

# Diseño de la estructura mecánica perteneciente al animatrónico del dinosaurio Laquintasaura

---

## Mechanical structure design pertaining to Laquintasaura animatronic dinosaur

Reyder Reales<sup>1a</sup>, Daniel Zambrano<sup>1b</sup>, Jesús M. García<sup>1c</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Prototipos, Decanato de Investigación, Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela. Orcid: ° 0000-0001-5466-9429. Correos electrónicos: <sup>a</sup> reyder.reales@unet.edu.ve, <sup>b</sup> daniel.zambranoc@unet.edu.ve, <sup>c</sup> jmgarcia@unet.edu.ve

Recibido: 11 diciembre 2018. Aceptado: 7 junio, 2019. Versión final: 25 julio, 2019.

### Resumen

Este artículo describe el proyecto de diseño de un animatrónico del dinosaurio venezolano llamado Laquintasaura, el cual se desarrolló a partir de un concepto seleccionado tomando en cuenta las especificaciones objetivo derivadas de las necesidades del cliente. Cuenta con 9 grados de libertad accionados mediante 8 mecanismos, los cuales le permiten realizar los movimientos correspondientes a la apertura de la boca, ascenso y giro de la cabeza, movimientos del cuello, ascenso y descenso del torso, giro de los brazos y movimiento de la cola. Para realizar el diseño del animatrónico se dimensionó la estructura, luego se realizaron una serie de simulaciones dinámicas y cinemáticas para evaluar los movimientos de los mecanismos y se seleccionaron los actuadores que ejecutarían los movimientos. Adicionalmente, se aplicó un análisis de esfuerzos mediante el Método de los Elementos Finitos a varios elementos mecánicos para obtener una estructura robusta que cumpla con los requerimientos solicitados.

**Palabras clave:** animatrónica; diseño de mecanismos; simulación dinámica; simulación cinemática.

### Abstract

This article describes the design project of an animatronic of the Venezuelan dinosaur named Laquintasaura, which was developed from a selected concept taking into account the objective specifications derived from the needs of the client. It has a total of 9 degrees of freedom, operated by 8 mechanisms, which give the ability to perform the movements corresponding to the opening of the mouth, ascent and rotation of the head, movements of the neck, ascent and descent of the torso, rotation of the arms and movement of the tail. To design the animatronic, a structure was dimensioned, then a series of dynamic and kinematic simulations were carried out to evaluate the movements of the mechanisms, then the actuators that would execute the movements were selected. Additionally, an analysis of stresses using the Finite Element Method was applied to several mechanical elements to obtain a robust structure that meets the requested requirements.

**Keywords:** animatronics; design of mechanisms; dynamic simulation; kinematic simulation.

### 1. Introducción

La animatrónica [1] es una técnica que recrea el movimiento de seres vivos mediante el uso de

mecanismos robóticos o electrónicos [2,3]. Esta, ha tenido un amplio uso en varias industrias, especialmente en aquellas relacionadas con el entretenimiento [4] tales como: producciones cinematográficas [5], teatrales [6] y

parques temáticos [7]. El primer animatrónico para fines de entretenimiento fue construido por Disney en 1960 [8]. No obstante, no se limitan a estos usos, también existen animatrónicos que se utilizan en: terapias médicas [9, 10], juguetes [11] y museos [12]. De esta manera, se pretende brindar a los espectadores experiencias más parecidas a la realidad [13].

Siguiendo este principio, se planteó la construcción de un animatrónico para ser utilizado en una exposición de la era jurásica que implementará el Museo del Táchira en Venezuela. Este animatrónico emulará a Laquintasaura [14] el cual, es un dinosaurio originario del estado Táchira (Venezuela) cuyas dimensiones son: aproximadamente un metro y medio de longitud y medio metro de altura. En este trabajo, se describe el diseño de la estructura mecánica de este animatrónico, el cual reproduce las características físicas que debió poseer el dinosaurio; este diseño fue realizado utilizando dimensiones reales y cuenta con nueve grados de libertad accionados por ocho mecanismos diferentes.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 muestra la metodología utilizada para la selección del concepto a desarrollar, en la Sección 3 se muestran los mecanismos que componen el animatrónico junto con un conjunto de simulaciones dinámicas y cinemáticas que permitieron verificar las cargas que soporta la estructura y los actuadores seleccionados. Además, con base a estas cargas, se realizan diversos análisis de esfuerzos a las piezas críticas de la estructura para garantizar la resistencia y robustez de la máquina. Finalmente, en la sección 4 se efectúa una comparación de los logros obtenidos en función de los requerimientos iniciales planteados y se describen las conclusiones de este trabajo con los posibles trabajos futuros.

## 2. Metodología

Para el diseño del animatrónico se utilizó la metodología de desarrollo de productos descrita por Ulrich [15], la cual esboza de una manera sistemática el procedimiento que se debe seguir para la adecuada definición de los conceptos de solución y la posterior selección para la obtención de la solución óptima entre todas las opciones que se pueden presentar.

### 2.1. Definición de las especificaciones objetivo

Para comenzar el procedimiento fue necesario en primer lugar, recopilar una serie de requerimientos y necesidades provenientes del cliente. De este procedimiento también se definió la cantidad de movimientos que debía tener el animatrónico, siendo estos: apertura de la mandíbula, giro de la cabeza, flexión y extensión de la cabeza, flexión y extensión vertical del cuello, flexión y extensión lateral del cuello, giro de los brazos, ascenso descenso del torso y movimiento de la cola. Posteriormente, todas las necesidades definidas inicialmente fueron interpretadas para tecnificar todos los requerimientos y de esta forma iniciar el diseño del animatrónico. Las especificaciones objetivo conseguidas a partir de las necesidades iniciales se listan en la Tabla 1, la cual muestra principalmente los valores ideales y valores marginales de las métricas que permiten cuantificar estas especificaciones. También se muestra una columna donde se jerarquizan estas métricas de acuerdo a la importancia que posee una especificación respecto al grado de satisfacción global de las necesidades que pretende suplir este diseño.

Tabla 1. Listado de especificaciones objetivo empleadas para la selección del concepto.

Métrica	Importancia	Unidad	Valor marginal	Valor Ideal
Masa Total	3	Kg	<5	<3
Emisión de sonidos (característico del Dinosaurio)	5	dB	>90	>110
Cantidad de movimientos en el mecanismo	5	Adimensional	8	9
Apariencia semejante a un dinosaurio	4	Subj.	3-4	5
Costo unitario de manufactura	4	US\$	<1100	<900
Tiempo necesario para realizar mantenimiento.	3	Min	<240	<180
No representa riesgo humano	5	Subj.	4	5
Volumen	4	$m^3$	0.2	0.1
Velocidad de movimientos	5	$mm/s$	5	3
Factor de seguridad	4	Adimensional	1.2	1.5

**Nota:** La expresión Subj. Hace referencia a un valor subjetivo que se calcula mediante la realización de una encuesta de aceptación por parte del público, en una escala que va entre 1 y 5.

Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Generación de conceptos

Con base en esta información se inició el proceso de generación de conceptos para lo cual se concibieron una serie de alternativas de solución para cada uno de los movimientos solicitados que permitiesen cumplir las especificaciones previamente definidas. Dichas alternativas se fundamentan en la selección de diferentes mecanismos, actuadores y elementos mecánicos para la transmisión de potencia. Estos elementos estarán alojados estratégicamente dentro de una estructura rígida fabricada con perfiles cilíndricos y láminas de aluminio. Por ejemplo, en la Figura 1 se describen 3 mecanismos propuestos para el movimiento de flexión vertical del cuello del animatrónico.

