

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Diseño y construcción de cocodrilo animatrónico.

Trabajo de graduación presentado por  
Rudy Gilberto Hernández López  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica  
Guatemala  
2018



Diseño y construcción de cocodrilo  
animatrónico.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Diseño y construcción de cocodrilo animatrónico.

Trabajo de graduación presentado por  
Rudy Gilberto Hernández López  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica  
Guatemala  
2018

Vo. Bo. (f) Pablo Mazariegos  
Ing. Pablo Mazariegos.

**Tribunal Examinador:**

(f) Pablo Mazariegos  
Ing. Pablo Mazariegos

(f) [Signature]  
MSc. Carlos Esquit

(f) [Signature]  
MSc. Miguel Zea.

Fecha de aprobación: Guatemala, 19 de junio de 2018

## **Agradecimientos**

Primero y más importante a Dios, porque en Él todo lo puedo.

A María, auxilio de los cristianos por llevarme de su mano a una casa salesiana, a la educación técnica profesional y a la Universidad del Valle de Guatemala, por nunca dejarme en este tan duro camino.

A San Juan Bosco, por la educación y modelo de vida adquirido en su casa, y por la enseñanza de estar siempre alegre.

A mis Padres, Don Rudy y Doña Lucia a quienes les debo todo y nunca tendré suficiente para pagarles.

A mis hermanas, por el apoyo incondicional y por estar siempre para mi sin importar nada.

A mi sobrino Fabiano, por ser la luz de mi vida y mi fuerza.

A mis viejitos, Don Constantino y Doña catalina, por ser esos abuelitos tan tiernos y cariñosos.

A mis tíos y primos, por estar siempre pendientes de mi desarrollo integral.

A Eddy Escobedo, Amílcar Vásquez, José y Jorge Rivera, Tito Chinchilla, Sergio Saravia, Wilmer López, Bruno López, Luis Ruiz, Paty León; equipo de la empresa Técnica Mecánica Herlo, quienes me dieron un apoyo enorme en la elaboración de este trabajo.

A la gremial de Metal/Mecánica de Guatemala, quienes durante tantos años me han dado su apoyo y amistad.

A Estuardo Mancio, Pablo Mazariegos, Kurt Kellner, Miguel Zea, Luis Pedro Montenegro, Willy Reyes, Lésly Gómez, personal docente y administrativo del departamento de ingeniería Electrónica/Mecatrónica de la Universidad del Valle de Guatemala, amigos, quienes me transmitieron la enseñanza y apoyo, no solo en el aspecto técnico/profesional, si no en la vida.

A mis amigos de toda la vida del Colegio Salesiano Don Bosco, por esa amistad de tantos años y por estar siempre ahí para mí.

A mis amigos de la UVG, ese grupo de raros que decidieron juntarse y hacer amistad, agradezco por haberlos conocido.

Este trabajo de graduación conlleva una dedicación especial a mi tío Hugo Leonel López Guerra, genio incomprendido, quien ha tenido una esmerada atención a mi persona y todos los sobrinos de la familia López, además; por tener una gran responsabilidad en mi deseo de saber el porqué de las cosas.

## Índice

Agradecimientos.....	v
Tabla de figuras.....	ix
<b>Resumen</b> .....	<b>xi</b>
I. Introducción.....	1
II. Objetivos .....	2
A. General: .....	2
B. Específicos:.....	2
III. Justificación.....	3
IV. Marco teórico.....	4
A. El departamento de Izabal: .....	4
B. El castillo de San Felipe: .....	5
C. Cocodrilos en las cercanías del castillo de San Felipe de Lara .....	6
D. El crocodylus acutus .....	6
E. Hábitat del crocodylus acutus .....	8
F. Estructura ósea del crocodylus acutus.....	9
1. Cráneo .....	9
2. Columna vertebral.....	9
G. Principales movimientos de un cocodrilo .....	10
H. Estudio de entorno donde operará el animatrónico.....	11
I. Escaneo 3D .....	12
J. Manipulación de archivos 3D.....	13
1. Autodesk Inventor .....	13
2. Repetier Host .....	14
K. Manufactura digital directa .....	15
L. Tecnología aditiva. ....	15
M. Tecnología sustractiva .....	15
N. Auxiliares tecnológicos.....	16
1. Neumática.....	16
2. Aire comprimido .....	16
3. Compresores de aire .....	16
4. Distribuidores o válvulas neumáticas.....	17

5.	Accionamiento electro pilotado .....	17
6.	Circuito eléctrico .....	18
7.	Computador Lógico Programable (PLC) .....	18
8.	Resortes.....	19
9.	Resortes de extensión .....	19
V.	Metodología .....	21
A.	Desarrollo del sistema mecánico: .....	21
B.	Elementos tensores:.....	21
C.	Scan3D del cráneo:.....	21
D.	Diseño de vertebras para ser impresas en PLA:.....	21
E.	Mando, potencia y actuadores: .....	21
F.	Diseño del sistema neumático: .....	22
G.	Diseño del sistema eléctrico:.....	22
H.	Programa del PLC:.....	22
I.	Diseño e implementación de circuito electroneumático:.....	22
VI.	Resultados.....	23
A.	Manufactura del cocodrilo .....	23
1.	Impresión de vértebras en PLA.....	26
2.	Impresión de cráneo en PLA.....	27
B.	Diseño de elementos que emulan los ligamentos de un cocodrilo. ....	29
1.	Cables acerados .....	29
2.	Hilo de pescar. ....	30
C.	Diseño de resorte que emula la columna vertebral. ....	32
D.	Diseño de mecanismo para movimiento de mandíbula del cocodrilo.....	33
E.	Diseño de actuadores para movimiento del animatrónico.....	34
1.	Actuadores neumáticos flexibles.....	34
2.	Actuadores neumáticos paso a paso .....	35
3.	Pistones neumáticos de doble efecto .....	36
F.	Circuito de mando, potencia y circuito neumático .....	37
G.	Cocodrilo animatrónico terminado.....	38
H.	Programación de PLC y colocación de elementos en gabinete transparente 39	
VII.	Discusión.....	43
VIII.	Conclusiones.....	44

IX. Recomendaciones.....	45
X. <b>Bibliografía</b> .....	46

## Tabla de figuras

Figura 1 Ubicación geográfica de Izabal. ....	4
Figura 2. Representación del Castillo de San Felipe bajo ataque. ....	6
Figura 3. Distribución geográfica de Crocodylus Acutus en América. ....	7
Figura 4. Ejemplar de Crocodylus Acutus en zoológico la Aurora. ....	7
Figura 5. Manglares del área del Lago de Izabal. ....	8
Figura 6. Estructura ósea del Crocodylus Acutus. ....	9
Figura 7. Vértebra de Crocodylus Acutus. ....	9
Figura 8. Distribución de vértebras a lo largo de la columna vertebral. ....	10
Figura 9. Movimiento oscilatorio de un cocodrilo al desplazarse en tierra. ....	11
Figura 10. Atracción del Parque Xetulul en la nueva área de Izabal. ....	11
Figura 11. Precipitación que se presenta en el departamento de Retalhuleu durante gran parte del año, área donde se podría instalar el animatrónico. ....	12
Figura 12. Ejemplos de escáner 3D. ....	13
Figura 13. Entorno de trabajo Software Autodesk Inventor. ....	14
Figura 14. Entorno de trabajo Repetier Host. ....	14
Figura 15. Impresora 3D. ....	15
Figura 16. Centro de maquinado CNC. ....	16
Figura 17. Tipos de compresores de aire. ....	17
Figura 18. Tipos de electroválvulas. ....	17
Figura 19. Ejemplo de circuito eléctrico con mando y potencia. ....	18
Figura 20. PLC Allen Bradley Mikrologix 1100. ....	19
Figura 21. Dimensiones importantes en un resorte. ....	19
Figura 22 Prototipo de estructura osea. ....	23
Figura 23 Prototipo de cola con mecanismo de bisagra. ....	23
Figura 24 Prototipo de cola con resorte. ....	24
Figura 25 Prototipo de cuerpo de cocodrilo con resortes como columna vertebral. ....	24
Figura 26 Escaneo 3D con software 1,2,3D Catch. ....	25
Figura 27. Modelos 3D de osamentas de animales que ofrece la página 3D Horse. ....	25
Figura 28. Modelo en 3D del cocodrilo. ....	26
Figura 29. Vértebras impresas en PLA previo a el tratamiento impermeabilizante. ....	26
Figura 30. Impresora 3D utilizada para la manufactura de las vértebras. ....	27
Figura 31. Vértebra impresa en 3D ....	27
Figura 32. Proceso de pegado del cráneo. ....	28
Figura 33. Sección del cráneo después de ser pegado. ....	28
Figura 34. Aplicación de fibra de vidrio al cráneo. ....	29
Figura 35. Prototipo de cola del cocodrilo con sistema de cables tensores acerados. ....	30
Figura 36. Prototipo de cola de cocodrilo con cables tensores de hilo de pescar. ....	30
Figura 37. Hilos tensores para el movimiento del cráneo. ....	31
Figura 38. Cola del cocodrilo con el sistema de hilos tensores. ....	32
Figura 39. Diagrama de distribución de resorte que emula columna vertebral. ....	33

Figura 40. Cráneo del cocodrilo con sistema de bisagra.....	34
Figura 41. Diagrama neumático de pistón de doble efecto, para mecanismo de mandíbula de cocodrilo. ....	34
Figura 42. Comparación músculos neumáticos y actuadores neumáticos flexibles. ....	35
Figura 43. Motor neumático paso a paso .....	36
Figura 44 Desgaste presentado en el rack.....	36
Figura 45 cilindros neumáticos utilizados en el cocodrilo animatrónico.....	37
Figura 46. Circuito electroneumático del cocodrilo animatrónico. ....	38
Figura 47. Cocodrilo animatrónico colocado sobre la base mimetizada.....	39
Figura 48 Primera parte del programa en Ladder, realizado en RSLogix 500.....	40
Figura 49. Segunda parte del programa en Ladder, realizado en RSLogix 500... ..	41
Figura 50. Tercera parte del programa en Ladder, realizado en RSLogix 500.....	42
Figura 51. Distribución de sistemas de mando y potencia dentro del gabinete ....	42

## Resumen

Se presentó por parte del Gerente del parque Xetulul, la inquietud de idear un conjunto de animatrónicos para inyectar mayor realismo a la nueva atracción llamada Castillo de San Felipe, que es una réplica del castillo original que se encuentra en Río Dulce Izabal. Se buscaba agregar un ser vivo en la parte externa del juego donde se realiza una guerra naval entre barcos piratas, por lo que después de realizar algunas encuestas con las personas que visitan el parque y realizar una investigación sobre los diferentes animales que se encuentran en el entorno, se llegó a la conclusión que el animal adecuado para colocar en este escenario sería un cocodrilo.

Después de investigar sobre el entorno en el que sería colocado el animatrónico, se determinó que estaría en contacto constante con agua, ya fuera que los usuarios le dispararan desde sus barcos o por las constantes lluvias que se presentan en el sector, por lo que la mejor opción es que se construya de materiales que no presenten corrosión en contacto con la humedad, así como una operación electrónica a distancia para evitar problemas de shock eléctrico. Por lo que se utilizaron hilos accionados por actuadores neumáticos ubicados en un espacio libre de humedad donde se encuentra también toda la parte de control y potencia.

Se buscó emular de la mejor manera posible, la forma ósea del cocodrilo por lo que se crearon una a una las vértebras del reptil, así como su columna vertebral, con la ayuda de resortes, que se flexionan por medio de hilos que hacen la función de tendones y ligamentos. Todo es accionado con la ayuda de un PLC Mikrologix 1100 que está programado con diferentes rutinas de movimiento.

# I. Introducción

Desde el nacimiento de la robótica, se ha intentado imitar el aspecto y comportamiento de seres vivos, con la finalidad de utilizar los robots para realizar ambientación de algunos escenarios, para que puedan realizar escenas que con especímenes vivos sería peligroso, o simplemente para materializar un ser que es producto de la imaginación de los diseñadores.

Un animatrónico, es conjunto de elementos mecánicos y electrónicos que con la ayuda de un traje creado a partir de polímeros o imitaciones de bello corporal o piel, logran emular de forma natural los movimientos y aspecto de un ser vivo u objeto al que se le pueden atribuir características humanas para proveerle de vida.

Los animatrónicos, han sido usados desde principios de los años 70 en parques temáticos y museos, haciendo que la visita a estos lugares sea inolvidable y tengan una mejor interacción con los visitantes.

En la actualidad, no todas las personas tienen la posibilidad de viajar a diferentes lugares del mundo, donde viven ciertas especies de animales que probablemente son endémicas del área, de manera que, una de las formas de educar a los visitantes, es por medio de un robot animatrónico que imite con naturalidad los movimientos corporales del animal que se desea exhibir.

La industria de la robótica y en especial, de la animatrónica, es una de las más caras a nivel mundial, teniendo ejemplares que pueden llegar a costar millones de dólares. Dentro de la visión de este trabajo de graduación, está poner al alcance del público en general, un animatrónico que pueda construirse en Guatemala, con tecnología moderna disponible.

