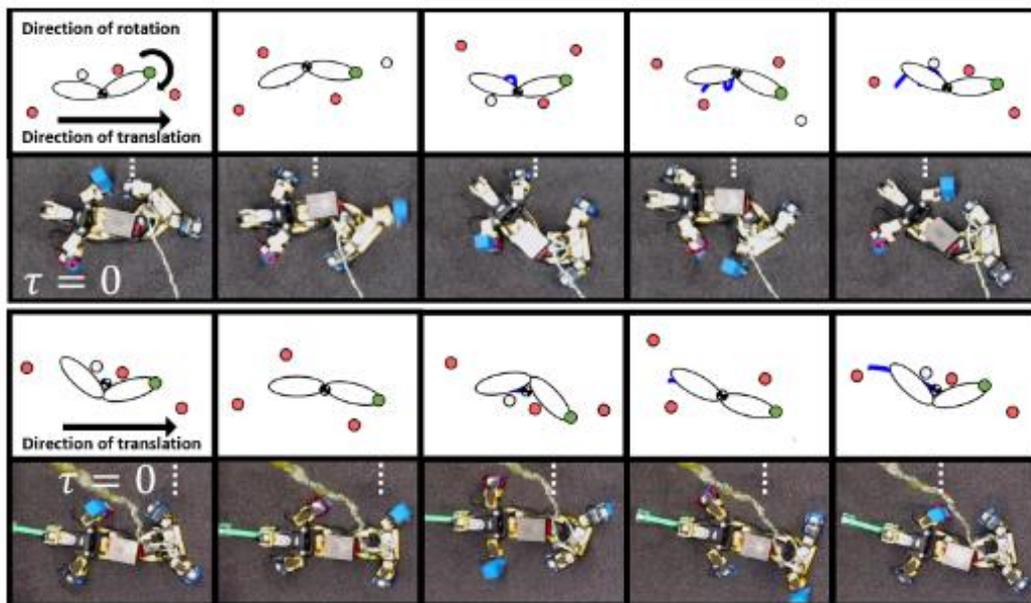


Figura 6 Coordinación de las extremidades y flexión de la espalda

### **Salamandra Robótica**

La salamandra robótica II: un anfibio capaz de caminar y nadar [4]. El robot tiene cuatro patas y una columna vertebral accionada que le permite realizar un movimiento de natación anguilliforme en el agua y caminar en el suelo. Este prototipo representa un nuevo diseño de hardware del robot denominado AmphiBot I [5].

Las consideraciones de diseño para salamandra robótica I y II, se centran en probar si un diseño tan simple, es decir, pocas características inspiradas en la locomoción de las salamandras, son capaces de replicar las características locomotoras del anfibio en un nivel adecuado.



Figura 7 a) Salamandra robótica II b) AmphiBot I

El robot está construido por una cadena de articulaciones que están diseñadas para realizar ondulaciones laterales respecto al plano horizontal, con cuatro patas giratorias que permiten crear puntos de contacto periódicos con empuje rotativo. El robot propone un grado de modularidad con varios elementos idénticos de dos tipos: elementos del cuerpo y elementos de las extremidades, ver Figura 8 cada elemento del cuerpo es completamente independiente, cada uno tiene su propia fuente de energía, motor controlador y caja de cambios, y son resistentes al agua. Cuentan con un grado de libertad y su carcasa está construida por tres piezas principales; un cuerpo y dos cubiertas principales, que se fijan al cuerpo magnéticamente usando cuatro pequeños imanes cada uno.

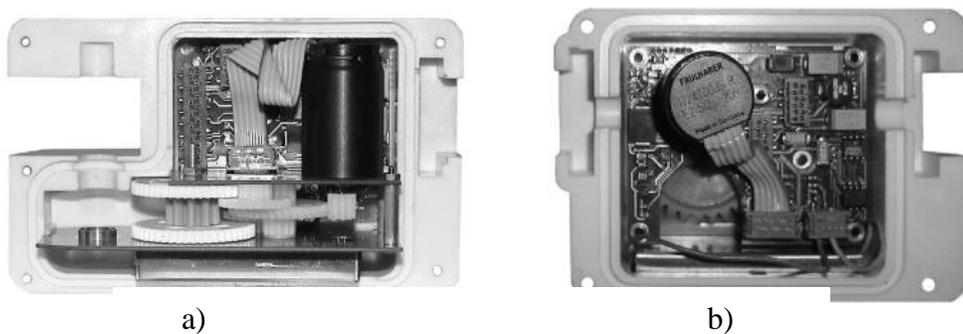


Figura 8 Vista interna de los módulos a) Cuerpo y b) Extremidades

El eje de salida se fija en una pieza de conexión realizada con poliuretano, que se puede atornillar al siguiente elemento, cada módulo cuenta con un conector de seis pines que permite realizar los arreglos de conexión en una serie de módulos más completa.

Es preciso mencionar que la salamandra robótica II, alcanza una velocidad de 0.42 m/s en las mejores condiciones de operación. En el interior de cada módulo está instalado un motor de corriente continua que ofrece un torque máximo de 0.0042 Nm junto con una caja de engranajes. Los elementos de las extremidades están inspirados en el diseño de una salamandra real se emplean los mismos motores de corriente continua usados en los módulos del cuerpo.

El movimiento de natación de las salamandras emplea ondulaciones axiales que se propagan como ondas viajeras de la cabeza a la cola. La salamandra robótica II es impulsada por un generador de patrones centrales implementando una red de osciladores no lineales.

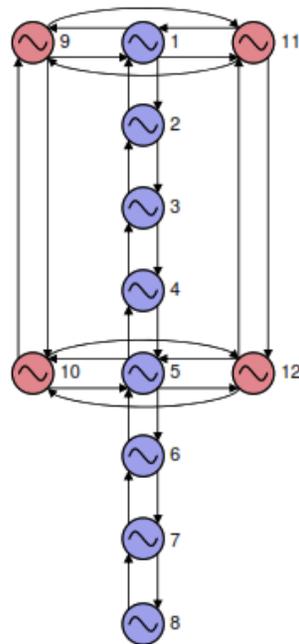


Figura 9 Red CPG de Salamandra robótica II

La columna vertebral se interpreta como una cadena única de osciladores con acoplamientos bilaterales, se emplea un oscilador para cada miembro. Los osciladores para las extremidades están conectados al oscilador correspondiente de la columna vertebral. El primer oscilador es el encargado de impulsar la cabeza, los osciladores 2-5 impulsan el tronco, 6 – 8 la cola y 9-12 las extremidades del robot, como se puede observar en la Figura 9.

Los componentes electrónicos para los módulos de la espina dorsal como de los que incorporan las extremidades, se componen de una placa controladora para cada motor con controladores PD, un microcontrolador PIC16 de 8 bits impulsa los puentes H. En el módulo que representa la cabeza de la salamandra se incorporó una placa de control, basada en un microcontrolador LPC2129 ARM7TDMI con una velocidad de 60 MHz en el cual esta implementado la red CPG descrita anteriormente. El procesador se comunica usando una línea serial con un microcontrolador de 8 bits para controlar un transceptor de radio nRF905, el microcontrolador ARM permite ser reprogramado a través del enlace de radio frecuencia.

Las placas de control de cada módulo están alimentadas por baterías recargables de iones de litio de 600 mAh, las cuales requieren de aproximadamente una hora para realizar el proceso de carga cuando las baterías se encuentran vacías.

### **Pleurobot**

Una salamandra que imita de cerca a su homólogo biológico, *Pleurodeles waltl* [6]. Propone un diseño que combina cineradiografía de alta velocidad, escalado dinámico, impresión tridimensional y servomotores de alta gama.

Pleurobot es un robot salamandra escalonado dinámicamente con 29 grados de libertad. Su morfología está compuesta por un cuerpo alargado (tronco y cola) y cuatro extremidades ubicada en la cintura pectoral y pélvica.

El comportamiento del robot se define de sus extremidades segmentadas que realizan funciones de girar y remar, para esto se emplearon servomotores de dimensiones considerables que terminaron por definir el tamaño del robot. El diseño mecánico del robot está determinado por dos factores:

1. El número de articulaciones relevantes para la locomoción.
2. La colocación de cada articulación a lo largo de cuerpo del robot.

Se usaron grabaciones cineradiográficas y reconstrucción tridimensional cinemática para analizar la locomoción recta y en estado estacionario del animal. Con esto se determinó analizar la columna vertebral, extremidades anteriores y posteriores como cadenas cinemáticas independientes.

La Figura 10 muestra los 27 DOF motorizados indicados con ejes azules, mientras que los ejes verdes representan 2 DOF pasivos. En (b) se observa las dimensiones de la segmentación de la columna vertebral junto con las extremidades. (c) Representa el diseño del robot, comprendido en piezas impresas tridimensionalmente, los 27 servomotores, pies de silicona y una cola flexible empleados para su fabricación. Por otra parte (d) muestra un tejido de nylon laminado con un 1mm de poliuretano que permite operar en ambientes terrestres y acuáticos.

El hardware empleado para la actuación del robot fueron servomotores Dynamixel MX- 64R que ofrecen 7.3 Nm de par de torque con una velocidad máxima sin carga de 78 rpm y una precisión posicional con una resolución de 0.888°. El hardware de control está basado en una computadora con un procesador Intel Atom de 1.6 GHz utilizando un protocolo de comunicación a través de un bus RS-485 a 1 Mbps. La estructura mecánica del robot se fabricó empleando tres variaciones de Poliamida 12 (plástico); la cabeza está fabricada de poliamida natural, los segmentos espinales están hechos de poliamida relleno de cristal, por su parte los segmentos de las extremidades están hechos con poliamida relleno de aluminio, estos dos últimos denominados metamateriales, es decir, materiales compuestos que ofrecen mayor fuerza y densidad que el agua, lo cual es importante que se pueda sumergir lo suficiente. Los pies con forma de bola están manufacturados en caucho de silicona.

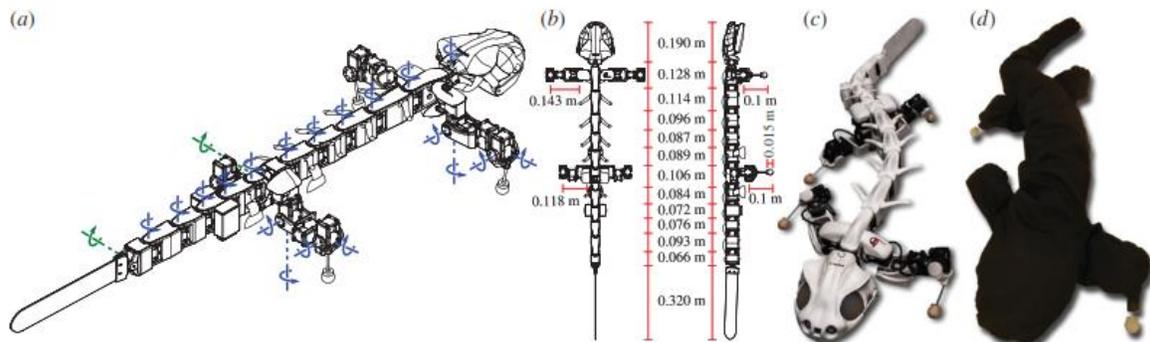


Figura 10 Pleurobot

## 2.3 Marco conceptual

### Biomimética

Hoy en día la innovación exige nuevos procesos creativos y métodos alternativos en el diseño industrial. La naturaleza ha desarrollado funciones y soluciones que sirven como modelo a seguir para los avances tecnológicos [7]. Actualmente los seres humanos generan réplicas de funcionamiento, estructuras y procesos basados en seres y mecanismos biológicos que desarrollan

tareas de manera muy eficaz y eficiente. Imitar estos mecanismos nos permiten extraer soluciones de problemas en diferentes ámbitos industriales desarrollando productos innovadores para obtener más cantidad de recursos o desarrollar actividades de manera más segura.

La biomimética, es un método por el cual se estudian seres vivos con el fin de determinar las soluciones que ofrecen en ámbitos y condiciones complejas. Una característica clave de los animales es su habilidad para moverse, ofrecen flexibilidad, complejidad y adaptación a diferentes medios.



(a)



(b)

Figura 11 Robots biomiméticos (a) Pleurobot y (b) Flappy

La Figura 11 (a) muestra a Pleurobot desarrollado con el propósito de recrear los movimientos reales de una salamandra estudiando los movimientos con rayos X, se comprobó cómo se desplazan los distintos huesos del animal para lograrlos movimientos deseados. En la Figura 11 (b) se observa un robot denominado Flappy que cuenta con facultades de vuelo reales a las de un colibrí lo cual lo convierte en idóneo para moverse en espacios reducidos, es un candidato perfecto para robot de búsqueda y rescate.

### **Locomoción Biológica**

Los robots que emplean ruedas como medio de locomoción son usados debido a que ofrecen velocidad y capacidad de desplazarse, pero solo lo logran en terrenos regulares.

Existen robots capaces de inspeccionar con diferentes sistemas de locomoción inspirados en algún ser biológico. Los hexápodos, robots capaces de operar en terrenos irregulares, ofrecen una estabilidad única y su maniobrabilidad dependerá de los DOF con los cuales sean diseñados en cada extremidad.

Los robots apodos son aquellos que no poseen extremidades, principalmente su locomoción es una técnica de desplazamiento por deslizamiento o arrastre sobre la superficie, en la que la fuerza de propulsión se desarrolla por los movimientos o cambios de formas generado en por su cuerpo. Debido a esto, la interacción entre el cuerpo del animal y la superficie sobre la cual se mueve es de gran importancia, por tanto, esa parte del cuerpo que entra en contacto con el terreno debe tener características especiales que le faciliten el desplazamiento.

Dentro de la clasificación de los robots apodos, se destacan aquellos robots de múltiples segmentos cuya propulsión se produce por las ondulaciones que se generan en su cuerpo. Emplean articulaciones simples, es decir con un solo grado de libertad, lo que facilita su implementación y control. La articulación de estos robots debe ser activa, en su mayoría se emplean accionamientos eléctricos, los motores eléctricos son los más utilizados, sin embargo, en algunos diseños emplean materiales con memoria de forma, SMA (Shape Memory Alloy), accionamientos neumáticos o hidráulicos.