Asimismo, para los demás mecanismos se desarrollaron diferentes alternativas: tres para la apertura de la boca, dos para la flexión y una para el giro de la cabeza, dos para la flexión horizontal del cuello, una para ascenso y descenso del torso, dos para el giro de los brazos y dos para el movimiento de la cola. A continuación, se realizó una combinación entre las distintas alternativas desarrolladas para cada mecanismo con el propósito de obtener varios conceptos viables del animatrónico completo que pudiese cumplir con los requerimientos exigidos. Es importante acotar que la combinación de alternativas fue limitada a aquellas combinaciones posibles que permitieran generar una máquina coherente donde todos los mecanismos individuales puedan trabajar eficientemente en conjunto. Entonces, de todas las posibles combinaciones se obtuvieron cinco conceptos denominados “factibles”.

## 2.3. Selección del concepto a desarrollar

A continuación, se realizó la selección del concepto a desarrollar mediante el uso de matrices de decisión que sirven para evaluar cada concepto con respecto a los criterios de elección asociados a las especificaciones objetivo. Dicho proceso de selección se realizó en dos etapas: la primera etapa denominada filtrado de conceptos, permitió aplicar una evaluación relativa donde cada concepto era comparado respecto a los demás de acuerdo a los criterios de selección. En cada parámetro evaluado, el concepto podría obtener una calificación de: “mejor que” (+1), “igual a” (0), o “peor que” (-1). Finalmente todas las calificaciones obtenidas por cada concepto fueron sumadas en una matriz de decisión que permitió diferenciar tres conceptos del resto cuyas características generales se listan en la Tabla 2.

En la segunda etapa se realizó el proceso de evaluación cuantitativa donde los tres conceptos sobrevivientes fueron calificados para cada criterio de selección con una escala del 1 al 5, pero esas calificaciones fueron ponderadas de acuerdo al peso definido para cada criterio (grado de importancia). Finalmente se totalizó la calificación obtenida para cada concepto (ver Tabla 3), resultando ser el concepto No. 5 el que satisface en mayor grado los criterios de selección.

En la Figura 2a se presenta esquemáticamente el concepto ganador con los mecanismos seleccionados después del proceso de evaluación, y en la Figura 2b se muestra el modelado CAD del animatrónico obtenido después de todo el proceso de dimensionamiento y selección de actuadores. Tanto el funcionamiento de este concepto como la selección de sus componentes se describirán a continuación.

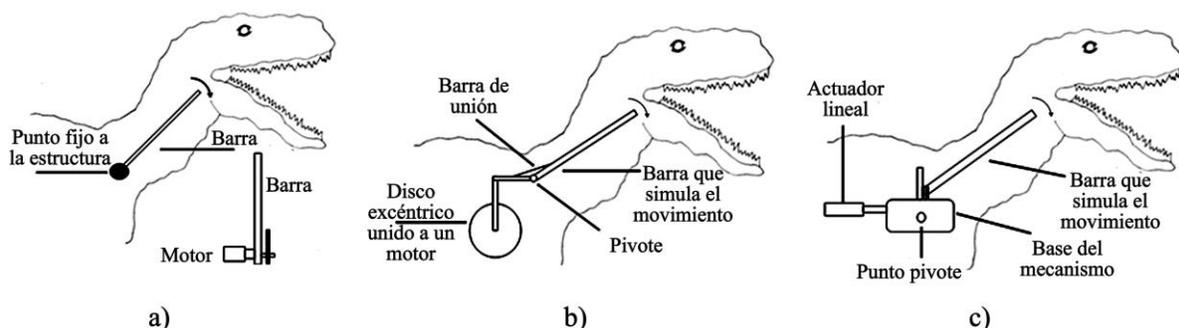


Figura 1. Alternativas para el mecanismo de ascenso y descenso de cuello: (a) acople directo del motor a una barra, (b) uso de un disco excéntrico para inducir el movimiento, (c) uso de actuador lineal. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Descripción de movimientos en los conceptos a ser valorados en evaluación cuantitativa

Movimiento	Alternativas de solución		
	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 5
Apertura de mandíbula	Cable unido a servomotor	Cable unido a servomotor	Sistema de resortes y cable unido a servomotor
Giro de cabeza	Servomotor acoplado a eje del cuello	Servomotor acoplado a eje del cuello	Servomotor acoplado a eje del cuello
Flexión y extensión de cabeza	Cable unido a actuador lineal	Sistema de cables unido a servomotor	Cable unido a actuador lineal
Movimiento vertical del cuello	Estructura pivotante unida a actuador lineal	Sistema de disco excéntrico	Estructura pivotante unida a actuador lineal
Movimiento horizontal del cuello	Servomotor acoplado a sistema de engranajes	Servomotor acoplado a sistema de engranajes	Servomotor acoplado a sistema de engranajes
Giro de brazos	Mecanismo de barras y pasadores	Movimiento de una barra rígida	Mecanismo de barras y pasadores
Movimiento de cola	Sistema de cables y discos	Sistema de cables y discos	Sistema de cables y discos
Ascenso del torso	Actuador lineal acoplado a la estructura	Actuador lineal acoplado a la estructura	Actuador lineal acoplado a la estructura

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Evaluación cuantitativa de tres conceptos preseleccionados.

Criterios de selección	Peso (%)	Concepto 1		Concepto 2		Concepto 5	
		Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada	Calif.	Evaluación ponderada
Ligero de peso	5.76	3	0,1728	4	0,2304	3	0,1728
Sonidos similares a <i>Laquintasaura</i>	9.61	5	0,4805	5	0,4805	5	0,4805
Ejecución 5 movimientos	9.61	5	0,4805	5	0,4805	5	0,4805
Semejanza a la realidad	7.69	3	0,2307	3	0,2307	4	0,3076
Es económico	7.69	2	0,1538	3	0,2307	2	0,1538
Es duradero	5.76	3	0,1728	3	0,1728	4	0,2304
Fácil traslado	5.76	3	0,1728	3	0,1728	3	0,1728
Fácil mantenimiento y limpieza	5.76	4	0,2304	4	0,2304	4	0,2304
Seguro para el público	9.61	5	0,4805	5	0,4805	5	0,4805
Se adecua a los recursos	7.69	5	0,3845	5	0,3845	5	0,3845
Realiza movimientos sutiles	9.61	4	0,3844	4	0,3844	5	0,4805
Es de fácil accionamiento	7.69	4	0,3076	4	0,3076	4	0,3076
Resistente	7.69	4	0,3076	4	0,3076	4	0,3076
Total			3,9589		4,0934		4,1895

Nota: la abreviatura Calif. equivale a calificación

Fuente: elaboración propia.

### 3. Resultados

En esta sección se muestra una descripción de los mecanismos que conforman el concepto seleccionado y además, el proceso de diseño que comprende el modelado de piezas, simulaciones cinemáticas y dinámicas realizadas con el software Autodesk

Inventor® [16], selección de los actuadores y componentes mecánicos. Para cada uno de los mecanismos evaluados se programó, al momento de realizar las simulaciones cinemáticas y dinámicas, un perfil de velocidades el cual tomó en consideración la variación de la velocidad en el arranque y la trayectoria seguida por el mecanismo.