## II. Objetivos

### A. General:

- Crear un cocodrilo animatrónico, que sea accionado con ayuda de actuadores neumáticos y comandado por PLC.

### B. Específicos:

- Imprimir los elementos en PLA, que imiten la estructura ósea de un cocodrilo.
- Diseñar e implementar un sistema de hilos tensores, que representen los ligamentos de un cocodrilo.
- Diseñar un mecanismo a base de resortes, que realice los movimientos naturales de una columna vertebral.
- Generar con un escaneo 3D, un modelo del cráneo de un cocodrilo, para que éste posteriormente, sea impreso y colocado en el animatrónico.
- Diseñar un Circuito eléctrico/neumático, que accione y controle, los actuadores neumáticos.
- Implementar un PLC, que realice el procesamiento de las señales de entrada y salida para el funcionamiento del animatrónico.
- Realizar un programa para un PLC, que comande los movimientos del cocodrilo animatrónico.

### **III. Justificación**

El hecho de comprar un animatrónico, significa un desembolso grande para cualquier parque de diversiones, en especial, en este caso, en el que el animatrónico tendría que ser pedido bajo especificaciones adecuadas para el entorno en el que será colocado, además, se debe incluir el costo de envío desde el extranjero hacia Guatemala.

La inversión en una atracción de este tipo, fluctúa entre \$2,500.00, en su versión básica donde solamente abre la boca, hasta \$20,000.00, en una versión que puede desplazarse y mover el cuerpo entero. Debe estimarse el costo de envío y el de los requerimientos específicos para que el animatrónico se use a la intemperie, de acuerdo a las circunstancias del medio ambiente.

El diseño y construcción de animatrónicos en Guatemala, abriría las puertas a una nueva industria de entretenimiento, el público tendría acceso a estas atracciones que, en la actualidad, solo pueden ser observadas en grandes parques temáticos como Disneylandia o Universal Estudios, además; Guatemala, se convertiría en pionero de la región, en la fabricación y exportación de animatrónicos a países vecinos, se brindaría también, los servicios de mantenimiento preventivo/correctivo.

Se estima que el costo de producir este modelo de animatrónico dependerá totalmente de la calidad del equipo que se desee utilizar, estableciendo tres calidades las cuales son:

Alta: \$2000.00 (movimiento completo del esqueleto)

Media: \$1500.00 (movimiento de cola, cuello y mandíbula)

Estándar: \$800.00 (movimiento de mandíbula)

Para fines de este trabajo, se decidió manufacturar la calidad media, ya que se considera que es la que logrará mostrar los conocimientos adquiridos durante la carrera a un precio razonable.

## IV. Marco teórico

### A. El departamento de Izabal:

El significado del nombre Izabal es “donde se suda constantemente”, según el libro de las Geonomías de Guatemala, este departamento abarca un amplio territorio de aproximadamente 9,000 kilómetros cuadrados, en los que se encuentran grandes montañas, amplios ríos que alguna vez fueron navegables, una variada flora y fauna. Su privilegiada ubicación lo transformó en tiempo de la colonia, en un paso forzado para los barcos mercantes, de ahí proviene su riqueza étnica, lingüística y pluricultural. (Martinez, 2015)

Este departamento es rico en flora y fauna, gracias a que grandes extensiones de tierra son área protegidas. En sus ríos, humedales y pantanos, se observa gran variedad de especies, que han sido parte de las tradiciones orales de los lugareños, agregándole sabor a las resonantes historias de los sanguinarios bucaneros que exploraron tan mágicas aguas. (Martinez, 2015)

Dentro de las principales historias que se cuentan entre los ancianos del área, están las incursiones de piratas en el río Motagua, llegando a las regiones de Zacapa y el Progreso Guastatoya. Las famosas sirenas que describen algunos lugareños, realmente eran manatíes, que los bucaneros confundían por las noches, con sirenas, por la similitud del área pectoral y la forma de la cola y las fantásticas historias de los monstruos marinos que cuidaban el castillo de San Felipe para evitar los saqueos. (Martinez, 2015)

*Figura 1 Ubicación geográfica de Izabal.*



(wikipedia, 2018)

## B. El castillo de San Felipe:

Durante el periodo colonial, el comercio de Guatemala se centraba en el sistema acuático del llamado Golfo Dulce (lago de Izabal), Río Polochic y Río dulce, situación que provocó que esos lugares fueran objeto de atención por parte de piratas como Drake Morgan, Pie de Palo, Antonio Sherlyn Yanques, entre otros, la seguridad de las embarcaciones que comerciaban con Guatemala se convirtió en una de las principales preocupaciones de los gobernantes. La primera persona que presentó interés en ese tema de la seguridad, fue el presidente de la Real Audiencia, Gobernador y Capitán General de Guatemala, Francisco de Sandé, quien escribió en el año 1555 al monarca español, relatándole los hechos que se suscitaban, asegurándole que buscaría una solución a los constantes robos; la solución encontrada fue construir una torre en un promontorio del lado noreste del lago de Izabal, buscando como punto estratégico, el desagüe del Río dulce, que es el área más angosta del lago de Izabal. (Martinez, 2015)

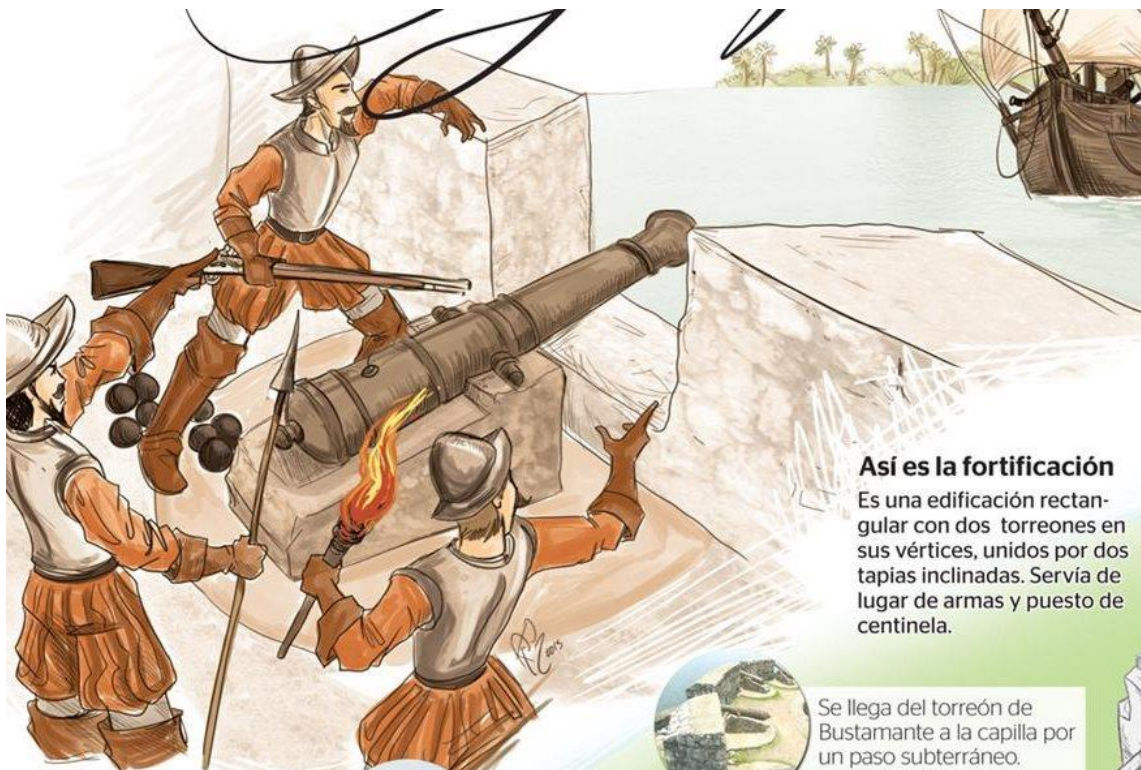
Siendo el año 1643, por orden en ese tiempo, del gobernante, licenciado don Diego de Avendaño, se encomendó al Ingeniero José Bustamante, la construcción de un torreón. En el año 1651 el oidor licenciado don Antonio de Lara, trasladó la alcaldía mayor de Santo Tomas de Castilla al torreón y artilló el fuerte al que llamó San Felipe, en honor al príncipe reinante. El 27 de abril de 1684, se dio la alarma por parte los vigías, que embarcaciones desconocidas que se acercaban al castillo. Al tocar tierra, desembarcaron gran cantidad de piratas que atacaron el castillo, las fuerzas armadas que se encontraban en el lugar se rindieron, el castillo fue quemado, dando paso al saqueo. Este suceso motivó a la Corona a enviar a sus representantes para realizar una inspección del lugar, obteniéndose como resultado en el año de 1684, la recomendación para hacer una nueva construcción, la anterior, no estaba diseñada para soportar muros más altos y era vulnerable a los ataques desde tierra. (Martinez, 2015)

En el año 1687 llegó al puerto donde se ubicaba el castillo, el general Jacinto Barrios Leal, a su arribo a Guatemala, se hizo cargo de la Capitanía General del Gobierno. Durante una de sus visitas a la región del golfo, presencié una nueva invasión. el general Barrios ordenó que se destinaran fondos para la construcción de un nuevo fuerte que protegiese el golfo. En 1688, comenzaron las obras de reconstrucción, modificando de forma sustancial el diseño del castillo. Este proyecto estuvo a cargo del ingeniero militar don Andrés Ortiz de Urbina, por orden de don Jacinto Barrios Leal. (Martinez, 2015)

En 1797, se construyeron las baterías de San Carlos, San Felipe, Santiago y dos cuarteles conocidos como Buenavista y Santiago, edificaciones que a la par del castillo, estaban de acuerdo con el plan de defensa que diseñó el ingeniero Sierra. En el año 1824, durante la época independiente, después de haber representado un punto primordial en la defensa de los bienes de la Capitanía, se ordenó por parte del gobierno de la Republica Federal la intervención del castillo, que desembocó en un proceso de olvido de las instalaciones, con el transcurso del tiempo, se habilitó el castillo, y fue convertido en cárcel. (Martinez, 2015)

A continuación, el castillo pasó a manos del instituto guatemalteco de turismo, sus autoridades lo remozaron y lo convirtieron en atracción turística. (Martinez, 2015)

Figura 2. Representación del Castillo de San Felipe bajo ataque.



(Martinez, 2015)

### C. Cocodrilos en las cercanías del castillo de San Felipe de Lara

Según algunas leyendas de los lugareños, en los canales alrededor del castillo se encontraban furiosos cocodrilos que eran alimentados por parte de los militares que lo resguardaban, proveyendo una protección extra por parte de estos reptiles ante los ataques de los sanguinarios piratas.

Cuando el castillo fue convertido en cárcel, se amenazaba a los privados de libertad, con ser lanzados a los cocodrilos, si éstos, no respetaban los lineamientos que se les establecían.

Estos reptiles han habitado estas áreas por millones de años, se han presentado casos en los que se identifican los lugares donde los cocodrilos pueden obtener alimento de manera fácil, frecuentando el área para obtener comida sin mayor esfuerzo. De lo anterior, se puede concluir cierta lógica sobre estas historias. (Mejicanos, 2017)

### D. El *Crocodylus acutus*.

También llamado cocodrilo americano, es la especie de cocodrilo de mayor distribución de ejemplares en América, esta especie abarca 29 países y su distribución

comprende desde el atlántico en el extremo sur de la Florida y las islas de Cuba, Jamaica, República Dominicana y Haití, hasta los hábitats costeros de manglar en el norte de Perú, esta especie se encuentra hasta los 1200 metros sobre el nivel del mar. (Vitt & Caldwell, 2014)

*Figura 3. Distribución geográfica de Crocodylus Acutus en América.*



(wikipedia, 2018)

Se caracterizan por ser reptiles de gran tamaño, se han registrado ejemplares de hasta 6 metros, aunque en la actualidad es raro observar un cocodrilo de más de 5 metros. Su cabeza es estrecha y de forma puntuda, de aquí el sobre nombre de caimán de aguja, el morro es ligeramente curvado con dientes sobresalientes. Dentro de sus características llamativas, se encuentran su capacidad para vivir tanto en aguas dulces como salobres, gracias a glándulas especializadas que ayudan a secretar el exceso de sal a través de los parpados, de esta capacidad nació el dicho "lágrimas de cocodrilo". Gracias a su metabolismo ectotermo, les permite pasar varios días sin comer y hasta 2 horas sin respirar. (Vitt & Caldwell, 2014)

*Figura 4. Ejemplar de Crocodylus Acutus en zoológico la Aurora.*



Este cocodrilo presenta un temperamento agresivo, ataca al sentirse amenazado, es usual en las hembras que se encuentran al cuidado de los nidos, son estrictamente territoriales. Son cazadores de emboscada, suelen esperar a que sus presas se acerquen lo suficiente para atacar, pese a su apariencia lenta, los cocodrilos son muy rápidos en distancias cortas aún fuera del agua, utilizando su cola como un medio de defensa o como una extremidad extra para impulsarse. (Vitt & Caldwell, 2014)

#### E. Hábitat del *Crocodylus acutus*

Se encuentra especialmente en hábitats costeros tales como lagunas, manglares y otras aguas salobres. Sin embargo, también puede habitar en agua dulce y depósitos de agua que no están cerca del mar.