En la mayoría de los robots ápodos, se desarrolla una tendencia de robótica modular con esta se propone desarrollar robots formados a partir de módulos con la capacidad para ensamblarse unos con respecto a otros. De esta manera los robots podrían cambiar su forma adoptando diferentes configuraciones y modos de caminar con respecto al terreno en el que se requieran desplazar.

La mayoría de los patrones de movimientos implementados para los robots serpientes están inspirados en la locomoción de las serpientes, sin embargo, las orugas y salamandras también se usan como inspiración, estas últimas empleando extremidades pequeñas para facilitar su desplazamiento en entornos terrestres.

La ondulación lateral es un movimiento continuo de todo el cuerpo de la serpiente en relación con el suelo. La locomoción es obtenida mediante la propagación de olas desde el frente hacia la parte trasera de la serpiente como se muestra en la Figura 12 (a) [8]. Las salamandras emplean este tipo de desplazamiento cuando nadan, a este tipo de natación se le llama natación anguilliforme [9].

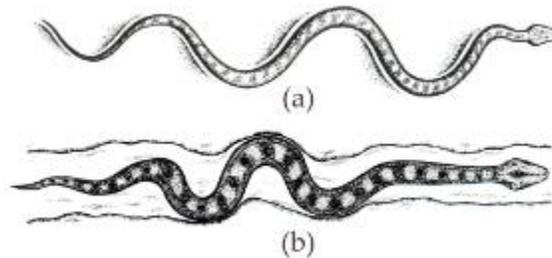


Figura 12 (a) Ondulación lateral (b) Locomoción concertina

La locomoción en modo concertina Figura 12 (b), se genera del cuerpo de la serpiente empujándose contra una superficie formando un pequeño número de ondas; moviendo estas ondas y los puntos de contactos la serpiente se desplaza. Esta locomoción se emplea cuando la serpiente se mueve por estrechos pasajes como tuberías o cuando los coeficientes de fricción del piso no permiten la ondulación lateral. [9]

## Sistemas de control

Un sistema es un conjunto de componentes que interactúan, en el que lo que realmente interesa es la relación entre las entradas y salidas. Un sistema de control es aquel en el que la salida del sistema se controla para tener un valor específico o cambiarlo, según lo determina el sistema. [10]

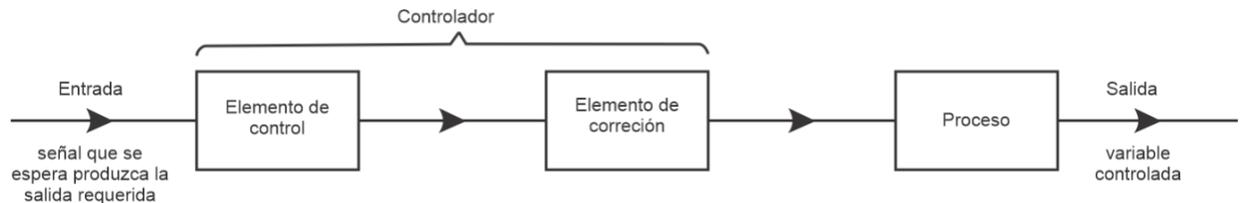


Figura 13 Subsistemas en un sistema de control de lazo abierto

Existen dos formas básicas de los sistemas de control, lazo abierto y lazo cerrado. Un sistema de lazo abierto la entrada se define con base en la experiencia que se tiene en dichos sistemas para producir el valor de salida requerido. En los sistemas de control de lazo cerrado se tiene una señal de realimentación de la salida hacia la entrada, el cual se utiliza para modificar la entrada de modo que la salida se mantenga constante a pesar de los cambios en las condiciones de operación.

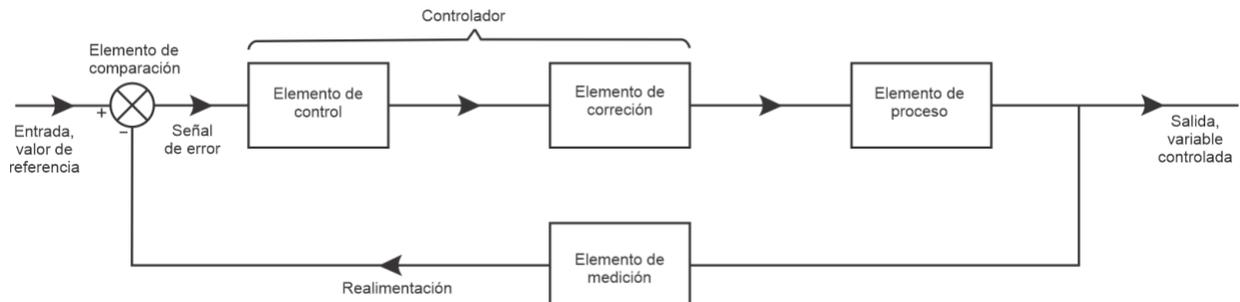


Figura 14 Subsistemas en un sistema de control de lazo cerrado

La relación entre la salida y la entrada al controlador se denomina ley de control. Existen tres formas de dicha ley: proporcional, integral y derivativo. Algunos sistemas requieren de efectuar tareas complejas lo cual exige un mejor desempeño del controlador, para obtener este desempeño se añaden elementos adicionales que se denominan compensadores, a esta alteración en el desempeño del controlador se denomina compensación.

La acción de control proporcional, es el controlador más simple en su funcionamiento, este reacciona proporcionalmente al error determinada por la ecuación 1;

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

$K_p$  es la ganancia proporcional. El control proporcional se considera un amplificador con una ganancia ajustable, tienen la ventaja de solo emplear un parámetro de ajuste, su desventaja es operar con una desviación.

En la acción de control integral delimitada por la ecuación 2 la salida del control se cambia a una razón proporcional a la señal de error, la mayoría de los procesos no puede operar con desviación, esta acción logra que el sistema funciones en el punto de control. El control integral logra eliminar la desviación integrando el error constantemente, por lo tanto, en un determinado momento el error será cero y la integral será una constante.

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad (2)$$

La acción de control derivativa logra anticipar la dirección del proceso, monitorea el cambio en la rapidez del error, es decir su derivada. La ecuación 3 define el controlador con las tres acciones combinadas:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

$K_p$  es la ganancia proporcional  $T_i$  es el tiempo integral y  $T_d$  es el tiempo derivativo. En la Figura 15 se observa el diagrama de bloques de un controlador PID.

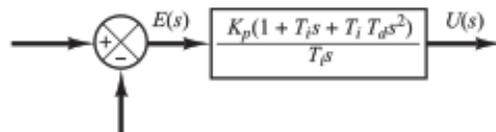


Figura 15 Diagrama de bloques de controlador PID

## Generadores Centrales de Patrones (CPGs)

Los Generadores Centrales de Patrones (CPGs) son redes neuronales cuyas células producen un patrón de actividad rítmico de una forma robusta y flexible. Este ritmo consiste en una secuencia de activación o disparo característica de cada una de las células que lo forman. Estas neuronas presentan un comportamiento que se caracteriza por la generación de ráfagas de potenciales de acción. El patrón rítmico generado sirve para controlar y coordinar actividades motoras repetitivas. Los CPGs son sistemas muy especializados que frecuentemente tienen elementos redundantes que les permiten actuar correctamente bajo muy diversas circunstancias. Son sistemas multifuncionales que pueden generar diferentes ritmos en función de su entrada sensorial y/o moduladora.

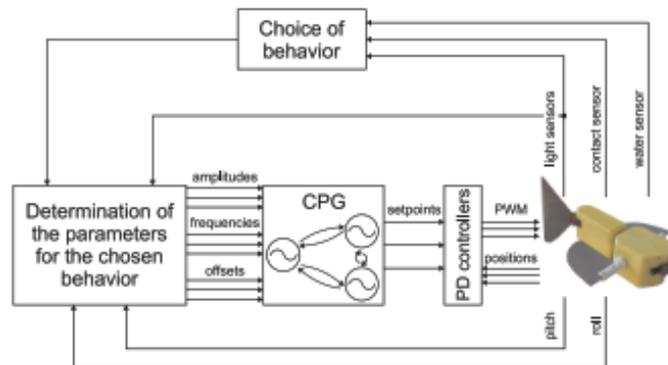


Figura 16 Diagrama de controlador basado en CPG para un robot de 3 DOF Fuente: [21]

Los controladores basados en Generadores de Patrones Centrales pueden ser muy robustos contra los escenarios que se presenten en un entorno real, la toma de decisiones en tiempo real es crucial para este tipo de interacciones, lo que conlleva a la realización de simulaciones detalladas biológicamente. Existen modelos simplificados desarrollados para facilitar su implementación en el mundo real y cumplir con las estrictas condiciones que se requieren.

## **Actuadores para Locomoción Biológica**

Se conoce como músculos artificiales a cualquier mecanismo o combinación de ellos que sea capaz de reproducir el comportamiento de los músculos, es decir cualquier elemento capaz de generar un movimiento en el sistema al que este acoplado a partir de la conversión de uno o varios tipos de energía en energía mecánica lineal o rotacional [11].

El objetivo de un músculo artificial es controlar posiciones, movimientos, aceleraciones o fuerzas aplicadas. Existe diversos tipos de actuadores para emular el comportamiento de los músculos, se clasifican de acuerdo a diferentes parámetros.

### **Actuadores Eléctricos**

Un motor eléctrico es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Son el tipo de actuadores más usado por su versatilidad y facilidad de control. Este tipo de actuadores se clasifican de la siguiente manera.

#### *Motor de corriente directa:*

Es una máquina capaz de transformar energía eléctrica, suministrada en forma de corriente continua, en energía mecánica. Su uso es en casos donde se requiere regular continuamente la velocidad del eje, su torque dependerá del tamaño del motor y el voltaje al que opere. Es el tipo de motor más utilizado por su versatilidad, es posible encontrarlos en robots industriales hasta micro-robots.



Figura 17 Motor de CD  
Fuente: Zuendo

A diferencia de los motores paso a paso y los servomecanismos, los motores DC no pueden posicionarse en una posición definida, estos simplemente giran a la velocidad y en el sentido en el que la alimentación les permite.

En robótica el control de estos motores se realiza mediante circuitos Drivers Puente H. El termino Puente H se deriva de la representación gráfica típica del circuito observado en la Figura 18 implementando interruptores mecánicos o de estado sólido.

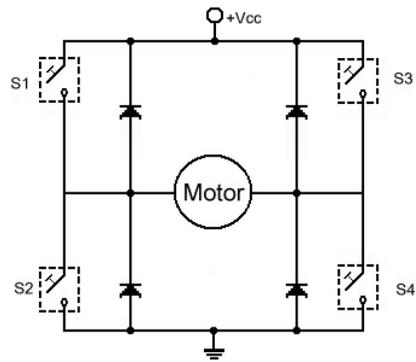


Figura 18 Representación del circuito de un controlador Puente H

*Motorreductor:*

Un motorreductor es una combinación de un motor eléctrico que se acopla directamente a un engranaje que se encarga de que el eje de accionamiento gire en a una velocidad inferior generando así un torque mayor. Los motores y engranajes se acoplan en una misma unidad, esto reduce el tamaño y peso del dispositivo, como se observa en la Figura 19. En la robótica actual se emplean para generar movimientos de manera más eficiente, estable y segura.



Figura 19 Micro motorreductor 100:1  
Fuente: Pololu Robotics & Electronics

### Servomotores:

El servomotor tiene la capacidad de posicionarse en cualquier lugar dentro de su rango de operación por lo regular  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$ , internamente tiene un motor de corriente directa conectado a una caja reductora y a un circuito de control de posición, son ideales para aplicaciones de robótica. El control del servomotor se hace en lazo cerrado, por lo que se obtiene un control de posición muy preciso, además ofrece un alto par de torsión. En la Figura 20 se observa el aspecto físico de este actuador.



Figura 20 Servomotor  
Fuente: Tower Pro

Para controlar un servomotor se requiere la aplicación de un pulso con duración y frecuencia específica. Los servomotores disponen de tres cables, dos para alimentación Vcc y GND que operan de 4 a 6 v y un tercer cable para aplicar los pulsos, que hace que el circuito de control interno coloque al servo en la posición indicada. En la Figura 21 se observan los posicionamientos del eje del servo, obteniendo  $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  y  $180^{\circ}$  con anchos de pulso de 0.5, 1.5 y 2.5 ms respectivamente.

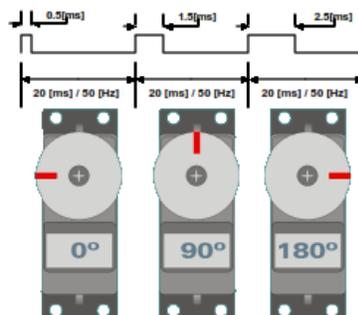


Figura 21 Posicionamiento de un servomotor

### *Motores de pasos:*

Son motores electromagnéticos, rotativos e incrementales que convierten pulsos digitales en rotación mecánica, la rotación es directamente proporcional al número pulsos y la velocidad de rotación es relativa a la frecuencia de dichos pulsos. En muchas aplicaciones se puede obtener información sobre su posición, con tan solo llevar una cuenta de los pulsos que se mandan al motor paso a paso, no necesitando sensores de posición ni control por retroalimentación; haciendo más simple su instalación. La Figura 22 muestra un motor de pasos Nema 34.



Figura 22 Motor de pasos Fuente:  
National Instruments

Los motores de pasos pueden ser unipolares o bipolares. Los unipolares llamados así porque, en su interior tiene un doble arrollamiento en sus bobinas, por lo tanto, no es necesario invertir la polaridad de la alimentación. Estos motores suelen tener conectores de 6 o 5 pines o hilos de conexión, en la Figura 23 (a) se muestra un motor con 5 hilos o pines lo cual representa que cada bobina tiene una toma central, la Figura 24 (b) representa un motor de 6 hilos o pines de conexión, las bobinas A y B están conectadas entre ellas en su interior, por una sola toma central.