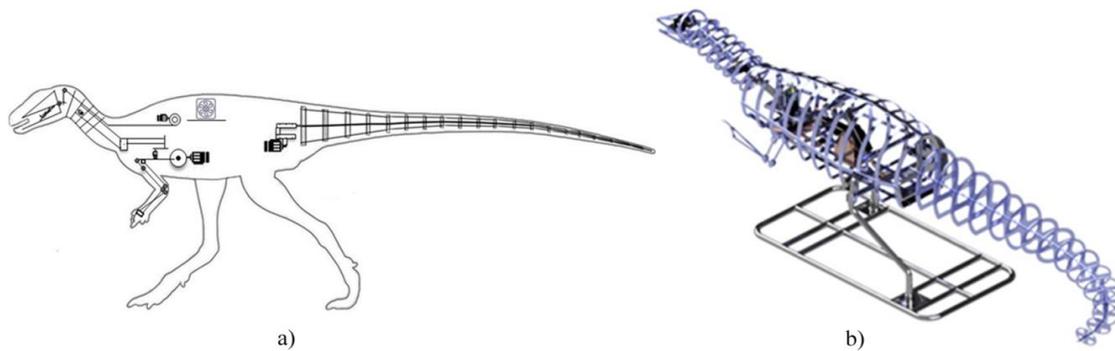


Figura 2. Animatrónico diseñado: (a) Boceto del concepto seleccionado, (b) Desarrollo final del animatrónico.  
 Fuente: elaboración propia.

De estas simulaciones se obtuvo el perfil de aceleraciones, torques o fuerzas requeridas para ejecutar el movimiento. Con esta información se seleccionaron los actuadores y se realizaron los análisis de esfuerzos sobre las piezas críticas para asegurar su resistencia. A continuación se muestran los mecanismos diseñados y los resultados de la simulación dinámica y análisis de esfuerzos en algunas piezas.

### 3.1. Mecanismo de apertura y cierre de la mandíbula

Está compuesto por dos estructuras que forman la cabeza y la quijada las cuales están unidas mediante un pasador (pivote). Esta última, es accionada por un cable que va desde el extremo posterior de la misma hasta un servomotor alojado en la cabeza. Adicionalmente, se incorporó un resorte de extensión que en conjunto con el motor y el cable, permitirán retornar al mecanismo a su posición inicial (boca cerrada). En la Figura 3a se muestra el modelado CAD del mecanismo y en la Figura

3b los componentes del mismo, así como la posición inicial y final.

Al realizar la simulación dinámica programando el perfil de velocidades adecuado para la aplicación (Figura 4a), se obtuvo el valor máximo de fuerza (33 N ejercida por el cable) que requiere la quijada para abrirse  $20^\circ$  como se indica en las Figura 4c y 4d. Con esta información se calculó el torque requerido por el servomotor ubicado en la parte superior de la cabeza el cual, mediante el cable, se encarga de transformar el giro del motor en movimiento lineal, para accionar el mecanismo. Se seleccionó en este caso, un servomotor Power HP mini servo HD-1160, el cual gira a una velocidad máxima de 93 rpm.

Por otro lado, teniendo en consideración las cargas a las cuales está sometido el mecanismo, se realizó un análisis de esfuerzos utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF) en la pieza crítica del mecanismo, obteniendo un valor máximo de esfuerzos de 72.8 Mpa (Figura 5a), un desplazamiento máximo de 0.03626 mm (Figura 5b) y un

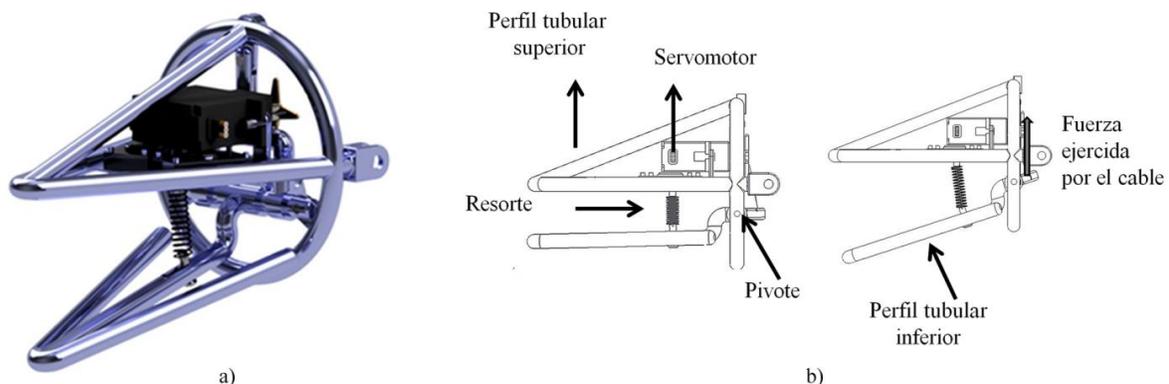


Figura 3. Mecanismo de apertura y cierre de la boca: (a) Modelado CAD del mecanismo, (b) Elementos del mecanismo. Fuente: elaboración propia.

Factor de seguridad de 3.78 cuando se simuló la pieza discretizada en 5535 elementos tetrahédricos y 9811 nodos.

Para realizar la simulación cinemática y dinámica del mecanismo, se programó un perfil de velocidades adecuado (Figura 7a). La simulación determinó que el

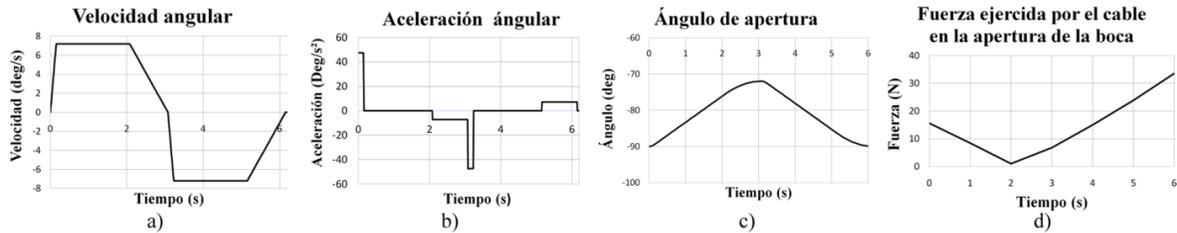


Figura 4. Análisis cinemático y dinámico para el mecanismo de apertura y cierre de la mandíbula. Fuente: elaboración propia.

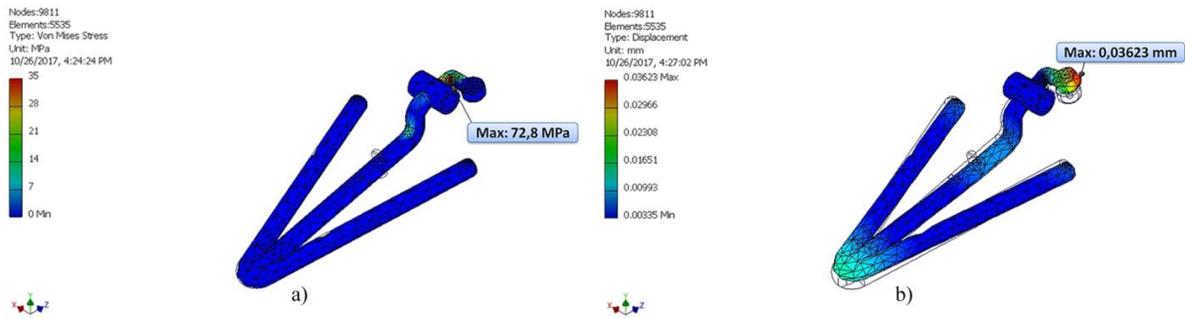


Figura 5. Análisis MEF en el mecanismo de apertura y cierre de la boca: (a) Esfuerzos de von Mises, (b) desplazamientos. Fuente: elaboración propia.