En Guatemala, en la región de Izabal, se encuentra en áreas pantanosas o en manglares, se han visto algunos ejemplares adentrarse en el área de la bahía de Amatique. Con frecuencia, se le ve en algunas playas tomando el sol y a las hembras, cuidando los nidos para evitar el ataque de los depredadores. (Vitt & Caldwell, 2014)

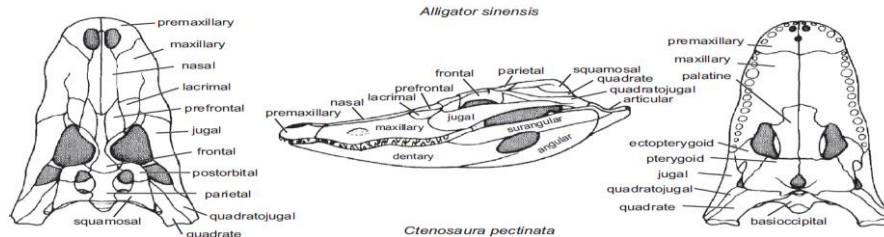
Figura 5. Manglares del área del Lago de Izabal.



## F. Estructura ósea del *Crocodylus acutus*

1. Cráneo. El cráneo del cocodrilo cuenta con 30 huesos en total, que son fusionados por suturas excepto en la articulación temporo-maxilar, que es de tipo bisagra. En la porción rostral se encuentran dos orificios nasales fusionados que se conectan con las coanas, el paladar está formado por 3 huesos simples que separan las dos cavidades palatina y nasal. (Vitt & Caldwell, 2014)

Figura 6. Estructura ósea del *Crocodylus Acutus*.

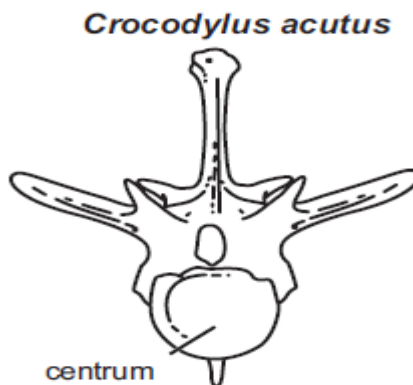


(Vitt & Caldwell, 2014)

2. Columna vertebral. La columna vertebral de un cocodrilo se divide en 5 regiones, cada una compuesta de cierto número de vértebras dependiendo de la edad o el sexo.

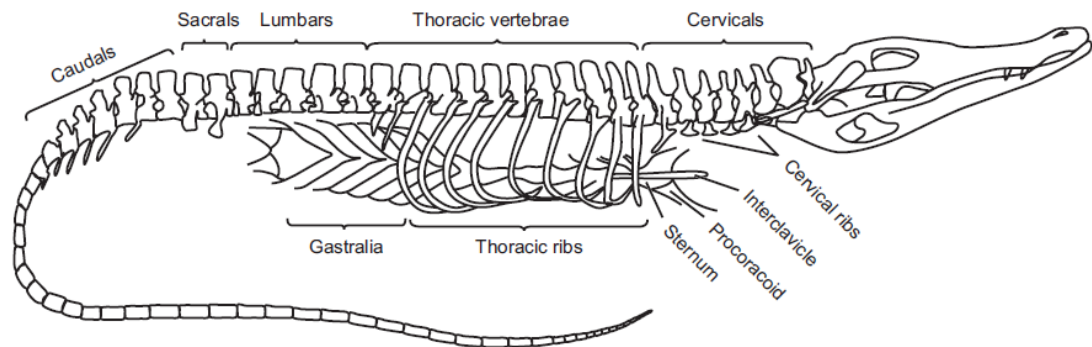
Área de la columna vertebral	Número de vertebras.
A) Cervical	8 a 9
B) Torácica	10 a 11
C) Lumbar	4 a 5
D) Sacra	2 a 3
E) Caudal	32 a 45

Figura 7. Vértebra de *Crocodylus Acutus*.



(Vitt & Caldwell, 2014)

Figura 8. Distribución de vértebras a lo largo de la columna vertebral.



(Vitt & Caldwell, 2014).

### G. Principales movimientos de un cocodrilo.

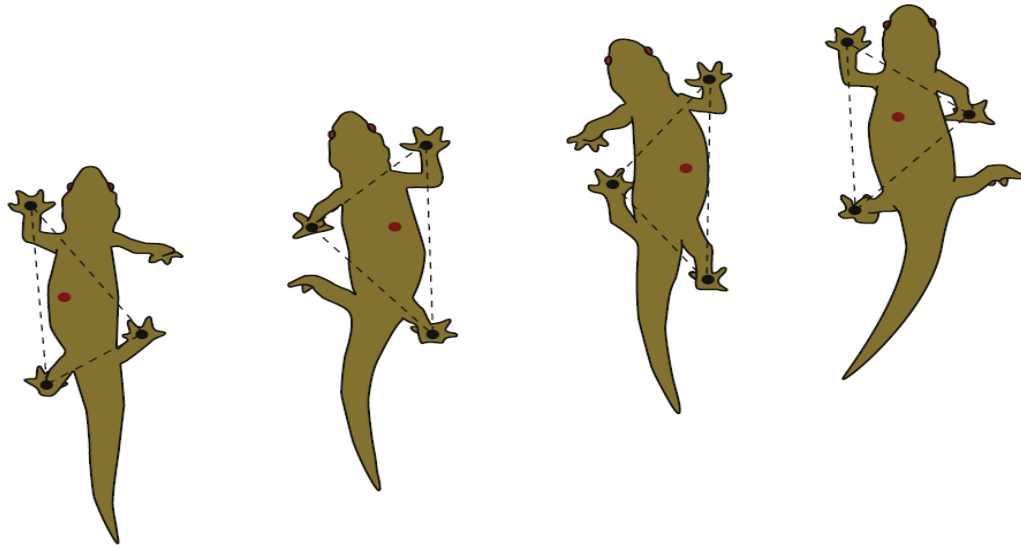
En los cocodrilos, la cola puede tomarse como el principal órgano de locomoción, está formada de músculos bastante desarrollados y muy trabajados por la vida diaria del cocodrilo. Al momento de nadar, los cocodrilos crean una ola desde la punta del hocico hasta el final de la cola, teniendo la capacidad de estar bajo el agua por casi 2 horas sin respirar. (Vitt & Caldwell, 2014).

Al momento de salir del agua y adentrarse en tierra, los cocodrilos cuentan con 4 patas cortas, las extremidades anteriores cuentan con cinco dedos sin interdigitaciones y las posteriores disponen de cuatro dedos y vestigios de un quinto, estos dedos cuentan con una fuerte membrana que es utilizada para impulsarse en el agua. (Vitt & Caldwell, 2014).

Al incursionar en tierra, los cocodrilos siguen una secuencia en la que las patas delanteras y traseras de un lado del cuerpo se juntan cuando el cuerpo se mueve hacia ese lado y luego se separan cuando el cuerpo se desplaza al lado contrario. Los cocodrilos agitan sus largas colas de un lado para otro en sincronía con estos movimientos. (Vitt & Caldwell, 2014)

En algunas ocasiones al verse atrapados en lodo, utilizan los movimientos oscilatorios de la cola para deslizarse y de esta forma desplazarse de forma rápida. Los cocodrilos no suelen ser rápidos, al caminar alcanzan una velocidad máxima de entre 2 y 4 km/h, sin embargo, si estos están en reposo y necesitan escapar o atacar logran tener un estallido de energía, alcanzando grandes velocidades, pero solo por un lapso corto de tiempo, por esta razón al momento de querer atrapar a un espécimen de este tipo primero se trata de cansarlo para evitar cualquier peligro. (Vitt & Caldwell, 2014)

Figura 9. Movimiento oscilatorio de un cocodrilo al desplazarse en tierra.



(Vitt & Caldwell, 2014).

#### H. Estudio de entorno donde operará el animatrónico.

El cocodrilo animatrónico es una propuesta para la tematización de la nueva atracción del IRTRA de Retalhuleu, esta consiste en una representación del castillo de San Felipe, forma parte de la nueva área del parque que representa al caribe guatemalteco. Esta representación del castillo tiene una relación específicamente marcada con las historias de los piratas que saquearon tantas veces la región del golfo.

El juego consiste en subir a un barco pirata y empezar una guerra de agua en contra del resto de barcos, que van moviéndose alrededor de las islas colindantes a la representación del castillo, en una de estas islas, se colocará el cocodrilo que estará al acecho y listo para atacar, se encuentra cuidando su nido.

Figura 10. Atracción del Parque Xetulul en la nueva área de Izabal.



(Irtra,2018)

El animatrónico, está preparado para ser utilizado en ambientes donde hay presencia de humedad; está desarrollado para operar donde se presenta un clima lluvioso la mayor parte del año. Por esta razón, los materiales elegidos para la manufactura son completamente a prueba de agua, y los actuadores trabajan con accionamiento a distancia por medio de señales neumáticas.

*Figura 11. Precipitación que se presenta en el departamento de Retalhuleu durante gran parte del año, área donde se podría instalar el animatrónico.*



Es conveniente informar que el animatrónico estaría rodeado por una piscina, además de estar expuesto y ser un blanco para los usuarios al tener a su disposición, cañones de agua que son parte de la temática del juego para mojar a los usuarios de otros barcos.

## I. Escaneo 3D.

El propósito de este tipo de tecnología, es crear una nube de puntos a partir de muestras geométricas en la superficie de un objeto. Los puntos que se obtienen son utilizados para extrapolar la forma externa o superficial de un objeto. El modelo obtenido por un escáner 3D, describe la posición en el espacio tridimensional de cada uno de los puntos analizados.

Figura 12. Ejemplos de escáner 3D.



(3D natives, 2016).

## J. Manipulación de archivos 3D.

Los archivos obtenidos posterior a los escaneos 3D, presentan algunas deficiencias o ciertas superficies que no pueden ser manufacturadas de forma correcta, se debe tener la posibilidad de modificar estos archivos.

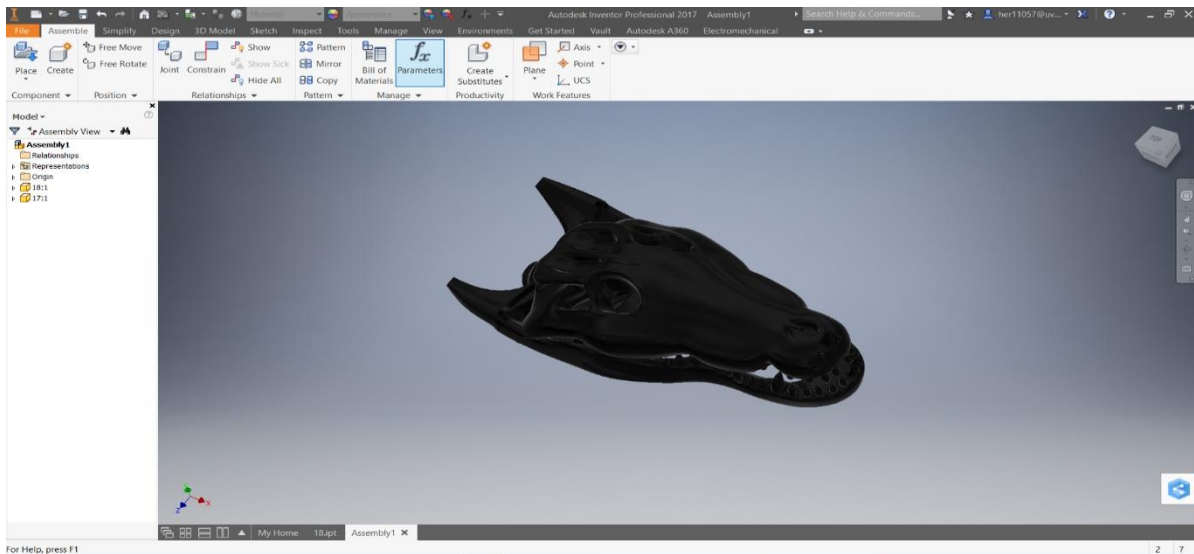
Los softwares que se utilizan, son del tipo vectorial y hay tanto de paga como de uso libre. A continuación, se listan los utilizados en este proyecto.

1. Autodesk Inventor. Este es un software CAD que ofrece un conjunto de herramientas para diseño mecánico en 3D, provee documentación y simulación. Realizar prototipado digital con este software, se vuelve fácil, utilizando las herramientas integradas para hacer análisis de esfuerzos, además; de animaciones, para establecer si un diseño funciona o realiza los movimientos adecuados antes de manufacturarlo, logrando de este modo, bajar costos al momento de prototipar.

Dentro de sus principales características, está la de ensamblar varias piezas que han sido diseñadas por separado y al momento de ejecutar una modificación en el archivo original de la pieza, se corregirá también en el ensamblaje.

Se presentan extensas bibliotecas, para utilizar elementos estandarizados que se pueden integrar a los diseños cumpliendo con normativas internacionales, entre estos, el asistente para crear resortes, que son de especial interés en el desarrollo de este trabajo, por ser el elemento elegido para emular la columna vertebral del cocodrilo animatrónico.