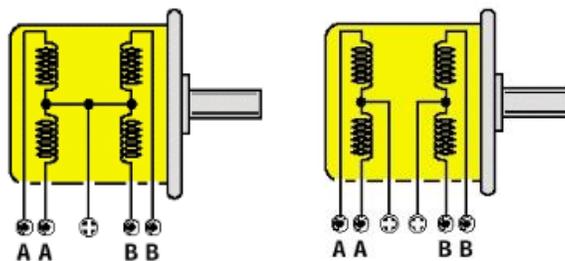


Figura 23 Motor de pasos unipolar de 5 y 6 conexiones

Los motores bipolares se componen de 2 bobinas, para efectuar el giro se debe cambiar el sentido en función de la tensión suministrada, es decir, en los extremos de una misma bobina se pueden tener distintas polaridades. Estos motores se reconocen porque solo cuenta con 4 hilos de conexión. Ver Figura 24.

### Actuadores Neumáticos

Los actuadores neumáticos utilizan energía a presión de un fluido aire. La expansión del aire hace que un pistón se mueva en la dirección deseada. Se caracterizan por ser silenciosos y rápidos en comparación con los hidráulicos, su sensibilidad a fugas es menor debido a que operan a presiones menores y su capacidad de carga es limitada. Su uso es en aplicaciones industriales, procesos de control, embalaje, etc.

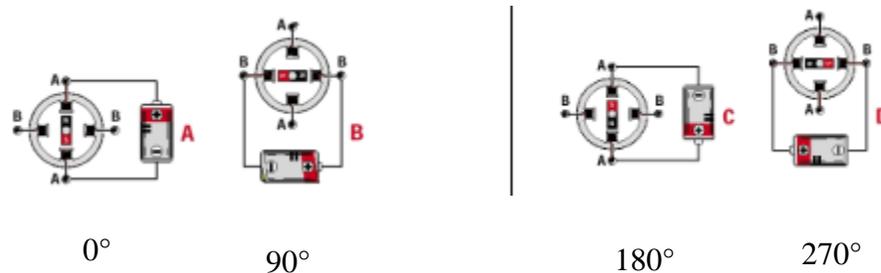


Figura 24 Secuencia y polaridad aplicada sobre las bobinas A-A y B-B para realizar un progresión de giro paso a paso

### Musculo de McKibben

El musculo artificial neumático mostrado en la Figura 25 tiene la capacidad de contraerse y expandirse de manera similar a la de un musculo natural, al aumentar la presión el musculo se expande y contrae, y al liberar el aire el musculo vuelve a su posición original mimetizando al musculo del ser humano [12].



Figura 25 Musculo de McKibben

### **Actuadores Hidráulicos**

Los actuadores hidráulicos convierten la energía brindada por fluidos a líquido a presión en energía mecánica ya sea por rotación o movimiento lineal, se considera una de las técnicas más antiguas de movimiento controlado. Su aplicación se da cuando se requieren fuerzas altas y a velocidades moderadas. Una ventaja de estos actuadores es mantener la posición sin necesidad de incrementar el consumo de energía. Su desventaja es la dificultad que presentan a la hora de determinar su posición, se requieren dispositivos adicionales para su funcionamiento, por esto su aplicación se da en robots industriales no móviles, y su uso en robots bio-inspirados no es muy común.

### **Actuadores Piezoeléctricos**

El efecto piezoeléctrico es una modificación de la polarización de un material dieléctrico cuando es sometido a una tensión mecánica o presión dinámica, este efecto es reversible, es decir cuando se aplica un campo eléctrico el material presenta una deformación mecánica. Una de las ventajas de este tipo de actuadores es la precisión de su movimiento, genera altas fuerzas con un bajo consumo de energía, adicionalmente tienen una velocidad de respuesta muy alta y no son sensibles a la interferencia electromagnética.

### **Actuadores de Aleación con Memoria de Forma (SMA: Shape Memory Alloy)**

Los cables musculares o fibras de nitinol presentan una alternativa a los actuadores convencionales, con una fuerza de actuación muy alta, equivalente a la de los actuadores hidráulicos proporcionales a su peso, además de su acción silenciosa.

La Figura 26 muestra claramente que los actuadores basados en materiales inteligentes pueden reducir el tamaño dos o tres veces su magnitud mientras mantienen la misma relación de salida.

[13]

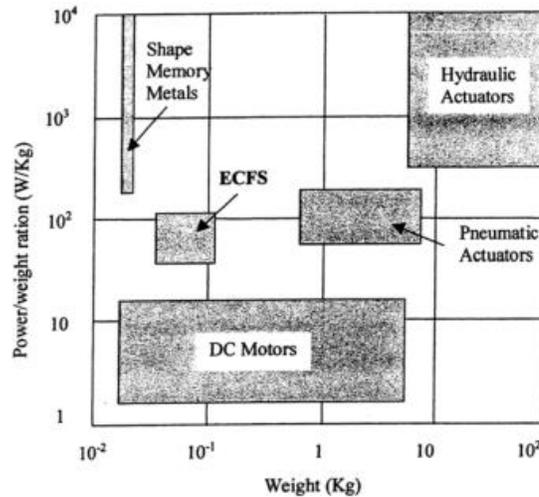


Figura 26 Comparación de actuadores basado en proporción de peso y potencia de salida.

Los cables musculares son SMA de nitinol. Esta aleación es una composición de níquel y titanio en proporciones equiatómicas. Cuando la aleación de memoria de forma está por debajo de la temperatura de transición, puede ser estirada y deformada con facilidad, después de que la aleación ha sido deformada, si se calienta ya sea por una corriente eléctrica o una fuente de calor, la aleación recupera su forma predeterminada y deshace su deformación previa. [14]

Las fibras de nitinol presentan debilidades una de ellas es que requieren sistemas de control complejos para lograr movimientos controlados, por otro lado, su eficiencia de uso energético es mínima.

## Activación de Sistemas de Locomoción

### Microcontroladores

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea determinada. Un sistema con

microcontrolador debe disponer de una memoria donde se almacena el programa que gobierna el funcionamiento del mismo, una vez programado y configurado, solo se desempeña realizando la tarea asignada. La utilización de microcontroladores reduce el tamaño y número de componentes, solo por mencionar algunas de sus ventajas de aplicación.

### *Arduino*

Arduino es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto, basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Arduino puede percibir el entorno mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores y puede afectar a su alrededor mediante el control de luces, motores y otros artefactos.

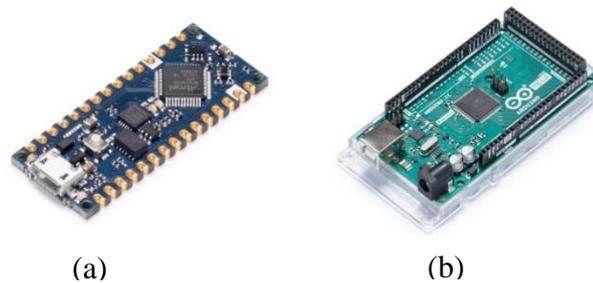


Figura 27 (a) Arduino Nano (b) Arduino Mega Fuente: Arduino Store

El microcontrolador de la placa se programa usando el Arduino Programming Language que está basado en Wiring y el Arduino Development Environment basado en Processing. Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos o se pueden comunicar con software en ejecución en un ordenador por ejemplo con Flash, Processing, MaxMSP, etc.

La estructura básica del lenguaje de programación de Arduino es simple, se divide en tres partes: estructura, valores (variables y constantes), y funciones.

El código se desarrolla en el IDE de Arduino y se debe estructurar como la Figura 28 que se observa a continuación:



Figura 28 Estructura del código de programación Arduino

En la sección “Declaraciones Globales”, deben incluir las bibliotecas que se emplearán y definir las variables. Este bloque se ejecuta una sola vez.

La función “setup ( )” se emplea para configurar el hardware que se utilizará, es decir se configuran los pines físicos de la tarjeta Arduino.

La función “loop ( )” como su nombre lo indica se ejecuta de forma cíclica, en esta se describen todas las instrucciones que ejecutan las acciones de control definidas por el usuario.

### *PIC*

Los microcontroladores PIC (Peripheral Interface Controller) de la empresa Microchip poseen buenas características, bajo precio, pequeño tamaño, flexibilidad, bajo consumo, etc. los convierten en microcontroladora fáciles y rápidos de utilizar. Existe una gran variedad de herramientas hardware que permiten grabar, depurar, borrar y comprobar el funcionamiento de los PIC.

Los microcontroladores PIC cuentan con una arquitectura que sigue el modelo Harvard. En esta arquitectura, la CPU se conecta de forma independiente y con buses diferentes a los empleados por la memoria de instrucciones y memoria de datos. Con esta arquitectura el CPU permite acceder simultáneamente a las dos memorias. Existen abundantes softwares programadores, simuladores, los emuladores en tiempo real, Ensambladores, Compiladores C, intérpretes y compiladores Basic.



Figura 29 Microcontrolador PIC 16F877 Fuente: Microchip

Microchip cuenta con herramientas para ensamblar y simular los programas en ensamblador. MPLAB es un editor IDE permite, configurar, desarrollar, depurar y calificar diseños integrados

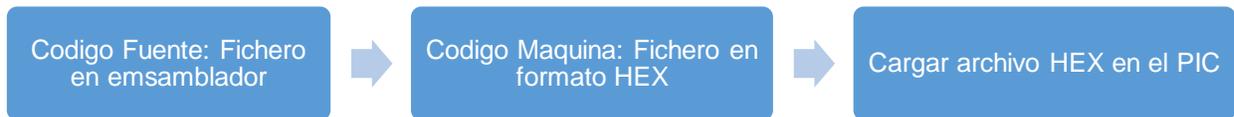


Figura 30 Proceso de programación PIC para microcontroladores Microchip. Su funcionamiento es simple, como se describe en la Figura 30.

### *Raspberry PI*

Raspberry PI es una placa de ordenador desarrollada en el Reino Unido por la fundación Raspberry PI. La idea del proyecto se concibió en 2006 como una solución orientada a entornos educativos para estimular la enseñanza de ciencias de la computación en las escuelas.

Es una computadora pequeña de placa única desarrollada originalmente con el propósito de enseñar informática. Emplea un sistema de chip (SoC) y se caracteriza por un factor de forma pequeño, baja potencia, no mucha RAM, entradas y salidas limitadas, y almacenamiento en disco proporcionado por una tarjeta SD o por almacenamiento externo utilizando un puerto USB.

Cuenta con una variedad de modelos comenzando por la Raspberry Pi 1 lanzada en el año 2012 al modelo Raspberry Pi 3 B lanzado en 2016, estas últimas cuentan con puerto HDMI y audio analógico.



Figura 31 Raspberry Pi 3 A+ Fuente: Raspberry Pi

La Fundación Raspberry Pi distribuye una herramienta de software conocida como NOOBS (New Out-Of-Box Software), esta herramienta ofrece una selección de sistemas operativos y herramientas que permiten modificar su configuración. Algunas placas Raspberry PI incluyen las tarjetas SD, si no es así se pueden descargar manualmente siguiendo los pasos descritos en [15].

La mayoría de las distribuciones Linux ofrecen interfaces gráficas de usuarios (GUI) que brindan una forma más simple de realizar tareas. Linux es un proyecto de código abierto que pueden encontrarse en diferentes distribuciones.

Raspbian es la variante más popular de la distribución Debian Linux. Debian cuenta con alta compatibilidad y un rendimiento excelente incluso con hardware modesto. Raspbian cuenta con software preinstalados bases para empezar a realizar tareas. El software que proporciona Raspbian se divide en categorías temáticas. La Figura 28 muestra el escritorio LXDE en la distribución Raspbian de la Raspberry PI.

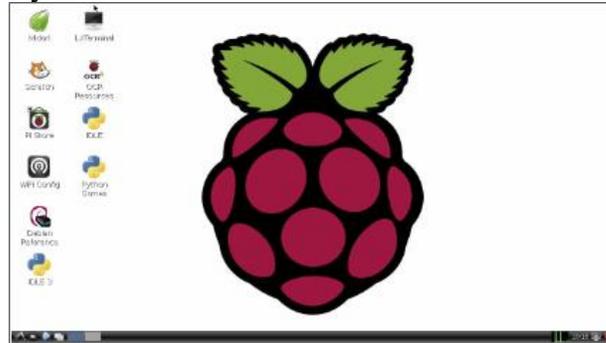


Figura 32 Escritorio de Raspbian en la Raspberry PI

La Raspberry PI tienen un puerto que cuenta con 26 pines configurables como entradas o salidas de propósito general (GPIO), estos puertos permiten comunicarse con otro componentes y circuitos para que este funcione como un controlador.

Un lenguaje de programación completo y fácil de utilizar es Python, sin embargo, no siempre es capaz de realizar funciones como operar en tiempo real determinista. En algunas aplicaciones de control para robótica compleja se recomienda un lenguaje de bajo nivel como C++ o ensamblador que se ejecuta en tiempo real dedicado del microcontrolador. La Figura 29 muestra el proceso para crear un proyecto en lenguaje de programación Python.



Figura 33 Ejecución de Python en Raspbian

En conclusión, existen microcontroladores que ofrecen distintas herramientas para la implementación en sistemas robóticos, todos ellos con características destacables en ciertas aplicaciones las cuales determinarán su uso. La Tabla 1 muestra las características de cada uno de los microcontroladores descritos anteriormente, eligiendo un modelo en particular de cada tipo.

**Tabla 1** *Tabla comparativa microcontroladores*

	Arduino Nano	Pic 16F84A	Raspberry PI 3
Voltaje de operación	5v	2 a 5.5 v	5v
Dimensiones	45 x 18 mm	8 x 20 mm	65 x 56 mm
Peso	7 gr		50 gr
Velocidad	16 MHz	20 MHz	700 MHz
Memoria Flash	32 Kb	3.5 Kb	Tarjeta SD 2 a 16 gb
Memoria RAM	0.002 Mb	0.000224 Mb	512 Mb
Sistema operativo	Ninguno	Ninguno	Linux
Entorno de desarrollo (IDE)	Arduino	MPLAB	IDLE
Costo en pesos mexicanos	\$250.00	\$100.00	\$485.00
Otras características	Solo requiere una fuente de alimentación para funcionar de manera autónoma con un código en C preprogramado.	Se requiere diseñar un circuito electrónico para su protección y correcto funcionamiento en la aplicación deseada.	Ofrece herramientas de un ordenador, algunas herramientas necesarias pueden elevar el costo al emplear el dispositivo.