El máximo esfuerzo está ubicado en la base del brazo donde se acopla el cable que permitirá mover el mecanismo.

Cabe destacar que en todos los análisis llevados a cabo, se estudió la sensibilidad de los resultados respecto al mallado utilizado; en este caso, después de 8 iteraciones se logró una diferencia porcentual menor al 1% entre los esfuerzos máximos obtenidos en las dos últimas iteraciones realizadas, lo cual permite asegurar la validez de los resultados conseguidos a través de la simulación.

### 3.2. Mecanismo de flexión y extensión de la cabeza

Está compuesto por la estructura de la cabeza, mencionada anteriormente, y por una serie de aros con perfil cilíndrico que forman una parte del cuello; ambos se encuentran unidos en un punto pivote mediante dos pasadores (Figura 6). El mecanismo es accionado mediante un cable que, por medio de un actuador lineal, transmite la potencia para lograr el movimiento deseado. Cuenta además con un resorte de compresión con constante de rigidez  $K=0.411$  N/mm que ayuda a retornar el mecanismo a la posición inicial.

El mecanismo requiere una fuerza en el cable de 8 N para ser accionado (Figura 7d) y obtener una flexión en la cabeza de  $25^\circ$  (Figura 7c). Con esta información se seleccionó un actuador lineal Actuonix PQ 12 miniature linear motion series de 12 V con velocidad de 15 mm/s, una capacidad máxima de carga de 25 N y una carrera de 20 mm, el cual es capaz de accionar el mecanismo.

### 3.3. Mecanismo de giro de la cabeza

Para efectuar este movimiento fue necesario dividir el cuello en dos secciones: una sección fija formada por la parte inferior del cuello y una móvil (parte superior del cuello más la cabeza) que gira solidaria a un eje ubicado en la parte interior de la estructura fija la cual, se encuentra acoplado a un servomotor tal y como se muestra en la Figura 8b. Partiendo de la posición natural, el mecanismo permite generar un giro de  $\pm 20^\circ$  partiendo de la posición central. En la Figura 8a se muestra el modelado CAD del mecanismo.

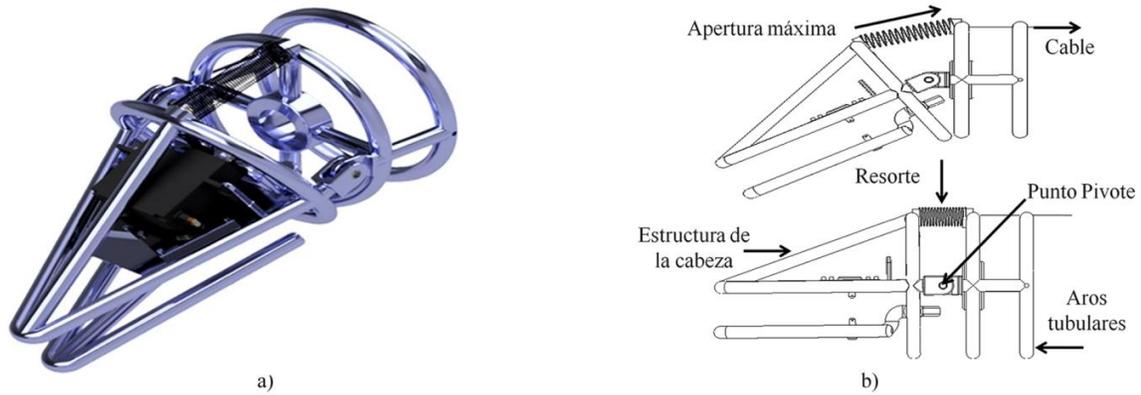


Figura 6. Mecanismo de flexión y extensión de la cabeza: (a) Modelado CAD del mecanismo, (b) Elementos que conforman el mecanismo. Fuente: elaboración propia.

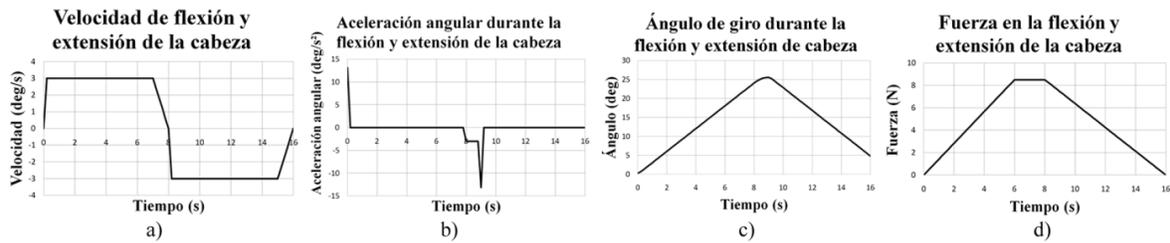


Figura 7. Análisis cinemático y dinámico para el mecanismo de flexión y extensión de la cabeza. Fuente: elaboración propia.

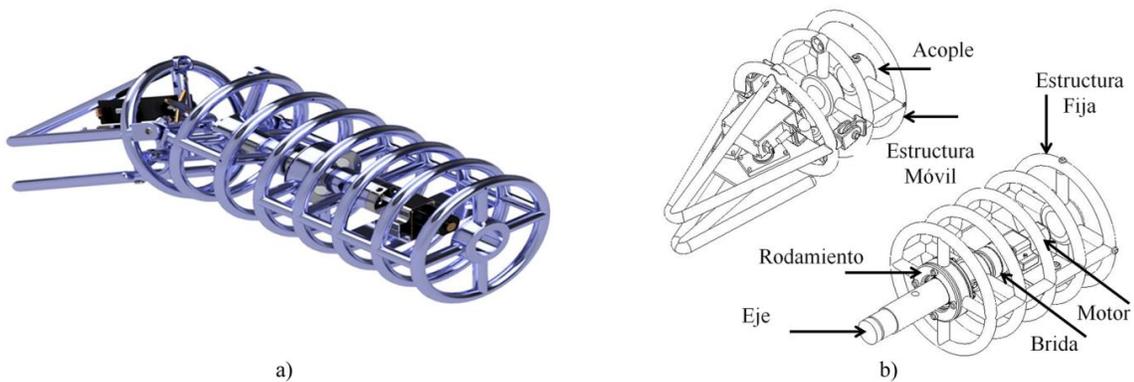


Figura 8. Mecanismo de giro de la cabeza: (a) Modelado CAD del mecanismo, (b) Elementos que conforman el mecanismo. Fuente: elaboración propia.