Figura 13. Entorno de trabajo Software Autodesk Inventor.

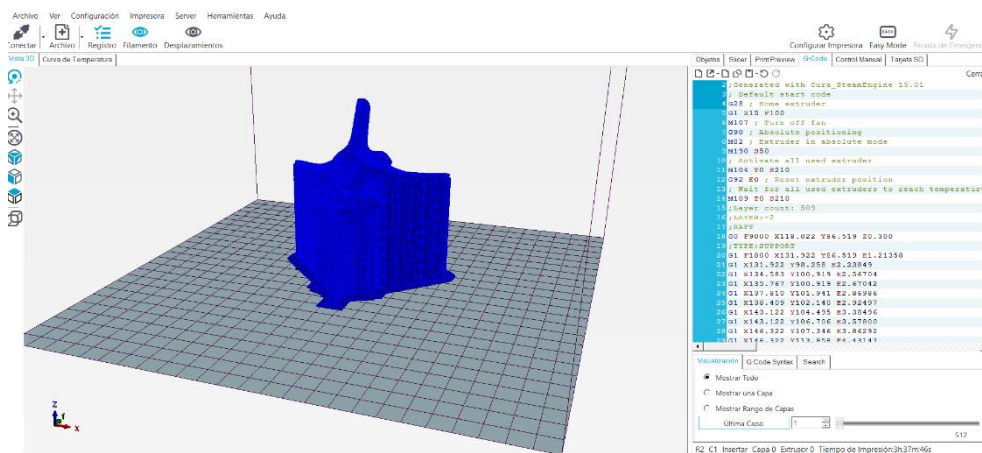


2. Repetier Host. Este es un programa completamente gratuito y de adquisición libre, sirve para gestionar la conexión entre un ordenador y la impresora 3D, en especial, traducir a un lenguaje que pueda comprender una impresora 3D, los archivos en extensión STL que se obtienen al realizar un diseño CAD en cualquier programa de diseño 3D.

Este programa sirve también para programar los valores adecuados para el correcto funcionamiento de la impresora 3D, tales como temperatura, velocidad de extrusión, área y calidad de la impresión.

Su principal función, es realizar un corte transversal en capas de el objeto 3D para imprimirlo capa por capa, agregando material por parte del extrusor. El archivo que se obtiene es un código G.

Figura 14. Entorno de trabajo Repetier Host.



### K. Manufactura digital directa.

Es el proceso de fabricación, que crea piezas físicas a partir de archivos CAD 3D o archivos de datos, utilizando maquinaria controlada por un ordenador con una mínima intervención humana.

### L. Tecnología aditiva.

En este proceso, un archivo 3D es convertido en un objeto físico, mediante la adición capa por capa de material, puede ser plástico, resina, metal, papel, entre otros. El término comúnmente usado como sinónimo de fabricación aditiva es el de impresión 3D. La fabricación aditiva, se inicia a partir de la creación de un archivo 3D mediante un programa de modelado. Luego de ese primer paso, el archivo es convertido en otro de control numérico, que puede ser interpretado por una impresora 3D y se especifica cuáles son los lugares donde debe y donde no, dejar el material, mediante el proceso por capas, se dice que se hace una fase de “slice” o corte en capas.

*Figura 15. Impresora 3D.*



(FLSUN, 2018)

### M. Tecnología sustractiva.

En esta tecnología a diferencia de la aditiva, el proceso de manufactura consiste en restar material de una masa. En este tipo de proceso hay diferentes técnicas, puede ser la pieza la que gire y una herramienta de corte esté fija, o que la herramienta de corte gire y la pieza esté en reposo, fija a una mesa de trabajo.

El uso de cada una de estas técnicas, depende de cuál sea el acabado que se quiera obtener en la pieza. En el caso de las máquinas de control numérico, el proceso es similar al de las tecnologías aditivas, con la diferencia que, en este caso, se le indica en que partes debe restar material. Otra particularidad muy importante, es que en el programa o código G, debe indicarse que herramienta será la encargada de ejecutar el

desbaste del material en esa área. Se necesita preparación y experiencia por parte de los técnicos encargados de realizar estos procesos.

*Figura 16. Centro de maquinado CNC.*



(HAAS, 2018).

## N. Auxiliares tecnológicos

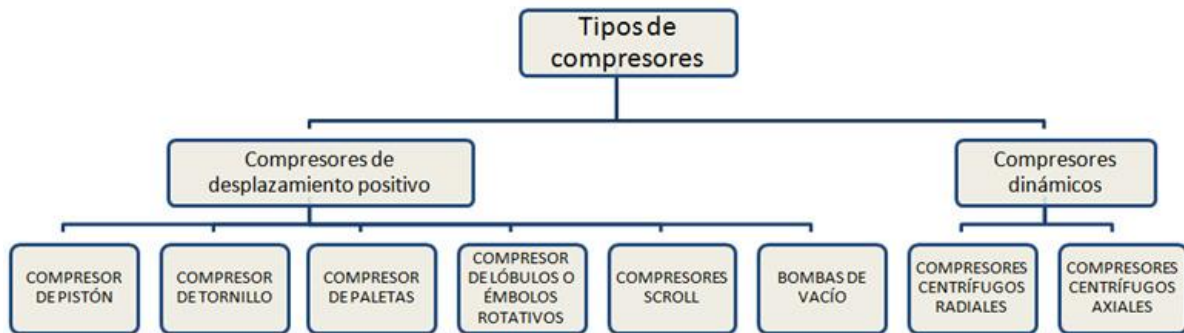
**1.** Neumática. Tecnología capaz de hacer uso del aire comprimido como vehículo para transmitir energía.

**2.** Aire comprimido. Es el aire compactado por medios mecánicos, confinado en un reservorio a una determinada presión. A diferencia de los líquidos, que son teóricamente incompresibles, el aire es de fácil compresibilidad y puede almacenarse en grandes cantidades en recipientes relativamente pequeños.

A pesar de ser relativamente fácil almacenar el aire comprimido, debe tomarse en cuenta que los recipientes utilizados, deben ser resistentes, en función de qué tanto se comprima el aire, entre más se comprima, mayor será la presión a la que está sometido el recipiente.

**3.** Compresores de aire Un compresor de aire, es una máquina diseñada y construida para provocar un aumento en la presión del aire, este dispositivo puede ser utilizado de forma intermitente o continuo, dependiendo de la aplicación y la necesidad.

Figura 17. Tipos de compresores de aire.



4. Distribuidores o válvulas neumáticas. Son las partes del circuito neumático, encargados de controlar los impulsos que hacen mover los cilindros, los distribuidores con sus diferentes sistemas de mando, conducen el aire comprimido hacia los cilindros, motores neumáticos y bombas de vacío, para que éstos efectúen dentro del automatismo, la función encomendada.

Dependiendo del número de vías con las que cuenta un distribuidor se clasifican de la siguiente forma.

Figura 18. Tipos de electroválvulas.

	Válvula 2/2 normalmente cerrada		Válvula 3/3 con posición neutra normalmente cerrada
	Válvula 2/2 normalmente abierta		Válvula 4/3 con posición neutra normalmente cerrada
	Válvula 3/2 normalmente cerrada		Válvula 4/3 con posición neutra a escape
	Válvula 3/2 normalmente abierta		Válvula 5/2
	Válvula 4/2		Válvula 5/3 en posición normalmente cerrada
	Válvula 4/2 normalmente cerrada		Válvula 5/3 en posición normalmente abierta

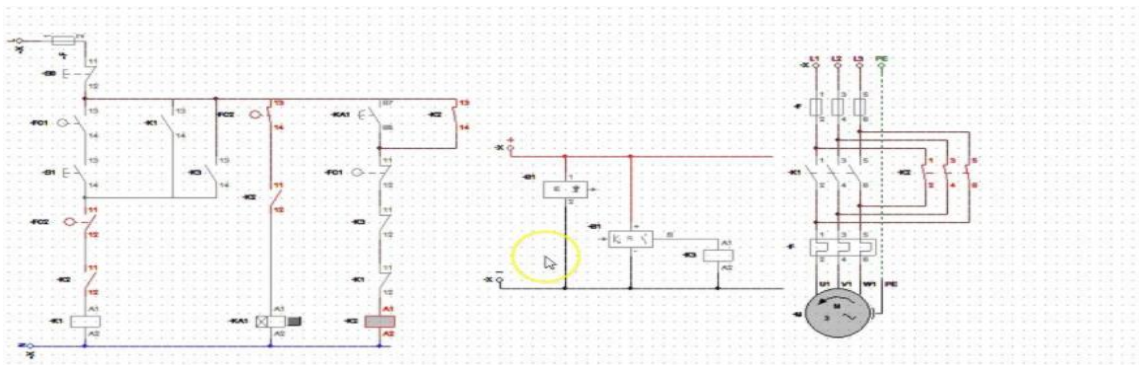
5. Accionamiento electro pilotado. Cuando es necesario efectuar movimientos en multitudes de actuadores neumáticos de una forma remota, es preciso utilizar distribuidores de mando eléctrico o electro pilotado, como enlace entre ambos tipos de energía. Las electroválvulas o electro distribuidores son los encargados de transformar las señales eléctricas en señales de tipo neumático.

**6. Circuito eléctrico.** Es un conjunto de elementos eléctricamente conectados, que conforman un camino cerrado por donde fluye la corriente eléctrica para realizar un trabajo.

En el área de control automático, se reconoce un área de mando y una de potencia, están eléctricamente separadas por medio de interruptores electro mecánicos.

El área de mando se maneja en bajo voltaje, con señales de 120 voltios AC, o 24 voltios DC. Por otro lado, el área de potencia dependerá del equipo que se desea operar.

*Figura 19. Ejemplo de circuito eléctrico con mando y potencia.*



**7. Computador Lógico Programable (PLC).** Este dispositivo, es ampliamente conocido en la industria como PLC. Un PLC es un dispositivo electrónico utilizado en el área de la automatización de procesos, como un procesador de señales de entrada que después de cumplir ciertas condicionales previamente programadas, ejecuta salidas que hacen que los actuadores realicen el trabajo asignado.

Estos dispositivos, dependiendo del modelo y la marca, son capaces de procesar entradas de tipo digital, analógicas o de comunicación en diferentes protocolos. Los Computadores lógicos programables pueden compararse dentro de un circuito de automatización como el “cerebro” que es el encargado de tomar las decisiones, validando diferentes condicionales del proceso que han sido establecidas.

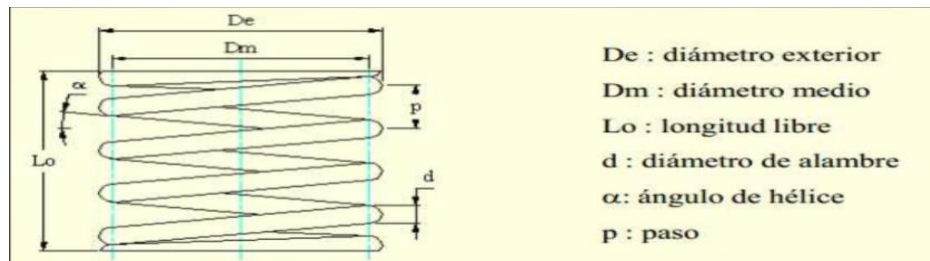
Un PLC, es adecuado para todo aquel proceso que tenga fases repetitivas o condicionales, que lleven a realizar una operación alterna al momento de presentarse una contingencia. En general, se desea minimizar el error humano al realizar una correcta operación de un equipo o la ejecución de un proceso.

Figura 20. PLC Allen Bradley Mikrologix 1100.



**8. Resortes.** Componentes mecánicos que presentan una gran elasticidad, se caracterizan por absorber considerables deformaciones bajo la acción de una fuerza exterior, recuperando su forma inicial al dejar de ser forzados.

Figura 21. Dimensiones importantes en un resorte.



(Aguilar, 2017)

Los resortes pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Según su forma: helicoidales cilíndricos, helicoidales cónicos, en espiral, laminares.
- Según la forma de su sección transversal: Circulares, cuadrado y rectangulares.
- Según el tipo de carga que soportan: De compresión de tracción, de torsión, de flexión.

Para la aplicación en el animatrónico, se pondrá especial atención en los resortes de extensión que serán los utilizados como columna vertebral del cocodrilo.

**9.** Resortes de extensión. Estos resortes están diseñados para soportar esfuerzos de tracción, cuando son sometidos a la acción de fuerzas opuestas que lo atraen, pueden usarse en diferentes longitudes y calibres de alambre, se caracterizan por ser de bobina o espira cerrada, donde las vueltas unidas suministran la tensión inicial

en el resorte para ayudar a manipular la carga y la velocidad de accionamiento. (Aguilar, 2017)

## V. Metodología

Este trabajo de graduación se desarrolló durante cuatro semestres, se estructuró en los siguientes módulos.

### A. Desarrollo del sistema mecánico:

En este apartado se incluye toda la parte móvil del cocodrilo animatrónico, que comprende el diseño del mecanismo flexible que atraviesa las vértebras, así como la forma de unir cabeza tronco y cola para que los mismos sean desmontables para un fácil transporte.