### Impresión 3d

La impresión 3d es una nueva opción en métodos de fabricación debido a un procedimiento para la realización de prototipos más rápido y económico, logrando ser eficientes en el uso de material obteniendo resultados con gran calidad y precisión.

Existen diversos materiales que pueden ser empleados para impresión de prototipos, algunos con características particulares de color, propiedades mecánicas y propiedades eléctricas; el uso de cada uno de ellos dependerá de las necesidades que requiera el prototipo a realizar.

## *Filamento Nylon*

Para este trabajo se selecciona el Nylon como material de impresión de las piezas que comprenden los módulos. El nylon es un material muy resistente, duradero al desgaste y abrasión, que ofrece flexibilidad, una propiedad importante es su anti adherencia. Se emplea generalmente para la elaboración de engranes y piezas mecánicas [16]. A continuación, se muestra una tabla con los parámetros que se requieren para realizar una impresión en modelado por deposición fundida (FDM), así como los ventajas y desventajas que nos ofrece el uso de este material. En el Anexo A se muestra los parámetros físicos del Nylon.

**Tabla 2** *Características del Nylon*

<b>Parámetros de configuración para la impresora.</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Temperatura de Extrusor: 220 °C a 270 °C	Resistente a la fatiga Resistente al calor	Higroscópico.
Temperatura de Cama: 75 °C a 90 °C.	Resistencia al impacto Flexible en paredes delgadas Mínima deformación	

## Capítulo III

### Metodología

Usando la salamandra como modelo biológico es importante definir parámetros fundamentales relacionado con la locomoción generada en la columna vertebral del animal, es decir, el mecanismo y control necesario para la coordinación de las extremidades y sus movimientos axiales.

#### 3.1 Diseño Mecánico

El diseño propuesto en la Figura 34, tiene como referencia el prototipo que se define por lo realizado en el proyecto de la salamandra robótica II [4]. La espina dorsal fue diseñada empleando cinco módulos, cantidad mínima que a consideración se propone para poder simular el mecanismo de locomoción de una salamandra real. Cuatro módulos estarán equipados con un solo grado de libertad, en el módulo restante se instalará el sistema de control y el sistema de video, completando el propósito del dispositivo a diseñar.

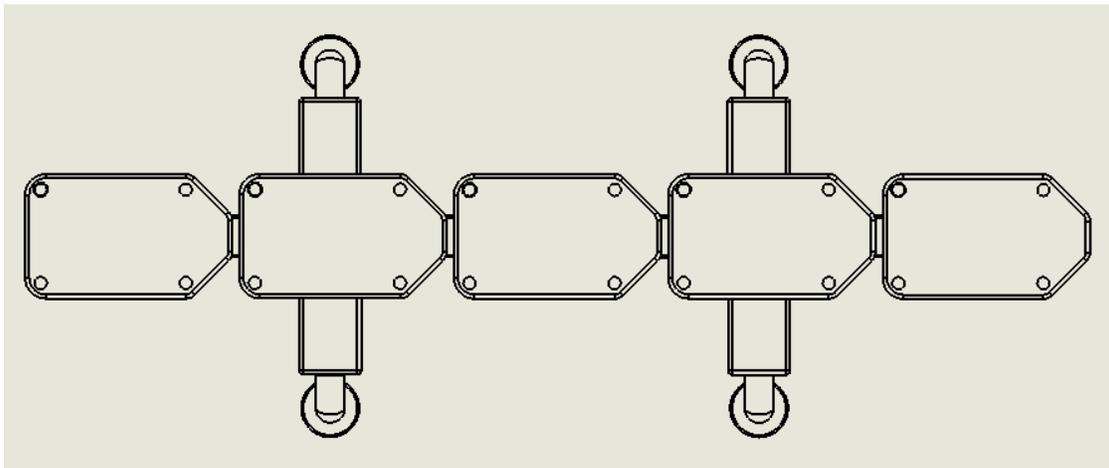


Figura 34 Plano CAD primer prototipo propuesto

En el diseño se propone emplear motores DC para accionar las extremidades, el uso de estos motores conlleva utilizar dispositivos electrónicos de control para lograr posicionar y definir los movimientos del motor, esto supone un incremento en las dimensiones de los módulos para lograr introducir sensores de posición. Por lo tanto, se desarrolló una segunda propuesta en la que se determinó usar motores servoaccionados tanto para generar los movimientos de la columna vertebral como para accionar las extremidades.

El nuevo prototipo representado en la Figura 35 plantea un nuevo mecanismo para realizar el movimiento de las extremidades, se implementa el uso de dos grados de libertad en cada extremidad uno más que la propuesta anterior, con esto se considera tener un mejor desplazamiento del robot.

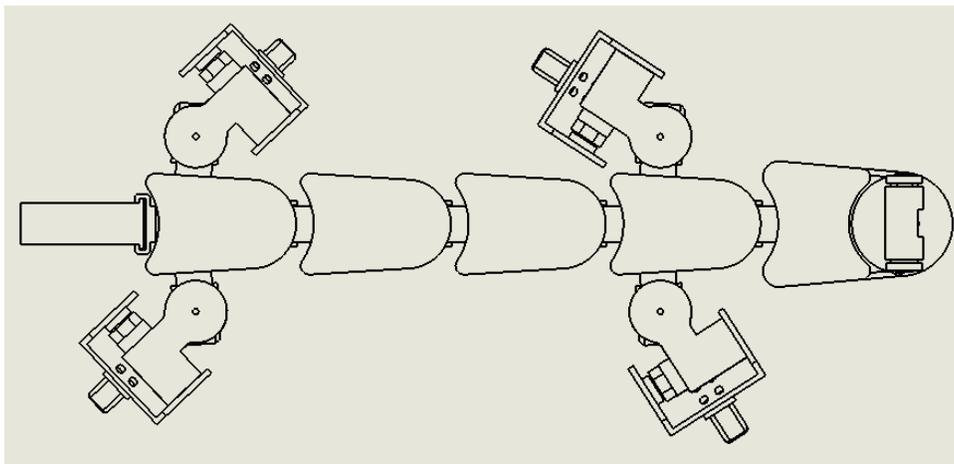


Figura 35 Plano CAD segundo prototipo propuesto

Este prototipo está basado en el diseño de Pleurobot [6], se integran los servomotores como objeto de conexión entre módulos, se emplean 5 módulos para representar la columna vertebral del robot aunque solo 4 cuentan con motores para ser accionados y 2 de ellos cuentan con soporte para sujetar los motores que accionan las extremidades. En la Figura 36 se observan los dos

módulos uno denominado simple y el otro con soporte para las extremidades, ambos módulos se componen de una base y un cuerpo utilizando tornillos como sujeción para su ensamble.

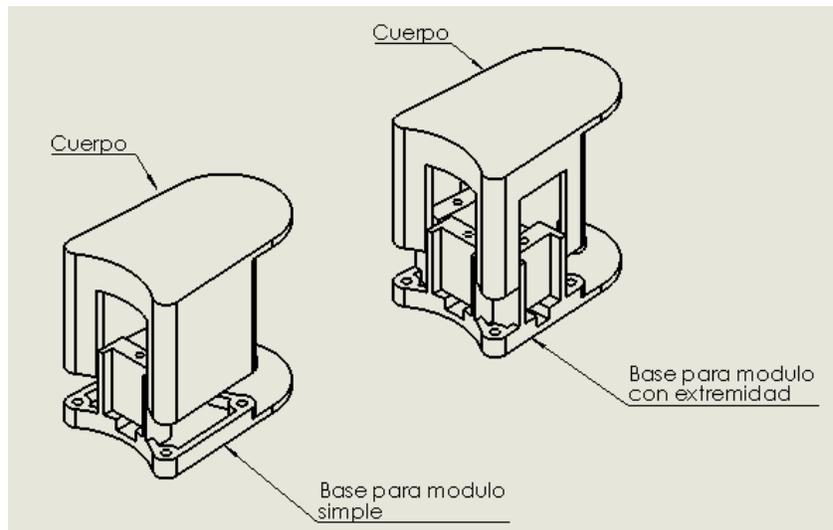


Figura 36 Partes de los Módulos

En la Figura 37 se muestran las dimensiones de los módulos definidas en milímetros.

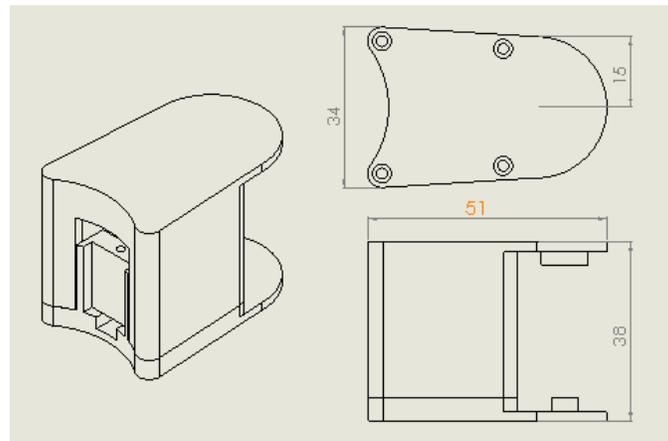


Figura 37 Medidas del módulo en milímetros

### Módulo Central

El dispositivo cuenta con un módulo central que representa la cabeza de una salamandra real, en este módulo se instalaron el microcontrolador, dispositivo de transmisión para el control a distancia y el sistema de videocámara. El diseño de este módulo se modificó con respecto a los módulos de la espina dorsal por los espacios que se requerían para instalar los componentes electrónicos de activación, se incrementaron las dimensiones sin afectar la congruencia del diseño

completo, de la misma forma se optimizo para que todos los elementos de control se instalaran al interior del módulo. La Figura 38 muestra el diseño del del módulo y el soporte de video cámara.

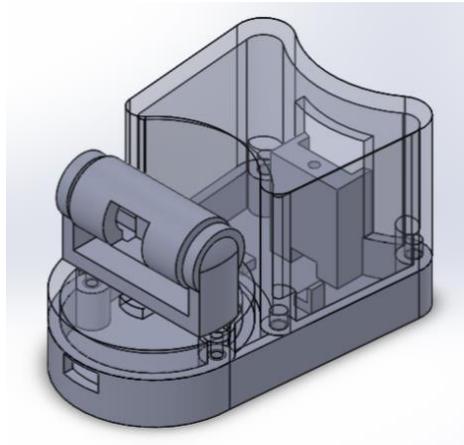


Figura 38 Vista Isométrica del modulo central

### **Extremidades**

Las extremidades cuentan con dos grados de libertad, por un lado uno permite realizar un movimiento oscilatorio horizontalmente que definirá el desplazamiento de la extremidad mientras que el otro ejecuta un movimiento vertical para levantar la extremidad y completar la secuencia del paso.

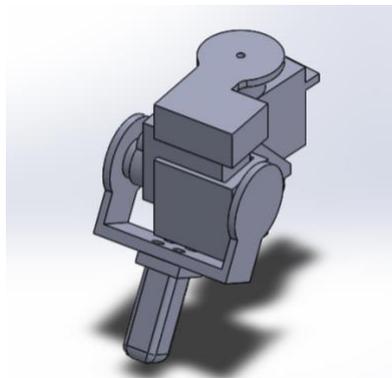


Figura 39 Ensamble extremidad

Las extremidades fueron al igual que los módulos fueron fabricadas en Nylon por las ventajas que ofrece el material de fabricación el pie de la extremidad logra obtener buenas propiedades de

fricción al entrar en contacto con la superficie. De la misma manera se propone el uso de una cubierta que se acople al pie de la extremidad, que será fabricada de materiales con diferentes propiedades en relación con fricción y su uso dependerá del terreno o superficie en la que se desplazará el robot.

### Mecanismo Cámara

Se diseñó un mecanismo que pueda proporcionar ángulos de visión mas amplios, por ello se planteó el diseño mostrado en la Figura 40, una base para el motor de Paneo que sirve como tapa para el modulo central donde esta ubicado el microcontrolador, de igual manera se implementa el uso de otro motor que proporcione movimiento sobre el eje “y”, el objetivo de este mecanismo es dar mas utilidad al robot y que pueda operar en situaciones mas complejas. El ensamble en el software se presenta en la Figura 41.

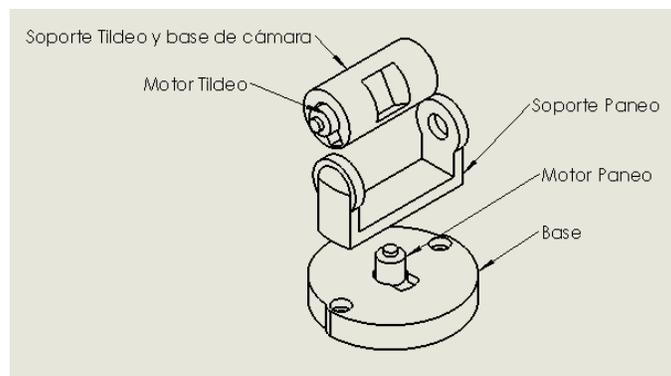


Figura 41 Partes de mecanismo para cámara

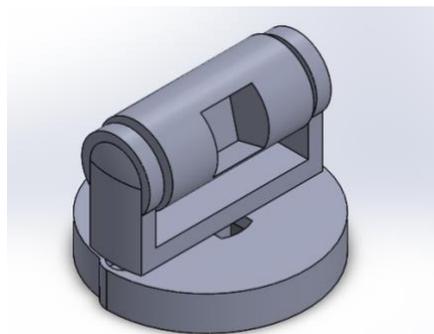


Figura 40 Ensamble mecanismo de cámara

Como resultado de los diseños realizados, se realizó un ensamblaje del dispositivo completo, para simular los movimientos que realizará el robot para desplazarse y comprobar que no existan colisiones entre componentes de cada módulo. A continuación, la Figura 42 muestra las dimensiones del dispositivo ensamblado en su totalidad.