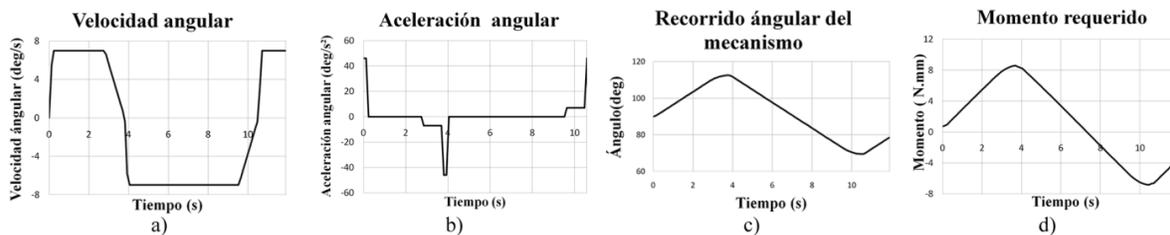


Figura 9. Análisis cinemático y dinámico del Mecanismo de giro de la cabeza. Fuente: elaboración propia.

Al realizar la simulación dinámica programando el perfil de velocidades (Figura 9a) se obtuvo que el mecanismo requiere un torque máximo de 8 N.mm (Figura 9d). Con esta información se seleccionó un servomotor “Micro metal Gearmotor HPCB” de 12 V que gira a una velocidad máxima de 32 rpm y entrega un torque máximo suficiente para accionar el mecanismo.

### 3.4. Mecanismo de extensión y flexión lateral del cuello

Este mecanismo permite realizar el movimiento del cuello desde su plano vertical de simetría hacia la izquierda y hacia la derecha (Figura 10a) proporcionando un giro de  $40^\circ$  entre posiciones límites (izquierda y derecha), además está compuesto por un servomotor el cual entrega una potencia que es transmitida a un eje vertical mediante un par de engranes rectos (Figura 10b). Sobre el eje vertical se encuentra alojado un eje inclinado, cuya función es proporcionar soporte a todo el conjunto de mecanismos de cuello y cabeza.

Al realizar la simulación dinámica programando un perfil de velocidades adecuado (ver Figura 11a) se obtuvo que el mecanismo requiere un torque máximo de 10 N.mm (ver Figura 11d). Con esta información se seleccionó un servomotor de Metal Gear Motor 488:1 de 6 V que gira

a una velocidad de 30 rpm (180 deg/s) y proporciona el torque requerido para accionar el mecanismo.

Adicionalmente, teniendo en consideración las cargas a las cuales está sometido el mecanismo, se realizó un análisis de esfuerzos MEF a la pieza crítica del mecanismo, que en este caso corresponde al eje inclinado. En este caso, se obtuvo un valor máximo de esfuerzos de 13.23 Mpa (Figura 12a) justo en un cambio de sección utilizada para alojar los retenedores. El desplazamiento máximo de la pieza sometida a las mismas cargas tuvo un valor de 0.01242 mm (Figura 12b) cuando la pieza se simuló con una malla formada por 6153 nodos y 3975 elementos tetrahédricos.

Estos resultados se obtuvieron después de un análisis de sensibilidad de malla donde, después de 6 iteraciones se logró una diferencia porcentual entre las dos últimas iteraciones de 1.13 %. Finalmente, la pieza posee un factor de seguridad de 15, lo cual garantiza que el mismo podrá soportar todas las cargas estimadas. Aunque este y otros elementos resultaron estar sobredimensionados, se consideró mantener sus dimensiones por practicidad y ahorro de costos al momento de construcción.

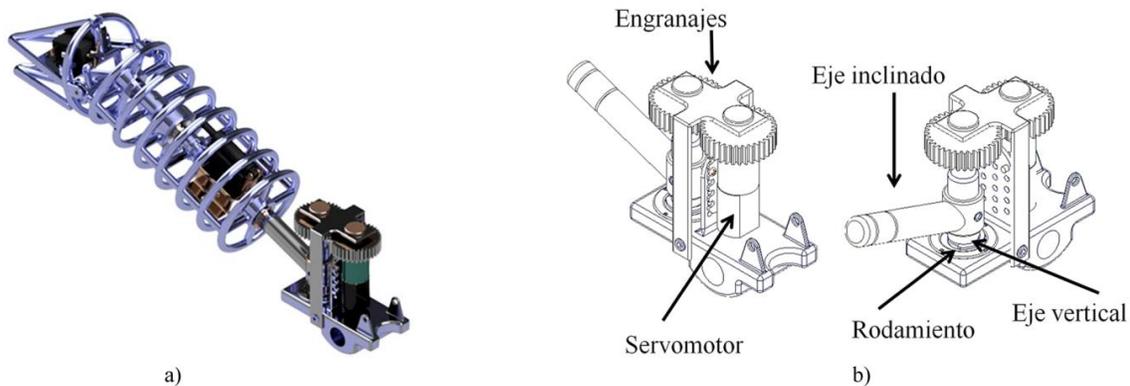


Figura 10. Mecanismo de extensión y flexión lateral del cuello: (a) Modelado CAD, (b) Componentes. Fuente: elaboración propia.

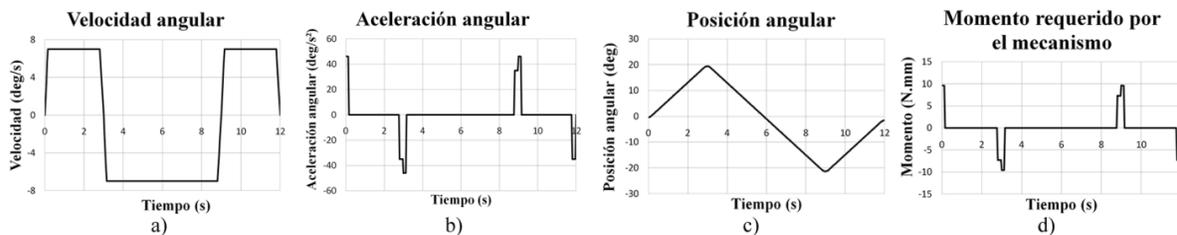


Figura 11. Análisis cinemático y dinámico para el mecanismo de extensión y flexión lateral del cuello. Fuente: elaboración propia.

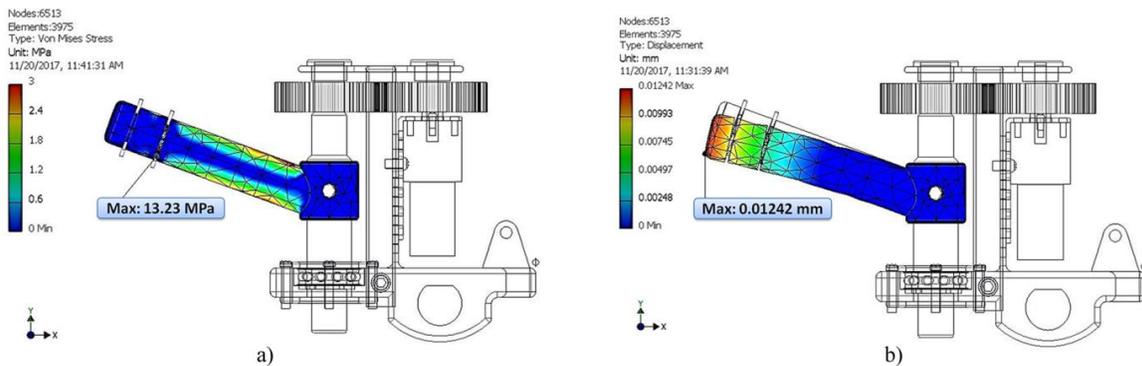


Figura 12. Análisis MEF en pieza del mecanismo de extensión y flexión lateral del cuello: (a) Esfuerzos de von Mises, b) Desplazamientos. Fuente: elaboración propia.