Se utilizaron resortes de acero inoxidable, para unir las vértebras de forma que hagan el trabajo de articulaciones, la idea es que los resortes ayuden a que el sistema mecánico posea memoria y al no presentarse ninguna fuerza externa, regrese a su posición de descanso predefinido.

### B. Elementos tensores:

Las vértebras del cocodrilo poseen armellas en los costados en donde pasan elementos tensores que llegan hasta puntos estratégicos, dividiendo el cuerpo en tres grandes grupos:

Grupo1: Cola

Grupo2: Tórax

Grupo3: Cuello y cabeza.

Estos cables llegan al final de cada grupo y con tensión proporcional, emulan los movimientos reales de un cocodrilo.

### C. Scan3D del cráneo:

Con el apoyo del departamento de Biología de la Universidad del Valle de Guatemala, a través del experto en Herpetología Daniel Ariano, se tuvo acceso a un cráneo real de cocodrilo, con el Software 1,2,3D catch, se obtuvo una imagen tridimensional que se exportó a un archivo STL.

### D. Diseño de vertebras para ser impresas en PLA:

Las vértebras fueron obtenidas y modificadas una a una, empleando un software CAD, la idea es que se vea la forma en que las vértebras van reduciendo su tamaño conforme se van acercando a la punta de la cola. Cada vértebra tiene el alojamiento donde ingresa el resorte, de esta forma, el sistema podrá ser de fácil ensamblaje y desensamblaje para realizar mantenimientos o reemplazar piezas.

### E. Mando, potencia y actuadores:

Se requiere que el animatrónico sea completamente autónomo, por ese motivo, se diseñaron los circuitos tanto neumáticos como eléctricos para que pueda operar de forma automática; en la parte de actuadores, se estudiaron tres opciones de actuadores, actuadores neumáticos flexibles, motores paso a paso neumáticos y pistones neumáticos. Eligiendo el que mejor se adaptó a las necesidades del animatrónico.

#### F. Diseño del sistema neumático:

Con la asesoría de expertos del Grupo Acisa, se procedió a elegir las electroválvulas, los actuadores, presiones y diámetros de mangueras adecuados, para el correcto funcionamiento del animatrónico.

#### G. Diseño del sistema eléctrico:

El animatrónico estará en un ambiente hostil, el sistema eléctrico debe estar resguardado y operar a distancia del cocodrilo, por lo que las bobinas de las electroválvulas y el computador lógico programable, se colocaron en una caja a prueba de agua, de donde sale tubería LT que protege las mangueras de aire y cables, ambos en tuberías diferentes; se tiene la posibilidad de utilizar un control manual que se encuentra en el interior de la caja, es para uso exclusivo de mantenimiento y calibraciones.

#### H. Programa del PLC:

Se utilizó un PLC Allen Bradley Mikrologix 1100, para desarrollar un programa de rutinas de movimiento, que pueden ser controladas con botones o en su defecto, sensores de proximidad, para que al detectar la presencia de los barcos realice movimientos previamente determinados. El programa es monitoreable por medio de una computadora, que puede ser conectada a una red inalámbrica, para manejarse de forma remota, con un smartphone o una tablet.

#### I. Diseño e implementación de circuito electroneumático:

Posterior a las pruebas que se realizaron con los actuadores neumáticos impresos, se determinó que el desgaste presentado ante la operación era muy alto, por lo que se eligieron cilindros neumáticos de acero inoxidable, para evitar problemas con la humedad, además, son modelos estándar que pueden ser sustituidos con facilidad y pueden adquirirse con cualquier distribuidor del país, al indicar la longitud de la carrera y el diámetro. Se eligieron cilindros de doble efecto, con electroválvulas cinco vías dos posiciones, con reguladores de caudal para graduar la velocidad con la que los pistones salen y entran.

Estos módulos fueron ejecutados según un cronograma semanal, en el que se detalla cada una de las actividades que se realizaron,

## VI. Resultados

### A. Manufactura del cocodrilo

Como primer paso se realizó un prototipo modificando un esqueleto en madera de un TRex, el mismo se realizó para poder tener una idea de cómo se vería el cocodrilo al armarse.

*Figura 22 Prototipo de estructura osea.*



Al tener una idea de la estructura ósea, se realizó el prototipo de la cola con mecanismo de bisagra esto con la finalidad de tener movimientos laterales en cada uno de los links. Cada uno de estos fue atravesado por un pin que permitió que giraran sobre su propio eje.

*Figura 23 Prototipo de cola con mecanismo de bisagra.*



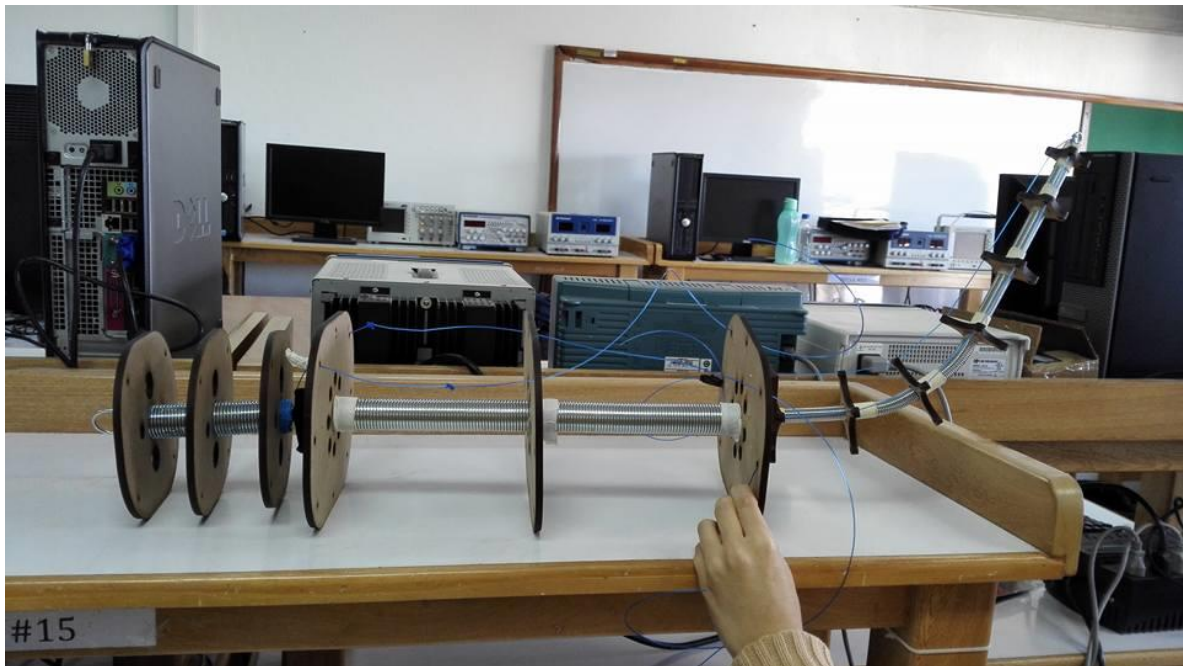
Posterior a este prototipo, se notó que la cola al ser una de las principales partes características del cocodrilo, se debía mover con mayor fluidez por lo que se pensó en atravesar las vértebras que conforman la cola con un resorte, obteniendo el prototipo #2 de la cola.

*Figura 24 Prototipo de cola con resorte.*



Al verificar que este sistema daba una mayor fluidez en los movimientos se realizó un modelo simplificado de cuello, torso y cola con el mismo sistema, obteniendo resultados favorables.

*Figura 25 Prototipo de cuerpo de cocodrilo con resortes como columna vertebral.*



A partir de este modelo se buscó emular al cocodrilo con mayor realismo verificando que como columna vertebral la mejor opción es la de los resortes, tomando en cuenta que los mismos deben ser de un material resistente a la corrosión provocada por la humedad.

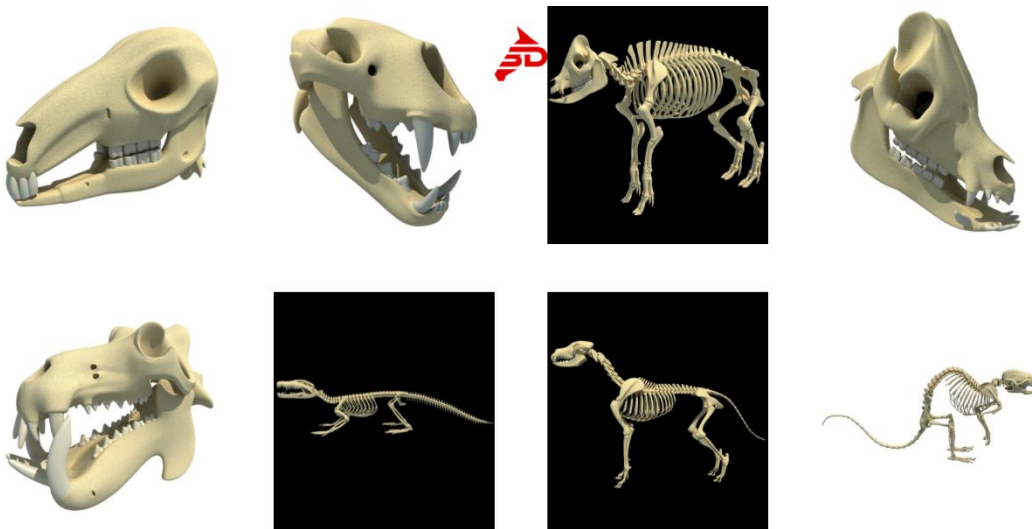
Para la emulación de la estructura ósea del cocodrilo, se hizo un escaneo 3D a una osamenta que se encuentra en la colección del departamento de Biología de la UVG. Lastimosamente esta osamenta se encontraba en mal estado y el proceso de escaneo 3d no arrojó un modelo que pudiera ser imprimible.

*Figura 26 Escaneo 3D con software 1,2,3D Catch.*



Por esta razón se contactó a la empresa 3D Horse, con sede en Dubái, esta empresa se dedica a la digitalización de modelos 3D de diferentes tipos, entre sus servicios está el modelaje de varios tipos de animales incluyendo el de un cocodrilo.

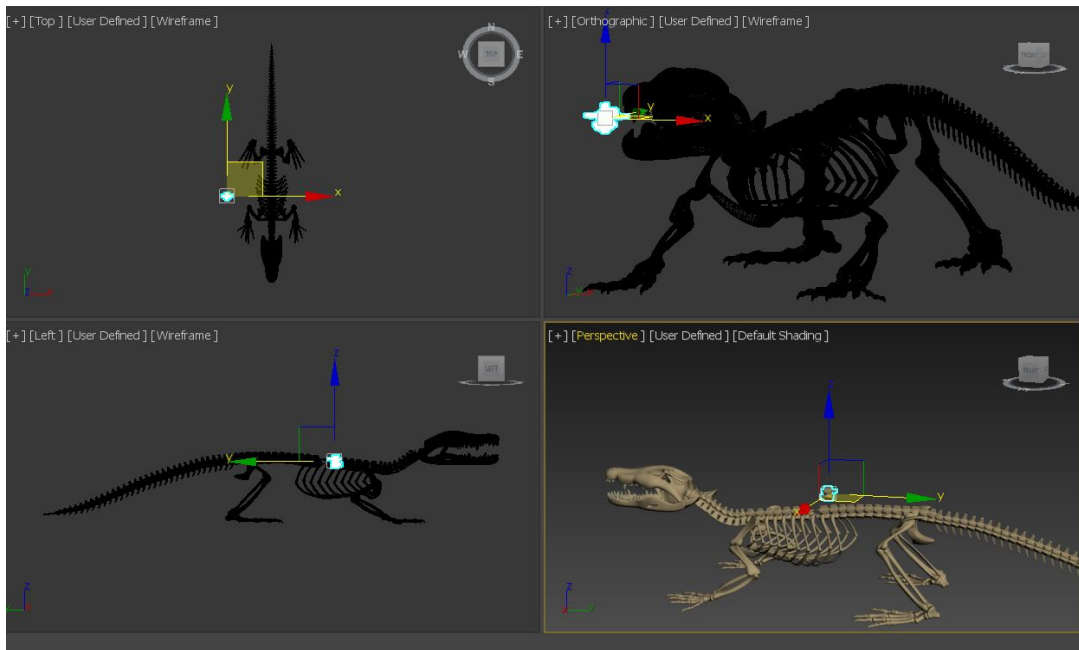
*Figura 27. Modelos 3D de osamentas de animales que ofrece la página 3D Horse.*



(3D Horse., 2018)

Luego de obtener el modelo 3D del cocodrilo, se realizó la etapa de modificación de este modelo realizando la manipulación en 3d necesaria para imprimir pieza por pieza de cada uno de los huesos y verificar que mismos se acoplaran con ayuda del resorte de acero inoxidable.

Figura 28. Modelo en 3D del cocodrilo.