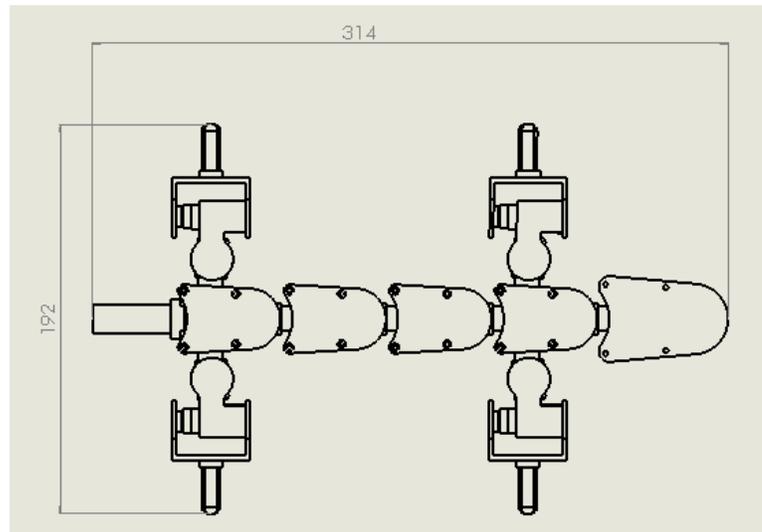


Figura 42 Dimensiones del robot completo en milímetros

En la figura 43 se observa el modelo del robot realizado en SolidWorks desde una vista isométrica con los módulos alineados.

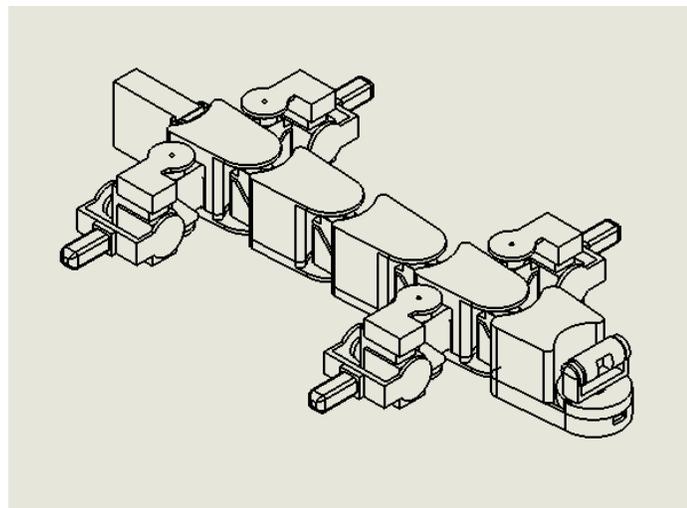


Figura 43 Vista Isométrica del robot

### 3.2 Manufactura

La fabricación de este prototipo se realizó por modelado en deposición fundida, se empleó una impresora 3D Creality CR-10S y filamento de Nylon. Se usó el software de impresión 3D Ultimaker Cura 4.3.0 para exportar los modelos realizados en SolidWorks al formato que requiere la impresora en nuestro caso G-CODE.

La fabricación de las piezas conllevó un gran reto pues se presentaron diversos inconvenientes al momento de realizar las piezas, estos inconvenientes dependen principalmente del material empleado ya que sus propiedades físicas se ven afectadas por la temperatura y humedad del ambiente en el que se encuentre.

Inicialmente se empleó una boquilla fabricada en Titanio, este material ofrece un calentamiento más uniforme en toda su superficie, aunque en el área de impresión 3D se recomienda el uso de boquillas de este material, para la fabricación del prototipo presentado en este documento no fue útil, ya que al realizar las piezas se presentaba el efecto denominado como Cracking, es decir, las capas de impresión no se adherían unas con otras y por lo tanto la pieza se fracturaba. En la Figura 44 se observa una pieza impresa que presenta tal efecto, se empleó una boquilla de titanio y los parámetros sugeridos por el fabricante del filamento 245 °C para el extrusor y 80 °C para la cama.



Figura 44 Pieza impresa empleando la boquilla de titanio

Durante la fabricación de piezas se realizaron pruebas empleando filamento de TPU, esto para corroborar las condiciones de operación de la impresora, tomando en cuenta que este material requiere de temperaturas inferiores de cama y extrusor, 240 °C y 40 °C respectivamente. En el Apendice C se puede observar la pieza obtenida, una pieza con buena definición y que ofrece un alto índice de elasticidad.

Para nuestro caso el efecto Cracking se originó por la falta de calentamiento al extruir el filamento, la boquilla no lograba fundir el filamento y las capas no se adherían de manera precisa para su correcta impresión. Para la corrección de estos problemas se optó por el uso de una boquilla fabricada en Latón, esta alcanza la temperatura deseada en un menor tiempo y la temperatura es más concentrada, logrando fundir el filamento lo suficiente para imprimir piezas consistentes como se observa en las siguientes figuras. Es importante el uso del soporte de adherencia denominado Borde ya que este ayuda a mantener la pieza sujeta a la cama de impresión y evitar el efecto Warping el cual deforma la base de la pieza a imprimir.

Por otra parte, se realizó un precalentamiento del filamento de Nylon a una temperatura de 80 °C, esto para eliminar toda la humedad contenida en los poros del mismo, el precalentamiento se realizó por aproximadamente 3 h.

Para la impresión del filamento de Nylon se recomienda el uso de una caja deshidratadora de filamento, de la misma manera se sugiere el uso de una cubierta para aislar a la impresora y así mantener un ambiente de trabajo con temperaturas constantes. En la Figura 45 se puede observar piezas impresas con una excelente calidad y corresponde a la base de extremidad y el cuerpo de un módulo simple.



Figura 45 Piezas de Nylon impresas correctamente

### 3.3 Diseño electrónico

#### Componentes Electrónicos

En esta sección se mencionan los componentes empleados para la activación del robot biomimético, se consideraron estos componentes para realizar el diseño electrónico de activación por las características que ofrecen, la fácil implementación y compatibilidad entre estos.

#### *Motores*

Después de analizar las diferentes opciones de motores eléctricos que se encuentran en la bibliografía estudiada y que, a partir de la experiencia al trabajar con algunos modelos, para la realización de este robot, se eligieron los más adecuados al diseño propuesto y aquellos que nos permitieron generar los movimientos requeridos, considerando costos, dimensiones, velocidad y torque.

Para la generación de los movimientos axiales de la espina dorsal y los movimientos requeridos en las extremidades, se optó por el servomotor modelo SG90 del fabricante Tower Pro, con un torque de 1.8 kg/cm y un peso de 9 gr son los más adecuados a las medidas del módulo y al torque requerido para realizar los movimientos axiales.

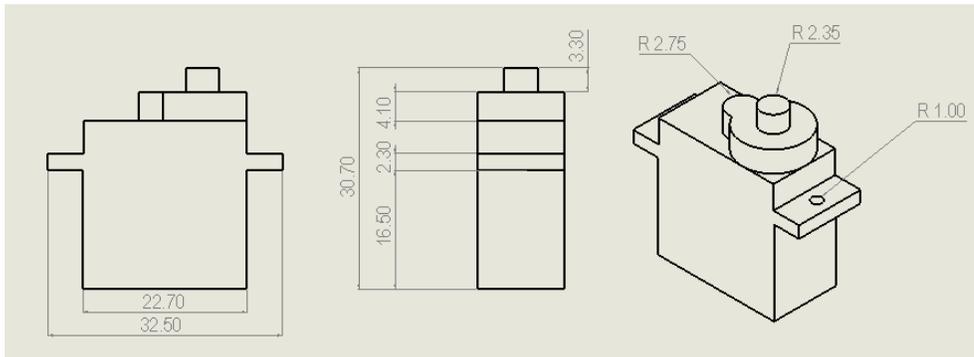


Figura 46 Medidas servomotor SG90

### *Microcontrolador*

Arduino Nano es el microcontrolador más pequeño de la familia Arduino, ofrece 14 pines digitales que pueden ser usados como entradas o salidas, de los cuales 6 de ellos proporcionan salidas PWM. También, cuenta con 8 entradas analógicas y bus de comunicación SPI [17]. En el Anexo C se muestra el diagrama completo de los puertos que ofrece el microcontrolador.

Actualmente existen kits de herramientas y dispositivos desarrollados para su fácil implementación con microcontroladores Arduino, es por ello la propuesta de usar un microcontrolador Arduino.

### *Transceptor*

Modulo transceptor NRF24L01 es un módulo de comunicación inalámbrica fabricado por Nordic Semiconductor que es de fácil operación con un microcontrolador. Integra un transceptor RF a una frecuencia entre 2.4GHz a 2.5 GHz, proporciona una velocidad de transmisión

configurable entre 250 Kbps, 1Mbps y 2 Mbps; y permite una conexión simultanea de hasta 6 dispositivos. [18]

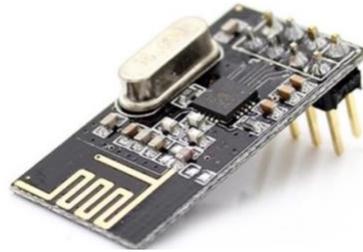


Figura 47 Transceptor NRF24L01 Fuente:  
Electrotek Mega

El control del módulo se realiza por bus SPI, por lo que es compatible con el microcontrolador Arduino empleado en el minirobot. En el Apéndice C se muestran las dimensiones del dispositivo.

### *Videocámara*

Actualmente existe una gran variedad de mini cámaras que cuenta con un sistema completo que incluye batería y sistema de comunicación inalámbrica, ya sea wifi o bluetooth ofreciendo alta resolución en la imagen transmitida, sin embargo, solo algunas se caracterizan por tener un sistema en dimensiones reducidas.



Figura 48 Videocámara

La cámara que se observa en la Figura 48, cuenta con transmisión inalámbrica Wifi gracias a que incorpora una antena a 2.4 GHz 802.11n, integra una batería de litio de 5v recargable capaz de alcanzar hasta 45 minutos de uso del dispositivo, sus dimensiones de 2.36 x 0.71 x 0.32 cm y un peso de 8 gr. La resolución de transmisión de red es de 640x480 a una velocidad de 10fps

(Fotogramas por segundo), cuenta con soporte de memoria microSD con una capacidad máxima de 32 gb. Es compatible con sistemas móviles Android e iOS. Esta cámara se considera ideal para emplear en tareas de inspección por la conectividad que ofrece.

### *Baterías*

Las baterías LiPo (Litio y polímero) son baterías recargables compuesta en ocasiones de múltiples celdas usadas en aplicaciones que requieren corrientes superiores a 1A con bajo peso y tamaño reducido, por ejemplo sistemas de radio control, como aviones, helicópteros, drones, etc.

Sus ventajas se determinan por su capacidad de carga y su inversión es a largo plazo, las baterías LiPo llegan a tener una vida útil de 3 a 5 años, son más eficientes en el uso de energía comparado con las otras tecnologías que existen actualmente. Su variedad en formas, tamaños y capacidad hacen que estas baterías sean ideales para proyectos robóticos, aunque es justo decir que se deben tener ciertos cuidados en el uso de este tipo de baterías, se debe emplear una corriente de carga inferior a la carga nominal soportada por la misma, el voltaje debe mantenerse en un valor de 3v, para su almacenamiento se recomienda guardarlas con un voltaje de 3.7 v, su voltaje base y en lugares libres de humedad, estas son lagunas de las recomendaciones que se deben aplicar para prolongar la vida útil de las baterías. En la Figura 49 podemos observar baterías LiPo.



Figura 49 Baterías LiPo

## Sistema de activación de espina dorsal y extremidades

El sistema de actuadores compuesto por 12 microservomotores y un microcontrolador Arduino Nano, requirió utilizar 8 pines de Arduino para el control de los servomotores 7 digitales y 1 analógico. Con base en el principio de desplazamiento de las salamandra, se realizó la conexión en la que los servos usados para activar las dos extremidades delanteras y las dos extremidades traseras se conectaron a 1 pin para cada par, de igual forma se conectaron los brazos del robot, de esta manera también se redujo el uso de una mayor cantidad de pines de Arduino. En la Figura 50 se observa de manera estructurada la distribución de los servomotores. El diagrama electrónico de conexión de los actuadores y el microcontrolador se encuentra en el Anexo D.

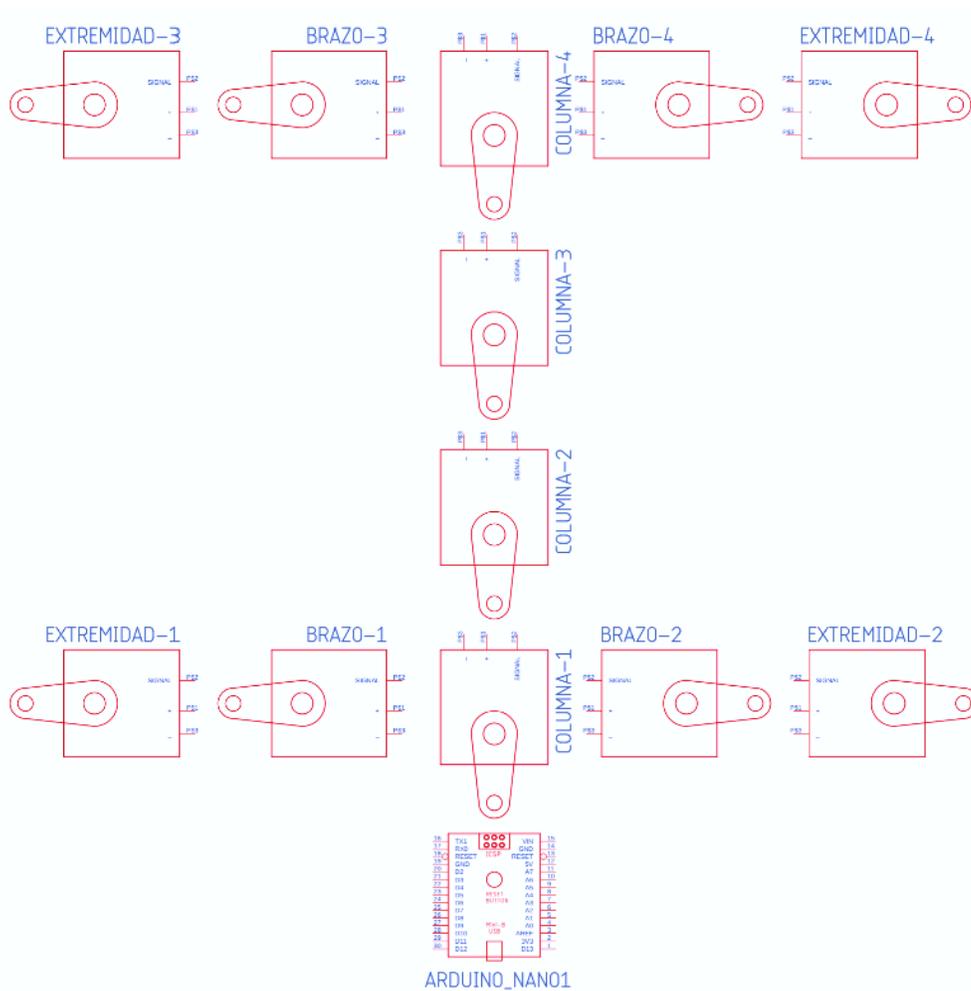


Figura 50 Distribución de servomotores

En la Tabla 3 se indican los pines de conexión para cada servomotor.