### 3.5. Mecanismo de flexión y extensión vertical del cuello

Este mecanismo permite realizar el movimiento vertical en el cuello del dinosaurio, es decir, simula su ascenso y descenso (Figura 13a). El mecanismo es capaz de recorrer 20° en ambos sentidos desde una posición de equilibrio, medidos sobre la articulación rotacional que permite el movimiento del cuello. Está compuesto por un una base que descansa sobre un eje que gira en torno a dos rodamientos; el mecanismo es impulsado por un actuador lineal tal y como se indica en la Figura 13b.

Para realizar la simulación dinámica, se programó un perfil de velocidades adecuado (Figura 14a) y se obtuvo que el mecanismo requiere de una fuerza máxima de 34 N para moverse (Figura 14d). Con esta información se seleccionó un actuador lineal L 16 miniature linear motion series de 12 V, el cual tiene una carrera de 100 mm, una capacidad de carga máxima de 46 N y funciona a una velocidad máxima de ejecución de 15 mm/s; estas características son suficientes para considerar apropiado a este actuador.

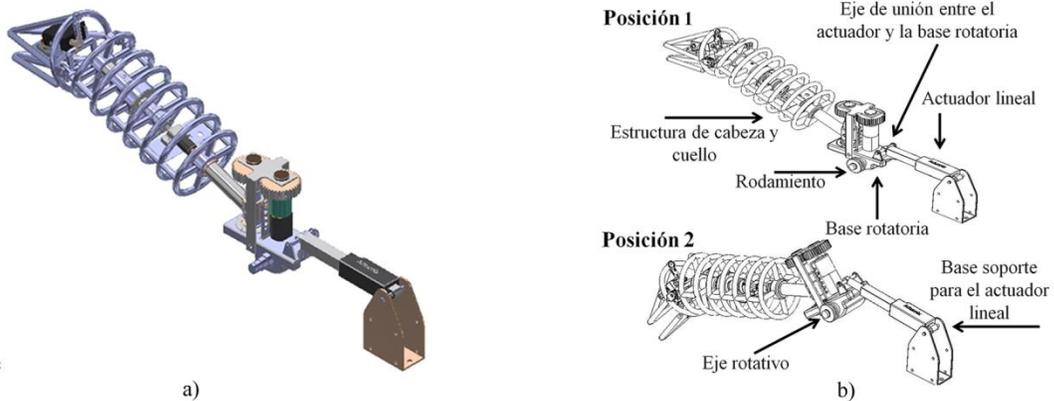


Figura 13. Mecanismo de flexión y extensión vertical del cuello: (a) Modelado CAD, (b) Componentes del mecanismo. Fuente: elaboración propia.

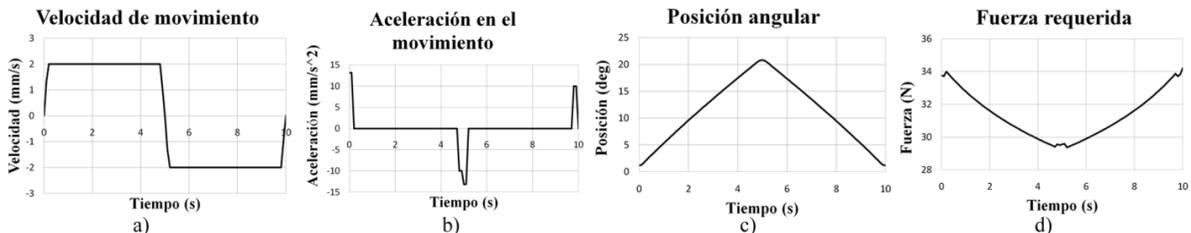
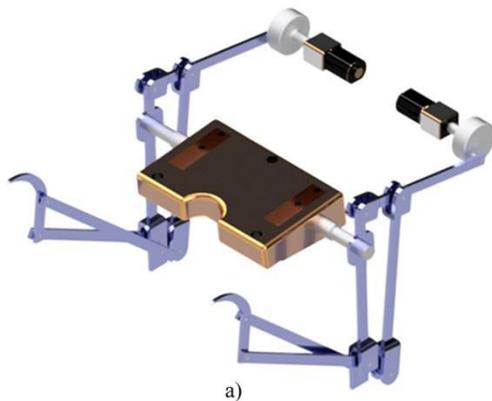


Figura 14. Análisis cinemático y dinámico para el mecanismo de flexión y extensión vertical del cuello. Fuente: elaboración propia.

### 3.6. Mecanismo de movimiento de los brazos

Este mecanismo se encarga de realizar el movimiento de cada brazo del dinosaurio (Figura 15a). Está compuesto por tres elementos principales, una base fija que brinda un punto de estabilidad al mecanismo, un conjunto de láminas articuladas que estructuran un mecanismo de barras que a su vez dan forma al brazo del dinosaurio y un servomotor unido a un disco con articulación excéntrica que se encarga de ejecutar la acción de movimiento como se indica en la Figura 15b. Este mecanismo realiza un recorrido de 10 cm entre las dos posiciones extremas del brazo (recogido y extendido), cuando se mide desde la punta de la garra.

Al realizar la simulación dinámica programando el perfil de velocidades que se muestra en la Figura 16a, se obtuvo que el mecanismo requiere de un torque máximo de 2.4 N.mm (Figura 16d). Con esta información se seleccionó un servomotor de 12 V “Micro metal gearmotor HPCB” el cual gira a una velocidad máxima de 32 rpm y entrega un torque apropiado para esta aplicación.



### 3.7. Mecanismo de ascenso y descenso del torso

Este se encarga de simular el movimiento la elevación y caída en el torso del dinosaurio. Está compuesto por un conjunto de bases tubulares que dan forma al torso (Figura 17a); este pivotea alrededor de un par de ejes y rodamientos alineados entre sí. Además, hay un actuador lineal, conectado a una base fija y a la estructura móvil del torso que impulsará la estructura del torso generando un giro de 20° con relación al eje de pivoteo (ver Figura 17b).

La simulación dinámica se realizó programando el perfil de velocidades que se observa en la Figura 18a. A partir de ello se obtuvo que el mecanismo requiere de una fuerza máxima de 32 N para moverse (Figura 18d). Obtenidos estos datos, se seleccionó el actuador lineal de 12V L16 miniature linear motion series, el cual tiene una carrera de 100 mm, una capacidad de carga máxima de 50 N y funciona a una velocidad máxima de 15 mm/s.

Por otro lado, teniendo en consideración las cargas a las cuales está sometido el mecanismo se realizó un análisis de esfuerzos MEF a la estructura inferior debido a que esta soporta todo el peso del animatrónico.

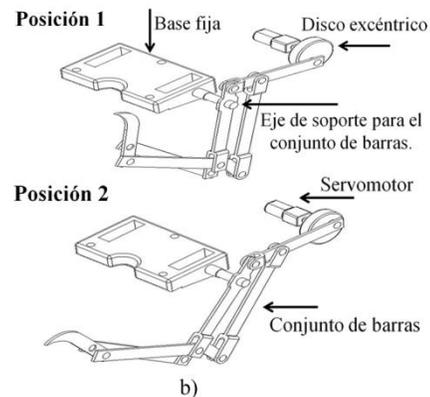


Figura 15. Mecanismo de movimiento de los brazos: (a) Modelado CAD, (b) Elementos del Mecanismo. Fuente: elaboración propia.