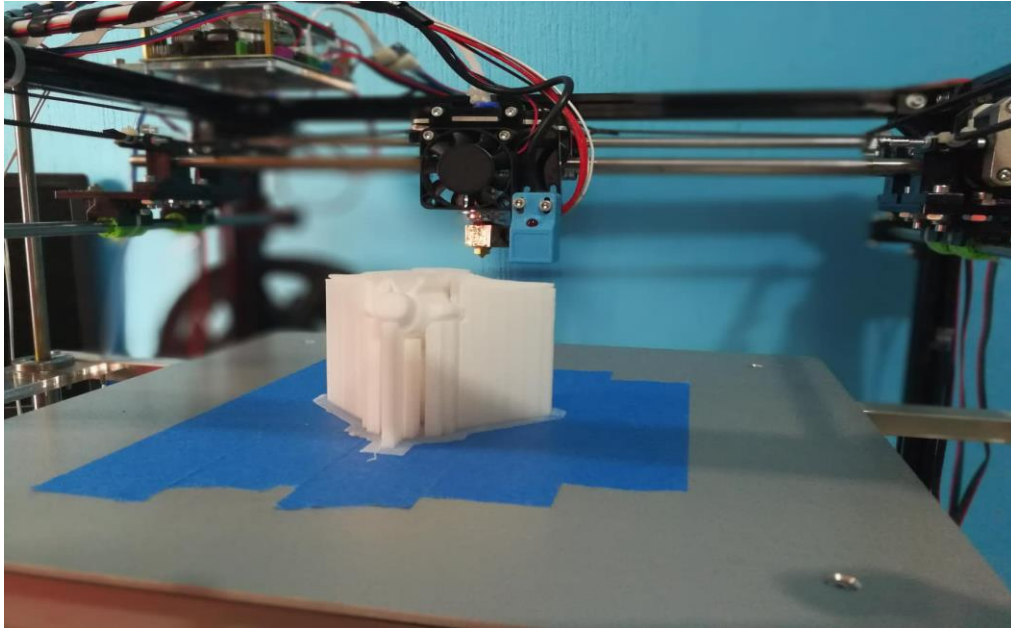
1. Impresión de vértebras en PLA. La impresión de los huesos se realizó por medio de tecnología aditiva, gracias a la obtención de una impresora 3D, que cuenta con un área de impresión de 300X300X300 mm, cada una de las vértebras del cocodrilo se imprimió por separado, posterior a la impresión se realizó el postproceso aplicando impermeabilizante y pintura de aceite en color hueso, esto con la finalidad de evitar que el PLA realice su proceso natural de descomposición en 2 años en presencia de humedad.

Una de las principales razones para imprimir cada una de las vértebras por separado, es la facilidad de reemplazarlas cuando se hayan dañado por cualquier motivo.

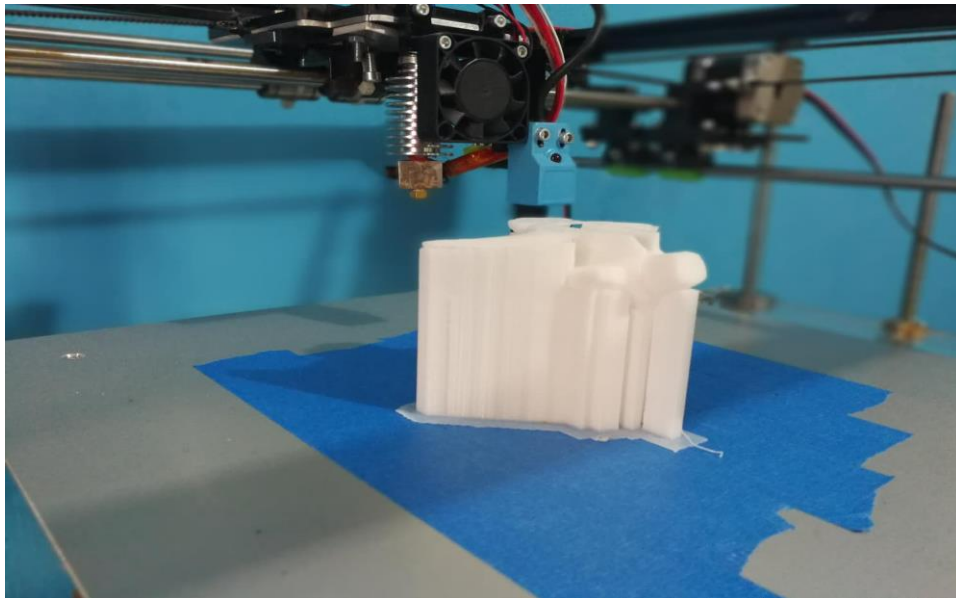
Figura 29. Vértebras impresas en PLA previo a el tratamiento impermeabilizante.



*Figura 30. Impresora 3D utilizada para la manufactura de las vértebras.*



*Figura 31. Vértebra impresa en 3D*



2. Impresión de cráneo en PLA. Para poder imprimir el cráneo del cocodrilo fue necesario seccionarlo en cuatro partes, tanto la mandíbula superior como la inferior, esto con la finalidad de minimizar el tiempo de impresión y asegurar que la impresora 3D no se quedaría sin material en el proceso. Fue necesario el uso de cemento de contacto

para poder unir las secciones y la aplicación de 2 capas de fibra de vidrio para tener una superficie uniforme y sin uniones perceptibles.

*Figura 32. Proceso de pegado del cráneo*



*Figura 33. Sección del cráneo después de ser pegado*



*Figura 34. Aplicación de fibra de vidrio al cráneo*



Después de la unión de las partes, se aplicaron las capas correspondientes al impermeabilizante, con lo que se logró uniformidad en el tono del cráneo, quedando preparado para ser pintado de color blanco hueso.

#### B. Diseño de elementos que emulan los ligamentos de un cocodrilo.

En esta parte, se realizaron dos prototipos previos al diseño final, con la finalidad de establecer qué configuración y material eran los adecuados para la fuerza que debe ejercer. Se presenta una breve descripción, las ventajas y desventajas de cada configuración.

1. Cables acerados. Estos son los utilizados en frenos de motocicletas y bicicletas, están provistos de un forro que les protegen de cualquier contaminación, pero para esta aplicación, se les eliminó por interferir con el movimiento natural del animatrónico.

Ventaja:

- Se puede ejercer una mayor fuerza.

Desventaja:

- Se presenta corrosión al momento de estar en contacto con humedad.
- Provoca desgaste en las piezas con las que fricciona al ejercer la fuerza de tensión.
- Alto factor de mantenimiento, por estar compuesto de varios alambres, al cortarse uno se debe cambiar el cable completo.

*Figura 35. Prototipo de cola del cocodrilo con sistema de cables tensores acerados.*

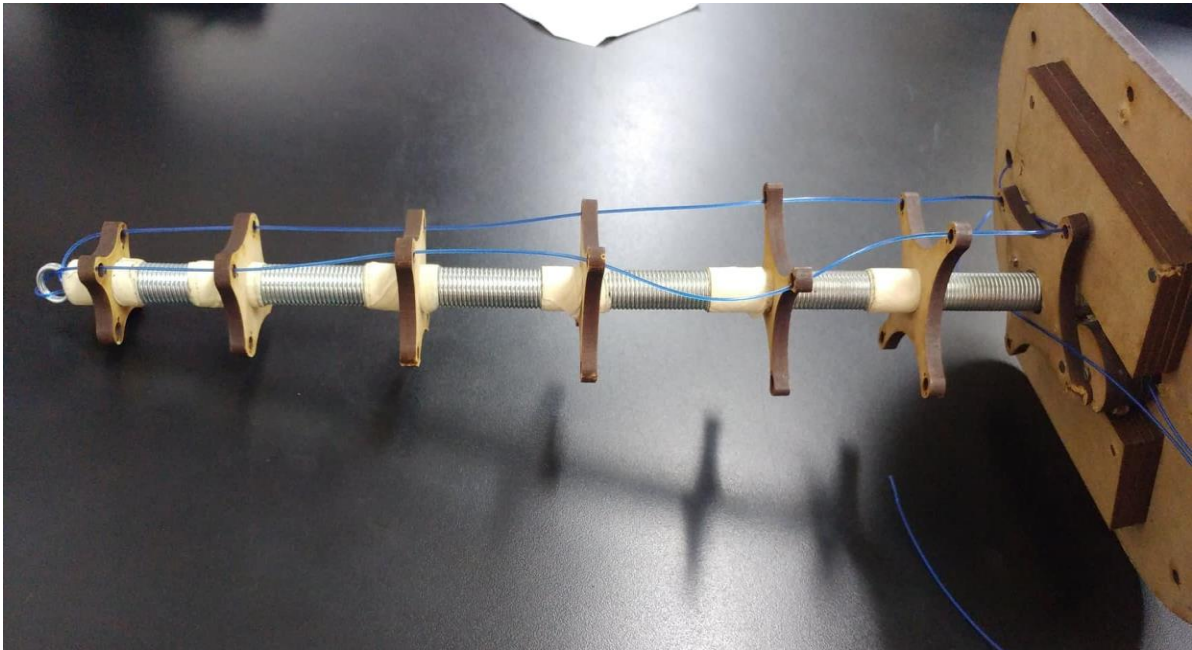


2. Hilo de pescar. El hilo de pescar, es un filamento que presenta buenas características de resistencia a la tensión, teniendo la particularidad de no ser abrasivo en los elementos donde se desliza.

Ventajas:

- Filamentos delgados, pueden soportar grandes cargas, por lo que, al realizar configuraciones de varios hilos juntos, esta particularidad se mejora.
- Bajo costo con respecto a otros elementos tensores.
- Baja deformación respecto al peso colocado, al momento de estar en mal estado se revienta y no se necesita un conocimiento amplio para remplazarse.

*Figura 36. Prototipo de cola de cocodrilo con cables tensores de hilo de pescar.*



Para imitar los ligamentos del cocodrilo animatrónico, y después de hacer pruebas con las opciones, se decidió utilizar hilo de pescar en una configuración de tres en mano, para elevar la resistencia de los filamentos y que cumplan con su trabajo de ser los elementos tensores que harán la fuerza en el resorte para flexionarlo.

El cráneo fue suspendido por medio de un hilo de pescar, para el movimiento lateral del cráneo, se utilizaron dos hilos de pescar transparente de 0.7 mm de diámetro, que se amarraron a los extremos traseros, con ayuda de dos armellas, de esta forma, se da la percepción de movimiento de asecho dando mayor realismo al diseño.

*Figura 37. Hilos tensores para el movimiento del cráneo*



Para la otra parte móvil que es la cola, se utilizó el mismo principio con la diferencia que esta vez el hilo va amarrado a la terminación del resorte, las vértebras no están sometidas a tensión, siendo el resorte, el encargado de hacer el trabajo mecánico. Los hilos utilizados fueron colocados de manera que sean imperceptibles a la vista, viajando por entre las vértebras.

Figura 38. Cola del cocodrilo con el sistema de hilos tensores



### C. Diseño de resorte que emula la columna vertebral.

La emulación de la columna vertebral se hizo con la ayuda de resortes fabricados en acero inoxidable, este material se eligió para evitar la corrosión provocada por la humedad que se presentará en el entorno.

Estos resortes van disminuyendo su diámetro dependiendo del tamaño de la vértebra que atraviesan, siendo más gruesos en el área torácica y más pequeños en el área de la cola, encontrando una base fija en la cadera que tiene la función de pivote, para el movimiento de la cola y de la parte torácica y el cuello. Esta parte fija, es la que irá directo al piso o a una base que le dé estabilidad al animatrónico, por lo que su función principal será la de darle estabilidad al cocodrilo además de ser un pivote para flexionar los resortes.

Los resortes se fabricaron a la medida, seccionándose entre vértebra y vértebra para que puedan remplazarse de forma fácil y para que no sea necesario desmontar completamente toda la columna vertebral. Esto ayudará a que el costo en repuestos sea menor.

Figura 39. Diagrama de distribución de resorte que emula columna vertebral.



**D. Diseño de mecanismo para movimiento de mandíbula del cocodrilo.**

Este mecanismo se realizó siguiendo el movimiento natural de bisagra que poseen la mayoría de los animales. Para emular este sistema, se utilizó un cilindro de doble efecto para abrir y cerrar las fauces.

El cilindro se colocó en el interior de la boca, para que no sea perceptible a simple vista y de esta forma, no se le reste naturalidad al animatrónico. La bisagra se colocó en la unión de la mandíbula con el cráneo, con la ayuda de un pin que se puso en cada extremo para permitir el movimiento de abrir y cerrar de la mandíbula, el cilindro neumático es el encargado de determinar qué tanto abre o cierra, esto está limitado por la carrera máxima y mínima del cilindro.

La velocidad con la que el cilindro se acciona, se regula con estranguladores de presión, que van en los racores de las vías de las electroválvulas, permitiendo de esta forma, que pueda calibrarse la velocidad sin necesidad de desmontar el cilindro de las fauces del animatrónico.

Figura 40. Cráneo del cocodrilo con sistema de bisagra.