**Tabla 3** Pines de conexión actuadores y microcontrolador

Pin Arduino	Servomotor
D2	Extremidad 1 y extremidad 2
D3	Brazo 1 y brazo 2
D4	Brazo 3 y brazo 4
D5	Extremidad 3 y extremidad 4
D6	Columna 1
D9	Columna 2
D10	Columna 3
A0	Columna 4

### Fuente de energía

El robot cuenta con un arreglo de baterías capaces de suministrar el voltaje y corriente necesaria para su funcionamiento.

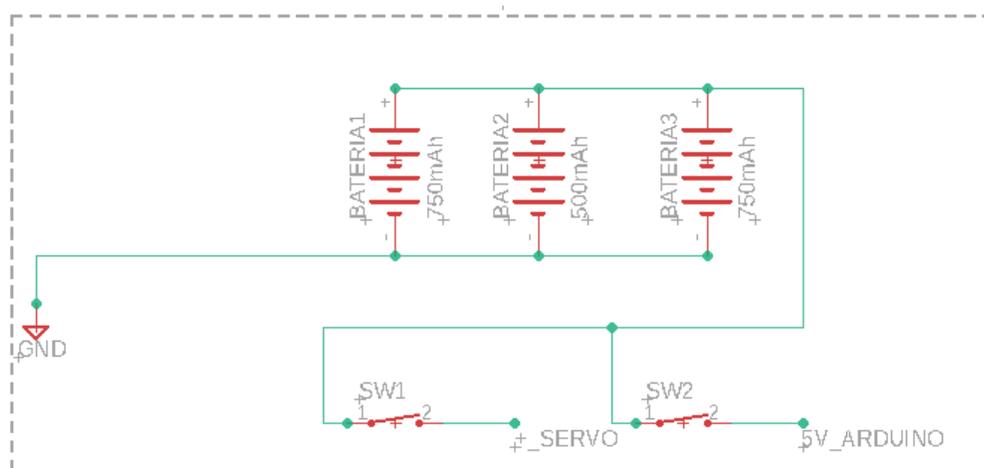


Figura 51 Sistema de energía del robot



El diseño de los diagramas de conexión se realizó en el software Autodesk EAGLE, inicialmente se planteó realizar los diagramas en Multisim, de manera circunstancial se trabajó en un equipo operando con Mac OS dada la incompatibilidad de Multisim con esta plataforma se buscaron alternativas.

### 3.4 Ensamble

Al finalizar la impresión y después de realizar los diagramas de conexión se procedió a iniciar con el ensamblaje para posteriormente realizar las pruebas de desplazamiento del robot. Se inicio reemplazando los cables de conexión de los servomotores por otros mas delgados, como se muestra en Figura 53, esto con el fin de optimizar los espacios en los módulos y hacer más fácil el ensamble.



Figura 53 Reemplazo de cables de los servomotores

A cada elemento de los cuerpos de los módulos se le colocaron rosquillas para poder realizar el ensamble entre base y cuerpo, en la Figura 54 se observa el proceso de adición de las rosquillas a los piezas de Nylon.



Figura 54 Adición de rosquillas para sujeción

Se iniciaron ensamblando los módulos con extremidades, en estos módulos se concentran una gran cantidad de cables de alimentación y control de los servomotores, se fue realizando la conexión de cada módulo conforme se iban armando. En el ensablaje del primer módulo se realizaron pruebas de movimiento empleando un código base para determinar si la movilidad de las extremidades era correcta. La Figura 55 muestra el módulo en una base para realizar las pruebas de movimiento.

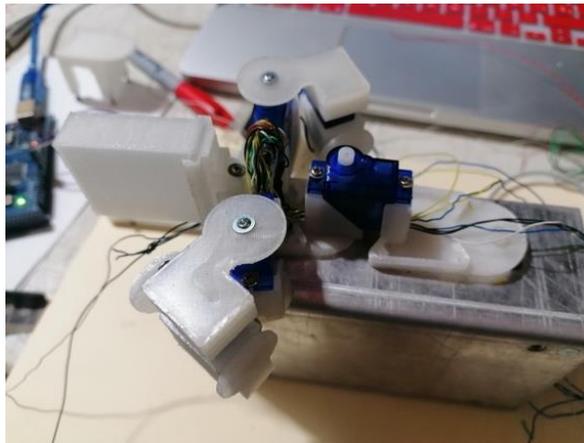


Figura 55 Módulo ensamblado con extremidades

En la Figura 56 se observa el robot desarticulado de la columna vertebral por la falta de los cuerpos que sujetan el motor de acción al módulo contenedor.

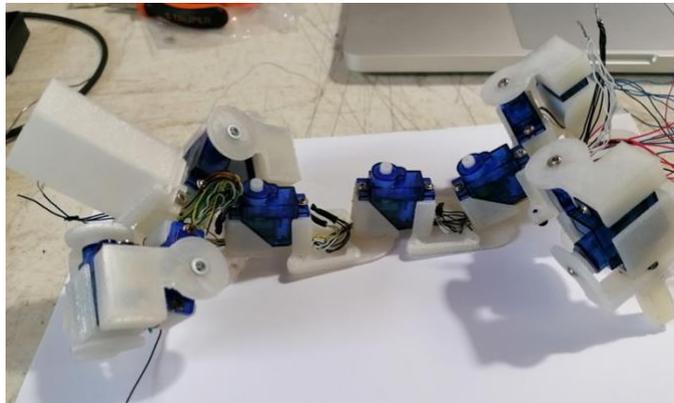


Figura 56 Vista interior del robot

El nivel de modularidad de este prototipo es menor comparado con la primera propuesta presentada en el apartado 3.1, sin embargo, la robustez de este último ofrece más libertad de movimiento que conlleva más operatividad del robot. A continuación la Figura 57 se observan los dos dispositivos propuestos ensamblados parcialmente para la comparación de los mismos.

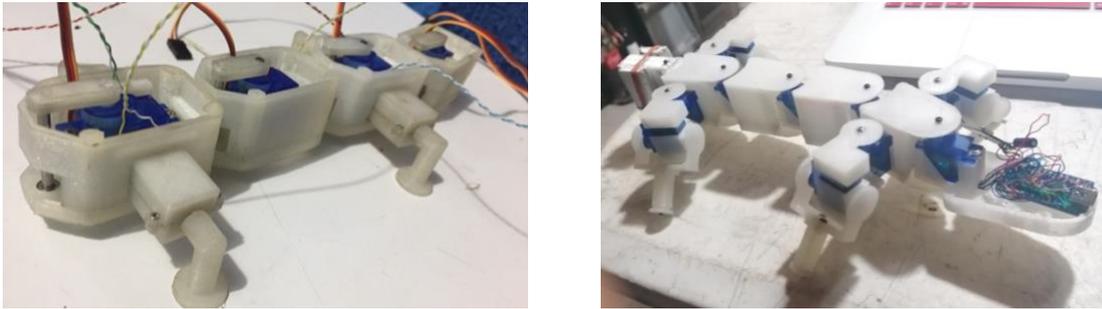


Figura 57 Prototipos propuestos

### 3.5 Programación

Se usó un código de programación realizado en el IDE de Arduino para que el robot realizara el desplazamiento y observar su comportamiento, el código se ejecutó directamente desde el microcontrolador instalado en el robot.

Dentro del IDE de Arduino se incluyen librerías para facilitar el uso de diversos sensores y actuadores. En la programación se empleó la librería “Servo.h” esta establece un rango de operación entre 0 y 179 que son los grados de rotación del servomotor, para facilitar su uso.

```
#include <Servo.h>
```

Figura 58 Librería Servo en IDE Arduino

Lo siguiente fue declarar cada uno de los servomotores definidos por el usuario con la librería.

```
Servo servoExtremidad1_2;  
Servo servoBrazo1_2;  
Servo servoExtremidad3_4;  
Servo servoBrazo3_4;  
Servo servo1columna;  
Servo servo2columna;  
Servo servo3columna;  
Servo servo4columna;
```

Figura 59 Declaración de servos a la librería

Seguido se redefinieron los nombres de los pines usando “#define” esto con el fin de identificar de manera más rápida la conexión de cada servomotor de acuerdo a su posición en la estructura del servomotor.

```
#define Servo_ext_D 2
#define Servo_br_D 3
#define Servo_ext_T 5
#define Servo_br_T 4
#define Servocolumna1 6
#define Servocolumna2 9
#define Servocolumna3 10
#define Servocolumna4 A0
```

Figura 60 Nombramiento de pines de Arduino

Iniciando con la estructura “void setup ()” asociamos cada objeto del tipo “Servo” con los pines de conexión usando el argumento “attach”.

```
void setup() {
    servoExtremidad1_2.attach(Servo_ext_D);
    servoBrazo1_2.attach(Servo_br_D);
    servoExtremidad3_4.attach(Servo_ext_T);
    servoBrazo3_4.attach(Servo_br_T);
    servo1columna.attach(Servocolumna1);
    servo2columna.attach(Servocolumna2);
    servo3columna.attach(Servocolumna3);
    servo4columna.attach(Servocolumna4);
}
```

Figura 61 Void setup del código

Posteriormente para la estructura “void loop ()” se ejecuta el void “caminar” que a su vez incluye el void “paso1”, este último incluye la secuencia de movimientos para los servomotores.

```
void loop() {
    caminar();
}

void paso1()
{
    servoExtremidad1_2.write(35);
    servoBrazo1_2.write(150);
    servoExtremidad3_4.write(55);
    servoBrazo3_4.write(30);
    servo1columna.write(60);
    servo2columna.write(50);
    servo3columna.write(75);
    servo4columna.write(85);
    delay(300);
}
```

Figura 62 Void loop del código

Se incluyeron dos estructuras void para generar una secuencia de diferentes movimientos que modificaran la dirección de desplazamiento del robot. En el Apéndice E se muestra el código completo para ejecutar un desplazamiento en línea recta.

## Capítulo IV

### Presentación, análisis e interpretación de resultados

#### 4.1 Descripción de los resultados del trabajo

En esta sección se describen las pruebas realizadas al robot diseñado, tomando como referencia las distintas fases que conllevó su fabricación, para determinar si los objetivos planteados se cumplieron totalmente.

El material empleado Nylon como se menciona en este documento ofrece buena resistencia a los esfuerzos y deformaciones, sin embargo esto representó un problema al realizar ciertos ensamblajes con los actuadores, la colocación de los servomotores a las bases es correcta cuando no esta conectada a los otro modulos colindantes, cuando se logró el ensamblaje total del robot se notó una curvatura sobre la columna en una vista lateral que se produce por la inclinación del soporte que sujeta el servomotor, que aunque no llega a fracturarse se desplazó unos pequeños milímetros que genera un punto de carga máxima hacia los módulos intermedios. Esto representa un problema en el desplazamiento del robot ya que la carga no esta distribuida uniformemente.

El prototipo obtenido se traduce en emplear de una forma mas simple lo realizado por [6], se emplea la base de diseño mecánico para crear un dispositivo de dimensiones mas pequeñas que pueda desplazarse en espacios reducidos, manteniendo el enfoque en el comportamiento que se define por una salamandra real, es decir los grados de libertad a través de su columna vertebral que ayudan a obtener un mejor desplazamiento, de esta manera también se logra poder cambiar la dirección del desplazamiento del robot. Por otra parte, el prototipo se limita a solo operar en tierra, dado que el diseño los servomotores de accionamiento están parcialmente descubiertos expuestos a agua y humedad, tomando en cuenta el robot denominado Salamandra robotica II un dispositivo

modular y completamente impermeable, sin embargo limitado por la estructura mecánica de sus extremidades.

Un factor fundamental para cumplir el objetivo por el cual fue fabricado este dispositivo es su peso, justo es decir que no es un dispositivo ligero y esto limita el uso del dispositivo sobre superficies no firmes que se encuentren en partes altas.

La funcionalidad del diseño mecánico se concreta al realizar el sistema de control. La etapa de control se diseñó con base a las necesidades que se requería para realizar el desplazamiento del robot, se optó por reducir la cantidad de pines empleados de Arduino para futuras adiciones de sensores o complementos que ayuden a la operación del robot. El diseño del control permite realizar futuras modificaciones para realizar un control mas fino en los actuadores, de esta manera permitirá al robot poder desplazarse en superficies mas complicadas y en situaciones mas críticas donde se requiera evadir obstáculos.

El mando a distancia no se logró elaborar por problemas de la programación e implementación con el robot, aunque en el robot si se encuentra instalado el módulo receptor de señales RF, se plantea desarrollar esta objetivo en futuros trabajos

## **4.2 Resultados**

Se diseñó y construyó un sistema mecánico para un robot biomimético inspirado en una salamandra, el cual tiene como objetivo ser una herramienta de apoyo para realizar tareas de inspección a instalaciones eléctricas, principalmente donde el personal encargado no puede acceder o peligrar la integridad física del mismo.

Se logró diseñar una estructura mecánica modular para copiar el principio de desplazamiento de una salamandra, que se determina por el movimiento generado en su espina dorsal y el impulso generado por sus cuatro extremidades.