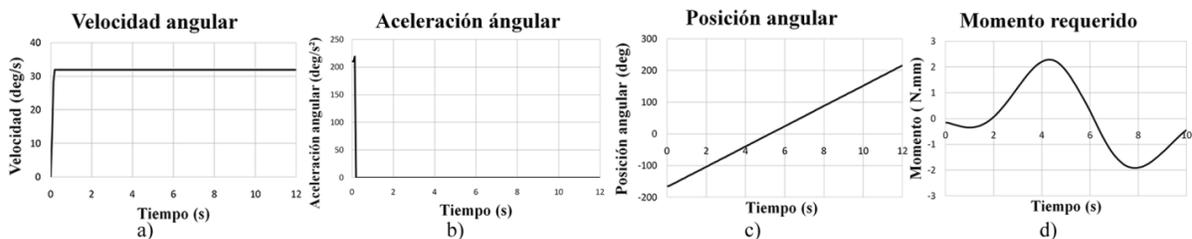


Figura 16. Análisis cinemático y dinámico del Mecanismo de movimiento de los brazos. Fuente: elaboración propia.

En este caso se obtuvo un valor máximo de esfuerzos de 66.38 Mpa (Figura 19a) justo en la base que aloja al actuador lineal, un desplazamiento máximo de 0.02898 mm (ver Figura 19b) y un factor de seguridad de 4.14 el cual garantiza la resistencia del componente. Estos resultados se obtuvieron cuando la pieza fue mallada utilizando 37369 elementos tetrahédricos y 67254 nodos. En este caso, el análisis de convergencia en los esfuerzos de Von Mises arrojó una diferencia porcentual entre las dos últimas simulaciones de 4.706% (considerando un total de 4 iteraciones).

### 3.8. Mecanismo de movimiento de la cola

Permite simular el movimiento de la cola del dinosaurio. Está compuesto por una serie de discos, unidos mediante un alma o eje principal de fibra de vidrio flexible cuya función es mantener todos los discos juntos pero a su vez, permitir una deformación suficiente, para generar el movimiento (Figura 20a).

El mecanismo utiliza la tensión de un par de cables, conectados a un elemento impulsor (Figura 20b) el cual, al girar en un sentido, genera dicha tensión y de esta forma logra deformar la varilla de fibra de vidrio para simular el movimiento de la cola.

Este mecanismo es accionado por un servomotor. Para seleccionarlo fue necesario estudiar el comportamiento de la varilla de fibra de vidrio comercial con diámetro de 6 mm la cual posee un módulo de elasticidad de 17236.9 Mpa. Este análisis arrojó que para deformar la varilla, con una deflexión establecida de 260 mm (medidos en un extremo de la varilla) fue necesario aplicar un par de 290 N.mm en la base impulsora de los cables. Con este torque, se seleccionó el motor metal Gear motor 488:1 20Dx46L mm de 6 V, que gira a una velocidad máxima de 30 rpm (180 deg/s) y entrega un torque apropiado para la aplicación.

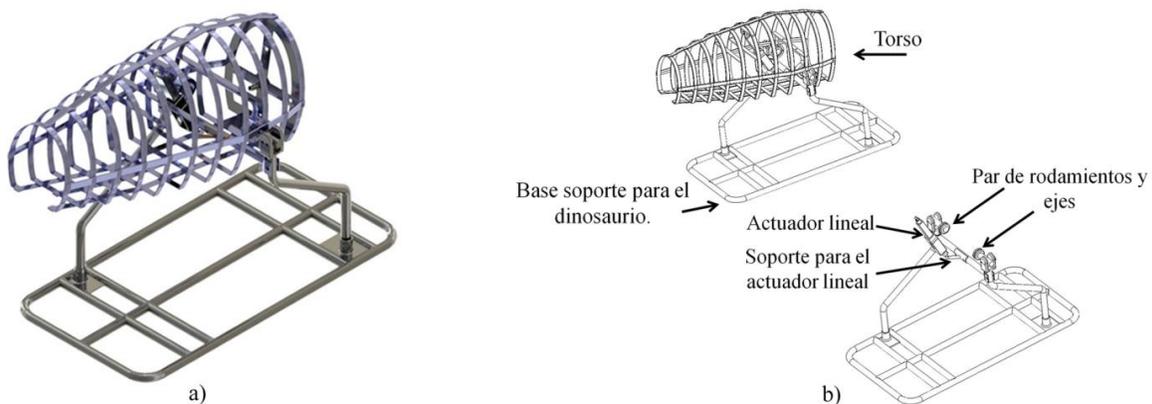


Figura 17. Mecanismo de ascenso y descenso del torso: (a) Elementos del Mecanismo de ascenso, (b) Descenso del torso. Fuente: elaboración propia.

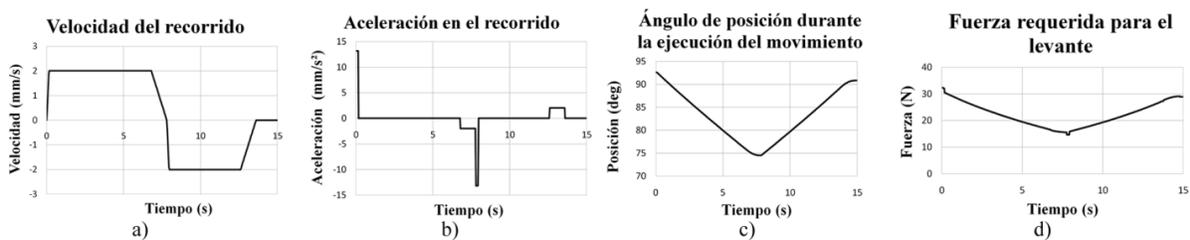


Figura 18. Análisis cinemático y dinámico del Mecanismo de ascenso y descenso del torso. Fuente: elaboración propia.

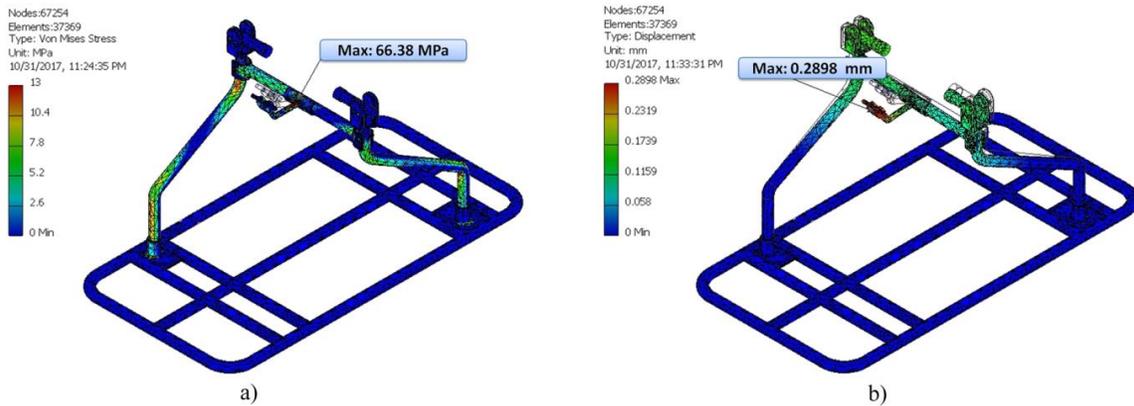


Figura 19. Análisis MEF en la base del animatrónico: (a) Esfuerzos de Von Mises; (b) Desplazamientos. Fuente: elaboración propia.