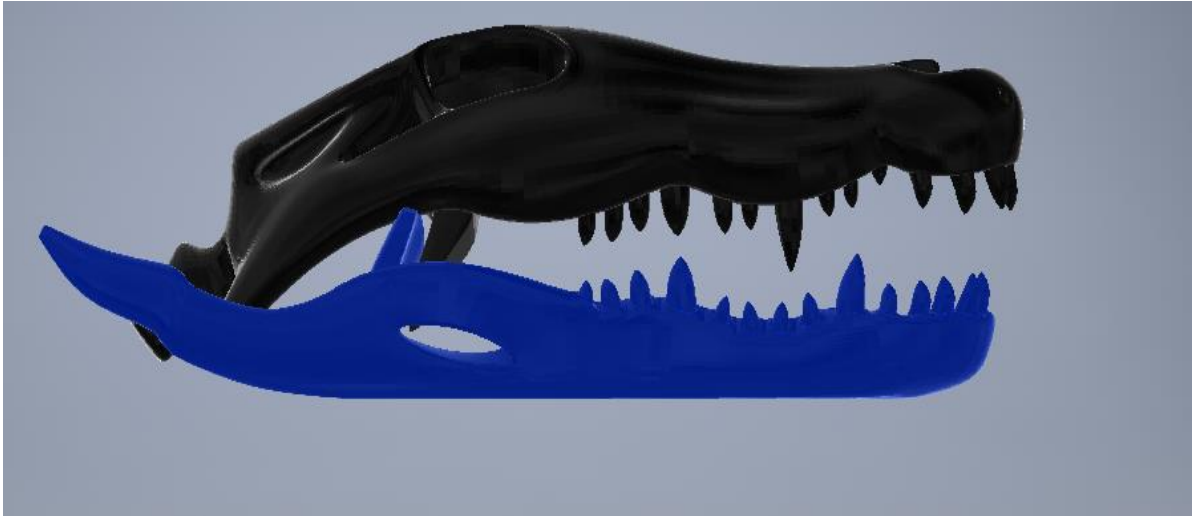
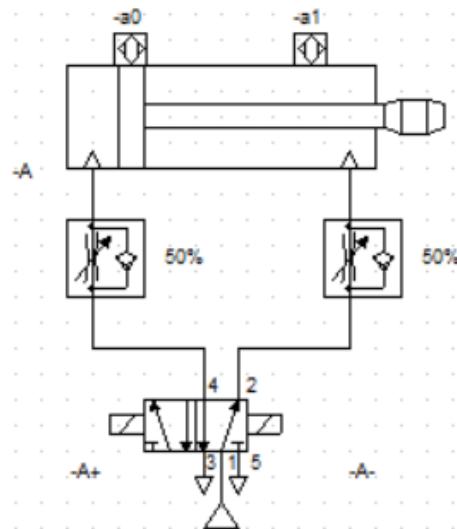


Figura 41. Diagrama neumático de pistón de doble efecto, para mecanismo de mandíbula de cocodrilo.



## E. Diseño de actuadores para movimiento del animatrónico.

1. Actuadores neumáticos flexibles. Los actuadores neumáticos flexibles se construyeron en su totalidad en la UVG y se realizó con ayuda de una cámara de ensayos destructivos las pruebas para determinar su capacidad para levantar grandes pesos.

Después de varias pruebas se determinó que la malla utilizada no era capaz de resistir los rayos del sol y la humedad ya que en contacto con estos elementos la misma se degradaría presentando un alto factor de mantenimiento.

El costo de los actuadores neumáticos flexibles fue accesible, pero se necesitan electroválvulas de flujo proporcional para poder manejarlos que son equipos de alto costo, haciendo que el animatrónico dejara de ser de bajo costo.

*Figura 42. Comparación músculos neumáticos y actuadores neumáticos flexibles.*



2. Actuadores neumáticos paso a paso. Al obtener los modelos de los actuadores por parte de los investigadores de la universidad de Twente, se procedió a manufacturarlos y a imprimirlos en 3D.

Después de realizar el proceso de impermeabilización y aplicar pegamento en las uniones, se obtuvieron los actuadores que efectuarán los movimientos ondulatorios de la columna vertebral.

Lo importante de estos actuadores, es que, al momento de necesitarse un repuesto, puede manufacturarse de manera rápida una vez se tenga a disposición una impresora 3D y material de aporte.

Al realizar las pruebas de funcionamiento se logró determinar que los mismos no eran los adecuados para utilizar en el animatrónico al presentar un excesivo desgaste en la parte del rack móvil.

Figura 43. Motor neumático paso a paso

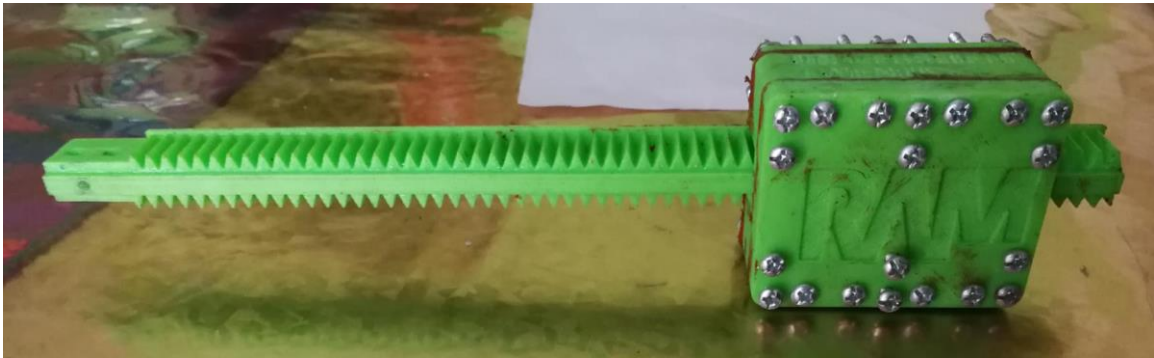


Figura 44 Desgaste presentado en el rack.



3. Pistones neumáticos de doble efecto. Al determinar que los motores paso a paso neumáticos impresos en PLA presentaban un desgaste considerable en pocos accionamientos, se optó por utilizar pistones neumáticos manufacturados en acero inoxidable, esto con la finalidad de tener confiabilidad en la reproducibilidad de los movimientos del cocodrilo al ser de un material resistente y que presenta poco desgaste. Otra característica importante que tomar en cuenta es que los pistones son estándar y pueden remplazar de forma fácil y es posible contar con estos en bodega para un cambio inmediato.

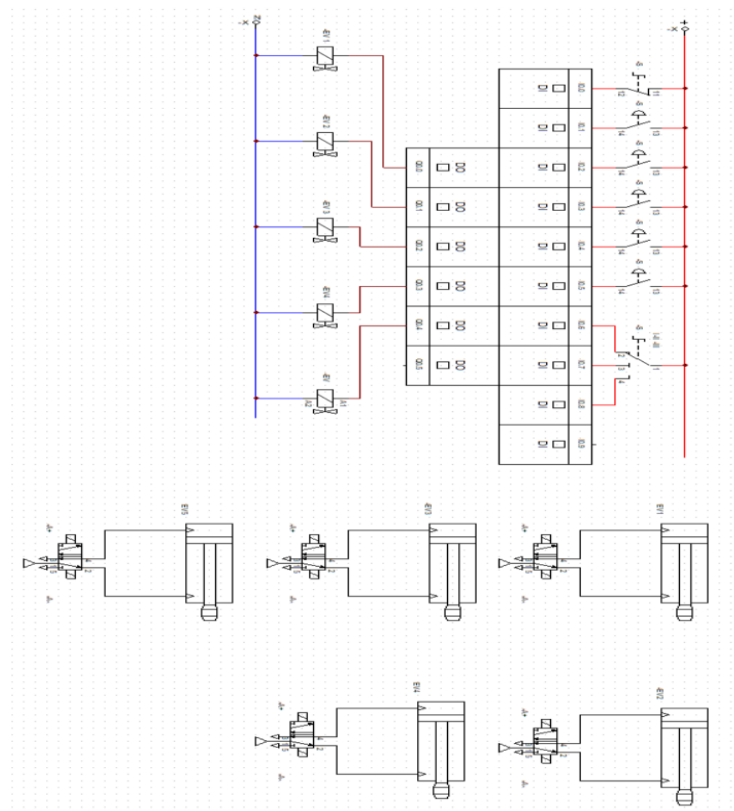
Figura 45 cilindros neumáticos utilizados en el cocodrilo animatrónico.



#### F. Circuito de mando, potencia y circuito neumático

Después de evaluar diferentes tecnologías para la automatización del animatrónico, se decidió utilizar un PLC marca Allen Bradley Mikrologix 1100. Obteniendo el circuito que se presenta a continuación

Figura 46. Circuito electroneumático del cocodrilo animatrónico.



### G. Cocodrilo animatrónico terminado

Al terminar de armar el cocodrilo, fue montado sobre una tabla de madera que fue mimetizada con ninfa plástica y el tubo donde cuelga el hilo que sostiene la cabeza, fue mimetizado imitando una palmera, el hilo no es perceptible a simple vista.

Figura 47. Cocodrilo animatrónico colocado sobre la base mimetizada



#### H. Programación de PLC y colocación de elementos en gabinete transparente

Se trabajó con un PLC Allen Bradley Mikrologix 1100, fue conectado a una botonera que contiene 6 contactos normalmente abiertos, de los cuales hay un start general que energiza las rutinas, tres son para rutinas, uno es para detener las rutinas (stop de estación de mando), un stop de emergencia y un selector para cambiar de modo rutinas a modo mantenimiento que es para la calibración y convierte cada uno de los botones anteriores a un movimiento de cada parte del cocodrilo. El PLC tiene entradas 24 Voltios DC y salidas tanto en AC como en DC, para esta aplicación se utilizaron salidas AC 120V, que son los voltajes de las bobinas de las electroválvulas.

Figura 48 Primera parte del programa en Ladder, realizado en RSLogix 500.

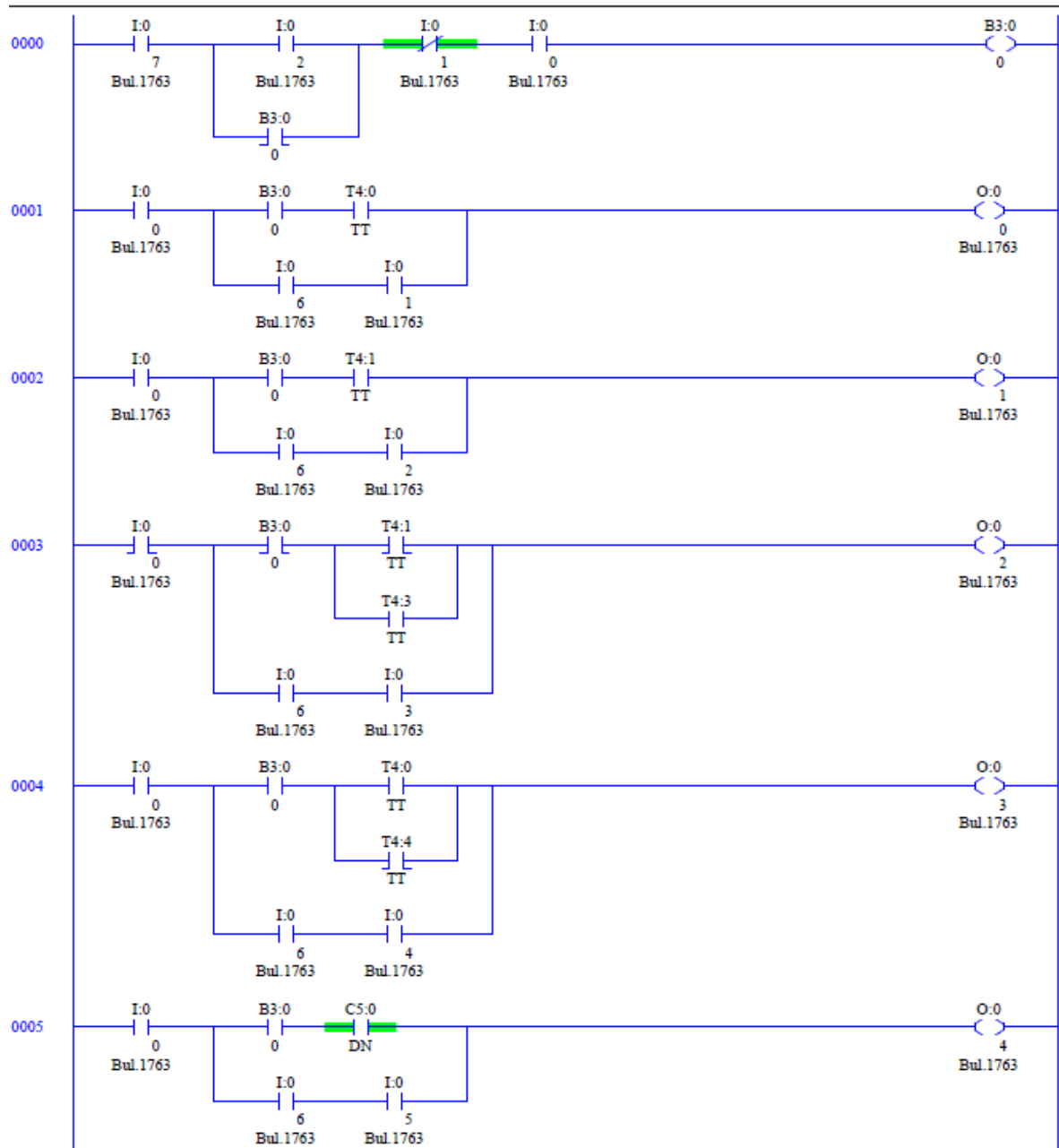


Figura 49. Segunda parte del programa en Ladder, realizado en RSLogix 500.