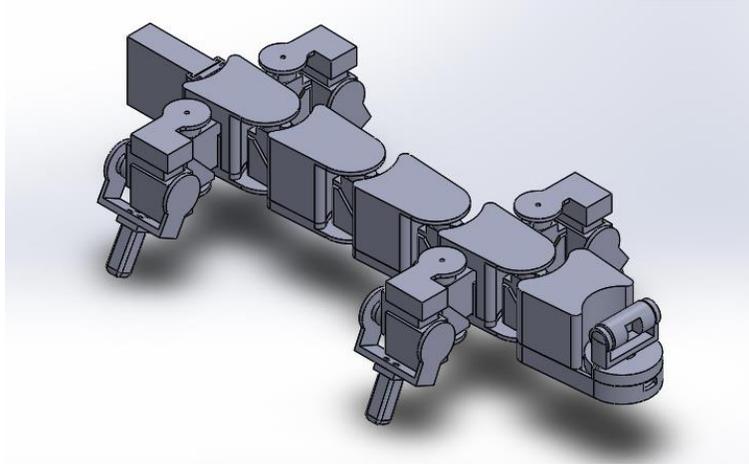


Figura 63 Simulación del diseño mecánico del dispositivo

Se creó una estructura con dimensiones de 314 x 182 x 50 mm. La estructura mecánica es apta para operar en situaciones de riesgo donde puede sufrir la colisión de algún otro elemento sobre él o que el dispositivo sufra de impactos por caída libre.

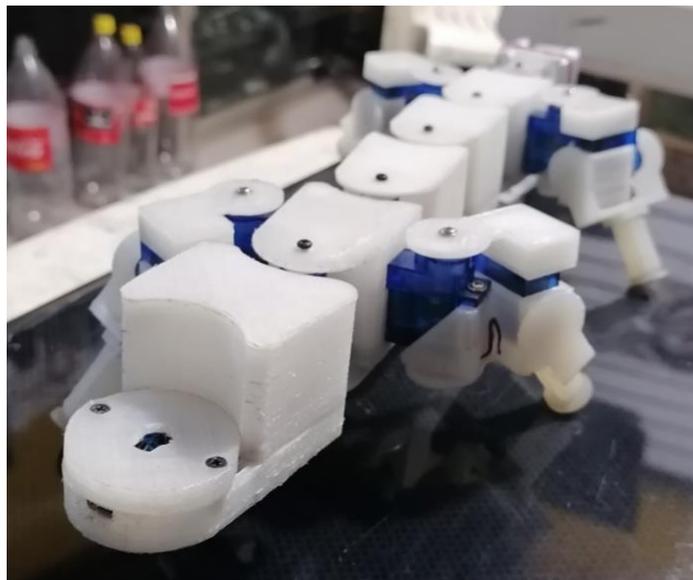


Figura 64 Prototipo realizado

Se diseñó un soporte mecánico que permite ampliar los ángulos de visión de la cámara que aunque fue impreso no se implementó por la capacidad de los motores que se eligieron en un inicio para la activación para dicho sistema.

Se realizó la prueba de desplazamiento en la cual la columna vertebral se encontraba alineada, en esta prueba todos los servomotores de la columna se encontraban en un valor de  $90^\circ$ , se desplazó de manera coordinada pero su dirección no fue la que se esperaba, se desvió de la trayectoria marcada, en la Figura 66 se representa gráficamente la prueba realizada trayectoria deseada se muestra en color azul y la que realizó el prototipo se muestra en color rojo.

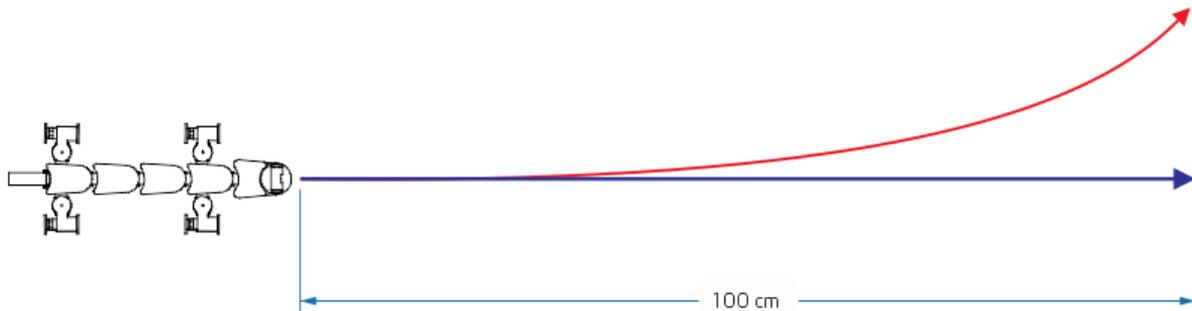


Figura 65 Representación de desplazamiento del prototipo

Al obtener estos resultados en las pruebas de desplazamiento se determina que es importante establecer un punto inicial en el cual se realice el ensamble, es decir establecer un valor de posición intermedio de los servomotores al realizar el anclaje con las piezas mecánicas.

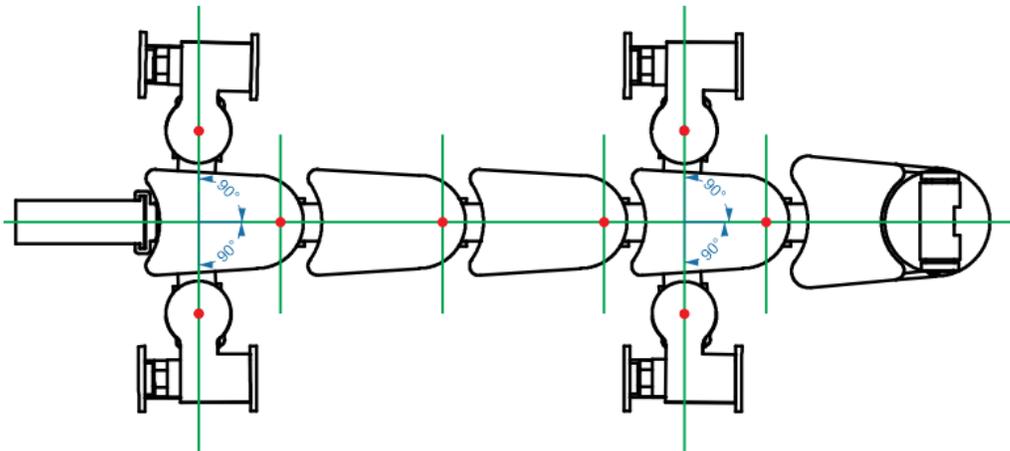


Figura 66 Representación de puntos de oscilación en la estructura mecánica

Establecer un valor de posición inicial, determina los grados de rotación que se emplean en el código de programación para realizar desplazamientos en diferentes direcciones, esto tiene como resultado ejecutar movimientos simétricos y coordinados.

La posición de cada uno de los elementos que conforman la estructura del prototipo influye en el dirección de desplazamiento. El uso de joystick contribuirá a controlar dirección, velocidad y altura de desplazamiento, de esta manera se podrán determinar los valores idóneos para que el robot efectue su desplazamiento correcto.

### 4.3 Conclusiones

Esta tesis describe la aplicación de la biomimética con el fin de determinar las características y conceptualizar un minirobot que permita realizar tareas de inspección en instalaciones eléctricas.

Se realizó el planteamiento de un sistema mecánico que permitiera a un dispositivo bioinspirado en una salamandra desplazarse, se analizaron las diferentes propuestas existentes y trabajos realizados para determinar la dinámica con la que se desplazan estos seres vivos.

Por otra parte se diseñó el diagrama esquemático de conexión de los actuadores y el microcontrolador buscando reducir el número de pines disponibles en el microcontrolador para poder añadir diferentes complementos. Se redactó un código de programación desarrollado en el IDE de Arduino con el propósito de realizar pruebas de desplazamiento en línea recta del robot.

Se diseñó y fabricó un soporte que permitiera a la cámara tener más rango visual, implementado un sistema de Pan y Tilt, sin embargo no se implementó por la no operatividad de los actuadores al sistema mecánico.

De manera general se logró realizar un dispositivo que se puede desplazar de manera coordinada, aunque es necesario desarrollar el mando a distancia para que el usuario pueda teleoperar y cumplir con el propósito planteado en esta tesis. Se propuso un dispositivo que ayude a realizar tareas de inspección, existiendo pocos prototipos enfocados a realizar esta actividad se considera un resultado aceptable.

## **Recomendaciones**

Cuando se realiza un proyecto que propone desarrollar un prototipo se desea obtener el mejor resultado posible, dentro del desarrollo del mismo y principalmente en la parte práctica, es decir en la fabricación del prototipo se presentan situaciones en las que puedes deducir una propuesta más simple pero con mejor desempeño al cumplir el objetivo planteado.

El prototipo creado representa solo una etapa inicial en la que se considera la idea de copiar la estructura y movimiento de un ser vivo, y con este realizar actividades que sirvan de apoyo al ser humano. Se diseña un prototipo que se desarrolla en diferentes etapas en las cuales cada una de ellas se puede mejorar, por lo tanto se recomienda en futuros trabajos realizar mejoras en la parte mecánica, un dispositivo de dimensiones y peso reducidos pero a su vez robusto con actuadores mas eficientes en relación tamaño – consumo energetico; en la etapa del sistema de control se encuentra un amplio margen de mejora, desde usar Generadores de patrones centrales (GCPs) para coordinar los movimientos propios del dispositivo hasta implementar sensores de proximidad, temperatura, humedad, etc, que permitan al dispositivo un comportamiento más autónomo dar mayor utilidad para realizar tareas más sofisticadas en el área de inspección a instalaciones eléctricas.

## Referencias bibliográficas

- [1] P.-L. R. S. M. Nicolas Pouliot, «LineScout Technology Opens the Way to Robot Inspection and Maintenance of High-Voltage Power Lines,» *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2014.
- [2] R. AIN, «Proyecto Pelicano: Robot aéreo para inspección de líneas eléctricas,» *Hisparob*, 2010.
- [3] B. a. O. A. Y. a. G. C. a. S. G. a. W. Y. a. R. J. a. X. H. a. R. J. a. M. K. N. A. a. H. J. a. G. D. a. C. H. Zhong, «Coordination of back bending and leg movements for quadrupedal motion,» 2018.
- [4] K. K. A. G. A. J. I. A. Crespi, «Salamandra Robotica II: An Amphibious Robot to Study Salamander-Like Swimming and Walking Gaits,» *Robotics, IEEE Transactions on*, pp. 308-320, 2013.
- [5] A. B. A. G. A. J. I. A. Crespi, «Amphibot I: an amphibious snake-like robot,» *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 163-175, 2004.
- [6] T. R. M. K. H. T. M. N. T. S. J. I. A. Karakasiliotis K, «From cineradiography to biorobots: An approach for designing robots to emulate and study animal locomotion,» *Journal of The Royal Society Interface*, p. 20151089, 2016.
- [7] U. N. d. Colombia, «Aproximación al diseño biomimético. Aprendizaje y Aplicación,» *DYNA*, pp. 181-190, 2014.
- [8] A. A. Transeth, «Modelling and Control of Snake Robots,» Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2007.
- [9] A. Crespi, «Design and Control of Amphibious Robots with Multiple Degrees of Freedom,» Escuela Politécnica Federal de Lausana, Lausana, 2007.
- [10] W. Bolton, *Ingeniería de Control*, México: Alfaomega, 2001.
- [11] M. A. G. Oviedo, «Estrategias Bio-inspiradas para Locomoción de Robots Ápodos,» Madrid, España, 2011.
- [12] V. B. a. P. L. Bertrand Tondu, «Naturally compliant robot-arms actuated by McKibben artificial muscles,» *In Proc. IEEE Int. conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 2635-2640, 1994.
- [13] C. Mavroidis, «Development of Advanced Actuators Using Shape Memory Alloys and Electrorheological Fluids,» *Research in Nondestructive Evaluation*, pp. 1-32, 2002.

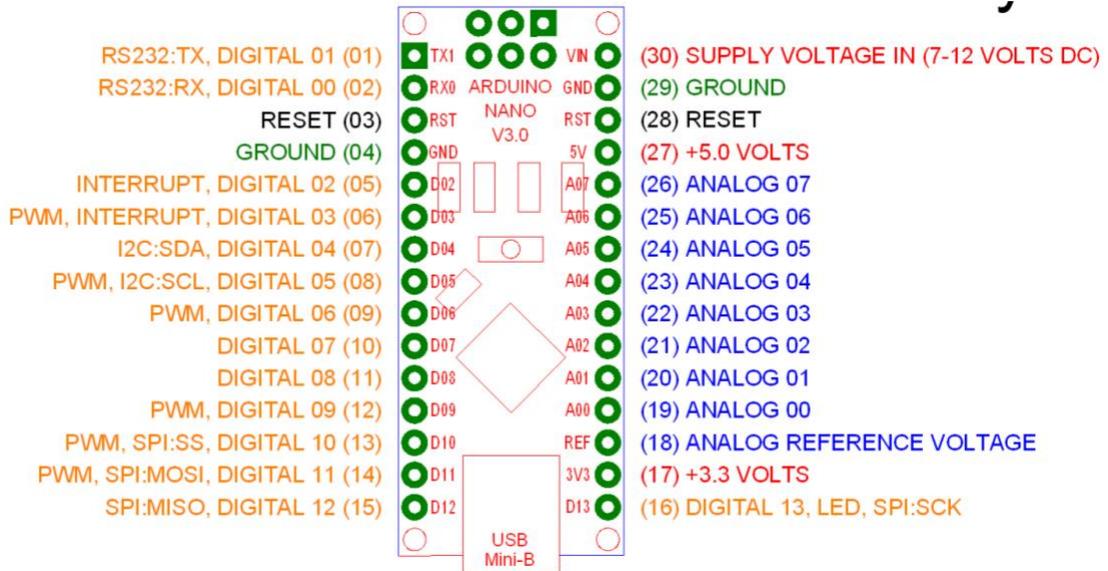
- [14] R. G. Gilbertson, *Muscle wires project book: A hands-on Guide to Amazing Robotic Muscles that Shorten When Electrically Powered*, San Rafael, California: Mondo-Tronics, 2000.
- [15] G. H. Eben Upton, «Scribd,» 22 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://es.scrib.com/doc/225682222/Raspberry-Pi-Guia-Del-Usuario-2da-Ed-en-Español>.
- [16] «Ultimaker,» 16 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://ultimaker.com/download/67541/TDS%20Nylon%20v3.011-spa-ES.pdf>.
- [17] «Arduino,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc>.
- [18] Nordic, «Sparkfun,» Marzo 2008. [En línea]. Available: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss\\_Preliminary\\_Product\\_Specification\\_v1\\_0.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf).
- [19] «Pololu Robotics & Electronics,» 2000. [En línea]. Available: <https://www.pololu.com>.
- [20] M. S. Carlo Menon, «A Biomimetic Climbing Robot Based on the Gecko,» *Journal of Bionic Engineering* 3, pp. 115 - 125, 2006.
- [21] D. L. A. P. A. J. I. Alessandro Crespi, «Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator,» *Autonomus Robots*, vol. 25, 2008.