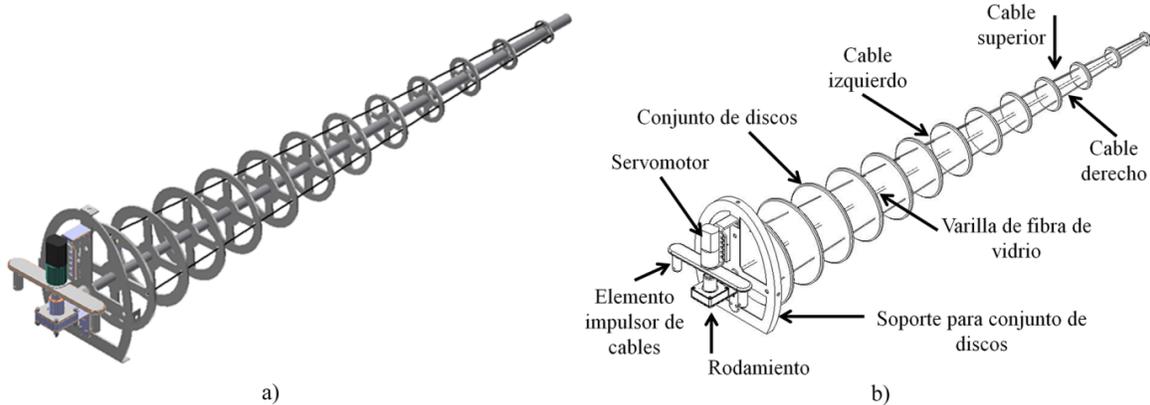


Figura 20. Mecanismo de giro de la cola: (a) Modelado CAD, (b) Elementos del Mecanismo del movimiento de la cola. Fuente: elaboración propia.

#### 4. Conclusiones

Con el propósito de cumplir con los requerimientos del cliente, se logró diseñar el animatrónico con dimensiones análogas al dinosaurio real, con un peso de 3,8 Kg y un volumen  $0.1144 \text{ m}^3$  lo cual satisfizo las especificaciones de diseño (Tabla 1) puesto que permite que el equipo sea portable y liviano. El diseño integra un par de altavoces, encargados de emitir los sonidos característicos del dinosaurio, además se logró incluir la totalidad de los movimientos requeridos.

Adicionalmente, se seleccionaron perfiles y láminas de aluminio para la construcción del robot, lo que ayudó a disminuir el peso y el costo de fabricación que no supera los 1000 USD; a su vez, se garantizó que todas las piezas diseñadas poseen un factor de seguridad superior a 1.2, dándole así la resistencia necesaria para soportar todas las cargas.

Por otro lado, todos los mecanismos fueron diseñados modularmente para facilitar los procesos de ensamblaje, mantenimiento o sustitución de elementos averiados. Para ello, se dispusieron de 2 puntos de acceso al espacio interno del animatrónico: una posterior en el área de la cola y una frontal que brinda acceso a los mecanismos del cuello.

Por tanto, se diseñó un animatrónico plenamente funcional conformado por un conjunto de mecanismos que le otorgan los 9 grados de libertad requeridos inicialmente. Al respecto, se aseguró el cumplimiento cabal de los requerimientos solicitados. Los trabajos futuros para culminar el diseño del animatrónico incluyen: desarrollo de la estructura electrónica y de control; además de la construcción e implementación de un recubrimiento flexible, texturizado y realístico.

## Agradecimiento

Este trabajo fue financiado por el Decanato de Investigación de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, a través del proyecto 01-008-2017.

## Referencias

[1] Y. D. Kapse, P. R. Sarangpure, and J. Mohurle, "Animatronic," *Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng.*, vol. 5, no. 4, pp. 266–269, 2016, doi: 10.17148/IJARCCCE.2016.5468.

[2] Y. Zerón Gutiérrez, "Animatronic controlado con lógica difusa," *Rev. del Cent. Investig. Univ. La Salle*, vol. 6, no. 24, pp. 39–53, Jul. 2005.

[3] S. "Mouse" Silverstein and K. Yamane, "Humanoid Robots for Entertainment," in *Humanoid Robotics: A Reference*, A. Goswami and P. Vadakkepat, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2018, pp. 1–17.

[4] M. Smith and D. Buckley, "A Lifelike Robotic Policeman with Realistic Motion and Speech," in *Proceedings of the Symposium on Robotics, Mechatronics and Animatronics in the Creative and Entertainment Industries and Arts*, 2005, pp. 22–26.

[5] G. Balmori Serrano, "Revista de occidente," *Rev. Occident.*, vol. 436, pp. 85–96, 2017.

[6] M. Sakashita, T. Minagawa, A. Koike, I. Suzuki, K. Kawahara, and Y. Ochiai, "You as a Puppet: Evaluation of Telepresence User Interface for Puppetry," in *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2017, pp. 217–228.

[7] L. Brooks, "Journeys in Liquid Space: Representations of the Sea in Disney Theme Parks," in *Beasts of the Deep : Sea Creatures and Popular Culture*, John Libbey Publishing, 2018, p. 232.

[8] A. I. Encinar Sáez, "La inteligencia artificial en el cine," *CYL Digit.*, vol. 14, pp. 28–31, 2015.

[9] J. S. Díaz Salguero, A. F. Campos Agudelo, and P. J. Corredor Gómez, "Mechanical design of an animatronic face to telerehabilitation," in *Congreso Internacional de Ciencias Básicas e Ingeniería - CICI 2016*, 2016.

[10] J. D. Botero, C. A. Peña, and S. C. Mantilla, "Implementación de robots animatrónicos para terapias

motivadoras de rehabilitación física en niños," *Rev. Espac.*, vol. 38, no. 57, Dec. 2017.

[11] M. J. Iaconis, J. M. Ford, L. J. Askeland, P. Hall, and R. Maddocks, "Electromechanical toy," US7364489B1, 03-Nov-2003.

[12] P. Cárdenas and R. Parreño, "Diseño e implementación del sistema de control y audio de la maqueta animada del Allosaurio para el Museo de Historia Natural Gustavo Orcés V," Escuela Politécnica Nacional, 2017.

[13] E. Jochum, P. Millar, and D. Nuñez, "Sequence and chance: Design and control methods for entertainment robots," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 87, pp. 372–380, 2017, doi: 10.1016/j.robot.2016.08.019.

[14] P. M. Barrett, R. J. Butler, R. Mundil, T. M. Scheyer, R. B. Irmis, and M. R. Sánchez-Villagra, "A palaeoequatorial ornithischian and new constraints on early dinosaur diversification," in *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, vol. 281, no. 1791, p. 20141147.

[15] K. T. Ulrich, S. D. Epinge, and R. V. Madrigal Alvarez, *Diseño y desarrollo de productos : enfoque multidisciplinario*. McGraw-Hill, 2004.

[16] W. Younis, *Inventor y su simulación con ejercicios prácticos : una guía paso a paso con soluciones para el diseño en ingeniería*. Marcombo, 2012.