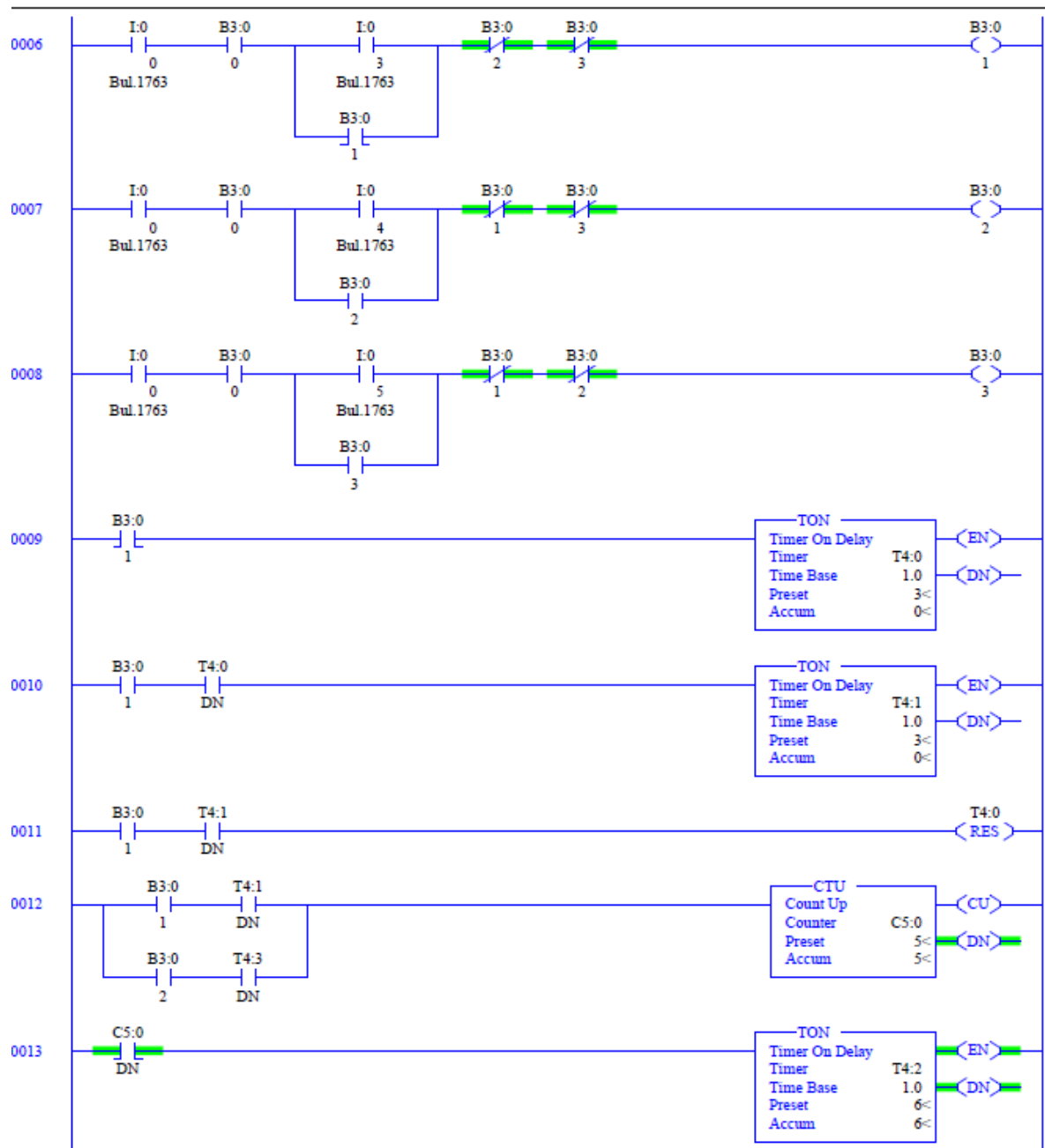


Figura 50. Tercera parte del programa en Ladder, realizado en RSLogix 500.

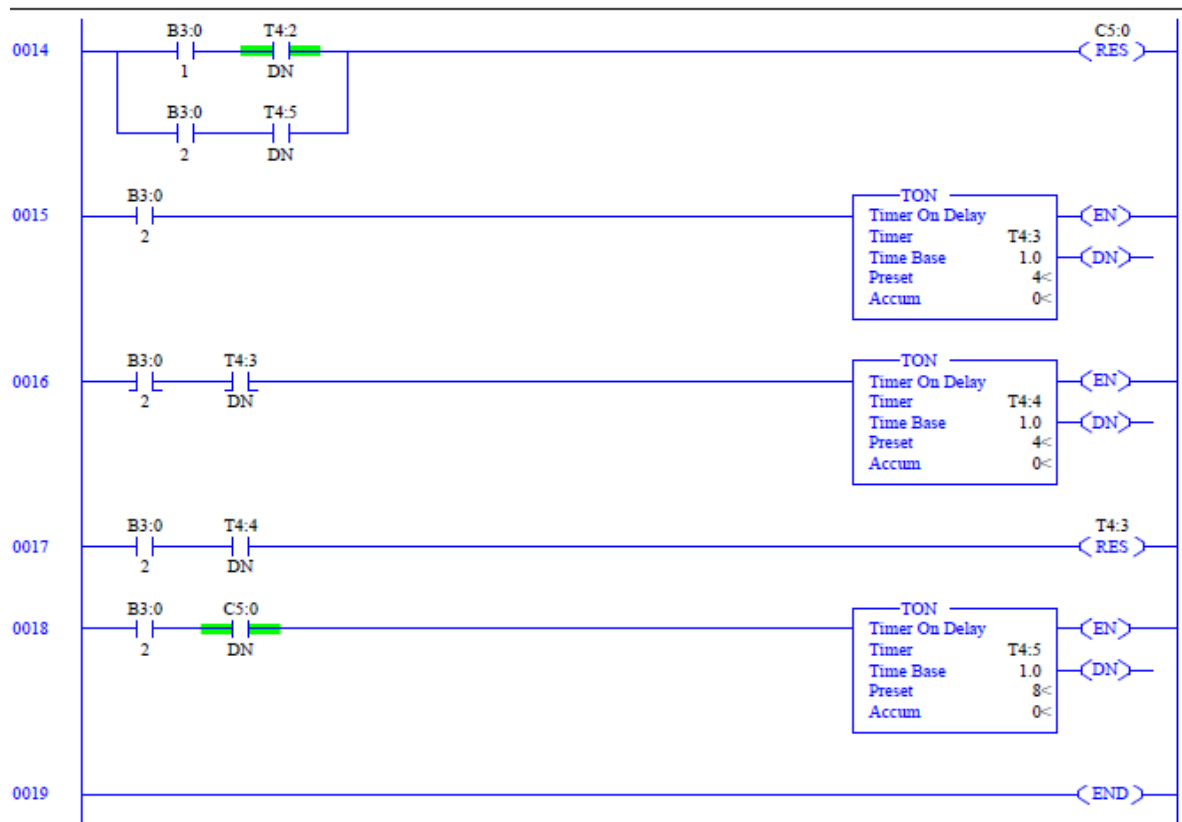


Figura 51. Distribución de sistemas de mando y potencia dentro del gabinete



## VII. Discusión.

El PLA es un material biodegradable, al contacto con la humedad va perdiendo sus propiedades poliméricas, para evitar esto en el animatrónico, las piezas fueron cubiertas con tres capas de impermeabilizante, además de protegerlas de las inclemencias del clima, son una base para la pintura final que se aplicó, imitando el color natural de un hueso.

Los motores paso a paso neumáticos, que eran la propuesta principal para el movimiento del animatrónico, fueron impresos correctamente y funcionaron de manera correcta, pero después de algunos ensayos de movimiento, se comenzó a observar desgaste en los racks, provocando deslizamiento al momento de estar sometidos a la fuerza contraria, al movimiento de cada uno de los elementos que movían. Por esta razón y pensando en la facilidad de replicar el diseño, se decidió cambiar estos actuadores por pistones neumáticos de acero inoxidable, obteniendo resultados favorables en el movimiento. Ante la imposibilidad natural del cocodrilo de levantar la cabeza y para evitar el rozamiento con la tabla base, se decidió utilizar un hilo que suspendiera la cabeza unos centímetros sobre la base, con la finalidad de lograr movimientos fluidos y limpios.

Los hilos transparentes de diámetro 0.7 mm, utilizados como tensores y por las propiedades de este material, presentaron un estiramiento, que influye en la calibración del animatrónico, en el proceso de pruebas, se hicieron de 3 a 5 calibraciones que consisten en acortar el hilo después de 10 accionamientos de los cilindros neumáticos, posterior a esto el hilo ya no sufre estiramiento y ya no es necesario realizar un cambio en los hilos tensores a no ser que se rompan por un factor externo.

## VIII. Conclusiones.

- Se construyó un cocodrilo animatrónico, logrando emular la estructura ósea de este ser vivo, logrando de esta forma realizar los movimientos característicos de un *Crocodylus acutus*.
- Se diseñó un sistema electromecánico capaz de automatizar los movimientos de un animatrónico con la ayuda de un PLC.
- El animatrónico construido fue capaz de trabajar en condiciones de humedad al realizar los tratamientos adecuados de impermeabilización a las piezas impresas en PLA y utilizar materiales que no presentan corrosión al contacto con el agua.
- No fue posible manufacturar un actuador neumático impreso en PLA por el desgaste prematuro que presenta ante el trabajo constante.
- Para la construcción de este animatrónico se gastó un total de Q8325.25 quetzales, logrando que el mismo sea de costo accesible para cualquier parque de diversiones de Guatemala.
- La construcción de las vértebras se realizó por medio de tecnología aditiva, esto para poder capturar las geometrías complicadas que presenta un hueso y apegarse lo más posible a la realidad.
- Las vértebras impresas en PLA, fueron atravesadas por un resorte que emuló la columna vertebral, logrando movimientos fluidos y naturales.
- La manufactura aditiva es una opción viable para la emulación de esqueletos para su estudio evitando que sea necesario el sacrificar un ejemplar para tener una idea precisa de la forma que trabajan los elementos contenidos en su cuerpo.

## IX. Recomendaciones

- En futuros trabajos, es conveniente presentar la construcción de animatrónicos como un megaproyecto multidisciplinario, integrando estudiantes de Biología, Ingeniería Mecánica e ingeniería mecatrónica, de esta forma, se obtendría mayor exactitud al diseñar y construir un animatrónico que emule un ser vivo.
- Con la disponibilidad de tecnologías CNC, se pueden crear moldes de segmentos completos del cuerpo, que se llenan con polímeros, no sería necesario perforarlos para meter el resorte que emula la columna vertebral.
- Se recomienda utilizar ABS para imprimir los huesos de cualquier estructura ósea, este material tiene mejores propiedades mecánicas, además, la particularidad de tener excelente comportamiento ante la humedad, siendo posible hacer post procesos, utilizando para una mejor presentación, acetona o solvente.
- En proyectos futuros de creación de animatrónicos, es recomendable que se replique el diseño de los actuadores neumáticos paso a paso, en plásticos de ingeniería, con la finalidad de reducir el desgaste y aplicarlos en el campo de robótica y medicina. Con estos plásticos, se elimina el desgaste que se presenta por los constantes accionamientos, se pueden emplear plásticos que son auto lubricantes.

## X. Bibliografía

- 3D Horse. (10 de febrero de 2018). *www.3dhorse.com*. Obtenido de <https://www.3dhorse.com/collections/3d-animals/products/crocodile-skeleton-animals-3d-models>
- 3D natives. (19 de octubre de 2016). *3D natives el sitio web de la impresión 3d*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/top-10-escaneres-3d-low-cost-19102016/>
- Aguilar, A. (5 de diciembre de 2017). *Slide Share*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/ANTHONYAGUILAR21/resortesfuncion-clasificacion-y-tipos>
- FLSUN. (12 de enero de 2018). *FLSun3D*. Obtenido de [http://www.flsun3dprinter.com/index.php?route=product/product&product\\_id=52](http://www.flsun3dprinter.com/index.php?route=product/product&product_id=52)
- HAAS. (11 de Febrero de 2018). *Haas Factory Outlet-España*. Obtenido de <http://www.haascnc.es/>
- Martínez, B. (11 de septiembre de 2015). La historia del castillo de San Felipe inicio hace 420 años. *Prensa Libre*, págs. 22,23.
- Mejicanos, C. L. (29 de diciembre de 2017). Historias contadas en el ferrocarril. (R. Hernández, Entrevistador)
- RAM, Universidad de Twente. (2016). High-Performance pneumatic stepper mottors. *IEEE*, 10.
- Vitt, L., & Caldwell. (2014). *Herpetology, An introductory Biology of amphibians and Reptiles*. San Diego: Elsevier.
- wikipedia. (20 de febrero de 2018). Obtenido de wikipedia la enciclopedia libre: <https://es.wikipedia.org/wiki/lzabal>
- wikipedia. (5 de febrero de 2018). *wikipedia la enciclopedia libre*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Crocodylus\\_acutus](https://es.wikipedia.org/wiki/Crocodylus_acutus)