## Anexos

### Anexo A. Nylon: Parámetros Físicos

		Normas	Resultados	Unidades
Mecánicos	Fuerza de Tensión	ASTM D638/ISO 527	64.6	$kg/cm^2$ (MPa) [Lb/in <sup>2</sup> ]
	Deformación por Fractura	ASTM D638/ISO 527	231.3	%
	Módulo de Flexión	ASTM D790/ISO 178	1992	$kg/cm^2$ (MPa) [Lb/in <sup>2</sup> ]
	Resistencia a la flexión	ASTM D790/ISO 178	84.9	$kg/cm^2$ (MPa) [Lb/in <sup>2</sup> ]
	Durómetro Shore D	ASTM D758	75	
	Fuerza de impacto Charpy	ASTM D256/ISO 1183	28.3	$kgcm/cm$ (J/M)ft lb/in
Físicos	Gravedad específica	ASTM D792/ISO 1183	1.157	
	Contracción de moldeo	ASTM D955	1.42	%
	Índice de fusión	ASTM D1238/ISO 1133	3.35	$g/10 min$
	Higroscopia 23°C/24H	ASTM D570/ISO62	0.07	%
	Temperatura de deformación	ASTM DD648/ISO75	75	°C (°F)
	Punto de fusión		219-225	°C(°F)
Eléctricos	Permitividad	ASTM D150/IEC 60250	1.5	
	Resistividad de volumen	ASTM D257/IEC 60093	2.5*10 <sup>14</sup>	$\Omega cm$
	Resistividad de superficie	ASTM D257/IEC 60093	6.0*10 <sup>12</sup>	$\Omega$

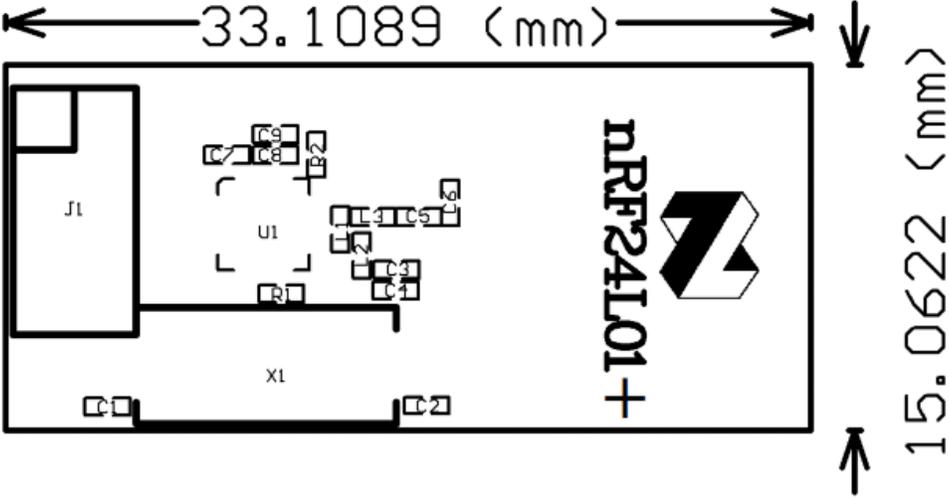
## Anexo B. Arduino Nano Pin Layout



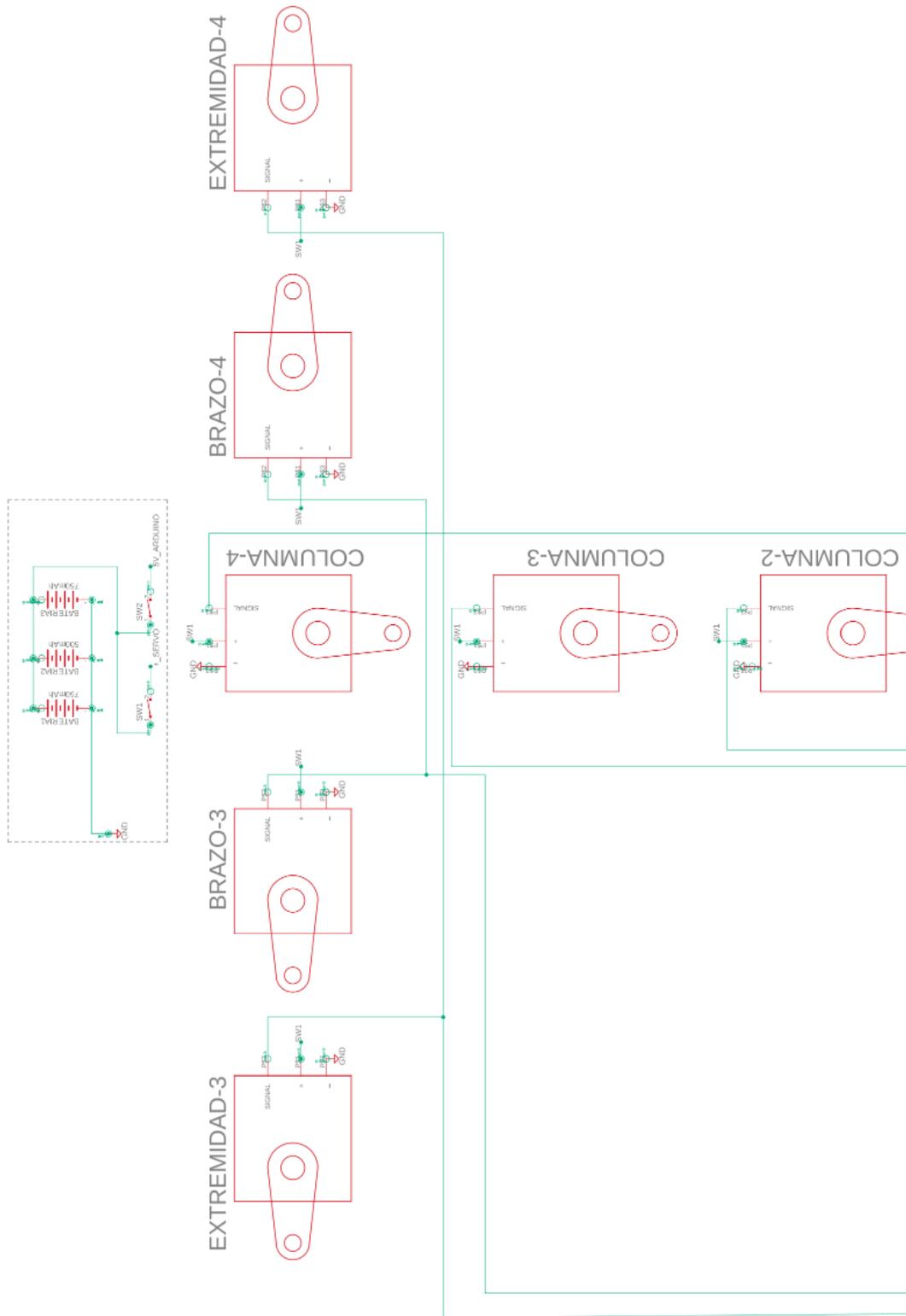
**Anexo C. Impresión 3d en TPU**

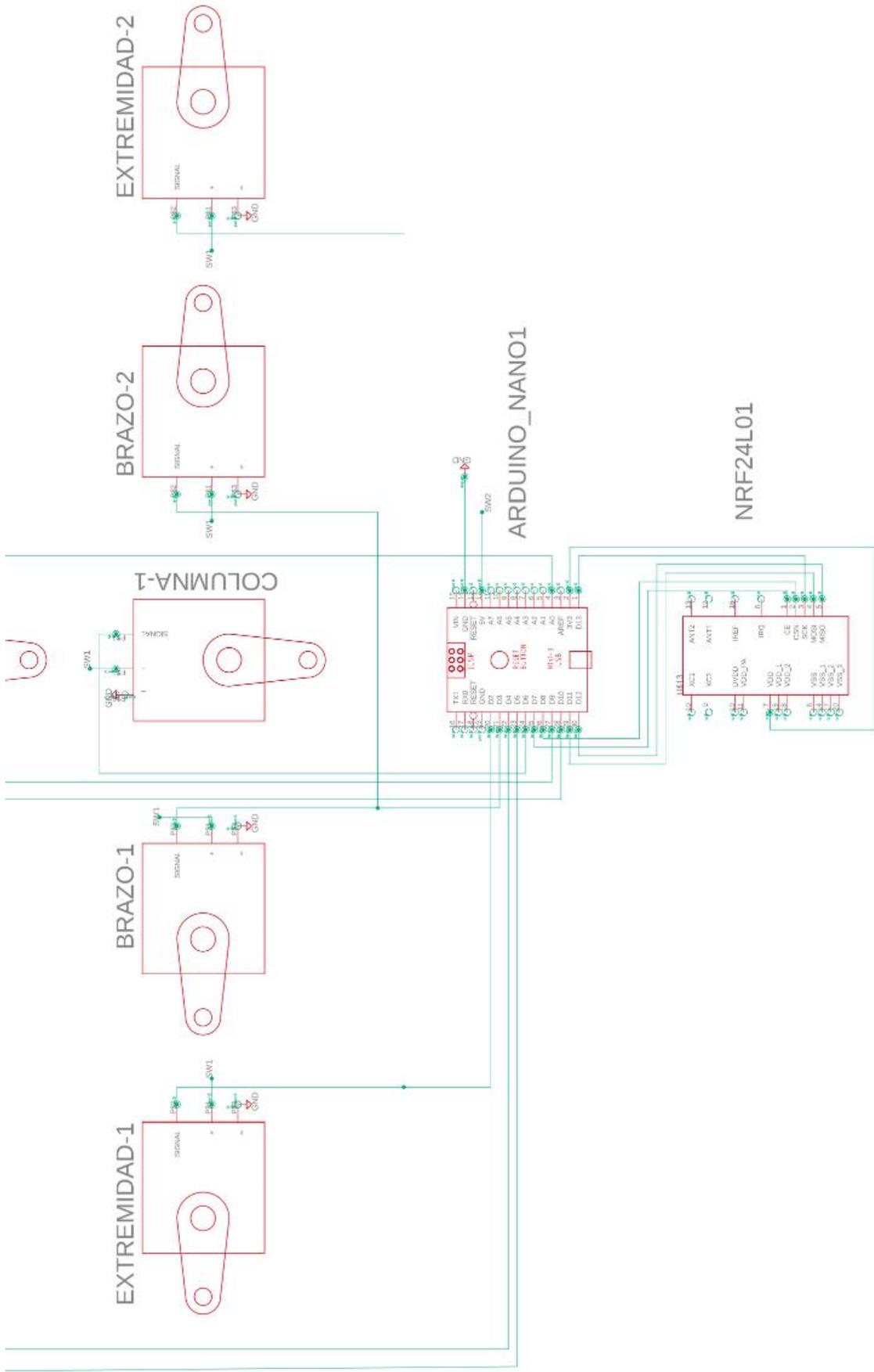


Anexo D. Transceptor nRF24L01: Dimensiones



## Anexo E. Diagrama de conexión de actuadores y microcontrolador





## Anexo F. Código de programación IDE Arduino

```
#include <Servo.h>

Servo servoExtremidad1_2;
Servo servoBrazo1_2;
Servo servoExtremidad3_4;
Servo servoBrazo3_4;
Servo servo1columna;
Servo servo2columna;
Servo servo3columna;
Servo servo4columna;

#define Servo_ext_D 2
#define Servo_br_D 3
#define Servo_ext_T 5
#define Servo_br_T 4
#define Servocolumna1 6
#define Servocolumna2 9
#define Servocolumna3 10
#define Servocolumna4 A0

void setup()
{
  servoExtremidad1_2.attach(Servo_ext_D);
  servoBrazo1_2.attach(Servo_br_D);
  servoExtremidad3_4.attach(Servo_ext_T);
  servoBrazo3_4.attach(Servo_br_T);
  servo1columna.attach(Servocolumna1);
  servo2columna.attach(Servocolumna2);
```

```
servo3columna.attach(Servocolumna3);  
servo4columna.attach(Servocolumna4);  
}
```

```
void loop()  
{  
  caminar();  
}
```

```
void paso1()  
{  
  servoExtremidad1_2.write(35);  
  servoBrazo1_2.write(150);  
  servoExtremidad3_4.write(55);  
  servoBrazo3_4.write(30);  
  servo1columna.write(60);  
  servo2columna.write(50);  
  servo3columna.write(75);  
  servo4columna.write(85);  
  delay(300);  
  servoExtremidad1_2.write(35);  
  servoBrazo1_2.write(30);  
  servoExtremidad3_4.write(55);  
  servoBrazo3_4.write(150);  
  servo1columna.write(100);  
  servo2columna.write(110);  
  servo3columna.write(105);  
  servo4columna.write(95);  
  delay(500);  
  servoExtremidad1_2.write(55);
```

```
servoBrazo1_2.write(30);
servoExtremidad3_4.write(35);
servoBrazo3_4.write(150);
servo1columna.write(100);
servo2columna.write(110);
servo3columna.write(105);
servo4columna.write(95);
delay(300);
servoExtremidad1_2.write(55);
servoBrazo1_2.write(150);
servoExtremidad3_4.write(35);
servoBrazo3_4.write(30);
servo1columna.write(60);
servo2columna.write(50);
servo3columna.write(75);
servo4columna.write(85);
delay(500);
}
void caminar ()
{
  paso1();
}
```